

Olivier AGUERRE

Les clés de la vitesse en Catamaran de Sport

Avant-propos

La régates est un jeu subtil où le corps et l'esprit doivent parvenir à s'entendre avec des éléments versatiles. Il s'agit de dérober un peu de force au vent, et de maîtriser au mieux celle de la mer.

En apparence, les régatiers de talent savent apprivoiser le vent avec une voile bien réglée, amadouer la mer avec un fin toucher de barre, déterminer une stratégie gagnante. Pour le débutant, tout ceci s'apparente à du grand art. Il interroge les meilleurs en tentant de percer les secrets de leur réussite, et très souvent il ne trouve que des réponses partielles. Comment, en effet, réduire une équation aussi complexe à quelques paramètres simples ? Comment transmettre l'essence d'une longue expérience en quelques mots ?

Notre débutant se dit alors à juste titre qu'en multipliant les sorties sur l'eau, il saura un jour prendre les bonnes décisions au bon moment. Il pense qu'il finira par trouver des réponses satisfaisantes aux questions qu'il se pose le plus souvent :

Pourquoi vais-je moins vite ? Comment cet adversaire, pourtant loin derrière, m'a-t-il doublé en prenant une autre option sur ce bord de près ? Pourquoi le vent a-t-il basculé à droite ? Beaucoup de régatiers progressent ainsi par empirisme. Ceci implique une analyse objective des points forts et des points faibles, et une remise en question permanente, parfois douloureuse, de pratiques qui semblaient pourtant acquises.

Il est cependant possible d'accélérer cette phase de perfectionnement, d'enrichir cette démarche d'essais-erreurs par un ensemble de connaissances théoriques et techniques.

En effet, la compréhension des phénomènes liés à l'écoulement de l'air sur la voilure permet de mieux prévoir des formes de voiles plus performantes dans des conditions de vent et de mer données.

Si nous connaissons les réactions du tissu d'une voile, la façon dont elle peut se déformer sous l'effet du vent ou des tensions imposées par les réglages, nous saurons mieux obtenir les formes que nous voulons.

Si nous maîtrisons l'effet de chaque réglage et la façon dont ils interagissent entre eux, nous trouverons plus vite, sur l'eau, une vitesse performante.

Le vent, si changeant, n'est pourtant pas complètement imprévisible. Avec une bonne anticipation de ses bascules et variations de force, nous pourrions optimiser notre trajectoire. Enfin, il existe quelques outils qui permettent de mieux tirer son épingle du jeu dans les situations brûlantes d'une régates : départs, passages de bouées, situations de contrôle défensif ou d'attaque offensive.

J'ai structuré ce livre autour de ces grands thèmes, en tentant de concevoir des chapitres qui peuvent être lus de façon relativement indépendante, selon l'intérêt plus ou moins grand que le lecteur leur porte. Ceci m'a forcément contraint à quelques redites.

Ce livre est essentiellement consacré à la compétition en catamaran de sport, mais la plupart des principes exposés sont applicables à tous les voiliers. Les pratiquants de dériveur et de croiseur pourront donc également y trouver beaucoup de concepts intéressants.

Je ne prétends pas apporter des réponses à toutes les questions, ni permettre aux débutants de gagner leur prochaine régates. Il faut naviguer encore et toujours, pour confronter sensations et raisonnements, et valider par l'expérience les quelques idées que je vous propose.

Sommaire

Chapitre I L'aérodynamique et l'hydrodynamique du voilier

I – 1) Les fluides et leurs écoulements

I – 2) Déflexion de l'air par une voile et ses conséquences

I – 3) La couche limite

I – 4) Typologie des écoulements sur une voile

I – 4 – 1) A l'extrados

I – 4 – 2) A l'intrados

I – 5) Caractéristiques remarquables de l'écoulement sur une voile

I – 6) Intérêt des penons

I – 7) Portance et traînée

I – 8) Equilibre des forces appliquées au bateau

I – 9) Etude d'un profil isolé

I – 9 – 1) Paramètres de forme d'une voile

I – 9 – 2) Polaire vélique portance – traînée (C_x/C_z)

I – 9 – 3) Influence de la quantité de creux

I – 9 – 4) Influence de la répartition horizontale du creux

I – 9 – 5) Les profils épais asymétriques

I – 9 – 6) Etude 3D d'un profil isolé (incluant la dimension verticale)

I – 9 – 6 – 1) La marginalité

I – 9 – 6 – 2) Effet triangulaire et répartition verticale du creux

I – 9 – 6 – 3) Gradient de vent et vrillage

I – 10) Interaction grand-voile / voile d’avant

I – 10 – 1) Etude 2D

I – 10 – 2) Etude 3D

I – 10 – 3) Influence de la gîte sur la portance utile des voiles et de la dérive

I – 10 – 4) Intérêt du calcul mathématique

I – 11) Les principales conclusions de l’étude aérodynamique des profils

Chapitre II Quelques concepts d’architecture

II – 1) Nécessité de puissance

II – 2) Quelques particularités des multicoques

II – 3) Architecture assistée par ordinateur

Chapitre III Elasticité, tensions, matériaux, conception des voiles

III – 1) Propagation des efforts, tensions parallèles et perpendiculaires

III – 2) Interdépendance des tensions et du creux

III – 3) Influence de l’élasticité du tissu

III – 3 – 1) Déformations du tissu

III – 3 – 2) Action du Cunningham

III – 3 – 2 – 1) Sur un mât raide

III – 3 – 2 – 2) Sur un mât souple

III – 3 – 3) Le bon choix du tissu et de son orientation

III – 4) Caractéristiques des fibres et des tissus

III – 5) Coupe assistée par ordinateur

III – 6) Exemples de coupes classiques

III – 7) Quelques conclusions utiles pour le régleur

Chapitre IV Equilibre de route

IV – 1) Rappel : portance et traînée des appendices

IV - 2) Rappel : les forces en action

IV –3) Centres de carène, de poussée et moment composante de dérive – force antidérive

IV – 4) Moment composante propulsive de la force vélique – résistance de carène

IV – 4 – 1) Influence de la gîte au près

IV – 4 – 2) Couple de lof ou d’abattée au portant

IV – 4 – 3) Couple d’enfournement au portant

IV – 5) Compensation et parallélisme du ou des safrans

IV – 6) Spécificités des multicoques

Chapitre V Le gréement et la grand-voile

V – 1) Rappels du chapitre I

V - 2) Rappels du chapitre III : tensions et élasticité

V – 3) Les différents types de gréement

V – 4) Perturbations apportées par le gréement

V – 5) Efforts subis par le gréement

V – 6) Conception et rôle du haubanage

V – 7) Effets de la flexion (provoquée ou non) du mât sur la forme de la grand-voile

V – 7 – 1) Effet du cintre longitudinal du mât

V – 7 – 2) Effet du cintre latéral du mât

V – 7 – 2 – 1) Mât non haubané

V – 7 – 2 – 2) Mât haubané, panneau supérieur long

V – 7 – 2 – 3) Mât haubané, panneau supérieur court

V – 8) Cas particulier des catamarans à mâts losangés pivotants : rotation et flexion du mât et leurs effets

V – 9) Contrôle du cintre longitudinal : les moyens d'action

V – 9 – 1) Objectifs du réglage du cintre longitudinal :

V – 9 – 2) Cintrage longitudinal par décalage pied de mât – étambrai – capelage

V – 9 – 3) Cintrage longitudinal par poussée sur la bôme (écoute et halebas)

V – 9 – 4) Cintrage longitudinal par bas-haubans, bas-étai, basses-bastaques

V – 9 – 5) Cintrage longitudinal par béquille ou tirant

V – 9 – 6) Cintrage longitudinal (et latéral) par poussée des barres de flèche

V – 9 – 7) Cintrage longitudinal par le pataras

V – 9 – 8) Cintrage longitudinal par tension de chute

V – 9 – 9) Cintrage longitudinal par le Cunningham

V – 9 – 10) Cintrage longitudinal par poussée du tangon

V – 9 – 11) Méthode de mesure du précintrage longitudinal

V - 10) La bordure

V - 11) Les lattes

V - 12) Influence de la quête arrière

V - 13) L'incidence

V – 14) Avantages et inconvénients des gréements souples

V – 14 – 1) Pour l'action du Cunningham

V – 14 – 2) Pour l'action de la tension d'écoute

V – 14 – 3) Pour l'action du halebas

V – 14 - 4) Inconvénient pour la flexion d'étai

V – 14 – 5) En ce qui concerne la puissance

V – 15) Installation des gréements fractionnés à barres de flèches et bas-haubans

V – 16) Installation des mâts à plusieurs panneaux très précontraints

V - 17) Résumé des points essentiels utiles pour le régleur

V - 18) Principes généraux de réglage pour une grand-voile établie sur un mât souple

Chapitre VI Réglage des voiles d'avant

VI – 1) Utilisation des penons dans la grand-voile et les voiles d'avant

VI – 2) Réglages du foc

VI – 2 – 1) Influence de la flexion d'étai

VI – 2 – 2) Influence de la tension de guindant

VI – 2 – 3) Réglage des points de tire et tension de chute

VI – 3) Réglages du spi

VI – 3 - 1) Interférences spi / grand-voile

VI – 3 - 2) Conception et utilisation du spi

VI – 3 – 3) Effet du spi sur l'équilibre de route

VI – 3 - 4) Les moyens d'action

VI – 3 – 4 - 1) Tension des lisières

VI – 3 – 4 - 2) Position du tangon en pivotement

VI – 3 – 4 - 3) Position du point de tire (barber)

VI – 4) Résumé des points essentiels pour le régleur

VI – 5) Adaptation des réglages des voiles d'avant aux conditions

Chapitre VII

Réglages au près et au portant : principes généraux et quelques exemples

VII – 1) Principes généraux

VII – 1 – 1) Au près

VII – 1- 1- 1) Vent faible / eau plate, priorité cap

VII – 1- 1- 2) Vent faible / eau plate, priorité vitesse

VII – 1- 1- 3) Médium / eau plate

VII – 1- 1- 4) Brise / eau plate

VII – 1- 1- 5) Vent faible et clapot

VII – 1- 1- 6) Médium et clapot

VII – 1 – 2) Au portant

VII – 1 – 2 – 1) Au travers (et au grand-largue sur une coque en catamaran de sport)

VII – 1 – 2 – 2) Au grand-largue

VII – 2) De bons réflexes

VII – 3) Réglages spécifiques des catamarans de sport

VII – 3 – 1) Rappels : effets des principaux réglages

VII – 3 – 2) Le Tornado

VII – 3 – 3) Le Hobie Cat 16

VII – 3 – 4) Le Dart 18

VII – 3 – 5) Le Classe A

Chapitre VIII

Conduite du voilier : optimisation de la vitesse

VIII – 1) Optimisation des caps-vitesse au près et au vent arrière par vent stable

VIII - 2) Vents variables en force (et non en direction)

VIII – 2 - 1) Au près

VIII – 2 – 2) Au travers

VIII – 2 – 3) Au vent arrière

VIII – 3) Variations en direction (et non en force)

VIII – 3 – 1) Au près

VIII – 3 – 2) Au travers

VIII – 3 – 3) Au vent arrière

VIII - 4) Variations en force et direction

VIII – 4 – 1) Au près

VIII – 4 – 2) Au travers

VIII – 4 – 3) Au vent arrière

VIII - 5) Comportement dans le clapot et la houle

VIII – 6) Les manœuvres

VIII – 6 – 1) Virements

VIII – 6 – 2) Empannages

Chapitre IX Comportement du vent et prévision

IX – 1) Bilan radiatif de la Terre, circulation méridienne, vents dominants

IX – 2) Forces appliquées aux particules d'air

IX – 3) Perturbations, anticyclones et dépressions

IX – 4) Mouvements verticaux

IX – 5) Développement d'une perturbation

IX – 6) Effets locaux

- IX – 6 – 1) Couche limite terrestre
- IX – 6 – 2) Structure du vent
- IX – 6 – 3) La brise thermique
- IX – 6 – 4) Effet des nuages
- IX – 6 – 5) Effets de site

Chapitre X

Stratégie et tactique

X – 1) Préambule

X – 2) Etude locale du plan d'eau et des conditions

X – 3) Le départ

- X – 3 – 1) Détermination du côté avantageé de la ligne
- X – 3 – 2) Prise d'amers
- X – 3 – 3) La nécessaire maîtrise du bateau
- X – 3 – 4) L'attitude face aux risques

X – 4) Stratégie après le départ

- X – 4 – 1) Bascules persistantes par rotation du vent
- X – 4 – 2) Bascules persistantes par effet de site
- X – 4 – 3) Bascules oscillantes
 - X – 4 – 3 – 1) Technique « Wally » dans une adonnante*
 - X – 4 – 3 – 2) Technique « Wally » dans une refusante*
- X – 4 – 4) Stratégie court terme
 - X – 4 – 4 – 1) Cas des bascules persistantes*
 - X – 4 – 4 – 2) Cas des bascules oscillantes*
- X – 4 – 5) Traitement des bascules persistantes au vent de travers

X – 4 – 6) Stratégie dans les cas contradictoires

X – 5) Effet du courant

X – 6) Gestion du cadre

X – 7) Contrôle et tactique rapprochée

X – 7 – 1) Contrôle

X – 7 – 2) Tactique rapprochée

X – 7 – 3) Passage de bouées, ligne d'arrivée

Une démarche de progrès

Bibliographie

Chapitre I : L'aérodynamique et l'hydrodynamique du voilier

I – 1) : Les fluides et leurs écoulements

Les fluides, gaz et liquides, sont constitués de molécules. Les molécules d'un fluide sont toujours en mouvement, même dans un fluide au repos, par simple agitation thermique. Dans un fluide en écoulement (le vent qui propulse une voile ou l'eau qui défile le long d'une coque), le mouvement de chaque molécule n'est pas indépendant du mouvement de ses voisines, du fait de l'existence de forces d'interaction.

Dans l'eau, où les molécules sont très proches les unes des autres (quelques Angströms), ces forces créent une interaction attractive entre les atomes d'hydrogène d'une molécule et l'atome d'oxygène de ses voisines : c'est la force de Van Der Waals. Dans l'air, où les molécules sont beaucoup plus éloignées, cette force attractive à courte distance se fait beaucoup moins sentir : l'interaction dominante est une force de répulsion liée aux chocs entre molécules, provoqués par l'agitation thermique (mouvement Brownien) et le mouvement d'ensemble du fluide.

L'action de ces forces attractives ou répulsives produit un comportement collectif : la mise en mouvement d'une molécule entraîne la mise en mouvement de ses voisines, qui à leur tour entraînent leurs propres voisines... Cette mise en mouvement collectif, cette perturbation, s'atténue avec la distance : le coup de rame du canotier génère des tourbillons qui meurent à quelque distance de l'aviron ; une balle de ping-pong frappée avec un effet entraîne avec elle une couche d'air mise en mouvement rotatif (figure ci-dessous).

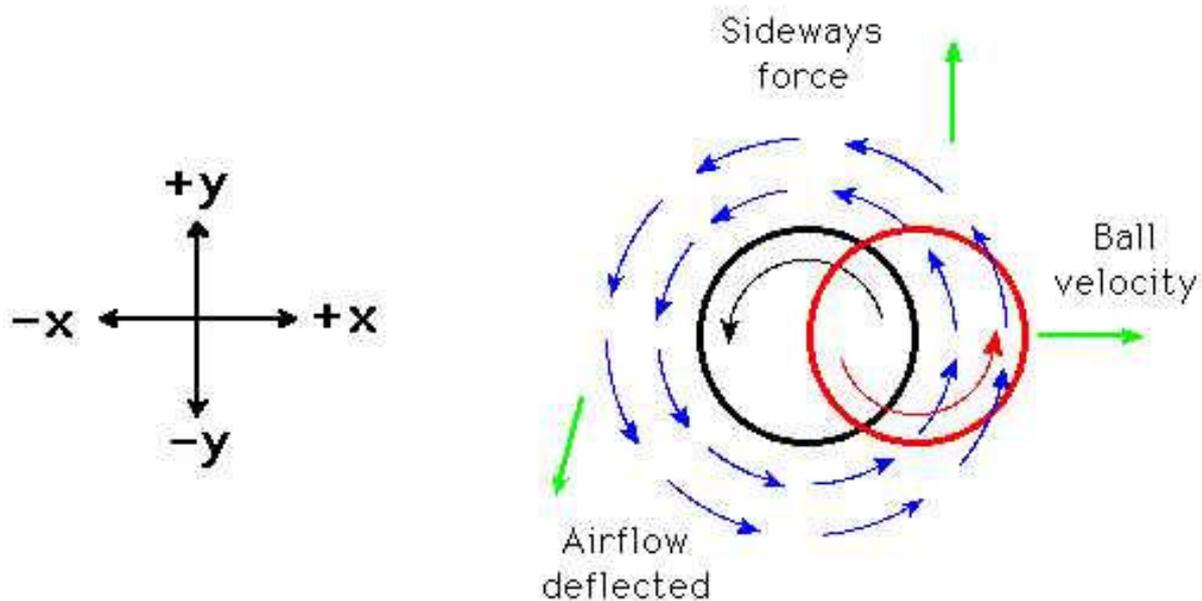


Fig20/ZZ6 : Couche d'air entraînée par viscosité autour d'une balle en rotation.

L'atténuation de cette perturbation avec la distance n'est pas la même dans tous les fluides. Ainsi, si on remue, même très doucement, une cuillère dans un pot de miel, on peut faire plusieurs remarques :

- le mouvement de la cuillère entraîne avec lui presque tout le contenu du pot alors que le même mouvement dans une tasse de café provoquera une perturbation beaucoup moins étendue ;

- l'effort nécessaire est relativement important, alors qu'il est comparativement beaucoup plus faible dans la tasse de café ;
- on génère des tourbillons (écoulement tourbillonnaire) dans le pot de miel alors qu'on les évite plus facilement dans la tasse de café.

Le paramètre physique qui quantifie ce comportement est la *viscosité*.

La viscosité d'un fluide est, qualitativement, sa capacité à propager une perturbation liée à une mise en mouvement locale, ou, ce qui revient au même, sa capacité à résister à cette mise en mouvement.

Ce comportement collectif des fluides a une conséquence immédiate sur leur écoulement : en l'absence de tout obstacle, les molécules s'écoulent selon des filets, ou lignes de courant, qui sont parallèles à faible vitesse (écoulement laminaire). La présence d'un obstacle (tel qu'une voile) dévie ces lignes de courant, nous verrons qu'elles ne sont alors plus parallèles.

La viscosité n'est pas le seul paramètre intrinsèque du fluide à commander sa résistance au déplacement : l'autre paramètre essentiel est la *densité*, qui exprime la compacité de l'empilement des molécules dans le fluide, ou, dit plus simplement, leur distance moyenne.

Plus les molécules sont proches, plus grand sera leur nombre mis en mouvement par une perturbation donnée, plus grande sera l'énergie nécessaire à cette mise en mouvement.

Si on met sa main en travers du vent par la portière d'une voiture, on sentira une force bien plus faible que si on laisse traîner sa main dans l'eau, depuis un hors-bord qui se déplace à la même vitesse !

Mais on constatera aussi que, même à vitesse faible, la main qui traîne dans l'eau génère des tourbillons, alors que l'air qui s'écoule autour de la main qui traîne à la portière reste plus facilement en écoulement laminaire...

L'empilement des molécules d'un liquide est très dense, on ne peut guère les rapprocher davantage : les liquides sont pratiquement incompressibles. Celui d'un gaz est beaucoup plus lâche (la densité de l'air est 800 fois plus faible que celle de l'eau) : les gaz sont compressibles, et inversement ils ont une capacité de détente qui leur permet d'occuper tout le volume disponible.

Nous avons déjà suggéré que la *vitesse de l'écoulement* du fluide a également une importance. Il est possible de déplacer un pinceau dans un pot de peinture sans générer de tourbillons – à condition de le déplacer très lentement. Un mouvement plus rapide génère des vortex. L'écoulement est dit laminaire dans le premier cas, tourbillonnaire dans le deuxième.

Enfin, pour une densité, viscosité et vitesse d'écoulement données, la *longueur parcourue* par l'écoulement a aussi une influence sur la qualité de l'écoulement : la fumée d'une cigarette monte d'abord en écoulement laminaire, puis des volutes, des tourbillons se forment, l'écoulement devient turbulent puis tourbillonnaire

Nous voyons donc que viscosité η , densité ρ , longueur parcourue L et vitesse V déterminent la qualité de l'écoulement. On peut rassembler l'influence de ces 4 paramètres dans un seul : le nombre de Reynolds R défini par :

$$R = \rho \times V \times L / \eta$$

C'est un nombre sans dimension qui permet de prédire le comportement de différents écoulements dans différents fluides. Ainsi, quelles que soient les valeurs prises individuellement par les quatre paramètres ci-dessus, la qualité de l'écoulement sera la même si le nombre de Reynolds est le même. Ce nombre permet de prévoir les points de transition

entre écoulement laminaire et écoulement turbulent. La figure ci-dessous donne un exemple de types d'écoulement rencontrés derrière un cylindre en mouvement, en fonction de la vitesse d'écoulement :

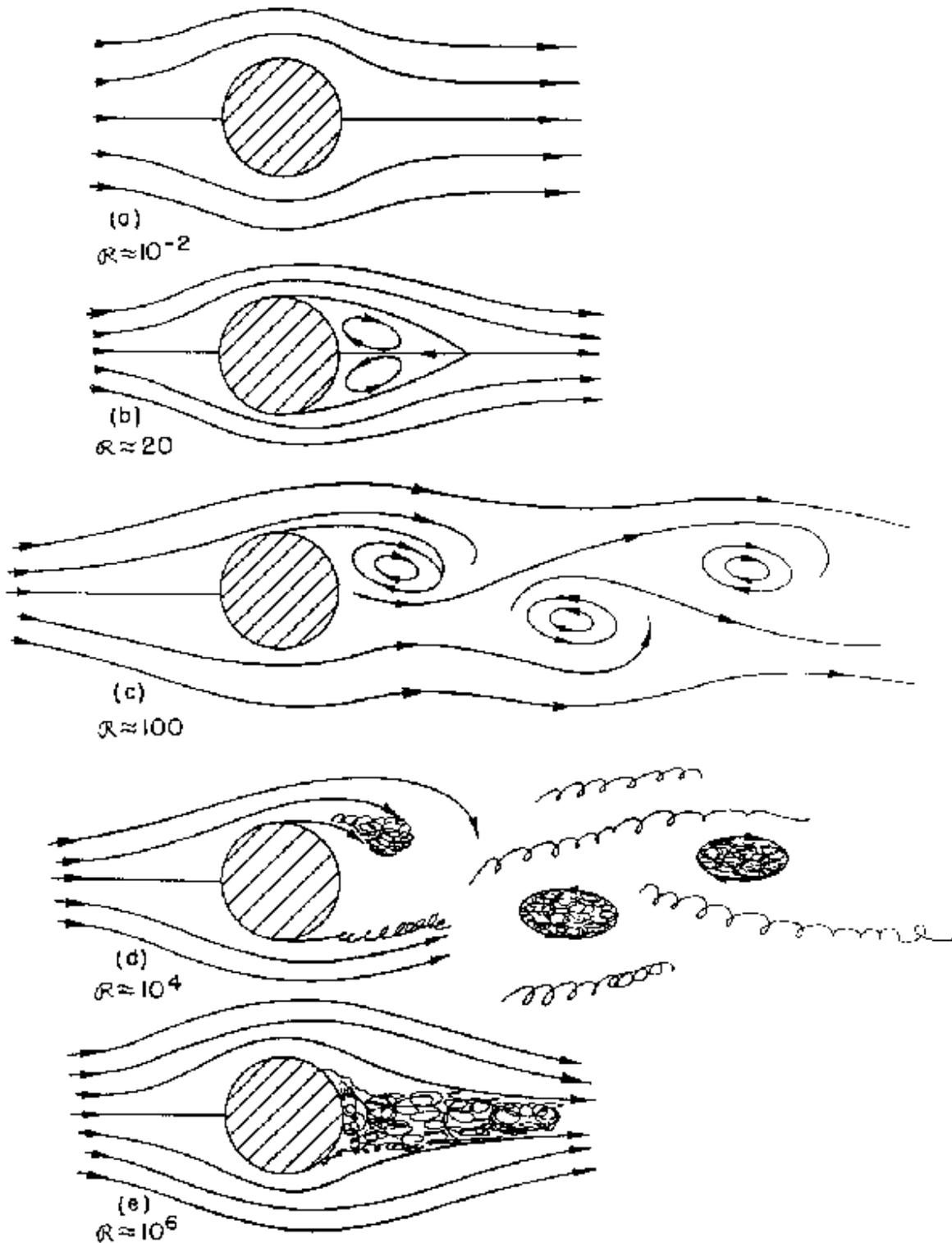


Fig. 41-6. Flow past a cylinder for various Reynolds numbers.

Fig22/ZZ6 : Dépendance du type d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds.

Pour un fluide donné (l'air) et une voile de dimensions données, la vitesse du flux reste le seul paramètre qui intervient parmi les 4 cités ci-dessus. Nous verrons que la forme de la voile constitue un cinquième paramètre bien connu du régatier.

I – 2) Déflexion de l'air par une voile et ses conséquences

Une voile mise en forme, établie dans le vent, constitue un obstacle à l'écoulement général. Sa surface courbée défléchit les lignes de courant du flux d'air. Considérons ce qui se passe à l'extrados : au contact immédiat de la voile, les lignes de courant du flux se trouvent en déflexion forcée, elles doivent suivre la courbure de la voile. Mais à une certaine distance de cet extrados, du fait de l'inertie de l'air, les lignes de courant ne sont plus déviées et on retrouve un écoulement non perturbé avec des lignes de courant parallèles. Il existe donc, à une certaine distance de l'extrados, ce qu'on appelle une « plaque d'inertie » à partir de laquelle le flux reprend son comportement d'origine.

Entre l'extrados et cette plaque d'inertie, la déflexion des lignes de courant s'atténue progressivement.

L'extrados convexe de la voile et cette plaque d'inertie constituent un étranglement, où les lignes de courant sont plus resserrées.

Côté intrados existe également une plaque d'inertie, mais cette fois l'intrados concave et cette plaque d'inertie constituent un évasement où les lignes de courant sont plus espacées.

L'étranglement à l'extrados et l'évasement à l'intrados sont d'autant plus marqués que l'incidence (l'angle entre la corde de la voile et le vent apparent) est plus grande.

Ils induisent une modification de vitesse du flux d'air des deux côtés de la voile, en vertu de **l'effet Venturi**.

Nous pouvons tous constater que si nous imposons un rétrécissement à l'écoulement d'un fluide incompressible (par exemple en pinçant l'extrémité d'un tuyau d'arrosage), sa vitesse d'écoulement augmente pour conserver un débit constant : le volume qui entre dans l'étranglement doit être le même que celui qui en sort car le liquide ne peut se contracter du fait de son incompressibilité.

Il se trouve qu'aux vitesses relativement faibles qui nous concernent (celles du vent apparent) l'air, qui est pourtant un gaz, peut être considéré comme incompressible. La courbure de la voile impose donc côté extrados un resserrement des lignes de courant et une accélération du flux, et côté intrados un évasement des lignes de courant et un ralentissement du flux.

Ce caractère incompressible de l'air aux faibles vitesses peut surprendre mais heureusement qu'il est réel, sans quoi nous aurions les mêmes vitesses d'écoulement des deux côtés de la voile et aucune force vélique résultante !

Il est possible de calculer mathématiquement la distribution des vitesses sur une voile isolée et même sur la combinaison d'une grand-voile et d'un foc. On conçoit cependant aisément que, côté extrados d'un profil isolé, l'accélération est maximale là où l'étranglement l'est aussi. Nous verrons que les dimensions finies d'une voile isolée d'une part, et l'interaction entre la voile d'avant et la grand-voile d'autre part, rendent la situation plus complexe.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous indique la distribution des vitesses à l'extrados d'une combinaison grand-voile et foc, pour un vent apparent de 8 m/s et une incidence non nulle. On constate qu'en effet ces vitesses d'écoulement sont pratiquement partout supérieures à celle du vent apparent !

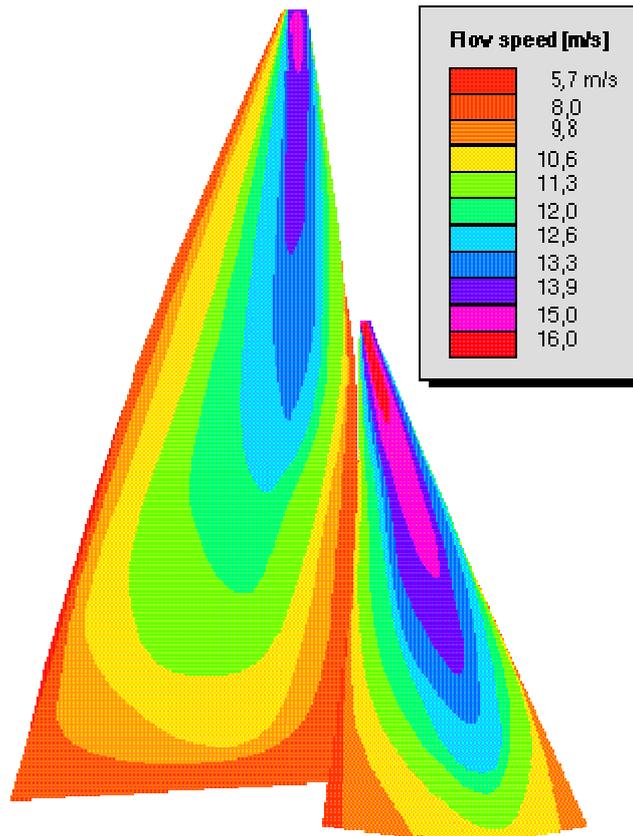


Fig46/ZZ22 : Distribution des vitesses à l'extrados calculées par MacSail (WB Sails).

Nous savons maintenant que les vitesses d'écoulement ne sont pas les mêmes des deux côtés d'une voile, mais pas encore pourquoi une force se développe pour faire avancer l'esquif ! Pour cela, nous devons faire intervenir le **théorème de Bernoulli**.

L'air est soumis à deux types de pression : une pression statique (la pression atmosphérique, ou celle, supérieure, qui permet de gonfler un pneu) et la pression dynamique (celle que l'on ressent en passant la main par la portière, due au transfert d'énergie cinétique entre les molécules d'air et la main qui tente de les repousser).

Ces deux natures différentes de pression ne sont pas indépendantes : le théorème de Bernoulli stipule que dans un fluide incompressible en écoulement, leur somme est constante. Chaque fois que l'une augmente, l'autre doit diminuer.

Retournons à présent à notre voile isolée. Côté extrados, donc côté étranglement, nous avons vu précédemment que les vitesses d'écoulement sont plus grandes que celle du vent apparent. La pression dynamique y est donc logiquement plus forte, donc la pression statique y est plus faible. Bien sûr, nous avons la situation opposée côté intrados.

Or, c'est la pression statique qui crée la force exercée sur le profil, la pression dynamique ne créant qu'une force de frottement parallèle à la surface du profil, et que nous pouvons négliger pour l'instant.

La pression statique est plus faible à l'extrados et plus forte à l'intrados : il y a succion à l'extrados et poussée à l'intrados. La différence de pression, d'abord très faible, augmente rapidement avec l'incidence (voir plus loin au paragraphe I – 9 – 2). Elle génère la *force vélique*, qui propulse le bateau mais permet, avant cela, à la voile de s'établir (de se mettre en forme).

L'air est normalement attiré vers les zones de basses pressions. Cette différence de pression entre les deux côtés de la voile établie crée donc une aspiration en amont du profil : des molécules qui seraient normalement passées à l'intrados se trouvent aspirées à l'extrados. Les lignes de courant se trouvent donc déviées non seulement le long du profil lui-même, mais aussi en amont (et également en aval comme nous le verrons). Quand la voile se met en forme, s'établit donc progressivement une adonnante d'attaque. Nous voyons qu'il y a bien sûr un lien évident entre la différence de vitesse, donc de pression statique, entre les deux côtés de la voile et l'importance de cette adonnante d'attaque. Toutes les deux s'établissent progressivement au cours de la mise en forme de la voile pour atteindre un état d'équilibre qui dépend des conditions régnantes (vitesse de vent, formes du profil). Ainsi les formes d'une voile, même entièrement lattée, doivent être appréciées lorsque la circulation est établie. Signalons également au passage que cette adonnante d'attaque est responsable, par exemple, de la fameuse « position favorable sous le vent » qui avantage le bateau situé en avant et sous le vent par rapport à un de ses adversaires.

La figure ci-dessous matérialise l'adonnante d'attaque et la circulation générale des lignes de courant autour d'un profil isolé, avec l'étranglement extrados et l'évasement intrados.

La ligne en pointillés matérialise *la ligne de séparation*, qui sépare les molécules qui vont (en amont) et sont (en aval) passées côté intrados de celles passées côté extrados. Notons que cette ligne de séparation intersecte le profil côté intrados et non pas à l'extrémité du bord d'attaque : rappelons-nous qu'un certain nombre de molécules « normalement » destinées à l'intrados ont été aspirées à l'extrados !

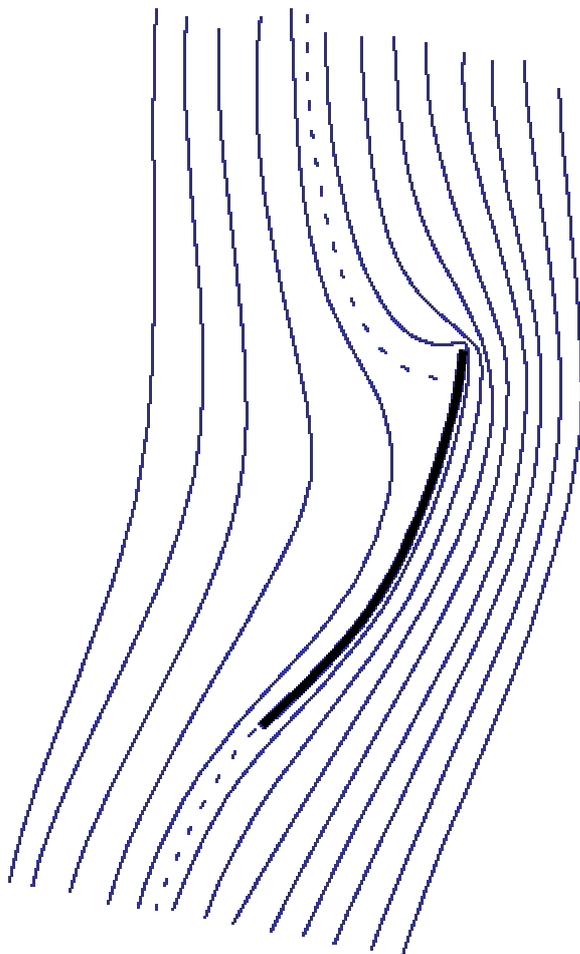


Fig11/ZZ2 : Perturbation de l'écoulement par une GV isolée.

A l'endroit où la ligne de séparation intersecte le profil de la voile, la vitesse des molécules au contact immédiat de la surface est nulle : c'est le point d'arrêt, parfois appelé aussi *point de stagnation*. Remarquons aussi que le point d'étranglement maximum est bien en amont du creux maximum du profil, du fait de l'incidence non nulle du profil par rapport au vent apparent.

I – 3) La couche limite

Tout ce que nous avons vu précédemment concerne l'écoulement à une certaine distance de la paroi, pour des lignes de courant non freinées par la surface de la paroi.

Au contact immédiat de la surface de la voile, la viscosité de l'air a une autre conséquence : les molécules adhèrent au tissu par friction, leur vitesse est nulle par rapport à la paroi. Cette première couche de molécules freine la couche suivante, qui à son tour réagit sur les couches suivantes... L'écoulement ne reprend sa vitesse normale, celle du vent apparent, qu'à une certaine distance de la paroi, qui est logiquement d'autant plus grande que la viscosité du fluide est grande. On obtient donc autour de la voile une sorte de « gaine » où l'écoulement est ralenti : c'est la *couche limite*. L'écoulement général non freiné, celui qui va générer la force vélique, ne rencontre donc pas seulement une voile constituée du seul tissu ; il voit l'ensemble voile + couche limite : ce sont les paramètres de forme de cet ensemble qui sont significatifs pour la performance.

On conçoit facilement que le freinage des molécules dans cette couche limite entraîne une résistance à l'avancement pour la voile : cette résistance est la *traînée visqueuse*, parfois appelée *traînée de friction*. Cette traînée visqueuse se manifeste bien sûr aussi pour une coque en mouvement dans l'eau, et elle est logiquement d'autant plus grande que la surface de coque en contact avec l'eau (*surface mouillée*) est grande. Le concept de surface mouillée, bien connu du régatier, tire donc son origine de la formation, par viscosité du fluide, de cette couche limite.

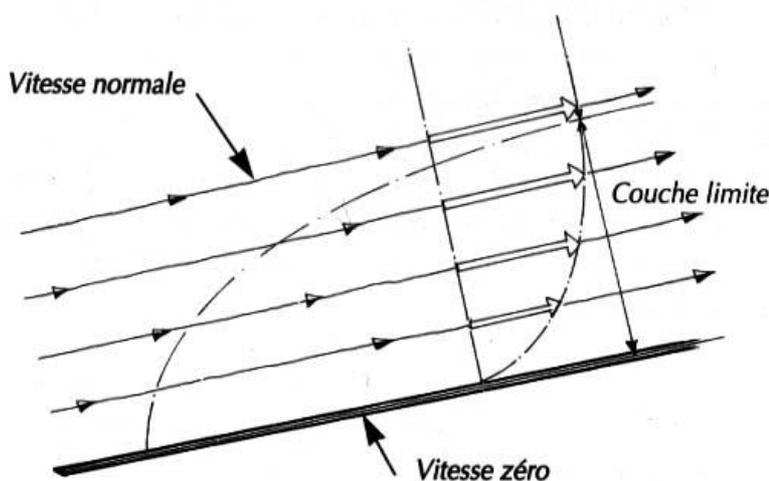


Fig172/ZZ212 page 29 : Couche limite.

Sur une voile, la couche limite, très fine au bord d'attaque, s'épaissit progressivement quand la longueur parcourue par l'écoulement augmente en direction du bord de fuite, car

logiquement, les différentes couches de molécules qui la composent se trouvent de plus en plus freinées.

Dans cette couche limite, la friction entre les différentes couches de molécules qui se ralentissent les unes les autres engendre un échauffement, qui est donc d'autant plus important que la distance parcourue sur la paroi est grande. La rugosité de la paroi induit également une friction donc un échauffement plus importants. Cet échauffement provoque la mise en vibration des molécules, qui se trouvent alors animées de mouvements sinusoïdaux : c'est la mise en turbulence. Ces mouvements sinusoïdaux tendent aussi à rendre la couche limite plus épaisse. L'écoulement au sein de la couche limite, initialement laminaire, devient turbulent lorsqu'il a parcouru une certaine distance sur la paroi. On retrouve ici l'influence du paramètre « longueur parcourue par l'écoulement », déjà mentionné quand nous avons introduit le nombre de Reynolds qui prédit les transitions entre les différents types d'écoulements.

La couche limite s'épaissit et tend à devenir turbulente en direction du bord de fuite.

La figure ci-dessous illustre l'épaississement de la couche limite vers le bord de fuite d'un profil constitué par un mât-aile et une grand-voile.

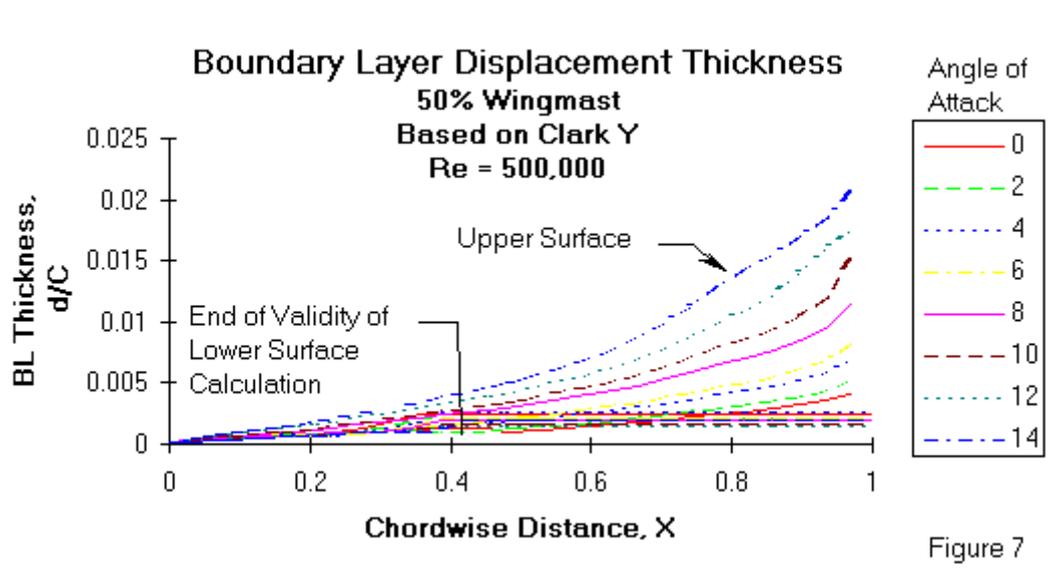


Fig17/ZZ4 : Epaississement de la couche limite vers l'AR en fonction de l'angle d'attaque.

L'épaisseur de la couche limite dépend aussi de la vitesse de l'écoulement, donc, pour une voile, de la vitesse du vent apparent. Un vent apparent faible, de plus faible inertie, est plus facilement freiné. Pour la couche limite, épaisseur rime avec instabilité : la couche limite plus épaisse par vent faible est aussi plus instable, plus sensible au décrochage, d'où l'importance de la précision des réglages, d'incidence notamment, par petit temps.

Puisque, nous l'avons vu, les vitesses d'écoulement sont plus lentes à l'intrados qu'à l'extrados, la couche limite y sera également plus épaisse. Nous avons vu également, côté extrados, que la vitesse de l'écoulement augmente jusqu'au niveau de l'étranglement maximum. Elle diminue ensuite en arrière de ce point pour retourner, au bord de fuite (chute de la voile), à la vitesse du vent apparent. En effet, sur la chute qui marque la fin de la voile, il n'y a plus (au bon réglage, c'est-à-dire en condition de Kutta que nous verrons plus loin) de différence de pression, donc de vitesse entre les deux côtés de la voile. A l'extrados, l'épaisseur de la couche limite augmente donc vers le bord de fuite par ralentissement du flux.

La figure ci-dessous matérialise l'épaississement de la couche limite vers le bord de fuite, à l'extrados, et son épaisseur plus grande à l'intrados.

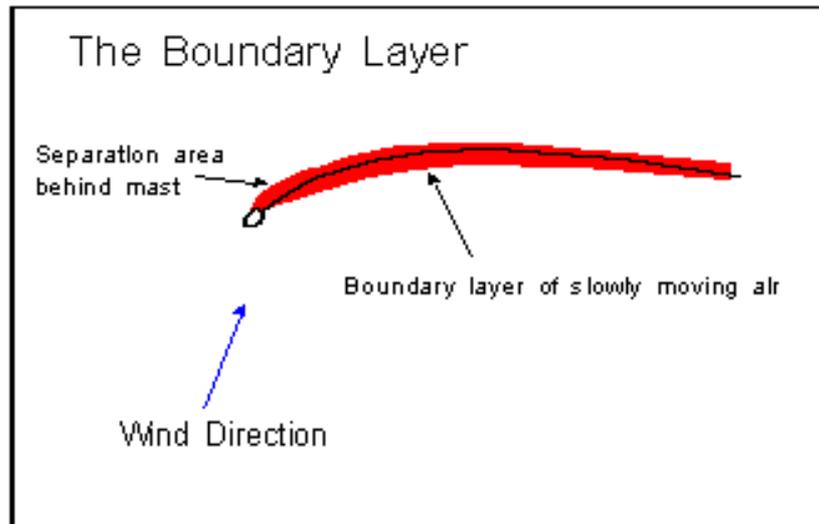


Fig38/ZZ12 : Séparation et couche limite ralentie, plus épaisse à l'intrados.

Nous avons vu que le profil, c'est-à-dire le dessin des formes de la voile, détermine la distribution des vitesses de l'écoulement (en dehors de la couche limite) des deux côtés de la voile. En retour, cette distribution des vitesses induit une distribution d'épaisseur de la couche limite sur la voile, ce qui modifie son profil effectif. Il y a donc une interaction réciproque et subtile entre les paramètres de forme de la voile seule, qui déterminent la morphologie de la couche limite, qui en retour modifie le profil effectif de l'ensemble...

Enfin, la dernière propriété de la couche limite est sans doute la plus importante : elle transmet les pressions. La succion et la poussée générées par la déflexion des lignes de courant par le profil, à l'extérieur de la couche limite, sont transmises au tissu à travers la couche limite. Si cette transmission de pression ne se faisait pas, aucune force vélique ne pourrait s'appliquer à la voile et notre beau sport n'existerait pas !

I – 4) Typologie des écoulements sur une voile

Nous allons revenir plus précisément au comportement des écoulements dans la couche limite, et pour cela prendre l'exemple d'une voile établie sur un mât profilé tournant du type de ceux qui équipent les multicoques de sport.

La figure ci-dessous, que nous allons abondamment commenter, illustre la distribution des vitesses extrados et intrados sur un tel profil. Elle a été obtenue non par mesure mais par calcul mathématique. Il s'agit d'un profil mis en forme, sous incidence nulle. Sous incidence non nulle, l'allure générale de la distribution des vitesses est la même (voir plus loin fig.18/ZZ4) mais bien sûr la différence des vitesses intrados et extrados est encore plus grande. Les commentaires qui suivent sont donc valides sur toute la gamme d'incidences de régime laminaire.

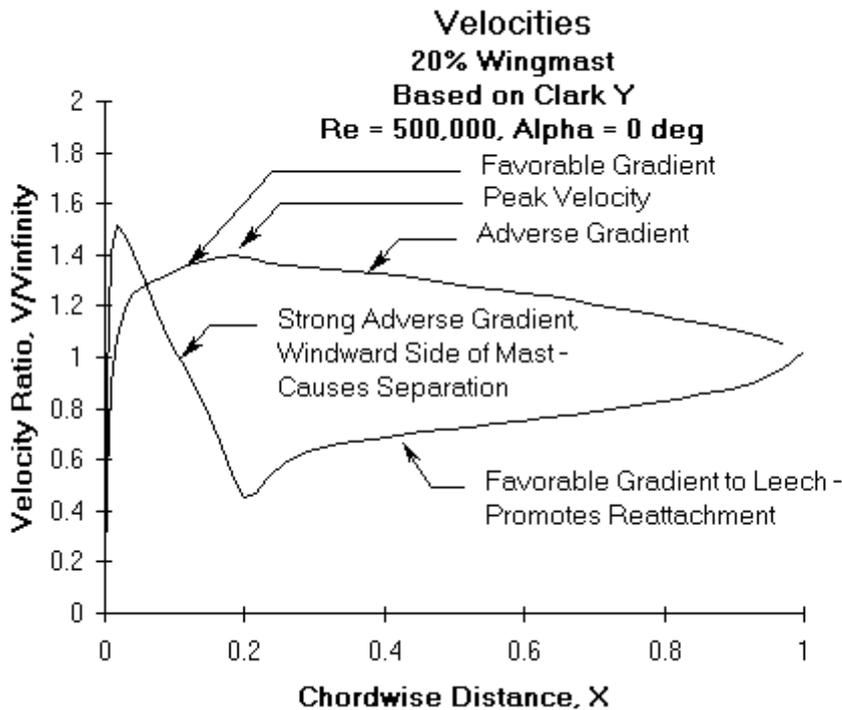


Figure 2

Fig14/ZZ4 : Distribution des vitesses le long d'un profil mât aile/GV. La longueur de corde du mât-aile est égale à 20% de la longueur de corde totale du profil d'ensemble. Sur l'axe des ordonnées, la valeur 1 de la vitesse est celle du vent apparent.

I - 4 - 1) A l'extrados

Au bord d'attaque, au point de stagnation, la vitesse des molécules dans la couche limite est nulle. Du fait de l'adonnante d'attaque, ce point de stagnation est situé légèrement au vent du mât. A partir de ce point, et en quelques centimètres, l'écoulement subit d'abord une énorme accélération initiale, qui lui est nécessaire pour pouvoir contourner le bord d'attaque du mât, très courbé, en direction de l'extrados. Cette vitesse acquise entraîne une grande inertie pour les molécules, qui ne parviennent pas toujours à rester accrochées à la surface dans une couche limite qui pour l'instant est laminaire : il y a création d'une *bulle de séparation laminaire*, petit tourbillon dans lequel, près de la surface, les molécules s'écoulent à contre-courant. Derrière cette bulle la succion recolle les flux dans la couche limite (toujours laminaire).

Ensuite la vitesse de l'écoulement continue d'augmenter jusqu'au niveau de l'étranglement maximum, dont la position est déterminée par celle du creux maximum et par l'incidence, après quoi elle retourne au bord de fuite à la vitesse du vent apparent. La couche limite, d'abord très fine au bord d'attaque, s'épaissit avec la longueur parcourue. Son épaisseur s'accroît ensuite par ralentissement en direction du bord de fuite, car nous avons déjà vu que quand la vitesse du flux diminue dans une couche limite, son épaisseur augmente.

L'écoulement au sein de cette couche limite, d'abord laminaire puis turbulent, est de plus en plus freiné après l'étranglement maximum, surtout si le creux de la voile est très prononcé ou l'incidence grande par rapport au vent apparent : il rencontre une résistance de plus en plus grande. Cette résistance finit par arracher la couche limite, et la pousser vers l'arrière : c'est le *décrochage*. Des molécules se mettent alors à remonter le sens de l'écoulement général, entraîné par son inertie, pour venir remplir le « vide » laissé près de la surface de la voile par

la couche limite décrochée : l'écoulement devient tourbillonnaire. Un penon placé dans ce type d'écoulement subit des mouvements désordonnés, il peut même pointer vers l'avant de la voile. Il se forme une poche d'air mort inefficace sur la propulsion.

Le décrochage est généré par le ralentissement trop rapide de l'écoulement dans la couche limite.

La figure ci-dessous illustre ces trois grands types d'écoulement, à l'extrados d'une voile, (la zone du bord d'attaque n'y est pas représentée). On y voit les points de transition entre ces différents types. La position de ces points est directement liée au nombre de Reynolds, donc à la vitesse de l'écoulement et à la longueur qu'il parcourt sur l'extrados.

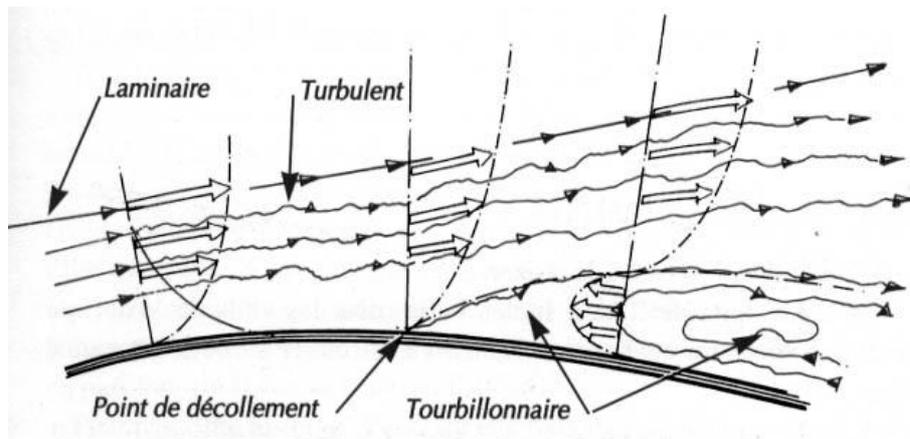


Fig 173/ZZ212 page 31 : Typologie des écoulements sur une voile.

Il ne faut surtout pas confondre écoulement tourbillonnaire induit par le décrochage et écoulement turbulent : ce dernier est loin d'être néfaste, au contraire, car les mouvements sinusoïdaux qui animent les molécules leur permettent de « recoller » périodiquement à la surface, donc d'y maintenir une couche limite, même si celle-ci, nous l'avons vu, est plus épaisse qu'une couche limite laminaire. Ces molécules résistent ainsi mieux au ralentissement qui tente de les arracher de la surface, leur décrochage est retardé : le profil est dit plus *tolérant* car ce phénomène élargit la plage d'incidences où le profil fonctionne avec efficacité en écoulement non tourbillonnaire. Une couche limite turbulente est moins sensible au décrochage : nous avons intérêt à favoriser son apparition dans les zones du profil où l'écoulement va subir un ralentissement. Elle continue à transmettre les pressions, l'écoulement reste globalement cohérent en son sein, la force vélique continue de pouvoir s'appliquer sur la voile.

On voit ici un premier intérêt de la *quête arrière du mât*, car il semble qu'en inclinant le guindant de la grand-voile vers l'arrière on favorise la mise en turbulence dès le bord d'attaque sur le profil. Dans des conditions d'écoulement instable (variations rapides de direction du vent apparent, clapot qui secoue le gréement) la quête arrière favorise la tolérance en retardant le décrochage.

Vers le point de transition laminaire-turbulent, après l'étranglement maximum, le ralentissement du flux tend à provoquer le décollement de la couche limite laminaire. Ce décrochage peut être également retardé si on arrive à créer une seconde *bulle de séparation laminaire* dans cette zone. En effet, à l'arrière de cette bulle, le mouvement inverse qui y règne favorise la remise en contact de la couche limite, maintenant turbulente, avec la surface de la voile. Il augmente aussi la vitesse générale de l'écoulement dans la zone de cette bulle, donc la force vélique (voir figure ci-dessous).

Sans cette bulle, la couche limite resterait décrochée.

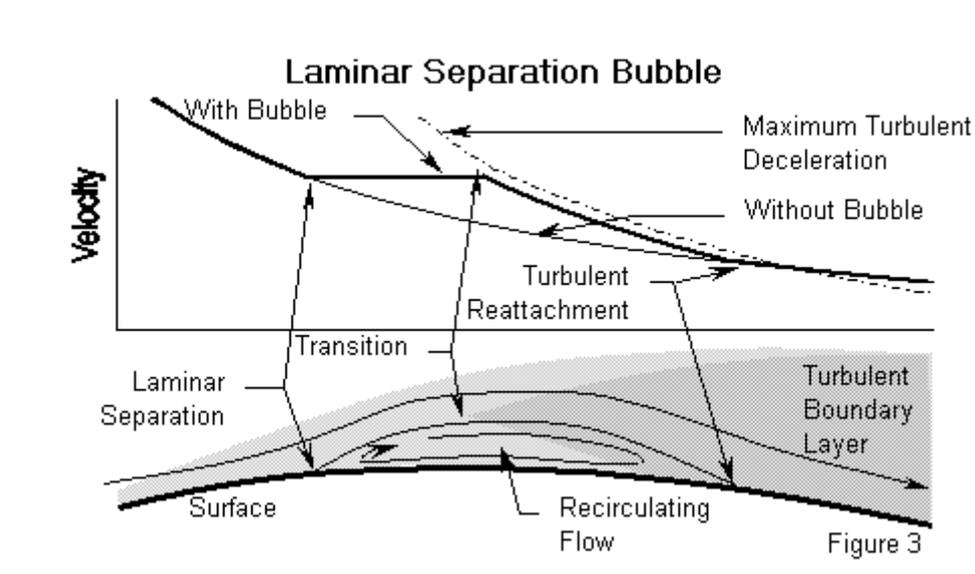


Fig15/ZZ4 : Bénéfice d'une bulle de séparation extradors recirculante, effets sur l'augmentation de vitesse extradors et le rattachement vers l'arrière du profil.

I – 4 – 2) A l'intrados

Nous avons également, après le point de stagnation, une énorme accélération initiale pour contourner le bord d'attaque du mât, puis très rapidement (en quelques centimètres) un ralentissement très important lié à l'évasement des lignes de courant. Il se crée donc, à l'intrados du mât, une bulle de séparation laminaire. En principe (si le dessin du profil du mât et le réglage de son incidence sont corrects), il existe derrière cette bulle un *rattachement turbulent* du même type que celui que nous venons de décrire pour l'extrados. Ce rattachement recrée une couche limite turbulente. Dans cette couche limite turbulente, la vitesse d'écoulement continue de ralentir du fait de l'évasement des lignes de courant, à peu près jusqu'à la jonction du mât et de la voile, donc sur le guindant. Ce ralentissement finit par provoquer le décrochage de la couche limite turbulente, avec création d'une *bulle de séparation turbulente*, dans laquelle la pression n'augmente plus : cette zone est donc inefficace dans la propulsion du profil. Un penon qui y est placé n'est jamais correctement orienté.

Cependant, après le guindant, la vitesse d'écoulement doit de nouveau accélérer pour retrouver, au bord de fuite, la vitesse du vent apparent ; d'après Bernoulli, cela signifie que la pression statique décroît à nouveau après être passée par son maximum, et cette chute de pression statique aspire l'air qui se recolle à la surface. Dans ce flux recollé l'écoulement est de nouveau cohérent avec des lignes de courant parallèles.

Après la bulle de séparation turbulente, on a donc un second point de rattachement turbulent.

La figure ci-dessous illustre le comportement de la couche limite des deux côtés d'un profil mât-aile / voile, avec l'emplacement approximatif des différentes bulles de séparation et des points de rattachement. La seconde bulle de séparation laminaire, présente à l'extrados après l'étranglement maximum vers le point de transition laminaire-turbulent, n'est pas représentée.

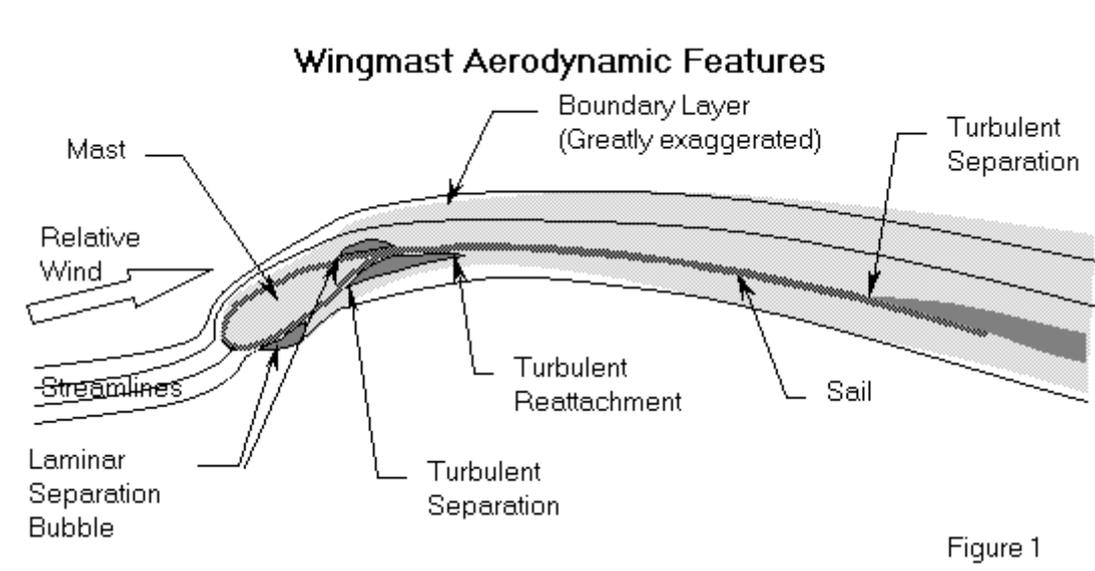


Figure 1

Fig13/ZZ4 : Typologie et points caractéristiques des écoulements sur un profil mât aile/GV.

Ce type d'étude démontre l'intérêt des mâts-aile à longue corde. En effet, si la longueur de corde n'a guère d'influence sur la distribution des vitesses à l'extrados (l'extrados du mât étant judicieusement dessiné dans le prolongement de celui de la grand-voile), elle modifie considérablement la distribution des vitesses à l'intrados.

C'est toujours à la jonction mât-voile que la vitesse d'écoulement est la plus faible (fig14/ZZ4 ci-dessus). Sur un mât à longue corde, le ralentissement s'effectue donc sur une distance plus grande, le gradient négatif de vitesse est plus faible (comme l'indique la fig18/ZZ4 ci-dessus), et l'apparition de la nuisible bulle de séparation turbulente, donc du décrochage, moins probable. Ces mâts à longue corde sont donc à la fois plus puissants et plus tolérants puisque, du fait que le décrochage intrados est retardé, la plage d'incidences utiles, pour une navigation en finesse, est plus grande.

Sur la figure ci-dessous, on compare la distribution des vitesses pour différentes longueur de corde de mâts-aile. Les profils sont cette fois placés sous incidence non nulle (8°). La puissance pour un mât donné sera proportionnelle à la surface inscrite entre les deux courbes de vitesses, à la nuance près des décrochages intrados. Les points de séparation turbulents (losanges) et les points de rattachement (croix) figurent sur les courbes pour chaque profil. Pour chaque profil, sous la droite qui joint ces deux points, donc dans la zone correspondant à la bulle de séparation turbulente côté intrados, nous avons une certaine longueur de corde inefficace dans la propulsion. On constate sur la figure que la perte de puissance (zone hachurée) est bien plus importante pour le mât de faible corde que pour le mât de longue corde...

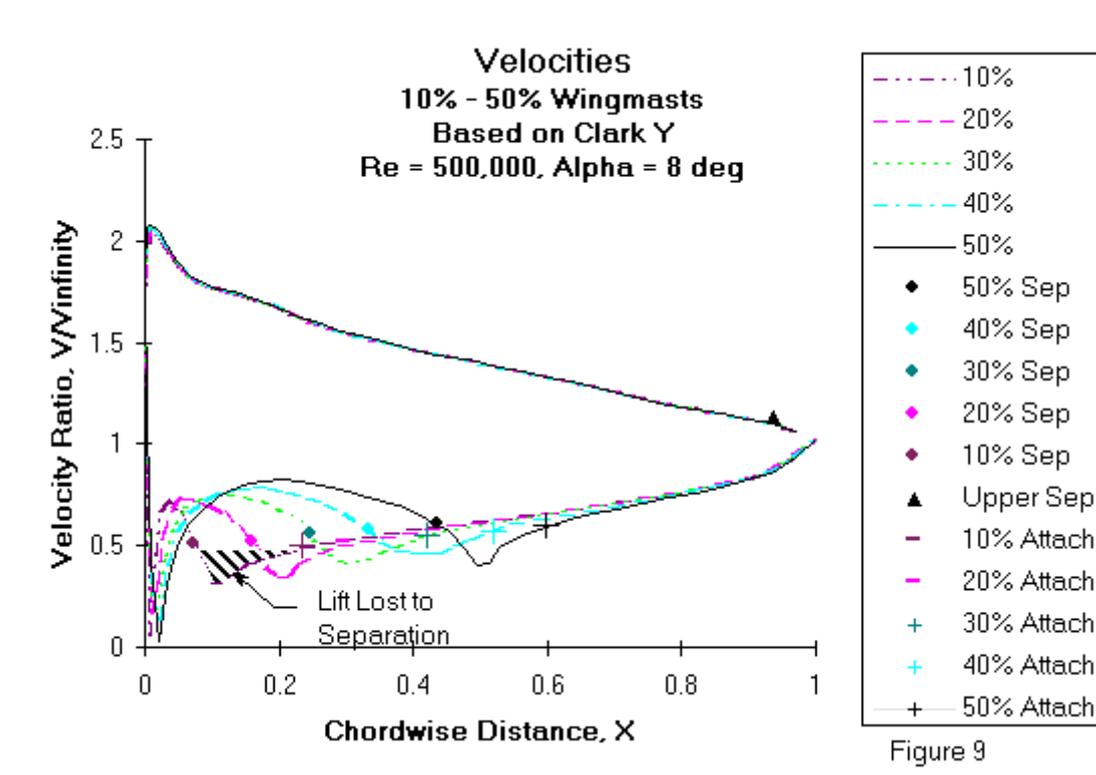


Fig18/ZZ4 : Effet de la longueur de corde d'un mât aile sur la distribution des vitesses, à incidence faible, à l'intrados (distribution extrados pratiquement non modifiée).

I - 5) Caractéristiques remarquables de l'écoulement sur une voile

Ce que nous avons vu dans le paragraphe I - 4 concerne les écoulements sur un profil bien dessiné, correctement orienté sous l'incidence adéquate. Nous allons maintenant voir comment évoluent bulles de séparation et décrochages quand on s'éloigne de ces conditions idéales : ceci parlera davantage au régatier !

Si l'incidence est trop faible (voile pas assez bordée ou cap trop serré), la voile ne s'établit pas car la circulation, des deux côtés de la voile, n'est pas assez dissymétrique pour qu'une différence de pression significative apparaisse et que la voile se mette en forme sous l'effet de la création d'une force vélique.

Avec une incidence un peu plus forte, la voile peut se mettre en forme, mais son fonctionnement optimal nécessite une incidence encore plus grande. En effet, si celle-ci reste trop faible, nous avons un fonctionnement dégradé de l'intrados : après son accélération initiale, le flux n'arrive pas à contourner le bord d'attaque du mât et celui de la voile car l'évasement des lignes de courant augmente trop rapidement. Emporté par son inertie, le flux décroche de la surface. La bulle de séparation turbulente, décrite précédemment, voit sa taille augmenter considérablement : en son sein, l'air près de la surface circule à l'envers. Le penon au vent, placé non loin du bord d'attaque, tourbillonne ou peut même pointer vers l'avant. Ce phénomène est bien connu du régatier, surtout dans la brise où la nécessaire limitation de la puissance disponible conduit à naviguer à des incidences plus faibles. Dans cette bulle de séparation, la pression reste constante au lieu d'augmenter comme elle le fait au bon réglage. Comme dans le même temps, côté extrados, la faible déflexion générée par la faible incidence ne génère qu'une faible succion, cela signifie que dans cette zone (près du bord d'attaque) la

différence de pression entre les deux côtés de la voile est faible, et qu'elle peut même s'inverser. L'attaque de la voile commence à faser, elle peut même prendre à contre. Les deux figures ci-dessous illustrent la séparation du flux à l'intrados, côté bord d'attaque, et par conséquent la tendance de la voile à s'inverser.

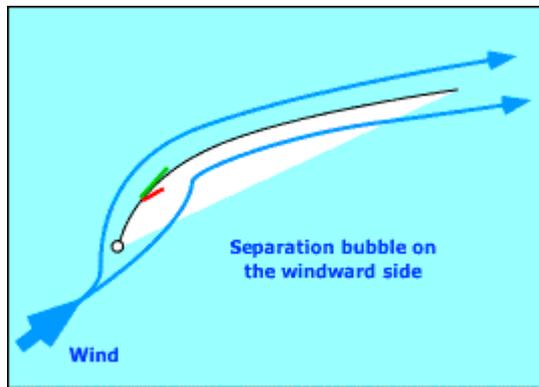


Fig35/ZZ10 : Bulle de séparation intrados (incidence trop faible).

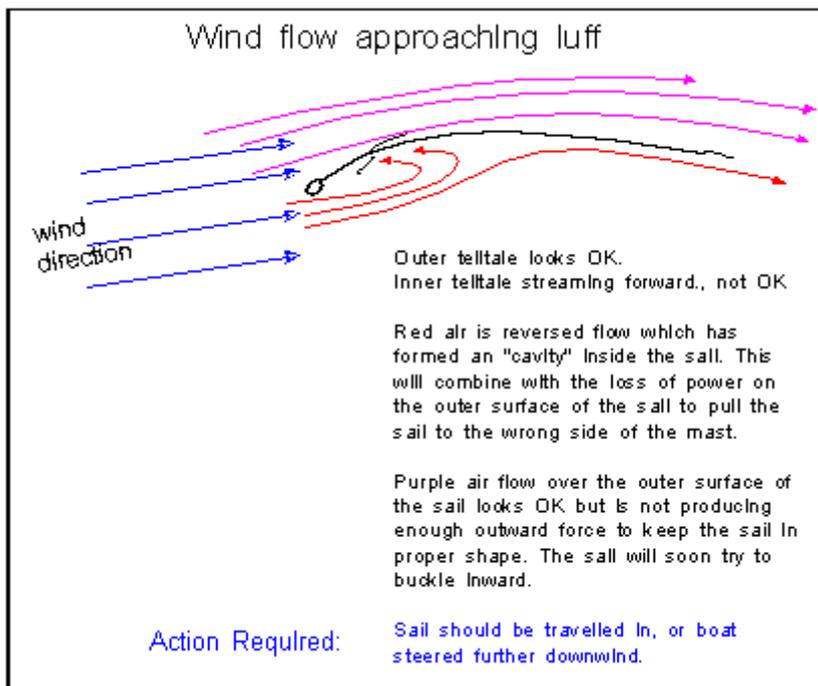


Fig36/ZZ12 : Inversion intrados quand l'angle d'attaque est trop faible.

Si l'incidence ou le creux sont trop forts il y a décrochage à partir du bord de fuite, côté extrados, car du fait de son inertie le flux ne peut supporter une déflexion aussi prononcée, qui lui imposerait un ralentissement trop brutal en direction de la chute. Derrière le point de décrochement, un tourbillon apparaît où l'air près de la surface circule à l'envers : le penon de chute vient alors à disparaître aux yeux de l'équipage, il se cache derrière la grand-voile, côté extrados. Il y a remontée de pression dans ce décrochage, la succion y disparaît, toute la zone décrochée perd son efficacité. Il y a diminution de force vélique, mais aussi augmentation de traînée liée à l'apparition de ce tourbillon qui brasse de l'air et consomme de l'énergie. Plus

l'incidence augmente, plus l'obstacle présenté au vent et la contrainte de déflexion deviennent importants, plus le point de décrochement avance en direction du bord d'attaque.

Ce décrochage au bord de fuite, côté extrados, peut également être interprété par la *condition de Kutta*. Un profil est en condition de Kutta si au bord de fuite les vitesses d'écoulement sont les mêmes à l'intrados et à l'extrados, et donc égales à la vitesse du vent apparent. Si elles ne le sont pas du fait d'un creux ou d'une incidence trop grande, la pression statique demeure plus forte à l'intrados qu'à l'extrados : de l'air en provenance de l'intrados est aspiré vers les basses pressions de l'extrados et y circule à l'envers. Il y a génération du tourbillon dont nous venons de parler, donc décrochage.

Rappelons que c'est le nombre de Reynolds qui prédit le décrochage, qui intervient dans l'air pour une valeur donnée du produit $V \times L$. Pour un creux et une incidence donnés, le décrochage extrados au bord de fuite sera d'autant plus étendu que la vitesse du vent est grande : ceci implique, par vent fort où les molécules ont plus d'inertie, d'aplatir la voile pour diminuer la déflexion que nous leur imposons.

Si l'incidence est trop forte, il y a aussi décrochage à l'attaque côté extrados. Rappelons-nous que le point de stagnation est décalé côté intrados, quand la voile s'est mise en forme et que l'adonnante d'attaque s'est constituée. Nous avons vu dans le paragraphe I – 4 – 1) que ceci contraint les molécules qui veulent passer à l'extrados à une grande déflexion qui génère une bulle de séparation laminaire. Si nous augmentons l'incidence, nous augmentons dans un premier temps la différence de pression entre les deux côtés de la voile, et nous déplaçons encore davantage le point de stagnation vers l'intrados. Mais dans le même temps la contrainte de déflexion augmente : du fait de leur inertie, les molécules décrochent davantage de la surface, la bulle de séparation laminaire s'étend et contamine une plus grande surface d'extrados.

Ceci a une conséquence immédiate en multicoque de sport où nous sommes souvent amenés à border le mât pivotant dans la brise. Ceci augmente l'angle d'incidence à l'attaque et y favorise donc le décrochage ; il est souhaitable de choquer le chariot pour réduire l'incidence d'ensemble et restaurer une incidence correcte à l'attaque (nous y reviendrons).

Aux incidences extrêmes, les deux bulles de séparation extrados (à l'attaque et sur la chute) se rejoignent et tout l'extrados est en décrochage.

Le décrochage extrados, sous incidence trop forte, a des conséquences beaucoup plus néfastes que le décrochage intrados sous incidence trop faible, car c'est la succion extrados qui contribue le plus à la force vélique totale.

Les deux figures ci-dessous illustrent ces deux types de décrochage extrados, à l'attaque et sur la chute.

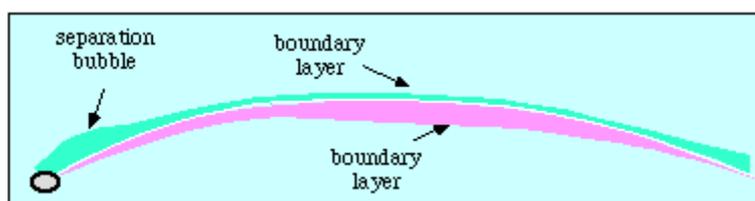


Fig34/ZZ10 : Bulle de séparation à l'attaque et couche limite.

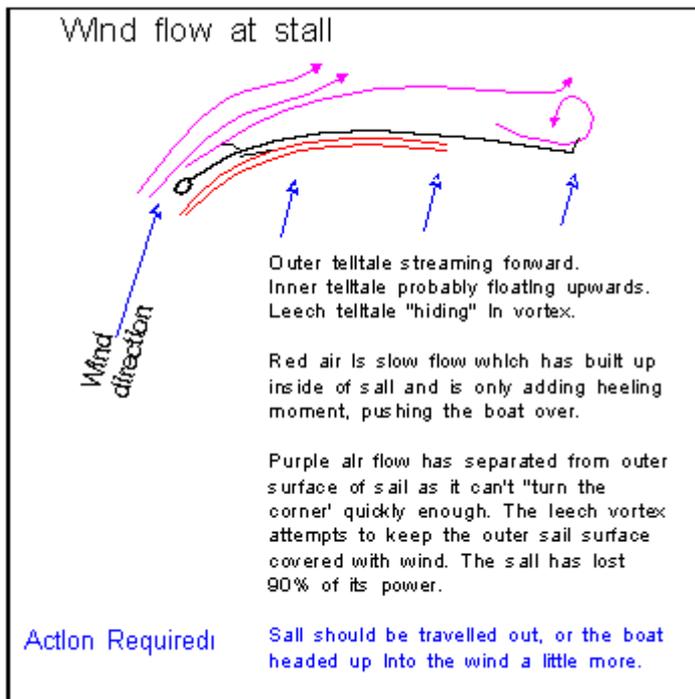


Fig37/ZZ12 : Décrochage extrados par l'AR (incidence trop forte).

Au bon réglage d'incidence, à l'attaque, les deux bulles de séparation laminaires seront toujours présentes à l'intrados et à l'extrados (éviter donc d'y mettre des penons qui ne fonctionneraient jamais), mais elles resteront petites. Il ne doit pas non plus y avoir de décrochage au bord de fuite côté extrados (le penon de chute pointe vers l'arrière).

I – 6) Intérêt des penons

Nous l'avons vu, les penons de chute matérialisent le décrochage extrados au bord de fuite quand l'incidence et/ou le creux sont trop importants. Un penon de chute placé haut dans la voile est particulièrement important car il permet de visualiser la bonne quantité de vrillage, donc de tension de chute, à adopter pour les conditions régnantes.

Il est également utile de placer deux ou trois penons supplémentaires plus bas sur la chute. En effet, si le penon supérieur flotte bien, le vrillage est bon et la voile est en condition de Kutta en partie haute ; mais si dans le même temps les penons plus bas décrochent, cela signifie que l'angle de sortie des profils inférieurs est plus grand que celui des profils supérieurs, c'est-à-dire que la voile est soit trop creuse dans le milieu (nous verrons qu'on peut cintrer le mât en partie médiane pour corriger), soit trop plate dans les hauts (nous verrons qu'on peut corriger en augmentant la tension de chute).

Ces penons seront surtout utiles dans le petit temps et le médium, puisque dans la brise, positionnée sous une incidence nécessairement faible, la voile sera toujours en condition de Kutta et les penons de chute bien orientés vers l'arrière.

La figure ci-dessous donne un exemple de placement des penons de chute dans une grand-voile.

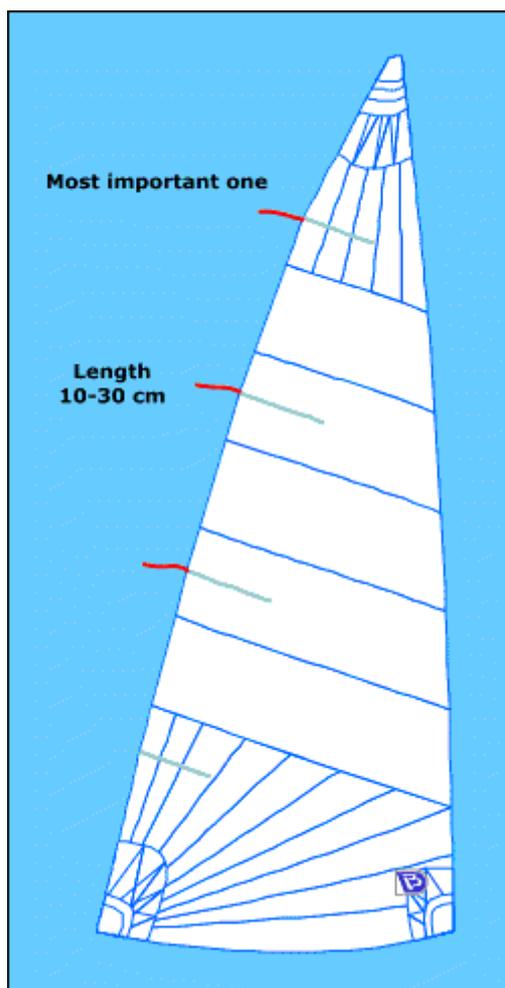


Fig32/ZZ10 : Penons de chute.

A l'attaque, il est souhaitable comme nous l'avons déjà signalé de placer les penons d'attaque en arrière des bulles de séparation laminaires qui s'y trouvent en permanence, ce qui signifie, selon le profil des mâts et des voiles, 20 à 30 cm en arrière du bord d'attaque des profils (un peu moins dans un foc non perturbé par un mât).

Correctement placés, ces penons sont particulièrement utiles pour le barreur, en particulier dans le foc. Si on lofe trop, la bulle de séparation intrados va rapidement s'étendre vers l'arrière et contaminer le penon qui se met d'abord à danser puis peut s'inverser. Si on abat trop, c'est le penon d'extrados qui est contaminé. Rappelons-nous toutefois que plus le vent monte, plus il est normal de naviguer sous incidence plus faible : le penon d'attaque au vent est alors « autorisé » à danser plus souvent que dans le petit temps.

Nous verrons aussi que ces penons d'attaque, dans une voile d'avant, ont un autre intérêt pour le réglage : ils permettent en particulier d'ajuster le vrillage de la voile d'avant (via le réglage des points de tire et de l'écoute) et la rondeur de l'attaque (via la flexion d'étai et la tension de guindant). Dans une voile d'avant, plus ils seront près de l'attaque, plus ils seront sensibles, mais une telle sensibilité peut s'avérer néfaste dans des conditions instables (clapot, vent mal établi) où une certaine tolérance serait plus adéquate : on peut alors être conduit à rajouter une autre paire un peu plus reculée que la précédente.

La figure ci-dessous donne un exemple de placement des penons dans une voile d'avant :

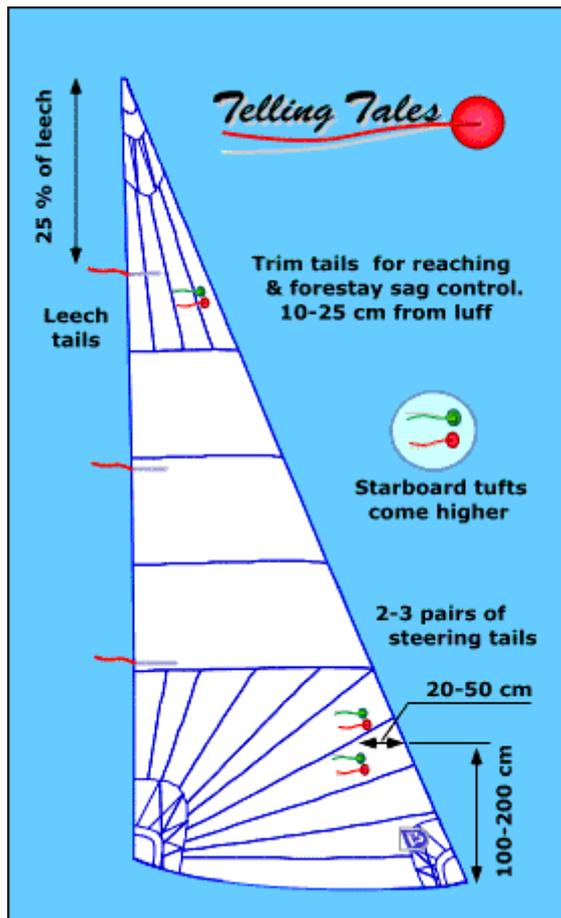


Fig33/ZZ10 : Rôle des penons dans la voile d'AV.

Dans une grand-voile, si un foc est présent, il conviendra, à l'attaque, de surtout surveiller les penons situés au-dessus du capelage, dans une zone de la grand-voile non soumise à la perturbation générée par le foc.

Sur un gréement à mât profilé pivotant, les penons d'attaque aident bien sûr à trouver le bon réglage de rotation du mât – et donc aussi d'incidence globale (par ajustement du chariot de grand-voile).

Enfin, pour aider à leur identification, il est évidemment préférable que les penons soient de couleurs différentes des deux côtés de la voile, et que, par exemple, les penons tribord soient systématiquement placés au-dessus des penons bâbord.

Au-dessus d'une certaine force de vent, au près, la gîte est un bien meilleur repère que les penons pour le barreur.

La figure ci-dessous illustre quelques comportements des penons d'attaque et de chute dans quelques situations courantes. Noter le sillage tourbillonnaire au bord de fuite : ce tourbillon ne doit pas être confondu avec celui qui est généré par le décrochage, c'est une matérialisation de la traînée induite de la voile, sur laquelle nous reviendrons dans son étude tridimensionnelle.

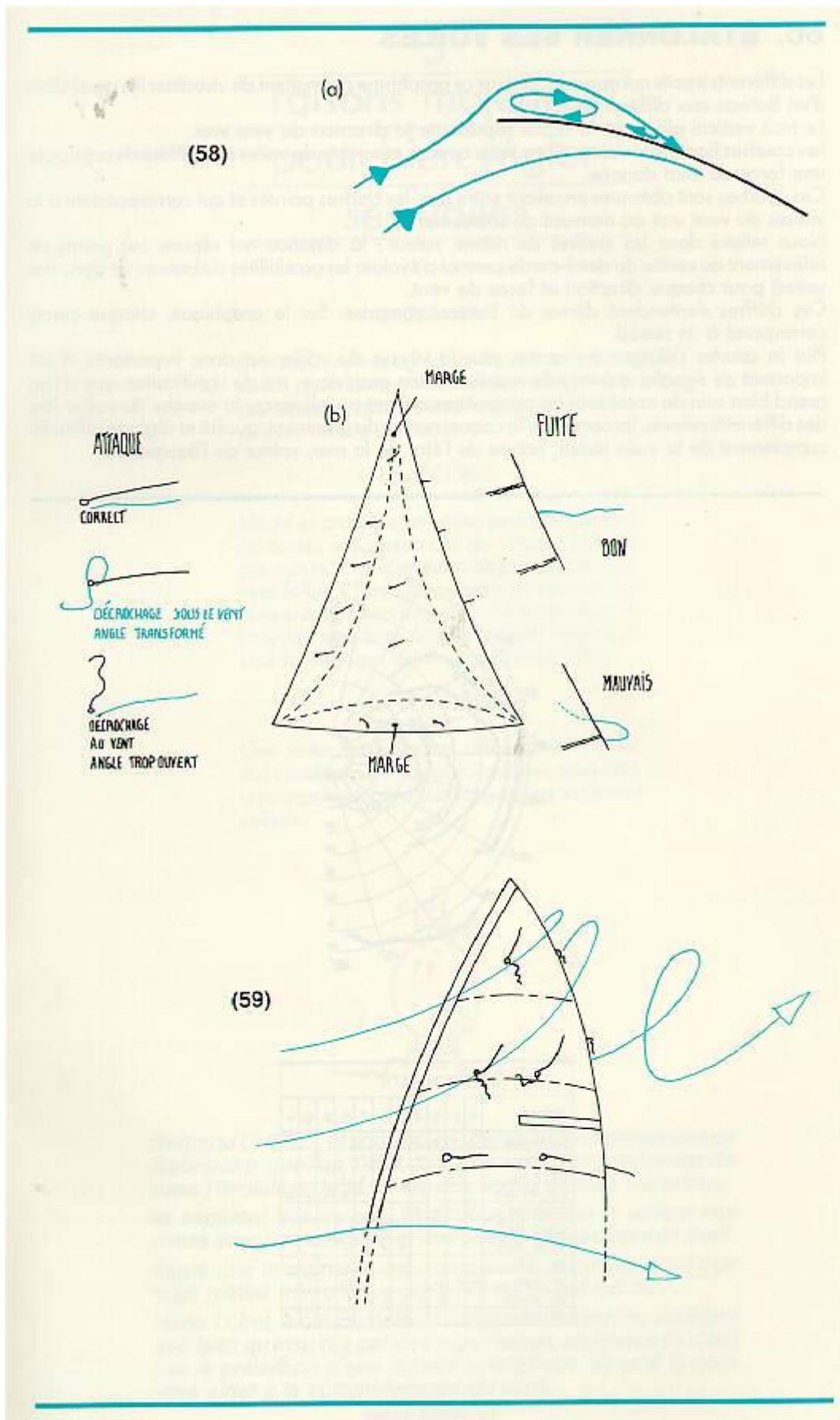


Fig8/ZZ1 : Matérialisation des écoulements par les penons.

I – 7) Portance et traînée

Nous avons établi que la *force vélique*, ou force aérodynamique, naît du déséquilibre de vitesses d'écoulement, donc de pression statique, entre les deux côtés de la voile. En chaque point du tissu, la force vélique s'applique perpendiculairement au tissu. Pour un profil isolé, elle est maximale au point d'étranglement maximum, qui se déplace vers l'avant quand l'incidence augmente. En direction du bord de fuite vers lequel la différence de pression tend à s'annuler en condition de Kutta, la force vélique diminue. Nous savons également que la succion extrados a une efficacité double de celle de la pression intrados, et qu'à l'intrados existe toujours une bulle de séparation turbulente inefficace.

Ce qui donne la répartition suivante des forces appliquées sur un profil isolé :

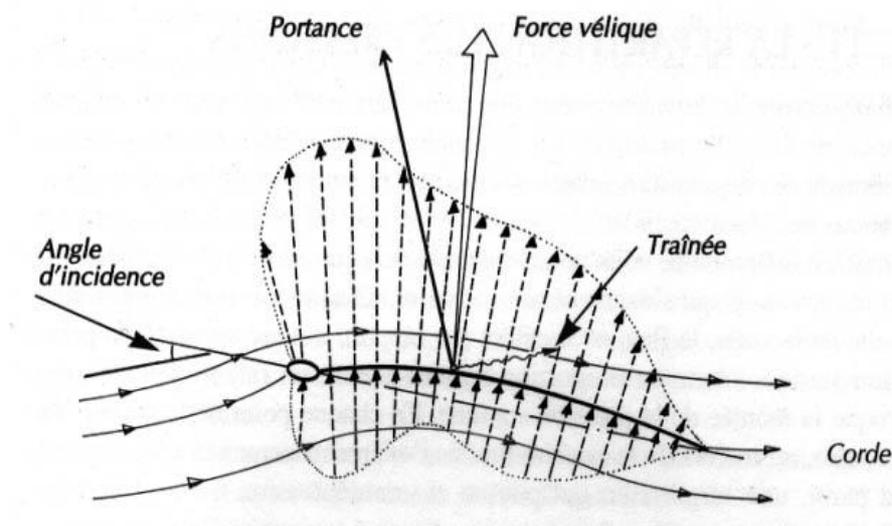


Fig199/ZZ212 page 76 : Distribution de la force vélique sur un profil isolé.

On voit sur cette figure que l'on peut réduire toutes les composantes individuelles de la force vélique en un seul vecteur, dont le point d'application est le *centre vélique* du profil.

Rappelons encore que la position de ce centre vélique n'est pas fixe et varie avec l'incidence, nous y reviendrons dans l'étude de la répartition horizontale du volume.

On constate également sur cette figure que la force vélique peut être décomposée en *traînée*, parallèle au vent apparent et qui freine le bateau à toutes les allures où le vent apparent est en avant de la perpendiculaire au bateau, et *portance*, perpendiculaire au vent apparent, qui le propulse. Cette décomposition par rapport à la direction du vent apparent, qui peut sembler arbitraire, a pourtant une réalité physique, comme nous allons maintenant le voir.

En effet nous avons déjà étudié la traînée visqueuse, ou traînée de friction, qui se manifeste dans la couche limite, mais il existe d'autres formes de traînée qui freinent le bateau.

La deuxième est la *traînée de forme*. Lorsque nous mettons la main à la portière, perpendiculairement au vent, nous sentons une grande force qui tend à la repousser vers l'arrière. La main stoppe les molécules qui la rencontrent : ces molécules lui transfèrent leur énergie cinétique. Si maintenant nous mettons notre main à plat, la force ressentie est plus

faible, car elle dépend directement de la surface présentée par l'obstacle à l'écoulement : notre main est, disons, plus « profilée » dans l'écoulement.

La traînée de forme est proportionnelle à la surface présentée par l'obstacle à l'écoulement.

Elle est une conséquence de la qualité de la pénétration de l'obstacle dans le fluide.

Le fardage d'un gréement par exemple n'est rien d'autre que sa traînée de forme.

Nous avons déjà mentionné, dans notre présentation des décrochages, la troisième forme de traînée qui apparaît avec l'écoulement tourbillonnaire qui consomme de l'énergie. Nous avons précisé que cette forme de traînée peut être grandement réduite par la qualité du dessin du profil et de son réglage, qui permettent d'éviter (ou du moins de retarder au maximum) le décrochage.

Une quatrième forme de traînée est la traînée induite, qui se manifeste dans le sillage tourbillonnaire du voilier ou dans les tourbillons que l'on peut constater à l'extrémité des ailes de l'avion qui traverse un nuage. Elle est liée à la dimension finie des profils, nous l'examinerons plus en détail dans leur étude tridimensionnelle.

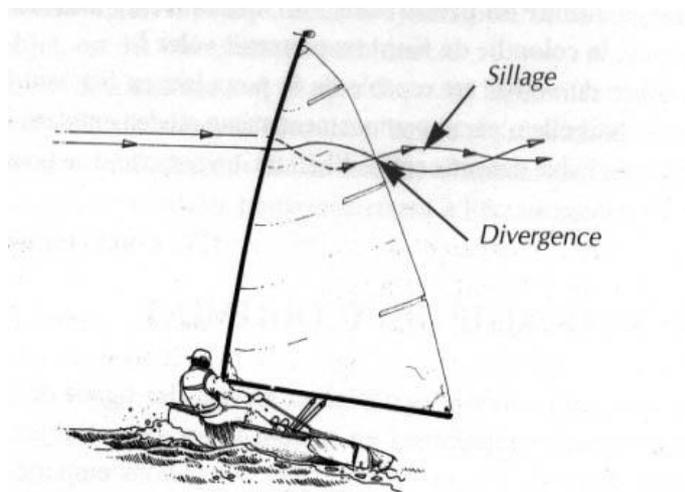


Fig171/ZZ212 (page25) : Traînée induite derrière une voile.

La traînée dans ses différentes formes est l'inévitable prix à payer pour obtenir de la portance. Si, par la portière, nous inclinons notre main vers le haut, nous sentirons une portance qui tend à la faire s'élever, liée à la déflexion du flux d'air vers le bas, mais nous sentirons toujours l'effet de la traînée qui tend à la repousser vers l'arrière.

Et si nous revenons à notre voile, la déflexion qu'elle provoque crée la portance, mais la couche limite qui s'y installe engendre de la traînée visqueuse. La courbure du profil, nécessaire à la portance, entraîne aussi une résistance à l'avancement (traînée de forme) tandis que ses dimensions finies génèrent des tourbillons marginaux à ses extrémités hautes et basses (traînée induite).

I – 8) Equilibre des forces appliquées au bateau

Ces concepts de portance et traînée s'appliquent aussi aux appendices, dérive et safran.

Une dérive ne devient efficace que si elle est mise en incidence par rapport à l'écoulement de l'eau, sinon elle n'oppose à l'écoulement qu'une traînée de forme et qu'une traînée visqueuse nuisibles. Une portance latérale au vent, qui empêche le bateau de dériver, ne se développe que si le bateau ... dérive.

En effet, considérons la figure ci-dessous qui représente la dérive d'un bateau qui navigue bâbord amures et qui donc dérape légèrement vers tribord, vers la droite sur la figure. On constate que l'angle qui apparaît entre la dérive ou la quille (axe du bateau) et la route effectivement suivie (l'angle d'attaque de l'écoulement sur l'appendice), génère une courbure pour l'écoulement, avec un intrados sous le vent et un extrados au vent : l'appendice en incidence n'est plus vu comme symétrique par l'écoulement. Ceci génère une portance au vent qui empêche le bateau de déraiper davantage, et qui l'équilibre sur sa route. Evidemment, pour une incidence (un angle de dérapage) donnés, la portance (l'efficacité anti-dérive) de l'appendice augmente avec la vitesse, de la même façon qu'un vent apparent plus fort exerce une force plus grande sur la voile. On peut donc remonter la dérive dans la brise au près, ce qui réduit également sa traînée. On peut aussi la remonter complètement au vent arrière (si le bateau est stable), qui est une allure où la composante latérale de la force aérodynamique est nulle.

La même portance se développe sur le safran. Elle sera supérieure si, du fait de l'ardeur du bateau, le barreur tire en permanence sur sa barre, augmentant ainsi l'incidence du safran. Le safran angulé d'un bateau ardent est donc plus efficace du point de vue anti-dérive, mais n'oublions pas l'inévitable contrepartie de cette augmentation de portance : l'augmentation de traînée !

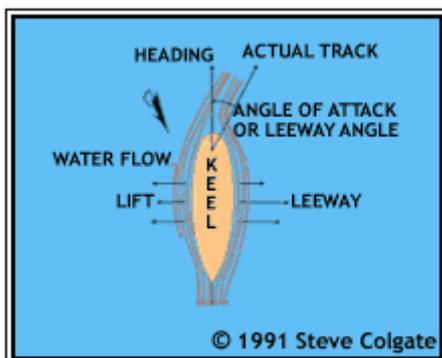


Figure 1

Fig62/ZZ68 : Portance générée par un appendice en incidence quand le bateau dérive.

Lorsque le bateau s'est lancé et qu'il a atteint une vitesse stable dans des conditions données, il ne subit donc plus d'accélération, ce qui signifie que la résultante des forces appliquées est nulle.

Pour expliciter davantage, on peut utiliser une autre décomposition de la force vélique, non plus en portance – traînée (selon la direction du vent apparent) mais en propulsion – dérive (selon l'axe longitudinal du bateau). Cette décomposition est illustrée sur la figure suivante :

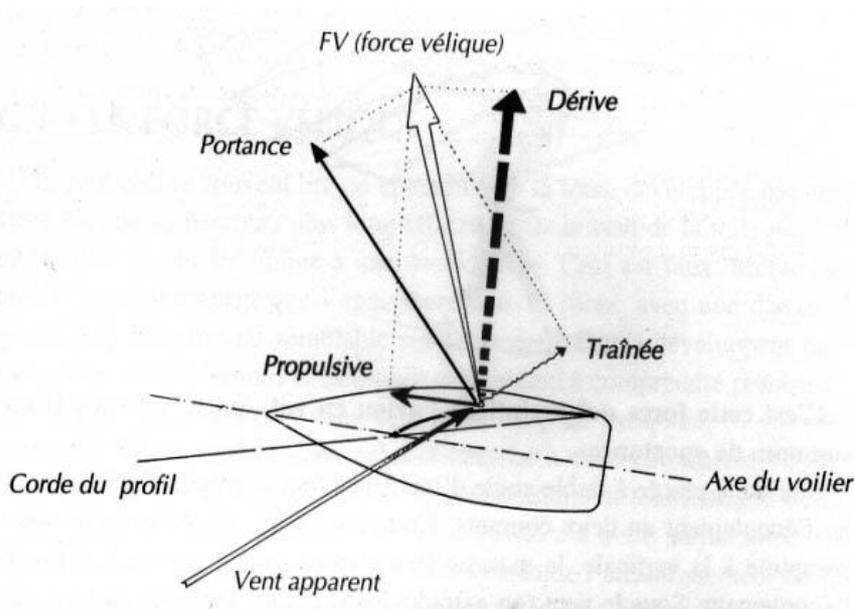


Fig200/ZZ212 page48 : Deux décompositions possibles pour la force vélique.

A l'équilibre, la force de propulsion est exactement contrebalancée par la résistance à l'avancement du bateau (les deux forces vertes sur la figure ci-dessous). La force de dérive est exactement contrebalancée par la force antidérive générée (essentiellement, car la coque y participe aussi un peu) par les appendices (les deux forces bleues sur la figure ci-dessous).

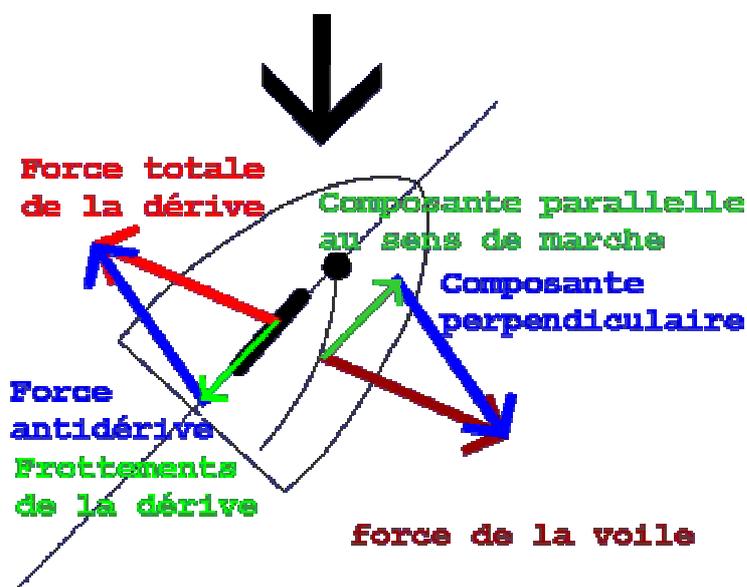


Fig9/ZZ2 : Equilibre des forces aérodynamiques et hydrodynamiques.

I – 9) Etude d'un profil isolé

I – 9 – 1) Paramètres de forme d'une voile

La forme d'une voile est définie, à une hauteur donnée, par deux pourcentages et trois angles. Ils sont tous mesurés par rapport à la corde du profil situé à cette même hauteur. Cette corde est définie par la ligne droite joignant le bord d'attaque et le bord de fuite.

On définit :

- la valeur du creux maximum, mesurée en pourcentage de la longueur de corde à la hauteur considérée ;
- la position de ce creux maximum, également mesurée en pourcentage de la longueur de corde à la hauteur considérée (voir figure ci-dessous) ;

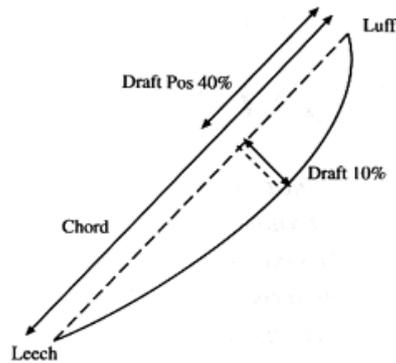


Fig25/ZZ9 : Définition du creux et de son emplacement.

- l'angle de vrillage *global* entre les différentes cordes de la voile, pris par rapport à la corde inférieure (sur la bordure), ou par rapport au vent apparent, ou encore, tel qu'illustré sur la figure ci-dessous, par rapport à l'axe longitudinal du bateau ;
- l'angle d'attaque, parfois appelé angle d'entrée, qui est l'angle que fait la tangente au profil à son bord d'attaque avec la corde du profil. Si par exemple cet angle augmente de bas en haut, nous avons un vrillage *d'attaque* (à ne pas confondre avec le vrillage global) ;
- l'angle de sortie, entre la tangente au profil à son bord de fuite et la corde du profil.

N'oublions pas, pour une grand-voile, que du point de vue aérodynamique le mât profilé tournant d'un multicoque de sport fait partie du profil d'ensemble. C'est donc cet ensemble mât – voile que nous devons prendre en considération lorsque nous effectuons les mesures de

ces paramètres.

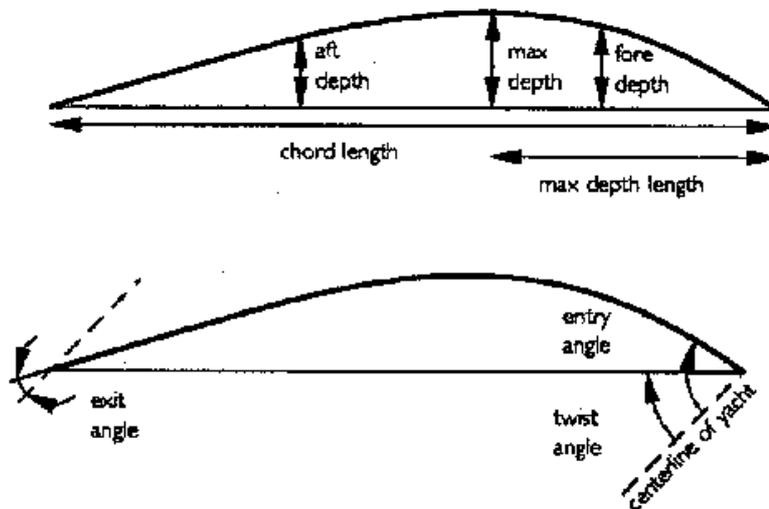


Fig68/ZZ73 : Définition des paramètres de forme d'une voile.

Un petit shareware disponible sur Internet, Sailform (Carlson Designs), permet d'obtenir directement ces paramètres, à partir de la photo numérisée d'une voile prise depuis la bôme en direction de la tête, dans les conditions de navigation. Ils décrivent la forme d'une voile à deux dimensions, dans une section située à une hauteur donnée. Pour décrire complètement la forme tridimensionnelle, il faut y ajouter la dimension verticale, à travers son allongement (rapport guindant / bordure) et la description de différentes sections situées à des hauteurs différentes, pour faire intervenir la répartition verticale du creux.

L'incidence donnée à la voile, via son braquage, n'est pas un paramètre intrinsèque de celle-ci, mais elle a une influence qu'on devine essentielle sur la portance et la traînée. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence de ces différents paramètres sur la force aérodynamique.

I – 9 – 2) Polaire vélique portance – traînée (C_x/C_z)

Sur des maquettes en bassin de carène ou en soufflerie, nous pouvons mesurer, pour une incidence donnée, l'intensité de la force aérodynamique résultante et sa direction d'application. La connaissance de ces deux informations nous permet de décomposer, pour chaque valeur de l'incidence, la force aérodynamique en portance (perpendiculaire au vent apparent) et traînée (parallèle au vent apparent). La portance est souvent quantifiée par le coefficient de portance C_z et la traînée par le coefficient de traînée C_x .

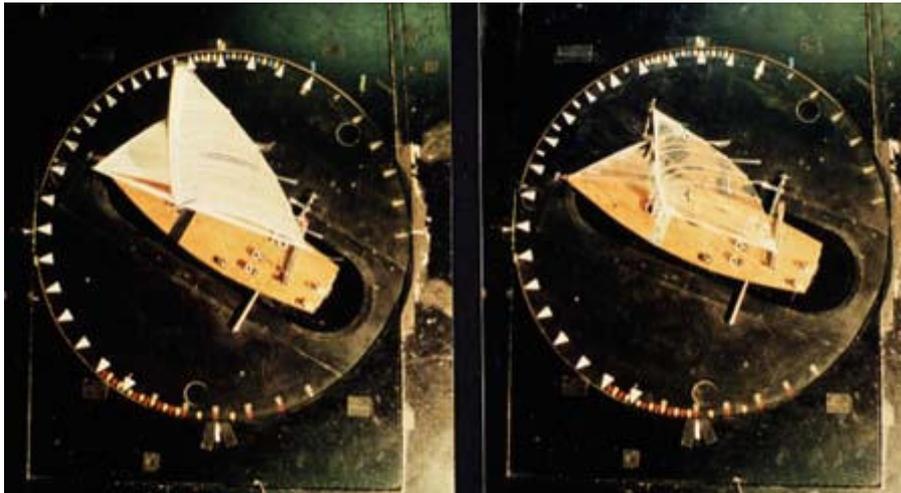


Fig49/ZZ29 : Tunnel à vent pour la mesure des forces véliques.

Une représentation unique peut matérialiser tous ces résultats : c'est la *polaire vélique*.
Puisqu'elles sont perpendiculaires, portance et traînée peuvent être représentées sur deux axes orthogonaux. La force aérodynamique, ou force vélique, est l'addition vectorielle de ces deux composantes. La portance est la projection de la force vélique sur l'axe vertical de la polaire vélique et la traînée sa projection sur l'axe horizontal.
Pour chaque valeur de l'incidence, l'intensité de la force vélique est représentée par un vecteur de longueur proportionnelle, tracé depuis l'origine du graphe. L'angle de ce vecteur avec la verticale, à ne pas confondre avec l'angle d'incidence, est déterminé par les valeurs prises, pour l'incidence considérée, par la portance et la traînée. Plus le vecteur pointe vers le haut, plus le rapport C_z/C_x (portance/traînée) est grand.
Si on relie l'extrémité de tous ces vecteurs, on obtient une courbe qui est la polaire vélique proprement dite. La figure ci-dessous est un exemple d'une telle courbe où seulement deux vecteurs - force vélique, pour les incidences 20° et 45° , ont été représentés. L'incidence y figure en tant que paramètre.

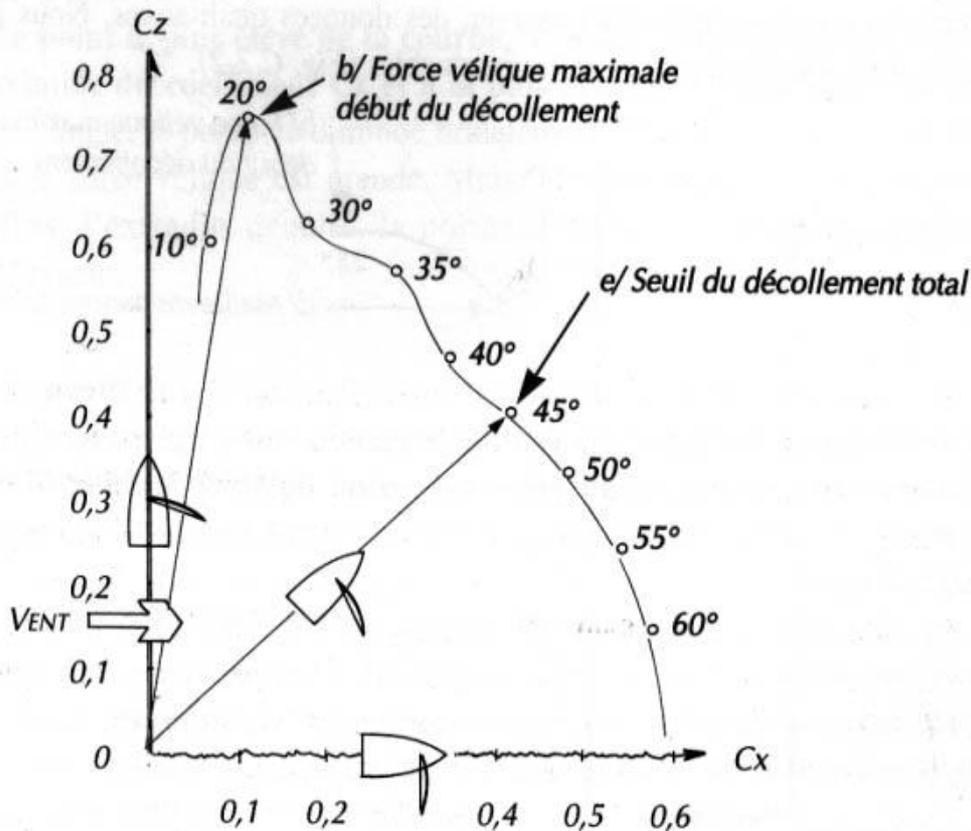


Fig1/ZZ212 page63 : Polaire CX/CZ d'un profil isolé. (à prolonger vers les incidences faibles, figurer les points A, B, C, D, E caractéristiques)

Regardons d'un peu plus près, en fonction de l'incidence, les valeurs prises par la portance et la traînée.

Aux incidences très faibles, la voile ne s'établit pas, seule la traînée s'applique et la portance est quasiment nulle. Les forces véliques correspondantes n'ont donc pas été représentées sur la figure.

Lorsque la voile se met en forme (point A), sa traînée diminue alors que sa portance augmente, la courbe « monte » inclinée vers la gauche. En effet nous devinons bien que la traînée d'une voile en drapeau est plus importante que celle d'une voile établie... Ce point est aussi celui où la valeur absolue de la traînée est la plus faible : c'est là qu'elle freine le moins l'écoulement : nous pouvons avoir intérêt à rechercher ce point de fonctionnement dans la brise, où nous devons réduire l'incidence pour réduire la portance donc aussi la gîte, mais où tout frein est particulièrement nuisible puisque le bateau va vite !

A partir du point de mise en forme de la voile (ici vers 10° d'incidence), lorsque l'incidence augmente, la portance augmente beaucoup sans que la traînée augmente énormément : la tangente à la courbe est presque verticale, la courbe « monte » presque tout droit.

On passe alors par le point B où l'angle entre la force vélique et la verticale, donc le rapport portance / traînée, est le plus important. La finesse, au sens aérodynamique, est maximale pour la voile. C'est théoriquement le meilleur angle d'incidence au près... si nous ne devons pas vaincre la résistance à l'avancement de la carène et si le vent était parfaitement stable.

Dans la pratique, il y a le plus souvent besoin d'une puissance (d'une portance) supérieure à celle obtenue en ce point B, ce qui conduit à adopter des incidences plus grandes.

Au-delà de ce point B, portance et traînée continuent d'augmenter toutes deux, mais le rapport portance / traînée (l'angle du vecteur force vélique) diminue.

Au point C, la tangente à la polaire est de 45° , la traînée se met donc à augmenter plus vite que la portance. Nous n'avons donc pas intérêt, au près où la traînée est opposée au sens du déplacement, à augmenter davantage l'incidence, pour appuyer davantage sur le frein que sur l'accélérateur ! Ce point C est donc le point où on tire les performances maximales de la voile au près, et nous avons intérêt à rechercher l'incidence correspondante... si le vent apparent pas trop fort nous permet de maîtriser la composante de gîte.

Cette augmentation de traînée est bien évidemment due à l'apparition progressive des décrochages à l'extrados, au bord d'attaque et au bord de fuite.

Ensuite et jusqu'au point D la portance augmente encore, bien que péniblement, et la traînée aussi jusqu'à l'augmentation brutale du décrochage. C'est en ce point, au sommet de la polaire, que la portance est maximale. Ce point de fonctionnement sera plus spécifiquement recherché aux allures portantes où la traînée s'oppose beaucoup moins à l'avancement du bateau (le vent apparent se retrouvant par le travers, ou même en arrière), du moins tant que la portance maximale développée ne se traduit pas par un enfournement royal !

Après ce point on a une redescente brutale de la courbe, une chute de force vélique essentiellement à travers la diminution de sa composante de portance, liée à la généralisation assez brutale des décrochages extrados. Dans le même temps, la traînée (projection sur l'axe horizontal) continue à augmenter, compensant plus ou moins la chute de portance.

Après le point E, seuil du décrochage total, la voile navigue en poussée avec une portance qui tend vers zéro et une traînée qui tend vers la valeur de la traînée de forme de la voile, qui est maintenant établie en travers du vent apparent. Ainsi, au vent arrière, la portance est nulle mais ce n'est pas pour autant que le bateau n'avance pas : il est propulsé par la traînée de forme de la voile, maintenant bien orientée en direction du cap suivi.

En multicoque de sport où on tire des bords de largue au vent arrière, on n'explorera quasiment jamais la polaire au-delà du point D.

Nous pouvons constater qu'au près, selon le besoin de puissance (vent instable et faible, eau agitée) ou de faible traînée (eau plate, conditions stables, brise) le point de fonctionnement choisi sur la polaire, donc concrètement l'incidence, est variable. Usuellement au près on se situe toujours entre les points B (recherche de cap, diminution de traînée) et C (recherche de vitesse et de puissance).

I – 9 – 3) Influence de la quantité de creux

Il est temps maintenant d'étudier l'influence de l'un des paramètres de forme d'une voile : la valeur du creux maximum.

Voici les trois polaires véliques obtenues sur trois profils d'envergure infinie isolés, placés en écoulement stable. L'influence de la traînée induite, que nous étudierons plus tard, n'est donc pas présente dans cette expérience. Les trois valeurs de creux retenues sont 1/20 (5%), 1/13,5 (7,4 %) et 1/7 (14,3%).

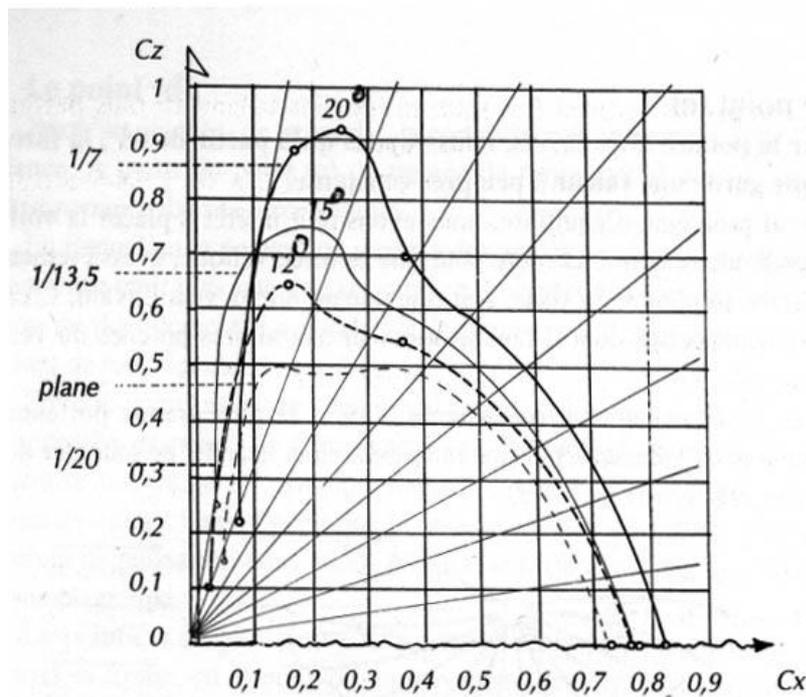


Fig189/ZZ212 page68 : C_x/C_z en fonction de l'importance du creux. (**y remettre les points B et C mais on ne connaît pas les incidences respectives**).

On constate que, globalement, la force vélique développée par le profil le plus creux est la plus grande. En finesse, donc en écoulement orienté (laminaire et turbulent) il défléchit davantage le vent, et selon Bernoulli il génère une plus grande différence de vitesse entre ses deux faces. En poussée, après le seuil de décrochage maximal, les forces véliques développées par les trois profils sont proches, car la courbure d'un profil décroché n'a logiquement plus d'influence sur les écoulements. C'est la traînée de forme, proportionnelle à la surface en plan, qui devient prépondérante sous ces incidences très élevées.

Mais dans la zone d'incidences faibles, avant l'apparition d'un décrochage généralisé, on peut faire des observations intéressantes :

- plus le creux augmente, plus l'incidence où on obtient la puissance (portance) maximale est importante. Ceci revient à dire plus concrètement que pour obtenir la puissance maximale, il faut border davantage une voile creuse qu'une voile plate. Ceci se conçoit aisément si on remarque que pour une même position du creux maximum, augmenter la valeur du creux maximum revient à augmenter l'angle d'entrée de la voile (se référer à nouveau à la fig68/ZZ73 ci-dessus). Cette entrée plus ronde pour la voile plus creuse oblige à la border davantage pour que le bord d'attaque s'inscrive correctement dans les lignes de courant du vent apparent. A défaut, la bulle de séparation turbulente gagne du terrain à l'intrados et la voile a tendance à s'inverser au bord d'attaque.

- Aux faibles angles d'incidence, les profils les plus fins ont un meilleur rapport portance / traînée (leur polaire « monte » plus vite). Donc, au près, si le besoin de portance n'est pas très important (la surface de toile est suffisante pour le poids à déplacer, l'eau est plate, le vent est assez fort), on pourra naviguer autour du point de fonctionnement B, donc en serrant beaucoup le vent, avec une voile fine. Avec une voile plus creuse, à ces incidences faibles, on pourrait sans doute obtenir une portance similaire, mais avec plus de traînée.

Inversement, si nous devons sacrifier le cap pour la puissance demandée par un bateau lourd et un clapot difficile, nous choisirons donc une incidence plus importante, pour laquelle les profils plus creux sont plus performants. Mais quel que soit le profil choisi, on ne devra pas dépasser le point C à partir duquel la traînée (le frein) augmente plus vite que la portance. Au portant où le réglage d'incidence n'est pas un souci on aura aussi intérêt, généralement, à donner du creux pour obtenir plus de puissance.

- on constate aussi sur cette figure que plus le profil est creux, plus la plage utile d'incidences pour le près (comprise entre les points B et C) est large. Ceci signifie que les voiles creuses pardonnent davantage d'erreurs au régleur inattentif, tandis qu'une faible erreur d'incidence conduit plus facilement à ruiner la performance d'une voile fine.

On retrouve ici un fait connu du régatier : les voiles fines exigent plus de concentration !

Faisons enfin deux rappels, qui ne se voient pas sur les polaires mais qui ont leur place ici :

- nous avons vu que plus le profil est creux plus les décrochages extradados interviendront tôt, du fait de l'inertie des molécules qui ne peuvent subir une contrainte de déflexion trop élevée. Ceci peut être pénalisant aux allures portantes puisque les angles de descente peuvent s'en trouver réduits.

- Enfin, nous l'avons déjà dit, dans la brise où la vitesse d'écoulement est plus grande, on réduit le creux pour moins gêter, certes, mais aussi pour retarder le décrochage, donc la traînée. Dans le même esprit, plus le bateau est rapide (parce que léger, surtoilé ou peu résistant à l'avancement), plus son vent apparent sera fort, plus sa voilure doit être fine. Il a davantage besoin d'une réduction de traînée que d'une augmentation de puissance, à l'exception peut-être des phases de relance (départ, sorties de manœuvres, sorties de vagues) où un creux plus important, synonyme de plus de puissance donc d'accélération, réduit le temps perdu.

Nous pouvons tirer de tout cela quelques conclusions schématiques, utiles pour le régleur :

- au près sur eau plate, avec un bateau suffisamment toilé pour le vent, il y a intérêt à serrer le vent, à incidence faible, donc à adopter un profil fin, d'autant plus que le bateau est rapide et/ou le vent apparent fort. Ces profils fins serrent mieux le vent du fait de leur angle d'attaque moins élevé, ils ont un meilleur rapport portance / traînée, mais ils sont plus « pointus » et demandent plus de concentration au régleur. Attention, trop de finesse entraîne une chute de portance : il en faut quand même un minimum même pour un bateau naturellement rapide. De plus, on constate sur les polaires ci-dessus que le rapport portance / traînée du profil 1/20 n'est pas forcément meilleur, aux incidences faibles, que celui du profil 1/13,5...

Si pour des raisons tactiques on est conduit à faire de la vitesse à incidence plus grande, on pourra, tant que la gête peut être maîtrisée, creuser un peu le profil, surtout si le bateau est lent ou sous-toilé.

- au près sur eau agitée, il faudra une puissance supérieure pour passer le clapot, conduisant à des incidences plus fortes pour lesquelles les profils plus creux sont plus efficaces. On creusera un peu les profils, d'autant plus que le bateau passe mal, mais il faudra maîtriser la gête et rester en dessous de l'incidence de décrochage extradados.

- au portant, on peut naviguer à la limite du décrochage extradados (tant qu'on maîtrise l'enfournement), donc à portance maximale, car la traînée est alors beaucoup moins opposée au sens de la marche. Creuser la voile sera donc généralement bénéfique. Ceci dit, en

multicoque de sport, la vitesse est tellement élevée (surtout par la pratique du grand-largue sur une coque ou l'utilisation d'un spi sur les bateaux qui en sont pourvus) que la vitesse du vent apparent, donc de l'écoulement sur la voile, diminue assez peu par rapport à sa valeur de près. Cette vitesse de flux qui reste élevée entraîne un risque important de décrochages à l'extrados, qui dégraderaient les angles de descente. Puisque les profils creux sont plus sensibles à ces décrochages, on est ainsi conduit à creuser les profils, mais sans excès, surtout si la voile est déjà relativement creuse naturellement. Un bateau plus lent (dériveur ou croiseur) creusera beaucoup plus largement son plan de voilure.

I – 9 – 4) Influence de la répartition horizontale du creux

Reprenons notre profil d'envergure infinie 1/13,5 (7,4%) et positionnons son creux soit au tiers avant (33%) soit au milieu (50%) soit au tiers arrière (67%).

La figure ci-dessous montre la partie utile des trois polaires correspondantes, avant la généralisation des décrochages extrados.

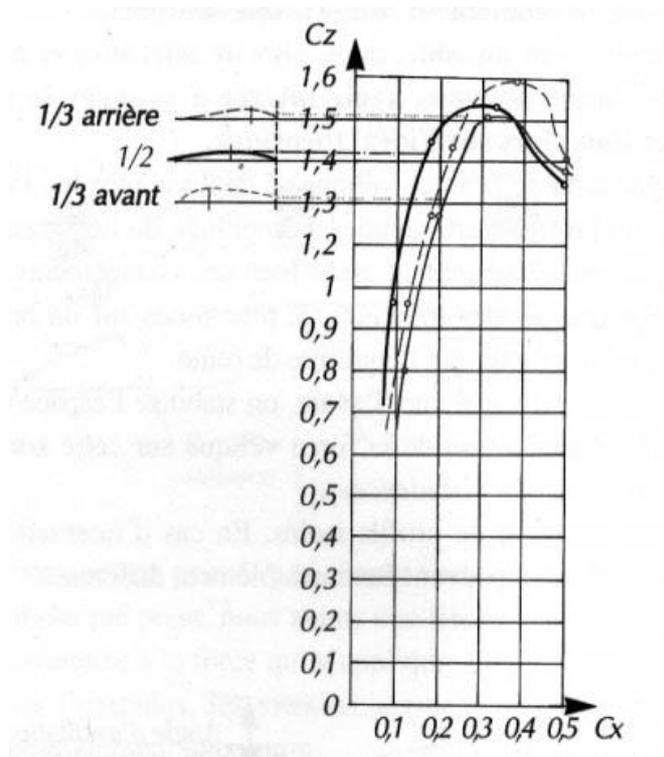


Fig2/ZZ112 page73 : Polaire CX/CZ en fonction de la répartition horizontale du creux.
(rajouter le point B pour 50 %)

On constate que le profil 67% développe la plus forte puissance (le sommet de sa polaire est plus haut) mais au prix d'une plus forte traînée (le sommet de sa polaire est plus à droite). Tant qu'on peut prévenir son décrochage, il sera donc théoriquement plus efficace aux allures portantes où la traînée est moins mal orientée. Il possède cependant l'inconvénient majeur d'obliger le flux à ralentir sur une plus courte distance (entre l'étranglement et la chute) donc de générer un décrochage rapide qui le rend impropre à l'utilisation. Au près, un creux reculé est trop puissant et constitue, par sa forte traînée, un frein important.

Le profil 50% possède le meilleur rapport portance/traînée vers son point B, dans la zone des faibles incidences. Il est donc théoriquement meilleur au près. Cela dit, même si les

incidences ne sont pas représentées sur la figure ci-dessus, on a observé que sa plage d'utilisation (gamme d'incidences entre point B et point C) est relativement restreinte. Ce type de profil devra donc plutôt être recherché dans des conditions d'écoulement où l'incidence peut être facilement maîtrisée, au près sur eau plate et par vent stable par exemple.

Le profil 33%, comparé au profil 50%, présente cinq différences essentielles.

- 1) Son rapport portance / traînée est moins bon aux faibles incidences (il est donc théoriquement moins bon au près).
- 2) Sa portance maximale est inférieure (il est donc théoriquement moins bon au portant).
- 3) Même si les incidences ne sont pas représentées, on a observé que son incidence de portance maximale est plus élevée (on doit le border plus pour en obtenir la portance maximale). On retrouve ici l'intervention de l'angle d'entrée du profil : plus le creux avance, plus l'angle d'entrée est grand, et plus il faut border pour insérer correctement le bord d'attaque dans l'écoulement. Ceci peut être un inconvénient au près mais un avantage au portant car pour un braquage (un angle voile / axe longitudinal) donnés, mettre le profil en incidence plus grande signifie descendre davantage sous le vent. Ce profil peut descendre ainsi moins vite (moins de portance) mais plus bas que le profil 50%.
- 4) Son angle limite de décrochage est retardé, car le nécessaire ralentissement du flux extradados, après l'étranglement maximal, s'effectue sur une plus grande distance, il est moins brutal. C'est ce qui fait dire à certains qu'avancer le creux réduit la traînée : ceci n'est vrai qu'aux fortes incidences, vers l'apparition des décrochages extradados. Donc au portant, même si sa portance est inférieure, il permettra de descendre plus avec une plus grande tolérance aux fluctuations de direction du vent apparent ou aux erreurs de barre.
- 5) Aux faibles incidences, utiles pour le près, on observe que sa plage d'utilisation (gamme d'incidences entre son point B et son point C) est plus large. Par conséquent ce profil sera plus facile à maîtriser, il sera plus tolérant dans des conditions d'écoulement instable (vent mal établi, clapot). De plus, dans ces conditions qui demandent nécessairement des caps moins serrés, le fait que la plage d'utilisation de ces profils au creux avancé soit décalée vers les incidences plus grandes (différence 3) ne constitue plus un inconvénient aussi sérieux que sur l'eau plate où il faut pointer davantage.

On peut donner une explication géométrique et physique aux deux derniers points que nous venons d'évoquer, donc à la tolérance supérieure de ce profil, par une stabilisation plus grande du point d'étranglement maximal quand l'incidence du profil varie en écoulement instable. Ceci entraîne le maintien d'une distance de ralentissement relativement élevée pour le flux à l'extrados, donc retarde le seuil de décrochage.

Sur la figure ci-dessous, on constate que la plage de déplacement $a - b$ du point d'étranglement, lorsque l'incidence varie, est plus réduite pour ce type de profil. Rappelons que la mise en turbulence de la couche limite intervient juste en aval des plus grandes vitesses, donc après ce point d'étranglement, et qu'une couche limite turbulente est moins sensible au décrochage.

Distance de ralentissement maintenue plus grande et mise en turbulence plus rapide sont les deux justifications physiques de cette tolérance plus grande des profils à creux avancé.

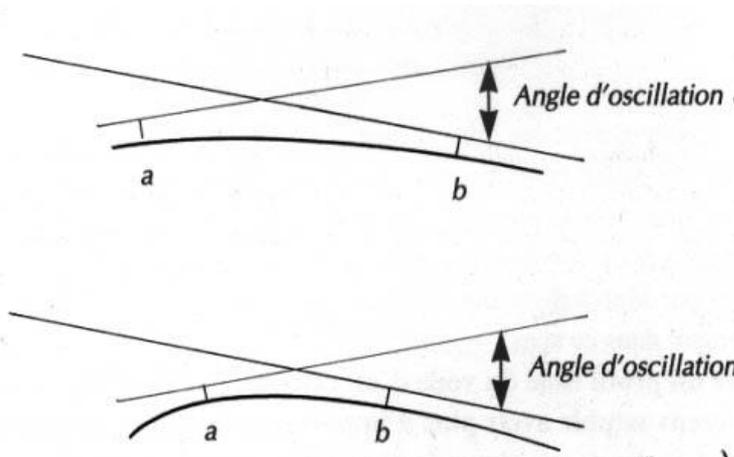


Fig201/ZZ212 page74 : Stabilisation du point d'étranglement par un profil au creux avancé.

Schématiquement, avancer le creux réduit la puissance, augmente la tolérance, réduit les possibilités de cap. Selon les conditions, nous sommes amenés à privilégier l'un ou l'autre de ces impératifs, ce qui donne les lignes de conduite générales suivantes :

- au près sur eau plate on visera plutôt un profil 50% avec un cap serré, sur eau agitée un creux plus avancé, et cela quelle que soit la force du vent.

- Au portant il est très difficile de tirer des conclusions claires. Les profils au creux avancé peuvent théoriquement descendre davantage du fait de leur forme, mais les profils 50%, du fait de leur plus grande portance, permettent une plus grande vitesse, donc un refus du vent apparent... qui permet aussi de descendre davantage. Dans des conditions maniables, seuls des essais intensifs permettront de déterminer le bon profil pour un bateau donné.

Il arrive cependant, au-delà d'une certaine force de vent, un moment où la vitesse plafonne du fait de la résistance à l'avancement de la carène et/ou de la perte de maîtrise du couple d'enfournement par l'équipage. Dans ces conditions, il est inutile de chercher une puissance supérieure, un creux plus avancé permettra de descendre davantage à la même vitesse plafonnée. Sa tolérance supérieure permettra également de mieux absorber les fluctuations d'incidence générées par le clapot qui n'aura pas manqué de se lever...

I – 9 – 5) Les profils épais asymétriques

Les profils épais asymétriques ont des avantages certains sur les profils conventionnels. Leur intrados étant plan au lieu d'être concave, la bulle de séparation turbulente située à la jonction mât-voile d'un profil classique (qui ruine la performance de son intrados), n'est pas présente. Rappelons (paragraphe I – 5) que cette bulle de séparation, sur un profil classique, s'étend à incidence trop faible et peut causer l'inversion du profil.

Du fait de son absence, on peut donc obtenir, sur un profil épais, la même portance à une incidence plus faible – et avec moins de traînée.

Aux incidences plus fortes, il y a gain de portance lié à ce meilleur fonctionnement de l'intrados.

Concrètement, au près serré, on peut donc choquer le profil pour orienter la force vélique davantage sur l'avant (figure ci-dessous) donc avec plus de propulsion et moins de gîte.

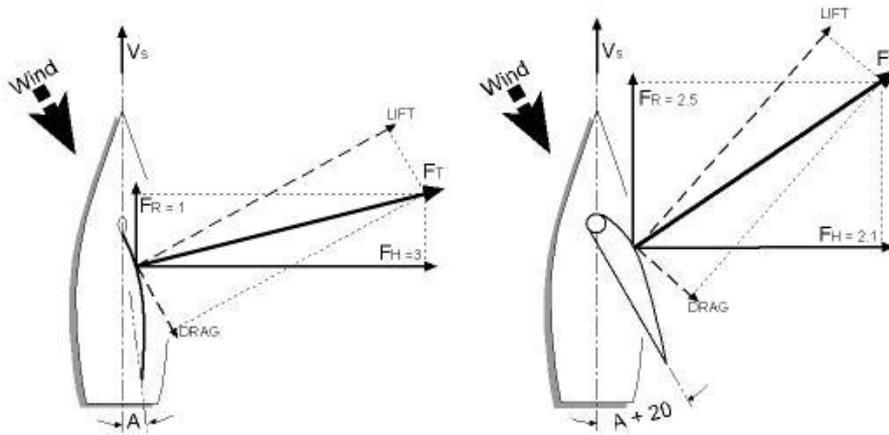


Fig43/ZZ19 : Intérêt d'un gréement aile (plus grande portance à plus faible incidence).

Et au portant, ces profils délivrent une puissance bien supérieure.

I – 9 – 6) Etude 3D d'un profil isolé (incluant la dimension verticale)

Tout ce que nous avons décrit précédemment négligeait le fait que les voiles n'ont pas une hauteur infinie. Nous savons qu'il y a différence de vitesse, donc de pression, entre les deux côtés de la voile. Vers la bordure, le flux d'intrados, attiré et accéléré par les basses pressions qui règnent à l'extrados, cherche à contourner la voile par le bas, au lieu de gentiment poursuivre son chemin vers la chute comme nous l'avons supposé jusqu'ici.

Un obstacle peut cependant empêcher ce contournement néfaste, (par exemple le pont ou le trampoline balayés par la bordure de grand-voile).

Le même phénomène existe également en tête de la voile où la direction du flux d'intrados a tendance à s'infléchir vers le haut.

I – 9 – 6 – 1) La marginalité

A l'intrados le flux diverge, défléchi et accéléré vers le bas au voisinage de la bordure et vers le haut au voisinage de la tête.

A l'extrados, on a le mouvement inverse. Lorsqu'on s'éloigne du cœur de la voile, le flux est de plus en plus défléchi vers celui-ci.

Les directions d'écoulement des deux flux, quasiment parallèles à mi-hauteur, diffèrent de plus en plus en direction des extrémités haute et basse.

Regardons d'un peu plus près ce qui se passe :

Loin des deux extrémités de la voile, au bord de fuite où les deux flux se rejoignent, leurs directions d'écoulement de moins en moins parallèles génèrent des tourbillons, appelés *tourbillons libres*. Ils consomment de l'énergie et augmentent donc la traînée.

Près des extrémités où les deux directions d'écoulement diffèrent le plus, ces tourbillons sont beaucoup plus importants et génèrent donc une traînée plus grande : ils sont appelés *tourbillons marginaux*. C'est aussi à cet endroit que l'aspiration du flux intrados vers l'extrados est la plus forte, diminuant sensiblement la différence de vitesse entre les deux flux, donc dégradant la performance du profil. Cette différence de pression qui diminue entraîne une réduction de la succion extrados et de la pression intrados qui maintiennent la couche limite en place : nous avons un décrochage plus précoce et une augmentation supplémentaire de traînée.

Il n'y a pas de différence de nature ou d'origine entre tourbillons libres et tourbillons marginaux, seulement une intensité et une localisation différentes.

La traînée induite d'un profil, que nous avons déjà mentionnée, est due à l'apparition inévitable de ces tourbillons libres et marginaux. Ces derniers, plus violents, en constituent logiquement la plus grande part. Elle représente la majeure partie de la traînée totale d'une voile. Rappelons que dans l'étude bidimensionnelle qui a précédé, elle n'a pas été prise en compte dans les mesures de force vélique, qui ont été effectuées sur des profils d'envergure infinie.

La figure ci-dessous donne une représentation de la traînée induite sur une voile isolée. On y voit les deux tourbillons marginaux, de bordure et de tête. Du fait de la déflexion des flux que nous venons de décrire, ces deux tourbillons tournent à contre-sens l'un de l'autre. Puisque le flux intrados a tendance à s'échapper vers le flux extrados, on voit aussi sur cette figure que ces deux tourbillons ont tendance à s'opposer à la déflexion générée par la courbure de la voile – ils « tirent » l'écoulement général sous le vent, tendent à le faire revenir à sa direction première. Ceci revient à réduire localement, aux extrémités, l'incidence de la voile, ou en d'autres termes à y générer un refus du vent apparent.

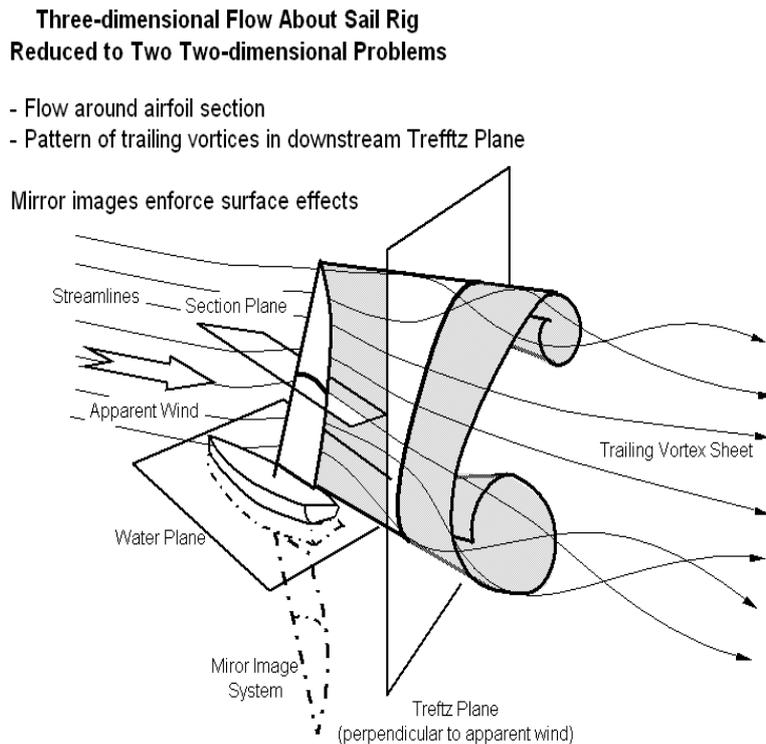


Fig19/ZZ5 : Tourbillons marginaux sur une GV isolée.

Les grands allongements présentent l'avantage de réduire la proportion de surface contaminée par les tourbillons marginaux, donc la traînée induite. Effectivement, les polaires véliques montrent que les grands allongements ont un meilleur rapport portance / traînée aux faibles incidences : ces profils sont donc plus performants au près. Par contre, aux incidences plus grandes exploitables au portant, ils sont moins puissants.

Par contre, ils seront plus sensibles à la perturbation générée par le mât, surtout si celui-ci n'est pas un mât profilé tournant. En effet cette perturbation contamine toujours la même longueur de voile derrière le mât, mais sur une hauteur plus grande.

Par ailleurs, cette perturbation se fera sentir davantage sur les profils plus courts du haut, d'où un premier intérêt des mâts rétreints.

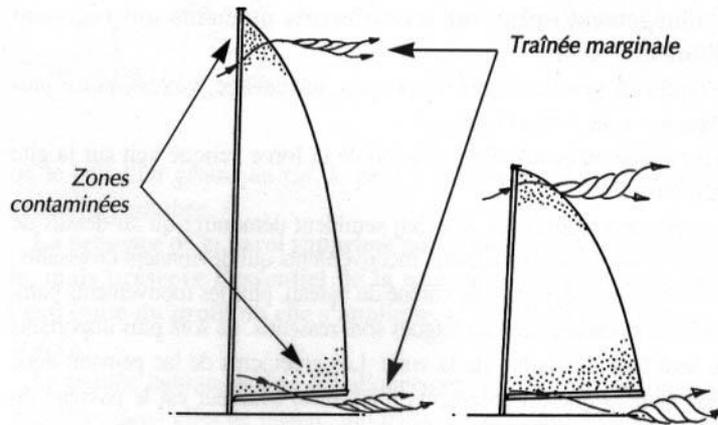


Fig174/ZZ212 page 85 : Avantages de l'allongement pour la réduction des tourbillons marginaux.

Il existe heureusement des moyens de réduire cette néfaste traînée induite, soit par le bon dessin de la voile, soit par son bon réglage.

Si, au lieu d'une voile triangulaire, nous dessinons une voile à fort rond de chute, ou même « square-top », nous positionnons la chute plus verticalement.

La chute inclinée des voiles triangulaires favorise la déflexion vers le haut du flux d'intrados. Il lui est ainsi relativement facile de s'échapper vers l'extrados. Sur une chute verticale, la déflexion vers le haut du flux intrados est moins prononcée : le flux est davantage contraint à suivre une trajectoire horizontale. Arrivant sur la chute au bord de fuite, pour s'échapper à l'extrados, il devrait s'écouler davantage à contre-courant du flux général, ce qui lui est plus difficile. Loin des extrémités, on a donc réduction des tourbillons libres. Par contre, en tête, la tête horizontale engendre probablement un tourbillon marginal plus important.

La perturbation générée par le mât sera de même valeur sur une square-top que sur une voile classique, du moment que la hauteur du mât et la surface de la voile sont maintenues constantes.

Mais les square-top ont deux autres avantages. Nous verrons au paragraphe I – 9 – 6 – 2) suivant que le vent adonne de plus en plus au fur et à mesure qu'on s'élève dans la voile. Les profils supérieurs d'une square-top, plus longs, exploiteront mieux ce vent adonnant et en tireront plus de portance. D'autre part, dans les vents forts, le vrillage naturel de la corne, plus facilement entraînée sous le vent, permet de réguler de manière quasi-automatique la puissance dans les hauts, là où elle est la plus néfaste au niveau de la gîte. Ces voiles demandent donc moins d'ajustements permanents au régleur, moins d'efforts physiques.



Fig42/ZZ18 : GV Square-top (Nacra 6.0, Calvert Sails).

Le vrillage de la tête, en réduisant l'incidence locale, réduit la différence de pression entre les deux côtés de la voile, à l'origine du tourbillon marginal. Ce faisant, nous réduisons la puissance, mais aussi et surtout la traînée, ce qui est le but recherché dans la brise. L'affinement de la partie supérieure réduit lui aussi l'écart de pression et joue dans le même sens.

Il y a intérêt à affiner et vriller la partie supérieure de la voile pour réduire le tourbillon marginal, surtout dans la brise.

I – 9 – 6 – 2) Effet triangulaire et répartition verticale du creux

Considérons une voile de forme triangulaire parfaite, positionnée avec sa base horizontale, et donc avec un guindant et une chute inclinés (le génois dans la figure ci-dessous).

L'étude en soufflerie de cette voile donne le résultat assez surprenant suivant : à l'exception de l'extrémité supérieure prise dans le tourbillon marginal, la différence de pression, donc de vitesse, entre les deux côtés du profil augmente régulièrement de bas en haut, comme le montre la figure ci-dessous. La ligne de séparation entre les flux extrados et intrados est ainsi décalée davantage vers le vent, l'adonnante d'attaque augmente de bas en haut de la voile.

Ce résultat s'explique encore par l'effet de la viscosité. Les profils inférieurs plus longs défléchissent l'écoulement sur une plus grande longueur. Du fait de la viscosité, ils influencent, de proche en proche, les écoulements des profils supérieurs. Le profil supérieur voit ainsi l'adonnante d'attaque générée par le profil inférieur, plus long, placé sous lui. Pour ce profil supérieur, cette adonnante d'attaque est située plus en amont, plus en avant dans l'écoulement. Il y ajoute sa propre déflexion qui tend encore à augmenter l'adonnante d'attaque. L'angle d'incidence globale des profils supérieurs doit donc être plus grande – ou bien leur angle d'entrée supérieur, pour qu'ils puissent s'insérer correctement dans l'écoulement.

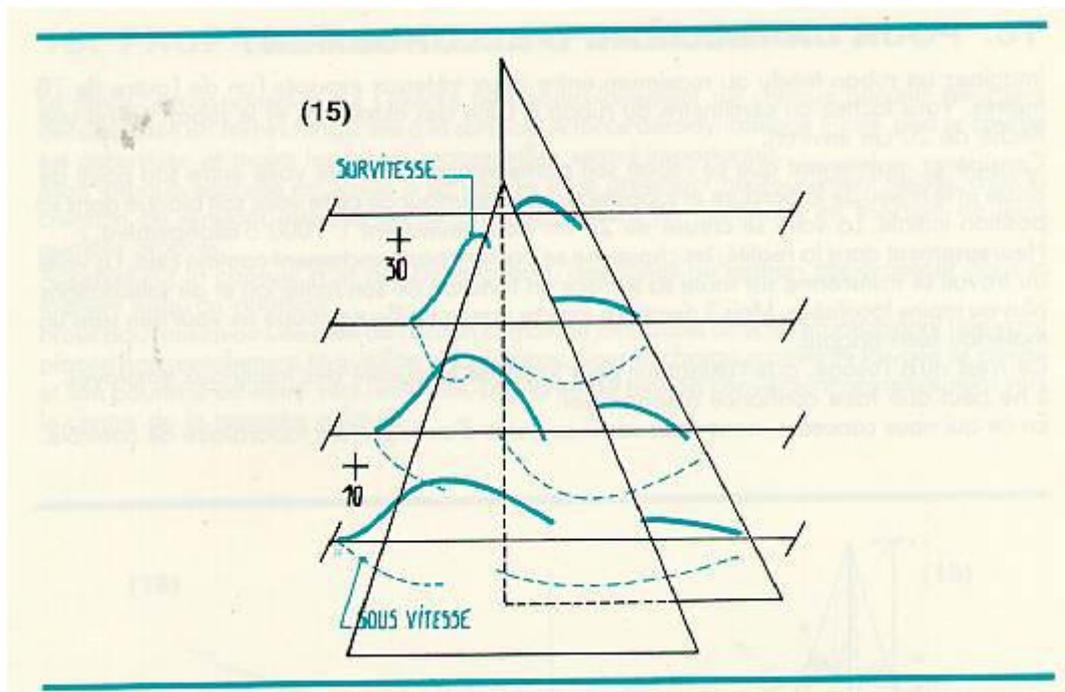


Fig65/ZZ1 : Effet triangulaire impliquant creusement ou vrillage des hauts.

Pour que la voile travaille correctement, on aura donc le choix entre trois solutions :

- vriller les profils supérieurs pour réduire leur incidence globale ;
- creuser davantage les profils supérieurs pour augmenter leur angle d'entrée. Mais ceci comporte, nous l'avons vu, des risques plus grands de décrochage, et amplifie le tourbillon marginal ;
- avancer le creux des profils supérieurs pour augmenter leur angle d'entrée.

La deuxième solution peut être envisagée par vent faible : les risques de décrochage induits par une courbure plus forte y sont plus faibles, le gradient vertical de vitesse de vent est généralement plus important (par freinage accentué du vent par l'eau) : on peut avoir intérêt à capter un vent plus fort en haut, avec des profils plus puissants.

La répartition verticale du volume ressemblera alors à ceci :

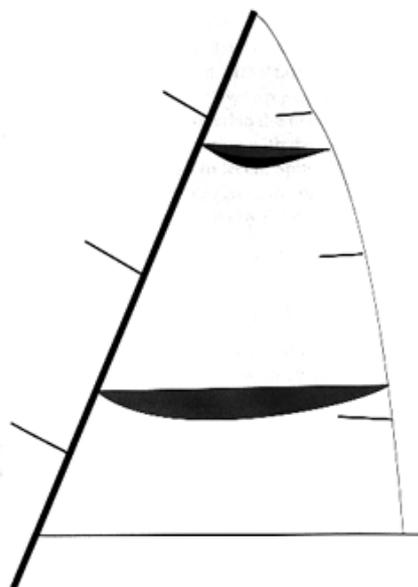


Fig29/ZZ9 : Répartition verticale souhaitable du creux (avant la surpuissance).

Par vent plus fort, on doit chercher à réduire à la fois la traînée et la portance des profils supérieurs. On combinera alors, selon le bateau et la coupe de la voile, avancement du creux, affinement et vrillage. La voile possède son creux maximal au milieu et s'affine vers ses extrémités, sa répartition verticale de volume se rapproche de la fameuse « charge elliptique » connue pour optimiser le rapport portance / traînée.

Nous avons déjà vu que la quète arrière, favorisant une mise en turbulence de la couche limite plus précoce au bord d'attaque, retarde le seuil de décrochage, donc augmente la tolérance. Mais elle possède aussi deux autres avantages.

Le premier est lié aux tourbillons libres sur la chute : en inclinant le mât vers l'arrière, nous rendons la chute plus verticale, et nous avons vu que ceci réduit les tourbillons libres.

Le deuxième est lié à l'effet triangulaire : en inclinant le guindant, les profils inférieurs génèrent une adonnante d'attaque plus en amont pour les profils supérieurs qui travaillent d'autant mieux.

Mais les barreurs de Hobie, et sans doute aussi beaucoup d'autres, savent bien qu'un excès de quète arrière réduit aussi la puissance, il convient donc de ne pas aller trop loin...

1 – 9 – 6 – 3) Gradient de vent et vrillage

De bas en haut de notre voile, le vent apparent n'est pas le même. Du fait de la friction, la vitesse du vent réel est nulle au voisinage immédiat de la surface de l'eau. Elle augmente progressivement avec l'altitude (couche limite terrestre, que nous étudierons plus en détail dans notre chapitre IX). Dans le vent apparent, la composante vent réel prend donc de plus en plus d'importance de bas en haut : le vent apparent adonne. Cet effet est d'autant plus sensible aux allures portantes, du fait de la plus grande différence angulaire entre vent réel et vent vitesse. Cependant, sur un bateau rapide, la composante vent vitesse plus importante réduit l'ampleur de cette adonnante.

Ce gradient de vent nous conduit donc aux mêmes réactions que l'adonnante d'attaque dont nous venons de parler : on creuse, avance le creux ou vrille les profils supérieurs.

Sauf par vent faible, un certain vrillage est généralement la réponse que nous apportons à ces deux phénomènes. Toutes les voiles sont conçues d'origine avec un certain vrillage dans leurs formes de coupe.

Lorsque nous augmentons le vrillage, nous réduisons l'incidence, donc la puissance, des profils supérieurs. Nous verrons aussi qu'en vrillant ces profils supérieurs, généralement nous les affinons, ce qui conduit à une réduction de traînée, donc une augmentation de vitesse dans la brise. Nous réduisons aussi les possibilités de cap puisque les profils supérieurs sont choqués.

Un certain vrillage garantit aussi que la voile prise dans un écoulement instable ne décrochera pas complètement car il subsistera toujours une partie de la voile en incidence correcte, susceptible, par effet d'entraînement moléculaire, de restaurer un écoulement sain sur les zones voisines.

Plus de vrillage = plus de vitesse dans la brise, plus d'accélération en phase de relance, plus de tolérance, moins de puissance et moins de cap.

Par conséquent, au près, sur eau plate on obtiendra la puissance nécessaire en ajustant la quantité de creux et son placement (les profils fins 50% étant, rappelons-le, plus performants lorsque la priorité est donnée au cap), le vrillage étant maintenu faible (mais non nul à cause

du gradient de vent et de l'adonnante d'attaque). Sur eau agitée, on utilisera des profils moins fins, au creux plus avancé et plus vrillés pour leur donner de la tolérance.

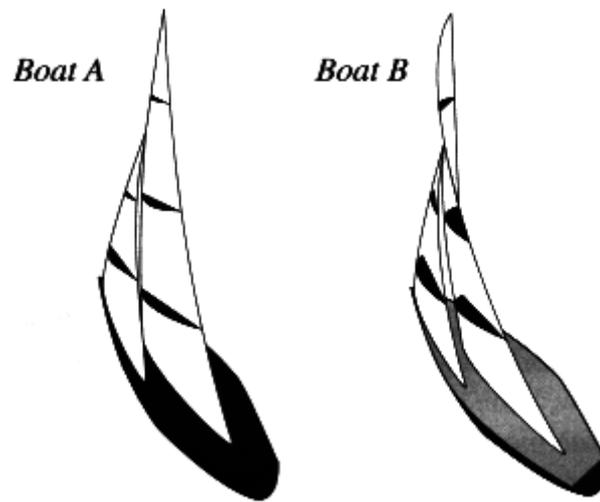


Fig30/ZZ9 : Effet du vrillage sur la forme des voiles et l'incidence.

I – 10) Interaction grand-voile / voile d'avant

L'étude d'une voile isolée a pu paraître un peu complexe au lecteur, cependant l'interaction entre une voile d'avant et une grand-voile introduit des nuances supplémentaires que nous nous devons de considérer.

I – 10 – 1) Etude 2D

La présence des deux voiles crée un étranglement entre elles, d'autant plus que le recouvrement est fort. Les couches limites présentes sur les surfaces des deux voiles contribuent à resserrer le passage. Les molécules d'air, renâclant à franchir cet étranglement, préfèrent le contourner. L'écoulement choisit la voie la plus facile. Contrairement à ce qu'on croit le plus souvent, ce n'est pas entre les deux voiles que le vent est le plus fort (il suffit de se placer dans le couloir, sur un croiseur, pour le vérifier).

Du côté de la voile d'avant, davantage de molécules (par rapport à la situation où cette voile serait isolée) sont aspirées à l'extrados, contribuant à un renforcement de la succion. Dans le même temps, l'adonnante d'attaque s'en trouve renforcée, la ligne de séparation des écoulements se déplace au vent (voir figure ci-dessous). Pour en tenir compte, il faut soit ouvrir le foc dans son ensemble, soit augmenter son creux, en particulier sur l'avant. Cette adonnante et accélération d'attaque bonifient les performances du foc.

Du côté de la grand-voile, des molécules qui seraient, sur la voile isolée, passées à l'extrados, doivent traverser le couloir pour le faire. Ceci leur étant plus difficile, elles préfèrent contourner ce couloir par l'intrados de la grand-voile. Nous avons donc une accélération des vitesses à l'intrados et une diminution à l'extrados, avec pour résultat une perte d'efficacité dans la zone de l'attaque, qui se trouve en refus par rapport à l'attaque d'une voile isolée. La fig46/ZZ22, présentée au paragraphe I – 2, montre bien qu'à l'extrados, dans le couloir, les

vitesse d'écoulement sont ralenties et non accélérées comme on pourrait le penser en invoquant à tort l'effet Venturi.

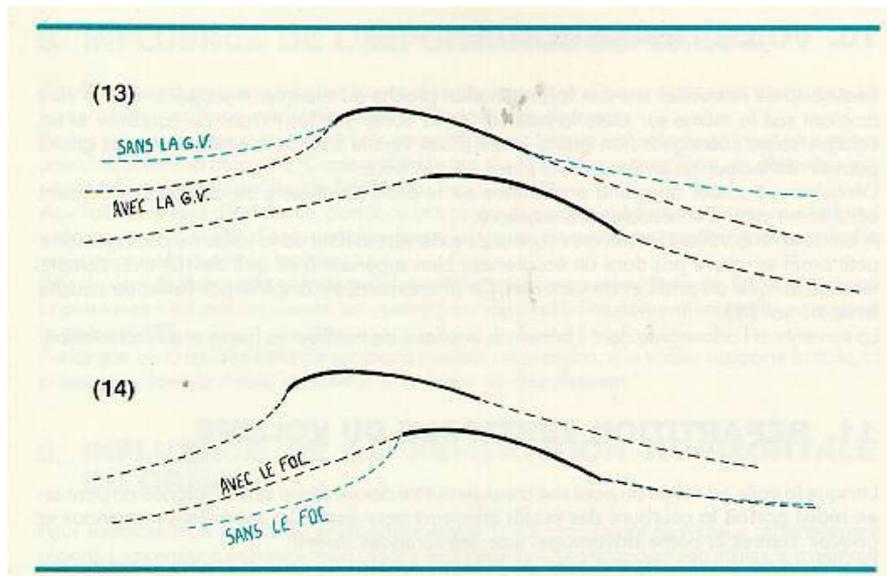


Fig3/ZZ1 : Interaction GV-foc, adonnante d'attaque sur le foc et refus d'attaque sur la GV.

Cette perturbation de l'attaque de la grand-voile est réduite si le foc est dessiné avec une partie arrière relativement plate, qui atténue l'étranglement. Ce qui donne la forme « idéale » suivante pour le foc :

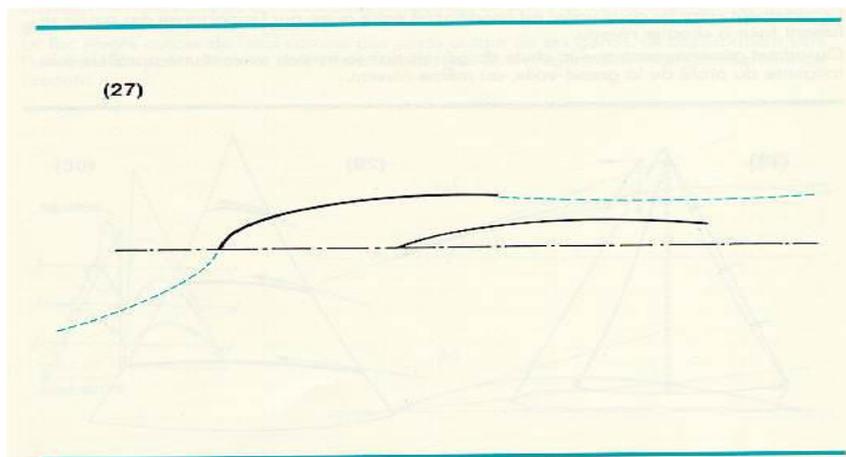


Fig6/ZZ1 : Forme optimale du foc : attaque ronde et AR plat.

On constate donc que le régleur devra plutôt se consacrer au bon réglage du creux de la partie avant du foc.

L'effet nuisible de la perturbation de l'attaque de la grand-voile est quelque peu atténué par le fait que la perturbation du mât, d'autant plus importante qu'il n'est pas profilé et tournant, se manifeste dans cette même zone qui est de toute façon en fonctionnement dégradé. La perturbation du mât a donc des effets négatifs moindres sur un sloop, surtout s'il est gréé en tête.

En arrière du couloir, sur la grand-voile, une circulation plus « normale », quoique avec des vitesses plus faibles que sur une voile isolée, se rétablit sur l'extrados (voir figure ci-dessous). Cette circulation, par les pressions négatives qu'elle génère, aspire et accélère les molécules qui passent à l'extrados du foc, au bord de fuite. Le foc n'a plus besoin, comme ce serait le cas s'il était seul, de respecter la condition de Kutta : cette aspiration l'en dispense, empêchant le décrochage au bord de fuite et l'apparition d'un tourbillon nuisible. A l'extrados, au bord de fuite, les vitesses d'écoulement sont supérieures à celles d'un foc isolé. La fig46/ZZ22 le montre bien. Le flux n'est pas obligé de ralentir pour respecter la condition de Kutta, le seuil de décrochage est donc retardé. La présence de la grand-voile profite donc également au foc via cette accélération de fuite.

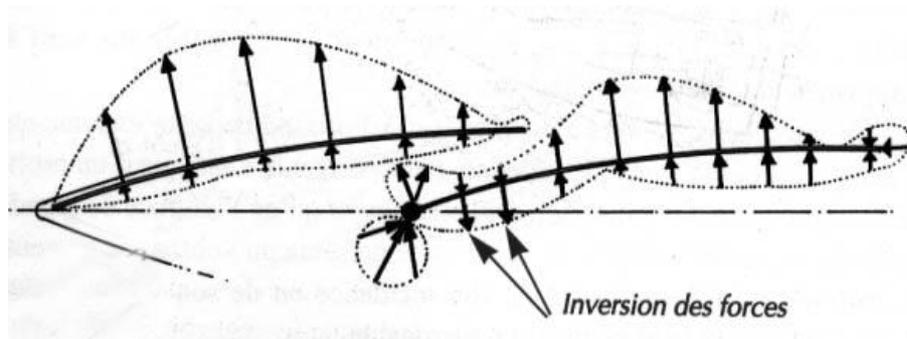


Fig175/ZZ212 page 99 : Interaction GV-foc, distribution des vitesses en plan.

La chute de la grand-voile, elle, doit respecter la condition de Kutta (égalité des vitesses intrados et extrados) puisqu'aucun autre profil ne se trouve derrière elle. A son extrados, à partir du point où elle retrouve une circulation « normale » on doit donc avoir ralentissement du flux en direction de la chute. Mais puisque la présence du foc a mis la grand-voile en refus, la vitesse maximale du flux, à l'extrados, est inférieure à ce qu'elle serait si elle était seule. Le ralentissement nécessaire – donc le risque de décrochage – est moins important. La présence du foc, même si elle met la grand-voile en refus et dégrade sa performance d'ensemble, retarde son décrochage et régularise son écoulement.

Du fait de sa mise en refus, la grand-voile d'un sloop doit être davantage bordée. Ce refus se manifestant surtout au bord d'attaque, il faut affiner ce bord d'attaque, donc plutôt reculer le creux. Le foc, lui, doit être plus ouvert et, nous l'avons vu, avoir une attaque ronde et un arrière plat. On retrouve cette différence d'orientation des deux voiles sur tous les bateaux : la grand-voile est toujours plus centrée que le foc.

La force vélique développée par le foc, plus ouvert, est donc mieux orientée sur l'avant. Bonifié par la grand-voile et développant une portance mieux orientée, sa contribution à la performance de l'ensemble est bien supérieure à celle qu'on attendrait en ne considérant que la contribution de sa surface.

On le voit, cette bonification du foc (par l'adonnante d'attaque et l'accélération généralisée du flux sur son extrados) et cette dégradation de la grand-voile (par sa mise en refus d'attaque, un peu atténuée par la régularisation de son écoulement) tire son origine de la présence d'un couloir entre les deux voiles. Ces phénomènes seront donc d'autant plus marqués que le recouvrement est grand. La bonification du foc est supérieure à la dégradation de la grand-voile, leur rendement global est supérieur à celui de la somme des deux voiles isolées.

Si nous augmentons la surface du foc vers l'arrière, sans changer sa hauteur de guindant, nous augmentons le recouvrement. Nous gagnons bien sûr en performance par gain de surface, côté

foc, mais nous perdons côté grand-voile par perturbation de son attaque. Augmenter la surface du foc sans augmentation de recouvrement (en augmentant sa longueur de guindant) serait plus efficace.

La présence d'un couloir est nécessaire à la bonification du foc et de l'ensemble grand-voile – foc. Cependant, si on ferme trop ce couloir, la mise en refus de la grand-voile est telle que la performance de l'ensemble se dégrade : elle prend à contre, on parle à tort de « renvoi » ou de « retour » du foc dans la grand-voile. C'est une situation fréquente par petit temps avec un foc trop bordé : les molécules, paresseuses, désertant trop le couloir !

Si le couloir est trop ouvert, le passage est trop « facile » pour les molécules, qui contournent l'extrados du foc en nombre insuffisant pour générer une adonnante d'attaque significative sur le foc : à nouveau, la performance d'ensemble diminue, par dégradation du foc cette fois. Une ouverture importante du couloir peut ainsi être recherchée dans la brise où elle constitue un outil de régulation de puissance très efficace, notamment pour les bateaux qui possèdent un foc de grande surface. C'est une astuce de réglage bien connue des pratiquants du Hobie Cat 16 par exemple : le chariot du foc doit être ouvert dans la brise – non seulement parce celui de la grand-voile a été aussi ouvert, mais davantage encore, pour élargir le couloir entre les deux voiles.

De manière générale, dans toutes les conditions de vent, il est crucial de déterminer, par le réglage d'ouverture des deux voiles, la bonne largeur du couloir.

Au portant où le couloir est de toute façon plus ouvert, l'interaction entre les deux voiles est moindre et leur travail plus proche de celui de voiles isolées.

I – 10 – 2) Etude 3D

Incluant maintenant la dimension verticale dans notre raisonnement, nous constatons que par effet triangulaire, l'adonnante d'attaque engendrée par la grand-voile sur le foc augmente logiquement de bas en haut. Ceci est déjà visible sur la fig46/ZZ22, où l'on constate que les vitesses les plus élevées se rencontrent en haut du foc. Sur la figure ci-dessous, on constate que l'incidence locale du vent apparent augmente bien de bas en haut du foc. Elle est, sur le foc, partout supérieure à celle régnant sur la grand-voile. Cependant le haut de celle-ci, non perturbé par la présence du foc, retrouve une incidence plus élevée.

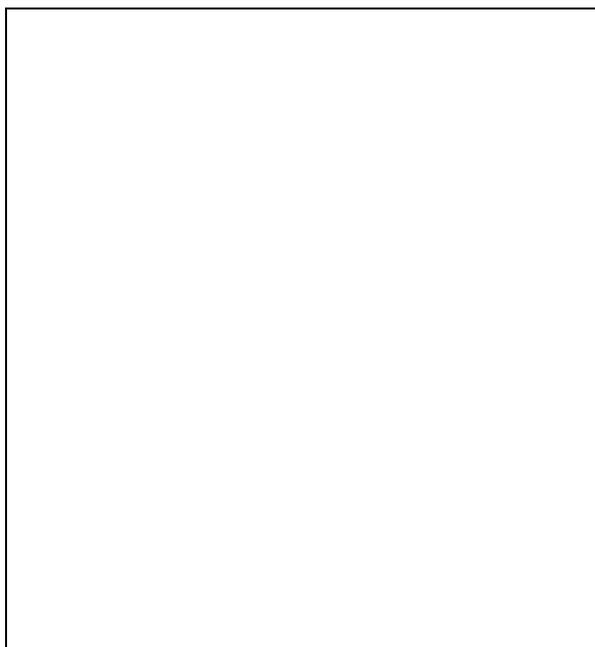


Fig24/ZZ7 : Interaction GV/foc, adonnante d'attaque qui augmente vers le haut par effet triangulaire.

Comme nous l'avons déjà signalé dans notre étude de l'effet triangulaire sur un profil isolé, on est donc amené à creuser, ou avancer le creux, ou vriller au fur et à mesure qu'on s'élève dans le foc. Le choix dépend bien sûr des conditions, mais il est clair que par fort vent, il vaudra mieux aplatir et vriller fortement le foc, le creux en tête ne trouvant une utilité qu'en sous-puissance.

Avec un foc sans recouvrement, les performances de l'ensemble, ramenées à l'unité de surface de voile, sont encore meilleures. L'étude en soufflerie montre en effet que l'adonnante d'attaque et l'accélération extrados sont toujours présentes sur le foc tandis que la mise en refus de la grand-voile est moins prononcée.

Sur un gréement fractionné tel que celui représenté sur la figure ci-dessus, le foc bénéficie d'un effet supplémentaire de la présence de la grand-voile : ses tourbillons marginaux sont annulés en tête, puisque à cet endroit, la forte succion exercée par le profil aval (la grand-voile) canalise l'écoulement, tandis qu'au-dessus du point de drisse du foc le travail des profils supérieurs de la grand-voile empêche la déflexion des flux en tête du foc.

Par contre il apparaît une discontinuité aérodynamique au capelage d'étai pour la grand-voile, au-dessus duquel, comme nous venons de le voir, elle retrouve une adonnante d'attaque (et aussi une perturbation du mât). La grand-voile passe ainsi brutalement, à l'attaque, d'une situation de refus à la situation d'adonnante qui est celle du profil isolé.

Par ailleurs, si on considère l'ensemble foc – grand-voile comme un profil unique, on a aussi une discontinuité géométrique au capelage d'étai. Sous celui-ci, le guindant du profil d'ensemble est constitué par l'étai (incliné) ; au-dessus il est constitué par le mât (plus vertical).

Pour adoucir ces discontinuités, il est judicieux de vriller le foc, (sa tête sous plus faible incidence atténuant la mise en refus de la grand-voile un peu en dessous du capelage d'étai). Surtout dans la brise, on vrillera aussi la grand-voile (pour lui permettre de mieux accommoder, en tête, cette adonnante d'attaque et limiter l'importance des décrochages). Dans le petit temps on peut avoir intérêt à garder un creux en tête relativement important et

avancé, qui permettra à l'attaque de grand-voile de mieux s'insérer dans cette adonnante de tête et donnera de la puissance.

Avec de la quête arrière, le mât se trouve davantage dans le prolongement de l'étai, le guindant du profil d'ensemble est alors plus régulier. Le cintrage longitudinal de la tête de mât aide également à lisser géométriquement l'attaque du profil.

Cette stratégie vise à maintenir la performance de la grand-voile. Elle sera d'autant plus payante que sa surface est grande en proportion de celle du foc (ce qui est le cas des multicoques de sport).

I – 10 – 3) Influence de la gîte sur la portance utile des voiles et de la dérive

Nous avons vu que la force vélique est une force perpendiculaire au plan du gréement. Si celui-ci s'incline à la gîte, la force vélique s'incline aussi vers le bas. Il apparaît une composante verticale dans sa composante « force de dérive » qui tend à augmenter le poids apparent du bateau, donc sa traînée de carène.

Mais nous avons un autre effet plus subtil concernant l'incidence des voiles avec le vent apparent, et la composante propulsive de la force vélique (portance). Prenons en effet le cas extrême d'un bateau qui navigue par le travers du vent apparent et qui est complètement couché sur l'eau. Le vent, qui se propage selon une direction horizontale, rencontre une voile couchée sur l'eau, elle-même située dans un plan horizontal. Le plan d'écoulement du vent et celui de la voile sont parallèles, il n'y a pas d'incidence sur la voile qui se met à battre ! Partant de cet exemple extrême, il est facile de concevoir qu'aux angles de gîte intermédiaires, la réduction d'incidence est proportionnelle à l'angle de gîte (plus précisément à son cosinus). La gîte dégrade donc la performance du gréement de deux façons : par augmentation du poids apparent du voilier et par réduction d'incidence.

L'efficacité d'une dérive diminue à la gîte, puisque la composante horizontale utile de sa portance (celle qui empêche le voilier de déraper) est réduite proportionnellement au cosinus de l'angle de gîte. Cependant la composante verticale de la portance tend ici plutôt à soulager le bateau (effet de sustentation utilisé par les foilers).

Et, comme pour la voile, nous avons une diminution d'incidence pour l'appendice à la gîte : la dérive d'un bateau qui avance couché sur l'eau est sous incidence nulle !

Par ailleurs, sur un appendice à la gîte dont la surface se rapproche par conséquent de l'eau, on aura accentuation du phénomène de ventilation (aspiration depuis la surface libre de l'eau d'une couche d'air attirée par la dépression extrados existant sur l'appendice).

I – 10 – 4) Intérêt du calcul mathématique

Nous avons mentionné à plusieurs reprises l'intérêt du calcul mathématique de la distribution des vitesses. Nous avons vu ainsi, sur la fig46/ZZ22, qu'il pouvait prédire l'influence de l'effet triangulaire et de l'interaction entre les deux voiles sur la distribution des vitesses, donc sur la performance des voiles.

Ces logiciels de calcul, tels que VisualFoil de Hanley Innovations (plus spécifiquement adapté aux profils symétriques) et MacSail de WB Sails permettent aussi de prévoir les caractéristiques principales de l'écoulement : points de stagnation, de transition, de séparation (voir figure ci-dessous).

Ils calculent les coefficients de portance et traînée d'un profil en fonction de l'incidence : en cela ils prédisent donc sa performance, ce qui justifie leur dénomination de VPP (Velocity Prediction Program).

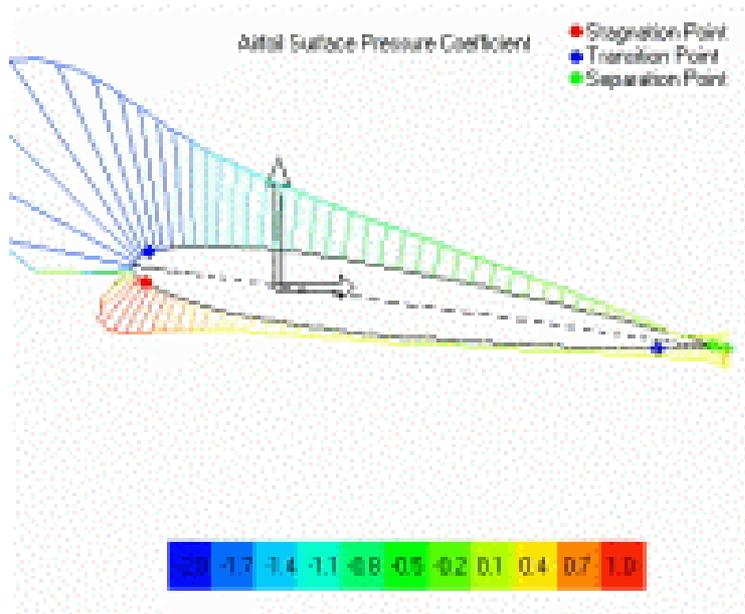


Fig44/ZZ20 : Distribution des vitesses et points caractéristiques de l'écoulement calculés par VisualFoil (Hanley Innovations).

Ils peuvent être intégrés dans le processus de conception d'une voile, comme nous le verrons au chapitre III.

I – 11) Les principales conclusions de l'étude aérodynamique des profils

Dans ce chapitre, au fil de l'eau, nous avons suggéré quelques guides de réglage utiles. Ceux-ci possédant un intérêt pratique et immédiat pour le régatier, nous les regroupons ci-après.

Les généralités d'abord :

- L'allongement réduit la traînée induite mais augmente la perturbation du mât s'il n'est pas profilé et tournant. Les mâts rétreints génèrent moins de perturbation en tête.
- Les voiles square-top à chute plus verticale minimisent les tourbillons libres mais amplifient le tourbillon marginal. Elles exploitent mieux l'adonnante de tête. Elles régulent la puissance dans les risées irrégulières.
- La quête arrière favorise la tolérance par mise en turbulence de la couche limite dès le bord d'attaque, inclinaison du guindant donc augmentation de l'effet triangulaire et plus grande bonification des profils supérieurs, chute plus verticale et réduction des tourbillons libres, lissage de la discontinuité géométrique du profil d'ensemble grand-voile – foc. Excès de quête = perte de puissance.
- Centrer un mât profilé pivotant diminue l'angle d'entrée du profil et augmente son incidence à l'attaque (c'est équivalent à « border le profil par l'avant »). Choquer le chariot de grand-voile pour restaurer l'incidence globale.

- Pour un creux et une incidence donnés, le décrochage extradós est plus précoce si le vent apparent augmente. Affiner plus le vent monte, un bateau rapide doit avoir des voiles plus fines.

- Plus de vrillage = plus de vitesse dans la brise, plus d'accélération en phase de relance, plus de tolérance par contagion moléculaire, moins de puissance et de traînée, et moins de cap. Un certain vrillage est toujours nécessaire pour accommoder le gradient de vent. Autres avantages : il réduit le tourbillon marginal, réduit la puissance et la gîte dans la brise, permet d'accommoder l'adonnante d'attaque plus forte en tête par effet triangulaire.

- Les penons de chute matérialisent le décrochage extradós, plus probable dans le petit temps et le médium. A l'attaque, placés à 20 ou 30 cm du bord d'attaque, ils permettent au barreur de maintenir la bonne incidence (le bon cap si on ne touche pas à la voile). Dans le foc ils permettent d'ajuster le vrillage et la rondeur de l'attaque ; plus ils sont près de l'étai, plus ils sont sensibles (parfois trop dans le clapot). Dans la grand-voile d'un sloop les penons d'attaque sont surtout utiles dans la partie supérieure dégagée du foc. Avec un mât profilé tournant, ils aident à trouver le bon réglage (le bon angle d'entrée) pour la rotation du mât et le chariot de GV.

En ce qui concerne la répartition horizontale du creux et son adaptation aux conditions :

- au près sur eau plate, avec un bateau suffisamment toilé pour le vent, généralement priorité au cap : profils fins 50%, avec un meilleur rapport portance/traînée mais plus pointus (moins tolérants). Affiner d'autant plus que le bateau est rapide et/ou le vent apparent fort. Si priorité vitesse (vent faible, raisons tactiques, bateau lent ou sous-toilé) creuser un peu les profils, tant que la gîte peut être maîtrisée. Vrillage faible mais non nul (gradient de vent) pour plus de puissance et cap.

- Au près sur eau agitée, il faudra une puissance et une tolérance supérieures et des incidences plus fortes. Profils creusés surtout si le passage du clapot est mauvais. Pas d'excès, attention à la gîte et aux décrochages extradós. Creux avancé pour la tolérance. Vrillage plus important pour la tolérance. Quête arrière plus prononcée pour la tolérance.

- Au portant, portance maximale donc incidences fortes, tant qu'on n'enfourne pas. Creuser les profils sans excès, davantage sur un bateau lent ou une voile naturellement plate. Avancer le creux par vent fort, quand la vitesse plafonne, surtout si le creux naturel de la grand-voile est assez reculé (50 %). Vrillage plus important (gradient de vent) qu'au près, surtout si le bateau n'est pas très rapide.

Dans toutes les conditions, ne pas oublier qu'on doit affiner progressivement quand le vent monte.

En ce qui concerne la répartition verticale du creux :

- creuser la tête (des deux voiles) par vent faible (sous-puissance) pour accommoder l'adonnante d'attaque plus forte (effet triangulaire) et mieux utiliser le vent plus fort.

- Vriller (les deux voiles) par vent plus fort pour accommoder l'adonnante d'attaque plus forte (effet triangulaire), réduire la puissance (gîte) et la traînée (frein), adoucir la discontinuité aérodynamique au capelage d'étai.

Particularités du sloop (par rapport au cat-boat) :

Tout ce qui est décrit ci-dessus reste vrai, avec les nuances et compléments suivants :

- la grand-voile d'un sloop doit être plus centrée, et son attaque plus affinée (creux plus reculé) ;

- le foc est plus rond sur l'avant que la grand-voile. Son arrière est plus plat, il doit être moins centré que la grand-voile. Il est souvent coupé plus creux en tête (effet triangulaire) ;

- le réglage de largeur du couloir est de première importance. En l'ouvrant, on régule efficacement dans la brise la puissance du foc, très significative dans celle de l'ensemble.

Tous ces guides sont connus du régatier chevronné, ce qui tendrait à prouver que théorie et pratique se rejoignent parfois. La théorie aérodynamique de notre beau sport n'est pas si mauvaise, si elle colle assez bien à l'expérience ! Ne regrettons donc pas d'avoir consacré du temps à ces aspects ardues...

Dans les chapitres suivants, nous étudierons plus en détail les moyens d'action, les réglages, dont nous disposons pour atteindre les objectifs généraux que nous venons de nous fixer.

Chapitre II : Quelques concepts d'architecture

II – 1) Nécessité de puissance

En ajustant la surface et les formes du plan de voilure, on donne au voilier la puissance nécessaire pour, du côté de la coque,

- entraîner le poids total. Une augmentation de poids entraîne une immersion plus grande du voilier et une augmentation de sa surface mouillée. Comme sur une voile, une couche limite se forme sur la carène, qui s'épaissit depuis l'étrave vers l'arrière et décroche généralement après le bau maximum, derrière lequel se forment des tourbillons qui consomment de l'énergie propulsive. Pour une carène, la traînée visqueuse représente la plus grande part de la traînée totale. Comme l'épaisseur de la couche limite entraînée avec le bateau augmente avec la friction, il est essentiel que l'état de surface de la carène soit très bon ;
- vaincre la perte d'énergie liée à l'apparition de la vague d'étrave, directement liée au coefficient prismatique de la carène (qui est schématiquement le rapport section immergée au maître-bau / longueur de la carène). Sur un multicoque, dont les coques ont une grande finesse, cette résistance de vague d'étrave est très faible mais néanmoins non nulle ;
- vaincre la traînée induite de la carène, visible dans les remous du sillage ;
- vaincre la traînée d'embrun, qui se manifeste dans la « gerbe » qui monte à l'étrave, et qui consomme elle aussi de l'énergie ;
- vaincre la résistance produite par la rencontre des vagues dans le clapot, essentiellement liée à la répartition des volumes avant de la carène.

En ce qui concerne le gréement, il faudra de la puissance pour :

- vaincre la traînée des voiles, essentiellement leur traînée induite ;
- vaincre la traînée de forme (fardage) de tout ce qui doit pénétrer dans l'air.

Plus de puissance sera également utile, dans les phases d'accélération, pour rejoindre plus rapidement la vitesse optimale, après un virement de bord ou le passage d'une mauvaise vague par exemple. Un surcroît de puissance permettra aussi, pour les bateaux à déplacement, d'atteindre leur vitesse limite (vitesse de carène) dans des vents plus faibles.

Nous devons cependant maîtriser la gîte, et l'inévitable augmentation de traînée générée par une augmentation de puissance : on conçoit donc que les réglages différeront d'un bateau à l'autre, en fonction de leurs caractéristiques (poids, surface de toile, finesse, qualité de pénétration dans les vagues)

II – 2) Quelques particularités des multicoques

En raison de la finesse de ses coques et de leur faible surface mouillée, la traînée de friction et la résistance de vague d'étrave sont beaucoup plus faibles pour un multicoque que pour un monocoque, mais le fardage est plus important, surtout en multicoque de croisière. Plus les coques sont fines, notamment à l'avant, plus le tangage sera réduit au près, les coques fendant la vague au lieu de la chevaucher. Ceci dit le couple d'enfournement au portant oblige à maintenir un volume minimal à l'avant.

Avec des coques plus fines, l'augmentation de surface mouillée liée à une augmentation de poids est plus importante : les coques fines supportent moins le poids que les coques plus

larges. Il est également connu que des sections immergées semi-circulaires, moins fines que des sections en V, supportent mieux le poids et donnent une surface mouillée moindre à volume immergé égal, virent mieux mais ont une pénétration à la vague moins bonne, d'où le compromis généralement trouvé sur les multicoques de sport où on trouve des avants en V et des arrières en U. Les plus légers tels que les Classe A constituent une exception à ce titre, car du fait de leur légèreté, ils ont des possibilités de planning : on leur donne alors parfois des sections immergées pratiquement planes pour favoriser le déjaugeage.

Lors des phases de manœuvre, la présence des deux coques oblige le multicoque à déplacer beaucoup d'eau, d'autant plus qu'elles sont plus fines et plus espacées.

Nous l'avons déjà signalé : globalement le multicoque a une résistance à l'avancement moindre. Il a donc moins besoin de puissance : ses voiles seront plus fines, et aussi moins vrillées par construction, que celles d'un bateau plus lent.

Les catamarans de sport présentent des coques symétriques ou asymétriques. Ces formes de coque différentes ont une conséquence importante sur le déplacement des lignes d'eau à la gîte.

Prenons d'abord l'exemple d'un catamaran à coques symétriques, pourvu d'une dérive et naviguant gîte au près bâbord amures (figure ci-dessous). Lorsque sa vitesse est stable, donc à accélération nulle, nous avons vu (paragraphe I – 8) que la composante de gîte de la force vélique, qui tire le bateau sous le vent, est exactement contrebalancée par la portance de la dérive qui monte le catamaran au vent. Cette portance n'existe que parce que le bateau dérape : en fait le cap suivi par le bateau n'est pas exactement parallèle à l'axe longitudinal de la coque, mais il est dévié légèrement sous le vent – à droite sur la figure ci-dessous.

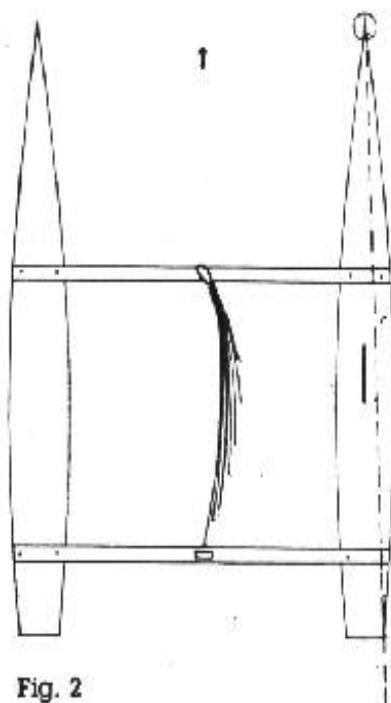


Fig. 2



fig.3

Fig47/ZZ25 : Evolution des lignes d'eau d'un catamaran à la gîte.

On remarque que les lignes d'eau de la carène ne sont plus symétriques. Sous le vent, elles partent toujours de l'étrave, mais rejoignent l'arrière en un point situé sous le vent de l'axe du bateau. Le déplacement sous le vent de ces lignes d'eau est d'autant plus important que le tableau arrière est large. Nous avons donc maintenant, pour la carène, un « intrados » sous le vent, plus plan à la gîte, et un « extrados » au vent, plus courbe. L'écoulement de l'eau y crée donc une portance au vent, qui s'ajoute à celle de la dérive.

Lorsque le catamaran est volontairement dessiné avec des coques inclinées, aux gîtes faibles que nous utilisons au près (pour juste dégager la coque au vent de la surface de l'eau), la coque sous le vent se retrouve verticale, donc symétrique. L'effet positif de l'asymétrie des coques est perdu. Or, il est loin d'être négligeable, puisque nous savons qu'une asymétrie volontaire suffit à assurer l'essentiel de la force antidérive sur certains catamarans...

Ceci dit, évidemment l'inclinaison des coques comporte des avantages, puisque la dérive et le safran maintenus plus longtemps en position verticale travaillent mieux. On peut ainsi obtenir la même efficacité antidérive avec une dérive davantage relevée, donc avec moins de surface mouillée ; la dérive plus verticale, plus efficace, favorise le départ sur une coque au grand-largue (Australienne). Mais et pour les mêmes raisons, on perd l'efficacité de la portance de la dérive inclinée.

Revenant à l'asymétrie des coques à la gîte, on comprend donc que si l'inclinaison des coques se conçoit pour des carènes fines, surtout de l'arrière, elle est plus discutable pour celles qui possèdent un tableau arrière relativement large. De fait, pour l'instant, l'efficacité supérieure de l'inclinaison des coques, pour ce type de carène, n'a toujours pas été démontrée...

L'asymétrie volontaire des coques de certains catamarans (Hobie, Prindle) leur confèrent également un intrados plan sous le vent et un extrados courbe au vent, et développe la portance au vent dont ils ont besoin. Ils peuvent ainsi se passer de dérive. Par contre, le safran se trouve en écoulement défléchi, il faut faire attention à son angulation (voir chapitre IV).

Le bon ajustement des volumes avant doit répondre, nous l'avons vu, à certains impératifs : pénétrer la vague, éviter l'enfournement. Mais son bon calcul n'est pas indépendant de la position longitudinale des poutres. Si par exemple, nous reculons les poutres, nous pouvons un peu réduire les volumes avant – mais il faudra augmenter les volumes arrière pour ne pas enfoncer le tableau arrière dans l'eau.

II – 3) Architecture assistée par ordinateur

Le dessin d'une carène consiste à maîtriser le trajet des lignes d'eau, la répartition longitudinale des volumes (courbe des aires) et les modifications de surface mouillée et de centre de carène à la gîte et sous assiette longitudinale variable.

Les programmes de conception assistée par ordinateur sont d'une grande aide pour l'architecte, car ils permettent de calculer tous ces paramètres hydrodynamiques pour un dessin donné. L'optimisation de celui-ci en est grandement facilitée. Le dessin lui-même est rendu plus aisé, grâce à l'utilisation automatique d'outils de lissage qui assurent une forme régulière à tous les tracés courbes.

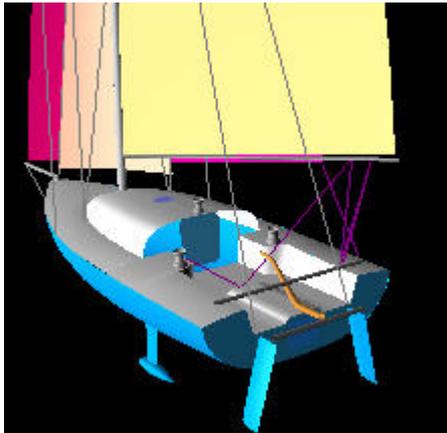


Fig50/ZZ30 : Conception assistée par Naval Designer.

Certains de ces programmes prennent aussi en compte les calculs de traînée et la résistance de vagues, on peut donc les utiliser pour prédire la vitesse théorique du dessin. En effet ces VPP vont jusqu'à calculer les polaires de vitesses (voir figures ci-dessous).

sailing each leg of the course for each wind speed and probability.

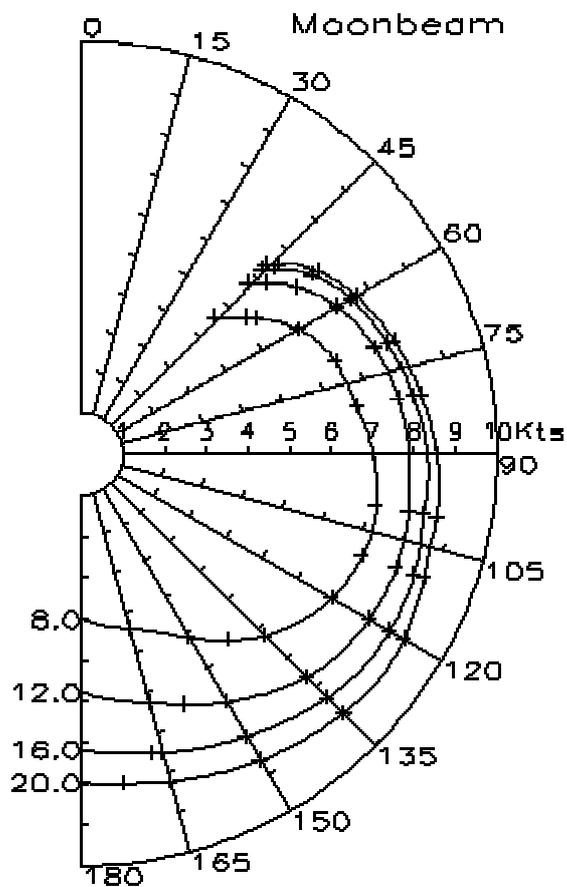


Fig51/ZZ34 : Polaire calculée par VPP.

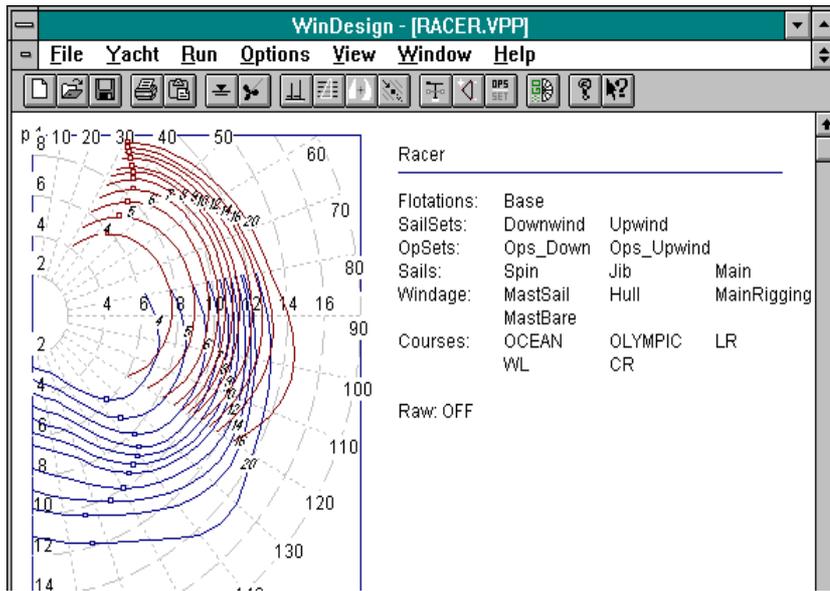


Fig52/ZZ37 : Polaire calculée par WinDesign.

Chapitre III : Elasticité, tensions, matériaux, conception des voiles

III – 1) Propagation des efforts, tensions parallèles et perpendiculaires

Les voiles, par leur courbure, génèrent la force aérodynamique. Cette force qui s'applique en tout point du tissu le met en formes et sous tension. Il est essentiel de comprendre comment ces tensions internes se propagent dans la voile.

Globalement, la résultante des forces aérodynamiques s'applique au centre vélique de la voile, dont la position, nous l'avons vu au chapitre I, varie avec l'incidence et les réglages de forme de la voile. Le tissu de la voile est attiré vers ce centre vélique.

Le mât et la bôme pour une grand-voile, l'étai pour le foc, constituent des supports rigides qui s'opposent à cette attraction de matière : ils maintiennent le tissu en place. Les deux voiles les sollicitent, ils opposent une réaction égale et opposée. La force vélique engendre donc, sur les espars et sur l'étai, des *tensions perpendiculaires* à ces espars (et donc au guindant et à la bordure, pour la grand-voile) : ce sont les forces dessinées en noir sur la figure ci-dessous.

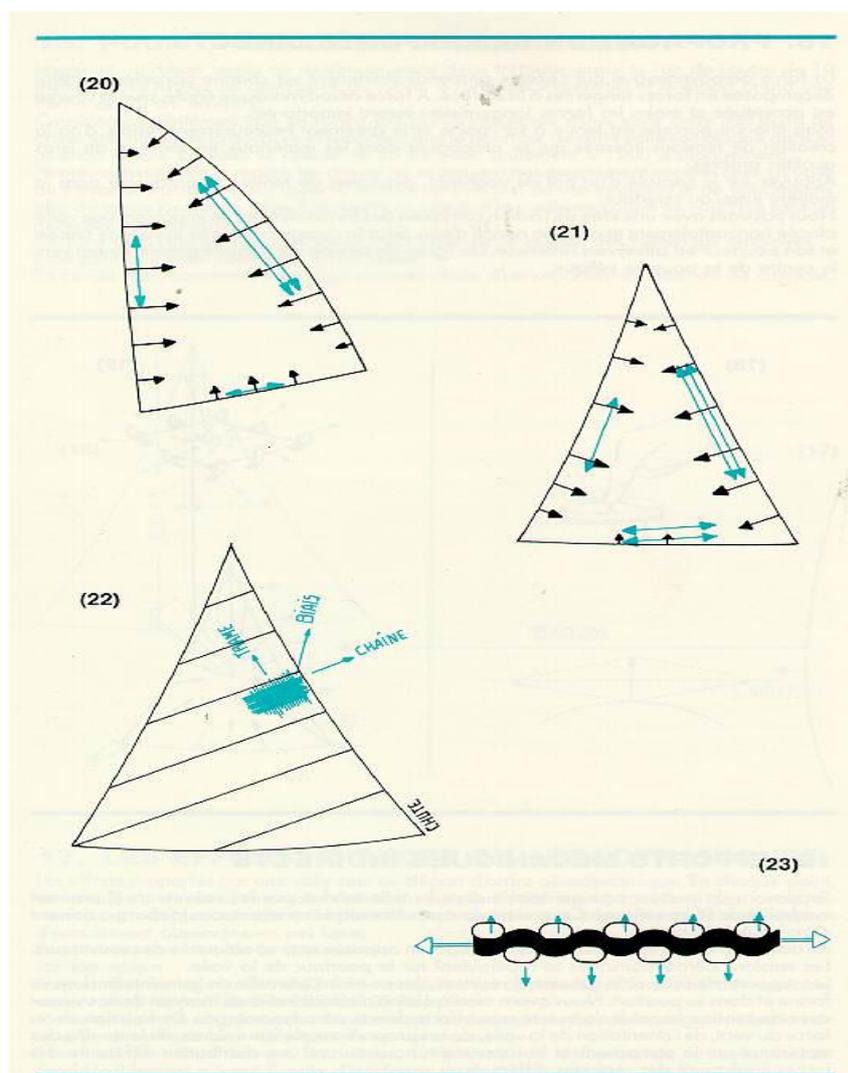


Fig4/ZZ1 : Tensions perpendiculaires. (supprimer la partie basse, les tensions perpendiculaires sont plus verticales que sur cette figure, en partie haute)

Pour rééquilibrer les tensions dans le tissu, nous sommes conduits à reprendre du Cunningham et de la bordure, donc à générer, dans le tissu, des *tensions parallèles* aux espars (forces dessinées en bleu dans la figure ci-dessus). Si nous ne le faisons pas, les tensions perpendiculaires non équilibrées déforment le tissu parallèlement à leur direction d'application. Ainsi, par exemple, lorsque le Cunningham n'est pas assez étarqué, des plis horizontaux apparaissent, partant du mât et se dirigeant vers le centre vélique de la voile, et pouvant même rejoindre le point d'écoute. Ces tensions parallèles permettent de remettre le tissu en forme.

Sur la chute de la grand-voile, les tensions perpendiculaires générées par l'attraction vers le centre vélique ne sont pas maîtrisées par un espar. Par ailleurs, la force aérodynamique qu'elle subit tend à la faire déverser sous le vent. Le seul moyen que nous avons de nous opposer à cette attraction vers le cœur et à ce dévers est d'appliquer, par le palan d'écoute, une forte tension de chute.

Cette tension de chute est une force parallèle à la chute elle-même, elle ne s'oppose pas directement aux forces perpendiculaires. Elle ne peut qu'imparfaitement s'opposer au dévers. On peut faire ici une analogie avec un arc : seule une tension infinie sur la corde de l'arc (une tension de chute infinie) nous empêcherait de bander l'arc (empêcherait le dévers de chute). Par conséquent, de par la volonté de l'équipage de conserver un dévers de chute raisonnable, la majeure partie des efforts est concentrée sur la chute. Par ailleurs plus l'allongement d'une voile est grand plus la tension de chute nécessaire sera élevée.

Les lattes absorbent une partie des forces perpendiculaires qui s'exercent sur la chute, puisque, du fait de leur raideur, elles s'opposent à la flexion que veulent leur faire prendre ces forces perpendiculaires. Grâce à elles, il nous faut moins de tension de chute pour empêcher le dévers. Les lattes facilitent le contrôle de la chute.

La tension de chute doit être encore (proportionnellement à sa surface) plus importante sur un foc, car elle doit maîtriser les forces perpendiculaires à la fois sur la chute et sur la bordure.

III – 2) Interdépendance des tensions et du creux

Suspendons un drap mouillé sur une corde à linge tenue à ses extrémités par deux personnes. Logiquement, son poids fait fléchir la corde. La tension sur la corde que devront exercer les deux personnes sera d'autant plus forte qu'elles veulent empêcher la corde de fléchir. Pour une voile, le drap mouillé est la force aérodynamique et la flexion de la corde est sa courbure.

Par conséquent, une même force aérodynamique génère plus de tensions perpendiculaires dans une voile plate que dans une voile creuse (nous supposons bien sûr ici que les voiles ne se déforment pas, ne se creusent pas sous l'effet de cette force). Nous devons donc, pour les équilibrer, exercer des tensions parallèles (Cunningham, bordure, tension de chute) plus grandes sur une voile plate.

Si nous considérons une voile en particulier, du fait que certaines zones y sont plus courbées que d'autres, nous comprenons qu'en vertu du raisonnement précédent la distribution des tensions est affectée par la distribution du creux. Dans les zones de forte courbure, les tensions seront plus faibles.

Ainsi, si la voile est plus creuse, la nécessaire tension de chute reste localisée sur l'arrière. Si on aplatit la voile par action, par exemple, de la bordure, si on ne touche pas à l'écoute la tension de chute reste globalement constante. Elle se distribue maintenant dans une zone plus plate, sur une surface plus étendue. Cette délocalisation de la tension de chute fait que la chute

est moins bien tenue, elle déverse. On voit ici un premier exemple d'une règle bien connue qui stipule qu'affinement marche souvent avec vrillage...

Creusons maintenant la bordure. Le creux supérieur induit dans le bas de la voile localise davantage la tension de chute sur l'arrière, donc referme la chute.

Le raisonnement inverse est tout aussi intéressant : à partir d'une grand-voile de forme donnée, établie sur un mât raide, bordons davantage. Nous augmentons la tension de chute, mais en tirant davantage sur la chute nous localisons davantage les tensions sur l'arrière du profil : nous les empêchons de diffuser vers le cœur de la voile et d'aller l'y aplatir. Nous aplatissons certes l'arrière de la voile par simple traction, mais un peu en avant de la chute il y a augmentation du creux ! Cette augmentation de creux est plus manifeste en tête. En effet, à cet endroit les différentes tensions appliquées (tension de guindant, de chute, tensions perpendiculaires) sont quasiment parallèles et verticales. Il n'y a pas de tensions horizontales pour les équilibrer, donc pour maintenir le tissu dans ses formes d'origine : il se déforme en se creusant. Globalement, si nous négligeons l'aplatissement d'une zone étroite sur la chute, nous avons augmenté (surtout en tête) et reculé le creux en bordant la voile... En choquant, non seulement on diminue la tension de chute, mais on lui permet de diffuser davantage vers le cœur de la voile : celle-ci se trouve globalement vrillée et affinée sur sa partie arrière. Quand nous relâchons la bordure, nous creusons le bas de la voile. Si maintenant nous bordons davantage, l'augmentation de creux induite par la tension de chute permet de répercuter plus haut dans la voile l'augmentation de creux liée au relâchement de la bordure. Par contre si on choque, le bas de la voile est certes creusé, mais il y a affinement et vrillage de la partie supérieure : dans ces conditions l'augmentation de creux générée par le réglage de la bordure reste plus localisée dans la partie inférieure.

On constate que si modifier la répartition du creux permet de modifier la répartition des tensions, modifier les tensions dans la voile agit également sur la répartition du creux... Cette dualité entre ces deux paramètres est un point fondamental pour le régleur. L'autre constat essentiel est la synergie, l'interaction entre les réglages, dont nous venons de voir un premier exemple à travers l'association des réglages de bordure et de tension d'écoute.

On retrouve aussi cette dualité entre creux et tensions dans l'effet du cunningham. Quand le vent monte, les tensions perpendiculaires augmentent dans le tissu, et dans le même temps le creux de la voile est soufflé vers l'arrière sous la pression du vent. Nous l'avons vu, prendre du Cunningham augmente les tensions parallèles. Cela permet dans un premier temps d'équilibrer les tensions perpendiculaires dans le tissu pour le remettre en forme. Sur un mât raide, cette action équilibre simplement les tensions perpendiculaires liées à la force aérodynamique. Sur un mât souple, cette même force aérodynamique engendre un cintre dans le mât, qui attire du tissu vers l'avant. Le tissu résiste à cet appel vers l'avant en appliquant au mât une réaction égale et opposée. Il tire le mât vers l'arrière, et ceci ajoute aux tensions perpendiculaires régnant dans le tissu. On voit donc qu'il faut plus de tension de Cunningham pour remettre le tissu en forme sur un mât souple.

Ce rééquilibrage des tensions ramène le creux vers l'avant, dans sa position d'origine déterminée par sa coupe. Ceci réaplatit donc la partie arrière. Compte tenu du raisonnement précédent, nous avons donc une plus grande dilution de la tension de chute et donc un dévers supérieur.

On voit que dans la brise, pour tous les types de tissus, l'intérêt du Cunningham est de restaurer la forme d'origine et de faciliter le dévers de la voile.

Nous verrons (paragraphe III – 3 – 2) qu'au-delà du point de remise en forme du tissu (qui concrètement se repère par la disparition des plis horizontaux le long du guindant), sous une

tension encore plus forte du Cunningham, les matériaux tissés classiques (avec chaîne et trame) ne se comportent pas de la même façon que des complexes moins déformables.

III – 3) Influence de l'élasticité du tissu

III – 3 – 1) Déformations du tissu

Lorsque dans une risée le mât et/ou l'étai fléchissent, une partie de l'énergie propulsive est consommée. Dans le même temps s'il y a déformation du tissu il y a aussi perte de propulsion. Si le tissu est déformable, par vent fort le creux est plus facilement soufflé vers l'arrière : nous savons que ce phénomène est nuisible.

Donc en principe la déformation du tissu nuit à la performance du bateau.

Cependant elle a aussi des avantages non négligeables, puisqu'elle donne au régleur plus de possibilités pour déplacer les volumes. Nous verrons ci-dessous l'intérêt du Cunningham sur un tissu déformable. Par ailleurs, sur la chute, une certaine déformation du tissu entraîne un dévers « automatique » à la risée. Nous verrons aussi que sur les bateaux possédant des mâts très souples, un tissu déformable permet d'accommoder un cintrage excessif, puisqu'on peut plus facilement rééquilibrer les tensions perpendiculaires par la tension parallèle du Cunningham, sans trop avancer le creux car le maillage du tissu peut s'agrandir plus facilement : on peut donc redonner plus facilement sa forme d'origine à la voile.

Un matériau tissé est plus déformable qu'un complexe laminé. Ceci est dû au tissage en chaîne et trame (voir figure ci-dessous). Les fils de trame sont plus tendus, forçant les fils de chaîne à des ondulations plus prononcées (embuvage).



Fig54/ZZ44 : Observation en Microscopie à Balayage d'un tissu Dacron tissé serré. On y voit un fil de chaîne en coupe sur le bord.

Du fait de leur croisement, la longueur des fils est inférieure à ce qu'elle serait si les fils étaient rectilignes. Lorsqu'on tire sur le tissu parallèlement à la chaîne ou à la trame, on peut augmenter la longueur du fil correspondant, ce qui force l'autre fil à une ondulation plus forcée. Cette possibilité d'allongement confère une étirabilité à un tel type de tissu. Les tissus peuvent être renforcés dans le sens de la chaîne ou dans celui de la trame, mais ils seront toujours plus sensibles à la déformation dans le sens du biais. Puisque les efforts sont plus importants sur la chute, une voile en tissu de coupe traditionnelle (horizontale) voit l'axe de moins grand allongement du tissu (en général, les fils de trame) placé parallèlement à celle-ci. Sur le guindant, le tissu est donc plus ou moins placé de biais.

III – 3 – 2) Action du Cunningham

III – 3 – 2 – 1) Sur un mât raide

Prenons l'exemple où, sur le guindant, ce sont les fils de trame qui sont les plus parallèles à celui-ci. Considérons toujours que la voile est établie sur un mât raide.

Nous avons vu précédemment que l'intérêt du Cunningham est d'équilibrer les tensions perpendiculaires et parallèles pour maintenir (ou rendre sa forme) au tissu. Si à partir de ce point de fonctionnement où le tissu est équilibré, nous augmentons encore la tension du Cunningham, nous localisons davantage les tensions parallèles sur une zone étroite en arrière du guindant. Cette zone se trouve logiquement aplatie par simple effet de traction.

Mais ce faisant, sur le guindant, on allonge les fils de trame, et on oblige les fils de chaîne à suivre des ondulations plus marquées. Le maillage du tissu initialement carré se déforme en losange. Puisque, du fait de leurs ondulations plus marquées, la longueur effective des fils de chaîne tend à diminuer, il y a attraction du tissu, selon une direction grossièrement horizontale, depuis le centre de la voile en direction du guindant. Cet apport de tissu sur l'avant, sous une tension forte du Cunningham, se manifeste, juste en arrière de la zone directement aplatie par la tension du guindant, par des plis de surtension verticaux que le régatier est habitué à repérer, en particulier dans les focs. Ces plis vont rester là car nous rappelons que nous supposons ici que la tension du Cunningham est supérieure à celle nécessaire pour équilibrer les tensions – concrètement, le Cunningham est surtendu par rapport à la force du vent. En arrière de ces plis, cette attraction de matière vers l'avant déplace avec elle les formes d'origine de la voile : on a avancé le creux.

Evidemment, on déplacera d'autant plus le creux vers l'avant que le tissu est déformable.

Sur la figure ci-dessous, on illustre la déformation du tissu vers un maillage en losange, et l'apport de matière sur l'avant qui en résulte, matérialisé par l'arrondi que prend sous traction la lisière d'une feuille pliée en accordéon.

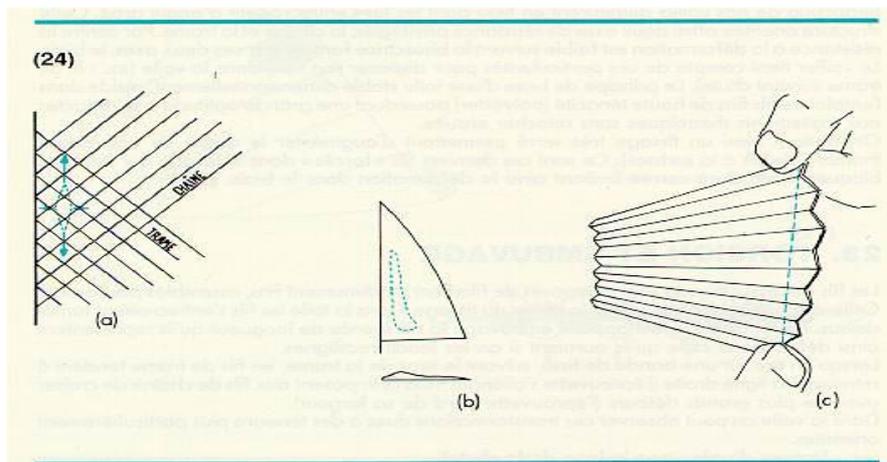


Fig5/ZZ1 : Tension de guindant, apport de matière sur l'AV.

Si nous résumons donc l'effet du Cunningham sur un mât raide, nous voyons que dans un premier temps celui-ci restaure les formes d'origine du tissu, empêchant son creux de reculer. Avec une surtension, on peut avancer le creux au-delà de son emplacement prévu à la coupe, d'autant plus que le tissu est déformable.

On comprend qu'en jouant sur l'orientation des panneaux dans une coupe de voile plus complexe qu'une simple coupe horizontale, dans une certaine mesure le maître-voilier peut contrôler le déplacement des volumes sous l'effet des réglages.

III – 3 – 2 – 2) Sur un mât souple

Avec un mât souple, il faut apporter quelques nuances au raisonnement précédent. La force du vent et la tension de chute nécessaire au contrôle du dévers cintent le mât sur l'avant. Ce cintrage avant du mât attire du tissu vers l'avant : cette attraction de tissu génère des tensions perpendiculaires plus importantes, nous avons vu que des plis apparaissent entre le mât et le point d'écoute.

Dans un premier temps, une tension adéquate du Cunningham équilibre ces tensions perpendiculaires, remet le tissu en forme et permet au rond de guindant de s'établir correctement dans la courbure du mât. Jusqu'ici il n'y a pas de différence avec le raisonnement tenu précédemment pour un mât raide.

Si maintenant nous surtendons le Cunningham, nous allons comme précédemment avancer le creux, d'autant plus que le tissu est déformable. On aplatit donc la partie arrière, ce qui détend la chute et favorise son dévers. Mais comme le mât est souple, nous augmentons également son cintrage. Cette courbure plus prononcée augmente la distance mât-chute, tire davantage encore sur le tissu. Comme la déformation de celui-ci est limitée, le volume global ne peut être maintenu : il est globalement réduit, d'autant plus d'ailleurs que le tissu est peu déformable. Sur la partie arrière de la voile, cet affinement général se conjugue à l'affinement lié à l'avancement du creux. Elle est ainsi plus aplatie que sur un mât raide, avec pour résultat une plus grande dilution de la tension de chute donc un vrillage plus facilité.

Le vrillage est d'autant plus facilité que du fait du cintrage du mât, la distance point de drisse – point d'écoute est réduite (si nous ne bordons pas simultanément l'écoute), ce qui diminue la tension de chute globale.

Avec un mât souple, nous avons donc avancement du creux comme sur un mât raide, mais en plus affinement général et dévers de chute plus facilité.

III – 3 – 3) Le bon choix du tissu et de son orientation

Nous constatons donc que même si la déformation du tissu est en principe nuisible, elle comporte des avantages pour le régleur qui a davantage de contrôle, via le Cunningham notamment, sur l'emplacement des volumes. Son autre avantage essentiel réside dans la maîtrise de l'affinement général entraîné par le cintrage d'un mât souple. Le maître-voilier doit donc choisir le tissu possédant les bonnes caractéristiques mécaniques, et l'orienter correctement dans le sens des efforts (d'où l'intérêt de prédire au mieux les distributions des tensions dans la voile avant de la fabriquer).

Si le tissu est trop déformable, nous risquons d'avoir trop de creux dans la brise, sous l'effet de la force aérodynamique, et de ne pas pouvoir le résorber. Le creux risque de trop reculer dans la brise. Le dévers de chute sera plus important, il sera impossible de le contrôler correctement puisque l'effet de la tension de chute sera davantage d'étirer le tissu que de l'empêcher de partir sous le vent. On aura aussi des risques de déformations résiduelles, non réversibles au repos, et donc une longévité plus faible.

Si le tissu n'est pas assez déformable, quand un mât souple cinte, on risque d'avoir un affinement trop rapide puisque le tissu, mis en traction entre la courbure du mât et la chute, ne peut s'étirer pour maintenir plus longtemps un certain volume.

L'intérêt des complexes indéformables est bien de maintenir plus longtemps, sous la pression du vent, la position du creux et le dévers de chute. Si le cintrage du mât n'entraîne pas leur affinement excessif, ces voiles pourront afficher des performances supérieures. Mais du fait que nous avons moins, par les réglages, de possibilité de rectifier la position de leurs volumes,

ceux-ci devront être prévus au départ avec une plus grande précision par le maître-voilier. D'autre part, pour la même raison, elles sont souvent jugées moins polyvalentes.

III – 4) Caractéristiques des fibres et des tissus

Les fibres utilisées dans les tissus à voile ont des caractéristiques mécaniques et une résistance aux UV très variables.

Les caractéristiques mécaniques essentielles sont :

- le module initial (résistance à l'allongement de la fibre en utilisation normale) ;
- la ténacité (résistance à la rupture, qui entraîne le déchirement de la voile) ;
- l'allongement juste avant rupture (étirabilité du tissu sous contrainte extrême) ;
- la résistance au pliage.

Le tableau ci-dessous résume ces principales caractéristiques, pour quelques fibres usuelles :

SAIL CLOTH FIBER COMPARISON CHART					
SAIL CLOTH FIBER	Initial Modulus grams/ denier	Tenacity grams/ denier	Flex Life % lost after 60 bend cycles	UV-Resistance 50% strength loss (months)	Elongation at Break Percentage
PBO Zylon†	1830	44	27%	2-3 months	2.5%
High Tenacity Carbon Fiber	1350	60	22%	not effected	1.2 - 1.5%
Spectra® / Dyneema®	1250	33.5	no effect	6-7 months	5.0%
Kevlar® Edge*	956	29.4	22%	2-3 months	3.0%
Kevlar® 49*	945	23.9	25%	2-3 months	1.5%
Twaron® 2200 (HMT)*	810	23.5	25%	2-3 months	1.5%
Cetran®	650	15	no effect	6-7 months	4.0%
Technora® Black	540	28.3	7%	3-4 months	4.2%
Vectran®	510	23	15%	1-2 months	2.0%
PEN Fiber (Pentex®)	250	10.2	no effect	6 months	6.0%
High Tenacity Polyester	135	7.9	no effect	6 months	8.0%
Nylon®	45	9.5	no effect	3-4 months	13%

† UV-Resistance tested with Magna Shield cover
* ASTM 885 (American Standard Testing Method #D885)

INITIAL MODULUS: A yarn's ability to resist stretch. Higher numbers indicate less stretch.
TENACITY: A yarn's initial breaking strength. Higher numbers indicate that greater load is needed to break the fiber.
FLEX LIFE: A measure for a yarn's ability to resist flexing & folding. Lower numbers indicate less loss after 60 cycles.
UV-RESISTANCE: Amount of time it takes for a yarn to lose 50% of its initial modulus. UV tests are normally conducted with artificial UV exposure.
ELONGATION: Elongation at break is a measure of a yarn's ability to resist "shock" loads.

Data Courtesy of Dimension Polyant Sailcloth

Fig53/ZZ42 : Caractéristiques mécaniques des fibres.

Le Dacron est une fibre polyester (polyéthylène téréphtalate) utilisée en tissage. Sa variante Pentex (polyéthylène naphthalate) est plus performante mécaniquement puisqu'elle possède un allongement deux fois moindre en conditions normales d'utilisation.

Les aramides (Kevlar, Technora, Twaron) ont une résistance à l'allongement et au déchirement bien supérieure mais une faible résistance aux UV. Par ailleurs ils n'aiment pas le pliage.

Le Spectra (polyéthylène) s'étire moins que les aramides en conditions normales mais davantage en conditions extrêmes, ce qui a un effet négatif sur sa longévité. Il peut être traité pour limiter le glissement entre fibrilles et diminuer encore son allongement (Cuben Fiber).

Le Vectran (polyester / polyacrylate) est un polymère à cristaux liquides. Il s'étire très peu, surtout sous forte charge, mais résiste mal aux UV.

La fibre la moins étirable est le PBO (p-phenylene-2, 6-benzobisoxazole). C'est aussi un polymère à cristaux liquides orientés dans le sens de la fibre. Inconvénients : résistances aux UV et au pliage très faibles.

Le Dacron est utilisé en tissage classique avec trame et chaîne. La densité du tissage est le paramètre qui confère sa résistance globale à l'allongement au tissu. Cette résistance est améliorée par imprégnation de résine, qui permet de limiter la porosité, le glissement des fibres les unes par rapport aux autres et la déformation dans le biais. On peut également pratiquer une enduction de résine supplémentaire en surface. Puisque la résistance à l'allongement de ces tissus varie selon la direction des tensions par rapport à celle du maillage, ils présentent l'inconvénient de mal accommoder des tensions multidirectionnelles.

Avec les fibres à haut module, il n'y a plus nécessité d'un tissage serré, d'autant plus que celui-ci est délicat avec des fibres aussi rigides. On utilise alors des grilles plus lâches, sandwichées par collage entre deux films polyéthylène (Mylar) qui eux présentent des caractéristiques d'allongement complètement isotropes. On fabrique ainsi des panneaux où une adéquate orientation des fibres permet de reprendre les principales directions d'effort, le film assurant la résistance dans les autres directions. On peut mixer des fibres différentes dans le même panneau pour utiliser les avantages spécifiques de chacune. Dans ces panneaux les fibres sont tendues et non tissées, il n'y a plus de déformation liée à l'embuvage. Il subsiste cependant une déformation liée à la torsion hélicoïdale résiduelle des fibres.



Fig55/ZZ46 : Cuben Fiber (Spectra traité anti-glissement / Mylar).

Les panneaux Mylar – fibres à haut module, en raison de leur moindre déformabilité, solliciteront beaucoup plus les coutures que des panneaux tissés classiques. Pour cette raison, le collage, notamment par pistolet à chaud, est une solution intéressante pour leur assemblage.

La technologie 3DL utilise un moule, dont les formes sont celles de la future voile, sur lequel on place un premier film Mylar. Les fibres, orientées selon les lignes d'effort prévues pour la voile, y sont déposées par encollage, puis le deuxième film recouvre l'ensemble. Une variante de cette technique consiste à déposer sur le moule des panneaux Mylar / fibres déjà fabriqués, découpés et orientés selon les lignes d'effort, et assemblés par encollage.

La technologie Tape Drive utilise, sur un film Mylar qui définit la forme de la voile, des bandes adhésives constituées d'une grille à haut module. Ces bandes sont placées de telle sorte que l'orientation des fibres permette la reprise des efforts principaux (voir figure ci-dessous). On sépare ainsi, dans la conception de la voile, la gestion de la forme et celle des efforts.

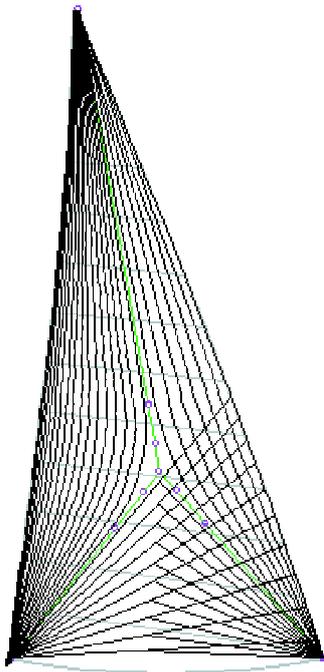


Fig56/ZZ49 : Reprise des efforts, technologie TapeDrive.

La plupart des voiles possèdent des renforts elliptiques aux différents points, pour une meilleure diffusion des tensions vers le centre de la voile. Certaines possèdent aussi des bandes de réglage, utiles pour mieux visualiser la répartition des volumes.

III – 5) Coupe assistée par ordinateur

Le maître-voilier cherche d'abord, soit par calcul soit par expérience, à connaître la distribution des tensions dans la voile qu'il projette.

Ensuite, le processus de conception est généralement le suivant :

- définition des dimensions extérieures ;
- prise en compte des caractéristiques de flexion du mât, de l'étai ;
- prise en compte de la nécessité de puissance ;

- détermination du meilleur profil théorique, soit par expérience empirique, soit par essais en soufflerie ou calcul théorique (VPP) en vue d'obtenir les courbes portance-traînée ;
- définition des répartitions horizontale et verticale du creux, des angles d'entrée et de sortie, du vrillage (notamment d'attaque) ;
- choix du matériau et de son orientation ;
- obtention de la forme 3D de la voile sous contrainte ;
- décomposition de cette forme 3D en panneaux 2D, pour la coupe et l'assemblage final.

Aujourd'hui la majorité de ces étapes, notamment la dernière, est assistée par ordinateur. Le maître-voilier est ainsi débarrassé du souci de calculer lui-même les pinces de chaque panneau, qui donnent le creux d'ensemble surtout pour les coupes horizontales (voir figure ci-dessous).

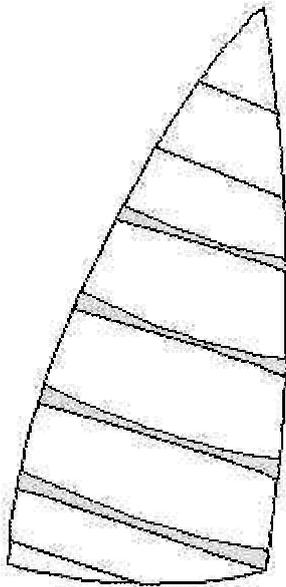


Fig86/ZZ90 : Gestion du creux par les pinces.

La démarche ci-dessus part d'une détermination à priori des formes de la voile à fabriquer, compte tenu des caractéristiques aérodynamiques qui lui sont demandées. On peut aussi parfois adopter avec profit une démarche inverse, un peu plus empirique, où une première voile est fabriquée et ses formes digitalisées, sur l'eau, par une caméra embarquée (voir la figure ci-dessous qui illustre l'utilisation du logiciel Shape Plot de WB Sails).

Le régatier pourra utiliser un petit shareware disponible sur Internet, Sailform (Carlson Designs), dont nous avons déjà parlé au chapitre I. A partir d'une photo numérique prise de bas en haut, on peut isoler différents profils à différentes hauteurs dans la voile et obtenir directement les paramètres de forme.

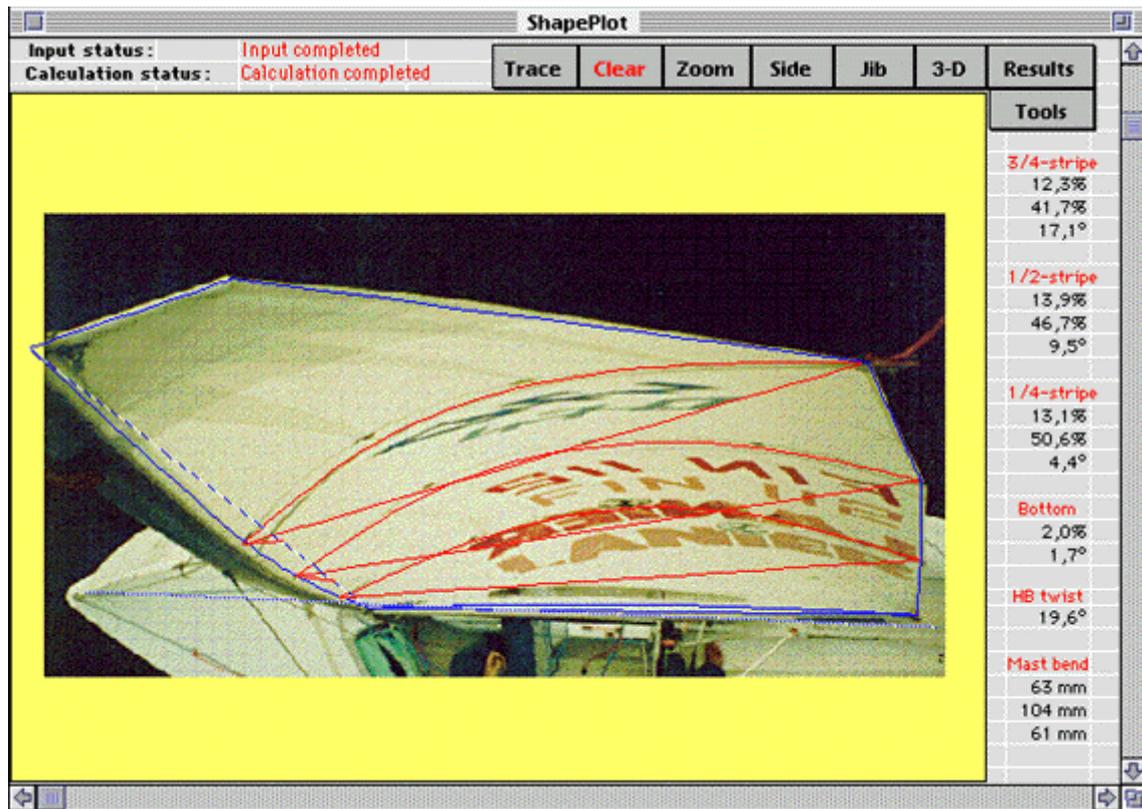


Fig45/ZZ21 : Analyse des formes d'une voile en navigation par le logiciel Shape Plot.

Ces paramètres de forme peuvent ensuite être introduits dans un VPP pour en déduire les courbes portance-trainée. Dans le même temps, le feedback d'un coureur de haut niveau qui teste la voile permet de comparer les sensations physiques avec l'analyse mathématique de la performance, donc de mieux cerner les modifications à intégrer dans la voile suivante. La figure ci-dessous décrit ce cycle d'optimisation, partant des tests sur l'eau, puis saisie des formes, analyse théorique de la performance, modification des formes, fabrication puis à nouveau tests sur l'eau...

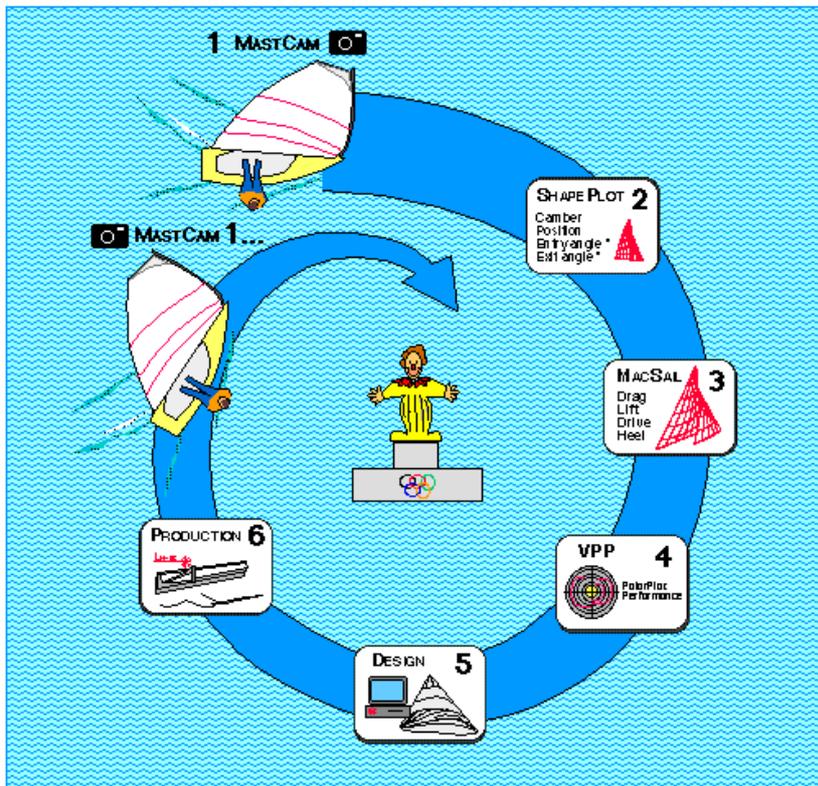


Fig58/ZZ21 : Procédure de conception d'une voile assisté par ordinateur.

III – 6) Exemples de coupes classiques

Nous avons déjà mentionné les coupes horizontales (Fig86/ZZ90) pour lesquelles, généralement, les fils de trame sont disposés parallèlement à la chute.

Les coupes radiales, biradiales ou triradiales témoignent d'une prise en compte plus précise de la distribution des tensions principales.

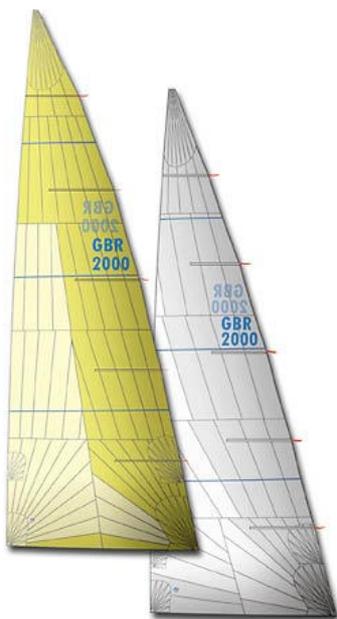


Fig61/ZZ59 : Exemple de coupe triradiale (à gauche) et biradiale (à droite).

Ci-dessous on trouve quelques exemples de coupes classiques pour les focs :

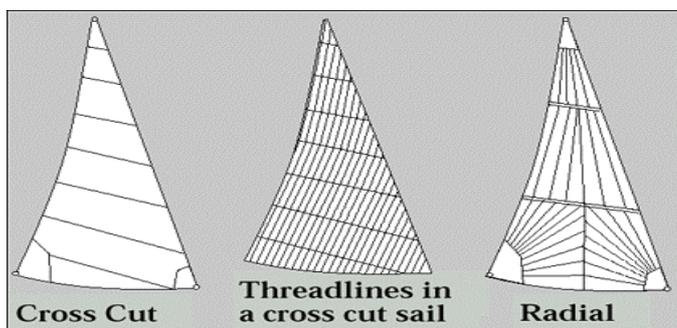


Fig57/ZZ49 : Coupes usuelles des focs.

Les spis asymétriques, sur les multicoques et certains croiseurs, peuvent être portés plus près du vent que les spis classiques car ils sont plus plats. Nous verrons (chapitre VI) que l'asymétrie vient du désir de mieux exploiter l'écoulement toujours plus rapide côté guindant et de raccourcir la chute pour limiter la perturbation du spi sur la grand-voile, ce qui donne, par exemple, la coupe suivante sur un croiseur :

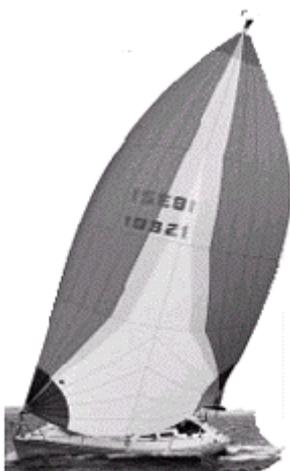


Fig59/ZZ55 : Exemple de spi asymétrique.

Ces spis sont utilisés en finesse, donc subissent des efforts importants : de ce fait on les taille dans des matériaux peu déformables (polyester, composites).

Enfin, nous avons aussi différentes coupes possibles pour les spis classiques symétriques, tels que ceux qui équipent croiseurs et dériveurs (voir figure ci-dessous). Noter en particulier la présence de panneaux horizontaux vers la mi-hauteur, qui aideront à contrôler les volumes (voir chapitre VI)

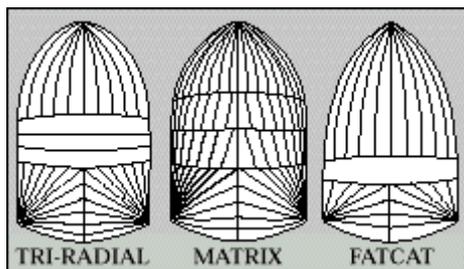


Fig60/ZZ56 : Coupes usuelles pour les spis.

III – 7) Quelques conclusions utiles pour le réglage

La force aérodynamique engendre dans les voiles des tensions perpendiculaires à leurs soutiens (mât, bôme, étai) qu'on doit équilibrer par des tensions parallèles (Cunningham, bordure) pour remettre le tissu en forme. Sur la chute seule la tension de chute s'oppose au dévers généré par la tension perpendiculaire. Les lattes qui en absorbent une partie facilitent le contrôle de la chute.

Une même force aérodynamique génère plus de tensions perpendiculaires dans une voile plate que dans une voile creuse. Une voile plate demande donc plus de Cunningham et de bordure pour être maintenue en forme.

Dans les zones plates les tensions sont davantage diffusées. S'il y a plus de creux au voisinage d'une lisière les tensions resteront plus localisées au voisinage immédiat de cette lisière.

En creusant la bordure on localise davantage la tension de chute sur l'arrière, donc on referme la chute. En l'aplatissant, on délocalise la tension de chute donc on favorise l'ouverture de la chute.

En bordant la voile, la tension de chute, forte donc davantage localisée sur l'arrière, aplatit la chute mais augmente le creux en tête et tend à le faire reculer globalement.

En creusant la bordure sur une voile bien bordée, pour les mêmes raisons le volume bas induit par ce creusement est répercuté plus haut.

Dans un premier temps, la tension du Cunningham équilibre tensions perpendiculaires et parallèles et remet le tissu en forme, quelles que soient la raideur du mât ou l'étirabilité du tissu.

Avec plus de tension, sur un mât raide il y a aplatissage du guidant et avancement du creux, d'autant plus que le tissu est déformable. L'aplatissage de la partie arrière favorise une plus grande ouverture de la chute. Sur un mât souple il y a en plus affinement global par augmentation du cintrage, d'autant plus marqué que le tissu est peu déformable. Sur un mât souple il y a aussi réduction de la distance point de drisse – point d'écoute donc diminution de la tension de chute. L'affinement global plus important et la diminution de tension de chute font que le vrillage est toujours plus accentué, sous l'action du Cunningham, sur un mât souple que sur un mât raide.

Chapitre IV : Equilibre de route

IV – 1) Rappel : portance et traînée des appendices

Les réglages, que nous aborderons dans les chapitres suivants, doivent non seulement permettre de tirer la meilleure performance des voiles, mais aussi de conserver l'équilibre de route. Rien ne sert d'avoir un réglage performant, du seul point de vue aérodynamique, si le barreur doit maintenir la barre en travers pour conserver sa trajectoire !

Nous avons vu (paragraphe I – 8) que les appendices, dérive et safran, développent, comme les voiles, une portance lorsqu'ils sont mis en incidence non nulle par rapport à l'écoulement de l'eau. Pour rappel, la figure ci-dessous représente la dérive d'un bateau tribord amure, qui dérape donc vers le bas du dessin. On constate qu'il y a bien déplacement du point de stagnation sous le vent, apparition d'un extrados au vent, donc d'une portance d'autant plus grande que la vitesse du bateau est importante.

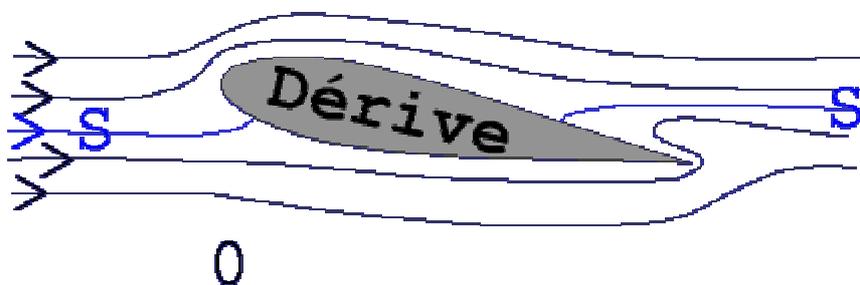


Fig10/ZZ2 : Portance d'une dérive en incidence: déplacement sous le vent du point de stagnation, resserrement au vent des lignes de courant.

Le bateau doit d'abord déraper un peu pour que les appendices se trouvent sous incidence non nulle, mais ensuite la portance au vent (représentée sur la figure ci-dessous pour un bateau bâbord amures cette fois) développée par ses appendices l'empêche de déraper davantage. Lorsque le bateau a atteint sa vitesse cible pour les conditions régnantes, ces forces antidérive équilibrent exactement la composante de dérive de la force aérodynamique.

Fig. 11 - Keel Lift. The keel generates lift perpendicular to the angle of attack of the water. The angle of attack is created by leeway.

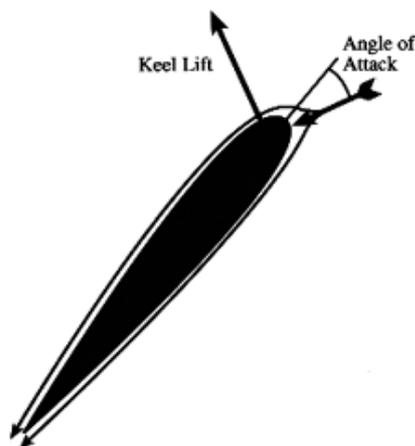


Fig28/ZZ9 : Portance d'une dérive en incidence.

La portance (mais aussi la traînée) d'un appendice augmente avec son incidence : un safran maintenu angulé au vent (du fait de l'ardeur du bateau) est plus efficace du point de vue antidérive, mais il freine davantage le bateau.

D'autres solutions que des appendices classiques ont été testées, consistant par exemple à fixer un aileron orientable à l'avant de la carène en lieu et place de la dérive. En l'orientant correctement, on développe une portance au vent qui peut faire suivre au voilier une direction, sur le fond, plus au vent que le cap qu'il suit, et facilite par ailleurs ses manœuvres par son action conjuguée avec le safran :

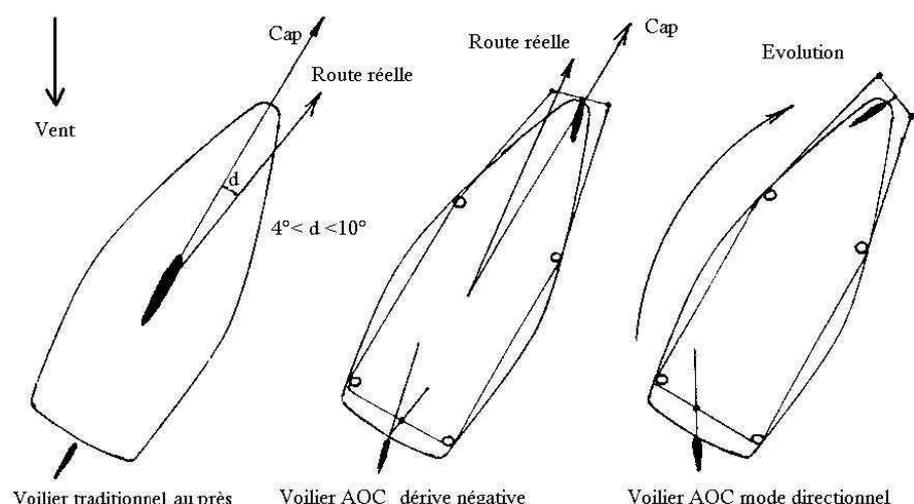


Fig48//ZZ28 : Dérive négative sous l'effet d'un aileron avant.

IV - 2) Rappel : les forces en action

Du point de vue de l'équilibre de route, on est amené à considérer deux couples de forces :
 - la composante propulsive de la force vélique, équilibrée à vitesse constante par la résistance à l'avancement de la carène d'une part,
 - et la composante de dérive de la force vélique, équilibrée à vitesse constante par la portance antidérive des appendices (et aussi de la coque qui y participe un peu).

La fig9//ZZ2 présentée au paragraphe I – 8 est une représentation de ces différentes forces à l'équilibre.

Même si, pour chaque couple de forces, la résultante est nulle, si pour un couple donné le plan d'application des deux forces n'est pas confondu il y a apparition d'un moment de rotation qui va influencer sur l'équilibre de route.

IV –3) Centres de carène, de poussée et moment composante de dérive – force antidérive

Le premier moment que nous allons considérer provient d'un décalage entre les points d'application de la force vélique et de la force antidérive. Il intervient surtout au près, là où la force antidérive et la composante de dérive de la force vélique sont à leur maximum.

Le point d'application de la force vélique, donc aussi de sa composante de dérive qui nous intéresse ici, est appelé centre vélique ou centre d'effort. Il est représenté par l'abréviation CE sur la figure ci-dessous.

Le point d'application de la force antidérive est appelé centre de dérive, ou centre de résistance latérale. Il est représenté par l'abréviation CLR sur la figure ci-dessous. La figure ci-dessous montre que lorsque le centre d'effort et le centre de résistance latérale sont dans le même plan vertical l'équilibre de route est parfait, et le voilier maintient sa route sans que le barreur doive anguler le safran. Si le CE passe en avant du CLR, le bateau abat. Il lofe dans la situation inverse.

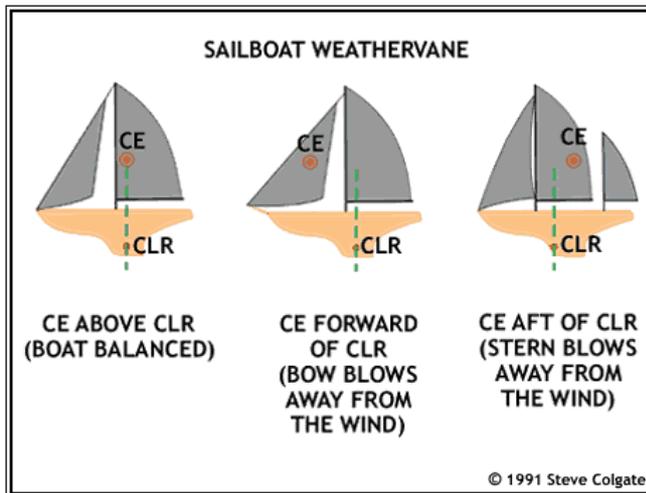


Figure 3

Fig63/ZZ68 : Centres de carène et de poussée.

Nous pouvons modifier l'équilibre de route d'un voilier par les réglages. Si nous voulons le rendre plus ardent, il nous faut reculer le CE et/ou avancer le CLR. Pour cela, on peut par exemple :

- augmenter le creux de la grand-voile ;
- reculer ce creux ;
- la border davantage ;
- affiner le foc ;
- choquer le foc ;
- basculer le mât en quête arrière (bien que ceci ait une influence beaucoup moins sensible, sur l'équilibre de route, que les autres réglages mentionnés ci-dessus) ;
- reculer le pied de mât (en dériveur) ;
- pour les dérives pivotantes, la descendre à fond, ce qui la bascule sur l'avant ;
- placer le bateau sur le nez, ce qui contribue également à avancer le centre de carène.

Ainsi certains dériveurs avancent le pied de mât dans la brise, pour compenser une tendance accrue du bateau à devenir ardent (liée au recul du creux sous la poussée du vent). Ils relèvent aussi la dérive, ce qui la recule, et contribue du même coup à réduire sa traînée.

La quête arrière n'a qu'une influence limitée, mais qui se fait tout de même sentir si elle devient importante. Certains catamarans, dans la brise, mettent beaucoup de quête arrière (pour diminuer la puissance et enfourner moins au portant), faisant reculer le CE. S'il n'y a pas de dérives, ceci peut contraindre l'équipage à se reculer énormément pour conserver un bateau pas trop ardent, naviguant ainsi en inclinaison sur l'arrière. Ceci peut être souhaitable dans le clapot car le franchissement par chevauchement de l'étrave s'en trouve facilité, mais nuisible sur eau plus plate du fait de la traînée du tableau arrière et du raccourcissement de la longueur à la flottaison.

Avec un excès de quête arrière, le safran devra également être maintenu plus angulé (surtout sans dérives), avec des risques de traînée excessive.

Notons que lorsqu'un bateau passe du près au portant, l'ouverture de ses voiles fait que son CE avance, ce qui réduit sa tendance à être ardent. Dans le même temps, la dérive est relevée. Sur un catamaran, cela se traduit par un avancement du CLR, donc une tendance à être plus ardent (tous les barreurs de catamarans savent que sans dérive, lors des départs ou arrivées de plage, il faut tirer fort sur la barre pour aller droit). Les deux phénomènes se compensent plus ou moins. Par conséquent, du point de vue de ce premier couple de forces, le passage du près au portant ne modifie pas sensiblement l'équilibre de route d'un catamaran à dérives, alors qu'un catamaran sans dérive deviendra un peu plus mou.

De manière générale, il est souhaitable que le bateau soit légèrement ardent. Cela lui donne un comportement plus sécurisant notamment dans les temps « à claques ».

IV – 4) Moment composante propulsive de la force vélique – résistance de carène

IV – 4 – 1) Influence de la gîte au près

Lorsque le bateau gîte, le point d'application (CE) de la composante propulsive de la force vélique se déplace sous le vent. Pour un monocoque, le point d'application de la résistance à l'avancement (situé quelque part sur la carène) se déplace aussi un peu sous le vent, mais moins.

Il en résulte, dans un plan vertical perpendiculaire au bateau, un décalage horizontal entre ces points d'application (voir figure ci-dessous) qui génère un couple de rotation qui tend à faire lofer le bateau. Des réponses rapides, en monocoque, consistent à remonter, donc reculer la dérive pivotante, en même temps qu'on ouvre les voiles pour limiter la gîte et avancer le CE.

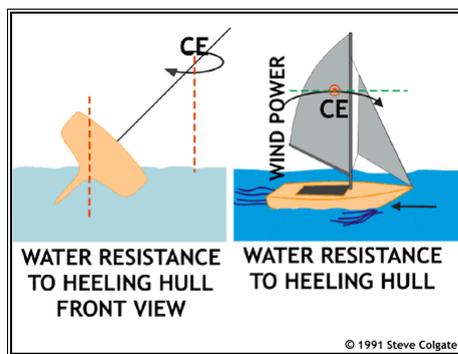


Fig64/ZZ68 : Le bateau devient plus ardent à la gîte.

Sur un catamaran de sport qui gîte sur une coque, le point d'application de la résistance à l'avancement se déplace sur la coque sous le vent. Aux gîtes modérées qui sont les plus efficaces au près, nous avons plutôt un couple d'abattée. Celui-ci reste gérable par l'équipage tant que le bateau glisse bien, mais si la rencontre avec une vague plus forte freine brutalement le voilier, cette tendance à l'abattée se manifestera bien avec risque accru de chavirage sous le vent.

IV – 4 – 2) Couple de lof ou d'abattée au portant

Au portant et pour tous les bateaux, l'ouverture plus grande des voiles déplace le CE sous le vent. Comme dans le cas précédent, il y a apparition d'un couple de lof. Pour l'annuler, les petits dériveurs marchent en contre-gîte au vent arrière, remettant ainsi le CE pile au-dessus du CLR.

Un spi « tire » toujours plus efficacement côté guindant. Sur un croiseur ou un dériveur qui marche au vent arrière, le CE du spi est décalé au vent (alors que celui de la grand-voile est décalé sous le vent). Le spi équilibre donc la grand-voile, mais si sa poussée devient beaucoup plus importante que celle de la grand-voile, du fait des surfaces ou des réglages respectifs, il peut y avoir départ à l'abattée (voir aussi paragraphe VI – 3 – 3) . Il faut alors ramener le tangon plus près de l'étai pour diminuer le bras de levier (distance horizontale CE – axe du bateau) de la poussée du spi.

IV – 4 – 3) Couple d'enfournement au portant

Au portant, la résistance à l'avancement de la carène et la composante propulsive de la force vélique sont davantage parallèles qu'au près.

La résistance à l'avancement de la carène s'exerce sur celle-ci, en bas du bateau, alors que le CE est situé beaucoup plus haut. L'action de ces deux forces décalées crée donc un moment qui tend à faire piquer le nez au bateau : c'est le couple d'enfournement responsable, pour beaucoup de pratiquants du catamaran de sport, de « soleils » mémorables.

Pour le réduire, on met le mât en quête arrière, on ajuste le vrillage (qui oriente la force vélique encore plus sur l'avant, mais qui peut aussi diminuer la portance des profils supérieurs, donc faire baisser le centre d'effort) et en présence d'un spi on le fait « monter » pour qu'il tire l'étrave vers le haut.

IV – 5) Compensation et parallélisme du ou des safrans

Nous avons vu qu'un peu d'ardeur est souhaitable, et que des réglages tels que la quête arrière du mât, importante dans la brise pour diminuer la puissance, influent sur l'équilibre de route. Le safran d'un bateau ardent est donc toujours un peu angulé au vent. Par conséquent, il développe une portance au vent, sous la forme d'une force grossièrement perpendiculaire au plan de la lame, et dont on peut repérer approximativement le point d'application (représenté par WC sur la figure ci-dessous).

Or le safran possède toujours un axe de rotation, qui exerce sur la lame une réaction égale et opposée à la portance aérodynamique.

Si le point d'application de la portance générée par le safran est exactement situé dans le prolongement de l'axe de rotation, aucun couple de rotation ne s'exerce sur la lame, et le barreur n'a aucun effort à faire pour maintenir la trajectoire. S'il lâche sa barre, le bateau poursuit sa route, le safran restant d'autant plus angulé qu'il est ardent.

Si sur la lame le point d'application de la portance hydrodynamique est en arrière de l'axe de rotation, alors un couple apparaît, qui tend à faire monter l'arrière de la lame au vent. Le barreur sent que sa barre se met à tirer. S'il ne réagit pas, le bateau lofe et stoppe.

Nous avons la situation inverse si le safran est trop fortement compensé vers l'avant. Le bateau tend à abattre.

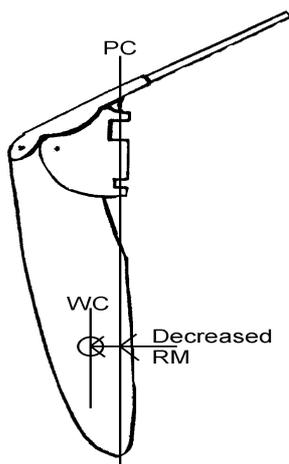


Fig113/ZZ172 : Compensation des safrans pour réduire le couplé appliqué au safran quand le bateau n'est pas équilibré.

Du fait de ces mouvements du bateau quand on lâche sa barre, nous pouvons donc croire (c'est une erreur très répandue) que régler la compensation du safran suffit à le rendre ardent ou mou. Il n'en est rien, car compenser un safran n'a qu'une incidence minime sur la position du CE global – qui seul détermine le comportement du bateau.

Si un voilier est ardent, il faudra quoiqu'il arrive orienter la lame de safran au vent. Mais selon la compensation donnée au safran, l'effort nécessaire pour maintenir le safran correctement angulé – donc pour marcher droit – sera soit une traction soit une poussée sur la barre ! La compensation des safrans ne sert qu'à éviter de fatiguer le barreur.

On trouve ici un autre intérêt à une légère ardeur du bateau. Le safran angulé se trouvant sous incidence non nulle, il développe une portance qui entraîne le tableau arrière au vent et aide à limiter le dérapage. Avec trop d'ardeur les pertes en traînée dépassent cependant les gains en portance antidérive.

Du point de vue du réglage des safrans, les coques asymétriques présentent un cas particulier. Elles défléchissent l'écoulement, lui présentent au vent un extradors qui développe une portance antidérive.

Mais cette déflexion met du même coup le safran dans un écoulement défléchi. Au départ, sans correction de trajectoire, le safran doit être dans le sens de l'écoulement général (si on néglige le dérapage, et si on suppose le bateau neutre). Sa traînée est ainsi minimisée. Puisque l'écoulement général diverge en arrière du bateau, on devine que les deux safrans devront eux-mêmes diverger, ou en d'autres termes, être légèrement pincés sur l'avant par un léger raccourcissement de la longueur de la barre d'accouplement.

Pour déterminer la bonne valeur du pincement, on peut par exemple désaccoupler le safran au vent pour le laisser prendre sa position naturelle, et barrer uniquement avec le safran sous le vent. On repère alors où tombe la barre d'accouplement par rapport au bras du safran au vent, et c'est dans cette position qu'on réaccouple le safran.

Si le bateau est ardent (les Hobie dans la brise) le safran sous le vent sera angulé davantage, donc positionné à peu près ainsi (dans la figure ci-dessous c'est la coque tribord qui est représentée) :

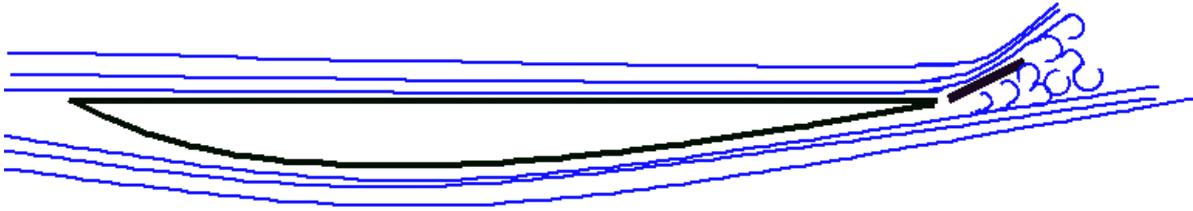


Fig114/ZZ172 : Angle de barre au-delà de la position naturelle de sortie de l'écoulement (qui nécessite un pincement préalable), pour corriger l'ardeur du bateau.

IV – 6) Spécificités des multicoques

On rappelle ici quelques subtilités architecturales des multicoques.

Nous avons vu (paragraphe II – 2) que pour une coque symétrique à la gîte, le déplacement des lignes d'eau, joignant l'étrave à un point sous le vent du tableau arrière, fait que le flanc de la coque se présente sous incidence positive à l'écoulement : ceci tend à faire monter la coque au vent, et augmente un peu le caractère ardent du bateau.

Pour les coques asymétriques, l'effet est encore plus marqué. Lorsqu'on navigue sur deux coques, les portances de la coque au vent et celle de la coque sous le vent se compensent, mais dès que la coque au vent déjauge, ne subsiste plus que la portance de la coque sous le vent. Cette portance est plus forte du fait du dessin volontairement asymétrique : par conséquent, à la gîte, la tendance à l'ardeur est plus importante que celle des catamarans à coques symétriques.

Chapitre V : Le gréement et la grand-voile

Le gréement est l'organe de transmission de l'énergie propulsive des voiles vers la coque. Inversement, les mouvements de la coque dans les vagues sont transmis aux voiles par son intermédiaire. Les flexions du mât, latérale et longitudinale, ont un effet prononcé sur les formes des voiles, notamment celles de la grand-voile. Le mât perturbe l'écoulement de la grand-voile, mais la bonne maîtrise de ses flexions permet au régleur d'ajuster la puissance de sa voilure pour l'adapter aux conditions régnantes. Avec la bôme et l'étai, il permet d'apporter un ancrage aux tensions perpendiculaires générées dans le tissu par la force aérodynamique.

Dans ce chapitre, nous ne nous intéressons pas uniquement aux gréements de catamarans (généralement des mâts profilés pivotants avec un étai, deux haubans et parfois un losange). Dans le domaine du contrôle des flexions du mât, il y a en effet beaucoup à apprendre des caractéristiques des différents types de gréement qu'on peut trouver sur les dériveurs ou les croiseurs.

Le bon réglage des voiles vise à obtenir une certaine quantité de puissance qui dépend des caractéristiques du voilier, des conditions régnantes et de la capacité de l'équipage à maîtriser la gîte (voir paragraphe II – 1).

Le seuil de surpuissance, force de vent à partir de laquelle on doit commencer à aplatir les voiles, n'est pas le même pour tous les bateaux. Pour un bateau donné, il dépend aussi du poids de l'équipage.

En dériveur comme en multicoque de sport, avec un équipage lourd et/ou un plan d'eau plus agité, il faudra davantage de puissance.

Nous avons vu (paragraphe 1 - 10 - 1) que du fait de sa mise en refus par le foc, la grand-voile d'un sloop est plus centrée et affinée sur l'avant que celle d'un cat-boat. Sa force vélique étant plus latérale, elle est moins efficace sur la propulsion, mais agit davantage sur la gîte. Avec un gréement souple, nous aurons l'avantage de pouvoir obtenir un affinement général, donc en particulier de la partie avant, par cintrage du mât. Le centre vélique d'une grand-voile de sloop étant plus reculé, elle a un rôle plus essentiel sur l'équilibre de route.

D'autre part, sur un gréement fractionné, au-dessus du capelage de foc elle retrouve une adonnante d'attaque. On doit donc, selon les besoins, la creuser, la vriller ou avancer son creux.

En navigation, les formes de la grand-voile dépendent aussi de celles qui lui ont été données à sa conception (ronds de guindant, de chute, volume de moule) et de l'élasticité du tissu, qui peut se déformer sous la pression du vent.

Le régleur peut agir sur ces volumes par la maîtrise des tensions de guindant, de chute, de bordure, des flexions longitudinale et latérale du mât, de la raideur et du profilage des lattes, de la rotation du mât et de la position du chariot d'écoute.

Il obtiendra ainsi la puissance et/ou la tolérance qu'il souhaite pour les conditions régnantes.

V – 1) Rappels du chapitre I

Avant d'aborder ce qui suit, le lecteur est invité à revoir les conclusions principales des chapitres précédents (paragraphe I – 11 et III – 7). Nous en résumons ci-dessous les points essentiels :

- plus le vent est fort et/ou plus le bateau est rapide, plus on doit affiner les voiles.
- La quète arrière permet de lisser la discontinuité aérodynamique et géométrique du profil d'ensemble grand-voile – foc.
- Plus de vrillage implique plus de vitesse dans la brise, d'accélération en relance, de tolérance, et moins de puissance, de traînée et de cap. Il accommode l'adonnante d'attaque et le gradient de vent, réduit le tourbillon marginal, réduit la puissance dans la brise.
- Au près sur eau plate avec priorité cap, on privilégie des profils fins 50%, qui ont un meilleur rapport portance/traînée mais sont moins tolérants. Peu de vrillage, creuser un peu si priorité vitesse.
- Au près sur eau agitée, creuser (plus de puissance) et avancer le creux des profils (plus de tolérance). Vriller et augmenter la quète arrière (plus de tolérance).
- Au portant, creux et vrillage plus prononcés surtout si le bateau est lent.
- Creuser en tête dans le vent faible mais vriller dans le vent fort.
- Le foc est toujours plus ouvert que la grand-voile. Il est plus rond sur l'avant et plus plat sur l'arrière, et souvent coupé plus creux en tête. Un foc plus creux doit être plus centré qu'un foc plat.
- Le réglage de largeur du couloir est un outil très efficace de régulation de la puissance.

V - 2) Rappels du chapitre III : tensions et élasticité

- Pour être maintenues (ou remises) en forme, les voiles plates demandent plus de tensions sur les réglages, pour une même force aérodynamique, que les voiles creuses. Donc quand une voile est aplatie globalement ou en partie, si les tensions restent globalement constantes, la voile cède plus facilement sous la pression du vent (elle vrille).
- En creusant une voile (par exemple par sa bordure), on localise davantage la tension de chute sur l'arrière, donc on referme la chute.
- En bordant plus, on localise davantage la tension de chute sur l'arrière, donc on augmente et recule le creux en tête des deux voiles, où cette tension de chute est plus verticale. Dans un foc, la tension de chute étant plus horizontale en partie basse, elle aplatit logiquement cette zone en tirant sur le tissu.
- La tension du guindant remet d'abord le tissu en formes, avec plus de tension elle avance le creux, aplatit l'attaque au guindant, aplatit la partie arrière et favorise la dilution de la tension de chute donc le vrillage. L'effet d'une surtension du guindant est d'autant plus prononcé que le tissu est déformable.

V – 3) Les différents types de gréement

Schématiquement, et partant des configurations les plus simples, nous avons les gréements non haubanés (dériveurs solitaires, planche à voile), puis les gréements dits « souples » qui sont les gréements haubanés des dériveurs. On trouve ensuite les mâts haubanés et losangés des dériveurs et des catamarans de sport et les gréements fractionnés de certains croiseurs. Enfin, les croiseurs lourds possèdent souvent des gréements complexes, à plusieurs panneaux, souvent fixés en tête.

Les gréements non haubanés, du fait de leur extrême simplicité, et les gréements en tête, du fait de leur grande complexité et de l'impossibilité d'ajuster le haubannage en navigation, offrent peu de possibilités de réglage sur l'eau.

V – 4) Perturbations apportées par le gréement

Les mâts non pivotants, même profilés, perturbent l'écoulement au bord d'attaque sur l'extrados de la grand-voile. Cette perturbation est d'autant plus marquée au large où le profil d'ensemble, constitué par une grand-voile ouverte et un mât qui reste orienté dans l'axe longitudinal du bateau, présente, à la jonction mât-voile, la discontinuité de courbure la plus prononcée à l'extrados. Nous avons vu (paragraphe I – 9 – 6 – 1) qu'un des intérêts des mâts rétreints et de limiter cette perturbation au niveau des profils supérieurs, là où elle est la plus sensible. Nous avons vu aussi (paragraphe I – 10 – 1) que cette perturbation est plus importante sur un cat-boat et que (paragraphe I – 10 – 2) elle se manifeste davantage, sur un sloop, au-dessus du capelage d'étai dans la partie de grand-voile dégagée du foc.

Un premier intérêt des mâts pivotants est de permettre, côté extrados, de mettre la grand-voile dans le prolongement de la courbure du mât. L'extrados, qui est la partie du profil la plus efficace dans la propulsion, retrouve ainsi une performance optimisée.

Comme nous le verrons ci-dessous, il y a d'autres intérêts aux mâts pivotants, notamment le contrôle du volume en tête et celui des flexions latérale et longitudinale.

Le fardage du mât et de son haubanage induit aussi une perturbation supplémentaire par l'intermédiaire de leurs traînées de forme.

V – 5) Efforts subis par le gréement

Le mât subit :

- des compressions, sous l'effet du poids du gréement, de la tension statique et dynamique du haubanage, de la tension du Cunningham, de la tension du câble de trapèze ;
- des flexions, sous l'effet du poids du gréement, de la force aérodynamique, des tensions de chute et du Cunningham, des poussées de la bôme, du tangon, des barres de flèche, des lattes forcées, des cales de mât, des tractions du patacas, des bas-haubans, de l'étai s'il existe un décalage vertical entre capelage d'étai et capelage de haubans ;
- des torsions, sous l'effet des poussées désaxées de la bôme sur le vit de mulet, du tangon, du haubanage sur un mât pivotant, de la grand-voile quand elle est ouverte et vrillée ;
- des ondes de choc répercutées dans le gréement quand la coque bute dans les vagues.

V – 6) Conception et rôle du haubanage

Le haubanage maintient le mât en place, limite ses flexions, mais peut aussi les favoriser selon les besoins. La conception du haubanage (tension, angulation et ancrage des câbles, angulation et longueur des barres de flèche) détermine en partie ses caractéristiques de flexion.

Ainsi, s'il existe un décalage vertical entre les capelages d'étai et de haubans, la traction plus forte du hauban au vent provoque un cintrage latéral au vent si son ancrage est situé au-dessous de celui de l'étai, et un cintrage sous le vent s'il est situé au-dessus. Certains mâts de gréements fractionnés ont un panneau supérieur libre de grande longueur. Dans ces cas nous verrons que le cintrage au vent du panneau inférieur est favorisé. Si on souhaite le limiter, on peut, entre autres, positionner l'ancrage des haubans au-dessus de l'étai, ce qui au contraire induit un cintrage latéral sous le vent pour ce panneau inférieur.

Lorsque les haubans sont écartés du mât par des barres de flèche (dériveurs, croiseurs) celles-ci aideront le mât à résister à la flexion latérale. En effet la traction des haubans sur le mât est plus efficace car son angle de tire est plus grand ; d'autre part, quand le mât cintre, la barre de flèche qui appuie sur le hauban concerné reporte sur ce hauban une partie des efforts induits.

Sur les multicoques de sport où le mât doit pouvoir pivoter, il est impossible de faire passer les haubans par les extrémités des barres de flèche et de les ancrer sur la coque, ce qui interdirait la rotation. Les efforts sont donc reportés sur des câbles de losange qui reviennent au pied du mât.

L'angulation des barres de flèche favorise un cintrage longitudinal, vers l'avant si elles sont poussantes. Aux paragraphes V – 8 et V – 9 – 6, nous étudierons en détail l'influence de leur longueur et de leur angulation sur les flexions latérale et longitudinale du mât.

Sur les dériveurs où ce sont les haubans qui passent par les barres de flèche (en l'absence de losange), la tension du gréement, appuyant sur des barres de flèche poussantes, induit un précintrage du mât, utile pour affiner les profils dans le petit temps et la brise. Ce précintrage est d'autant plus important que l'ancrage des haubans est reculé, car alors les haubans, qui cintent toujours le mât par poussée sur les barres de flèche, peuvent en outre le cintrer plus facilement encore par traction sur le capelage. L'ancrage reculé des haubans sur certains dériveurs (montage en V, voir figure ci-dessous) permet aussi d'éviter, au portant, que le mât ne parte sur l'avant. Il possède cependant l'inconvénient de limiter l'ouverture de la grand-voile.

En multicoque de sport le précintrage est assuré par la tension des câbles de losange, quand ils sont présents.

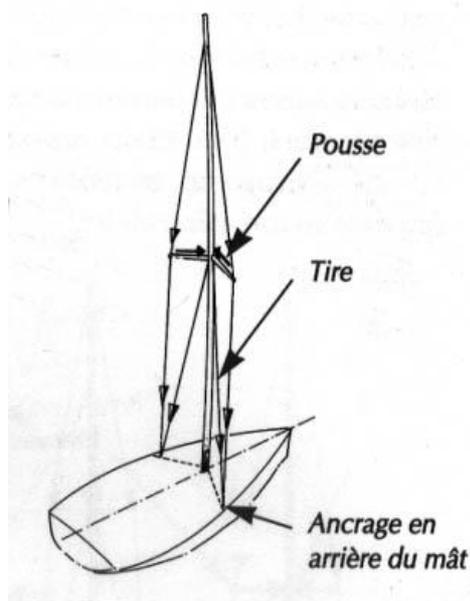


Fig179/ZZ212 page 178 : Montage en V des dériveurs.

Quand l'ancrage des haubans est reculé par rapport au mât, la tension du gréement détermine également la flexion de l'étai (ou de la drisse de foc lorsqu'elle remplace l'étai, voir figure ci-dessous) donc la puissance, la tolérance et le cap du foc (voir chapitre VI).

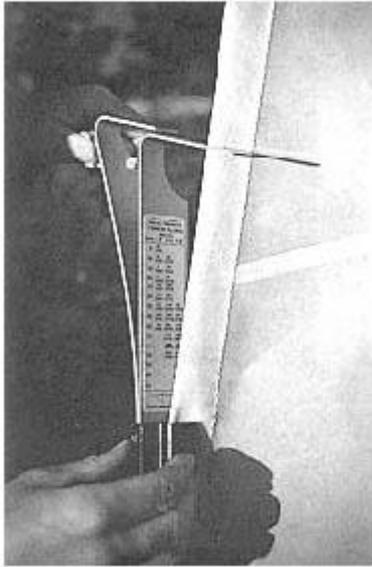


Fig97/ZZ131 : Mesure de la tension de gréement sur la drisse de foc d'un Fireball.

Elle doit être ajustée en fonction de la force du vent pour obtenir la flexion d'étai désirée. La flexion d'étai augmentant logiquement avec la force du vent, il est naturel de raidir le haubanage quand le vent monte.

En l'absence de foc, sur un catamaran cat-boat une faible tension de gréement permet de basculer le mât sur l'avant au portant et de récupérer de la puissance. Mais ceci laisse partir le mât sous le vent au près, donc réduit la puissance. Seuls les speed tests permettront de se faire une idée sur l'intérêt d'un tel réglage.

Sur des gréements plus complexes, on peut trouver des bas-haubans (également appelés diagonaux), ancrés au niveau du pont en arrière du plan du mât, et sur le mât au niveau des barres de flèche (figure ci-dessous).

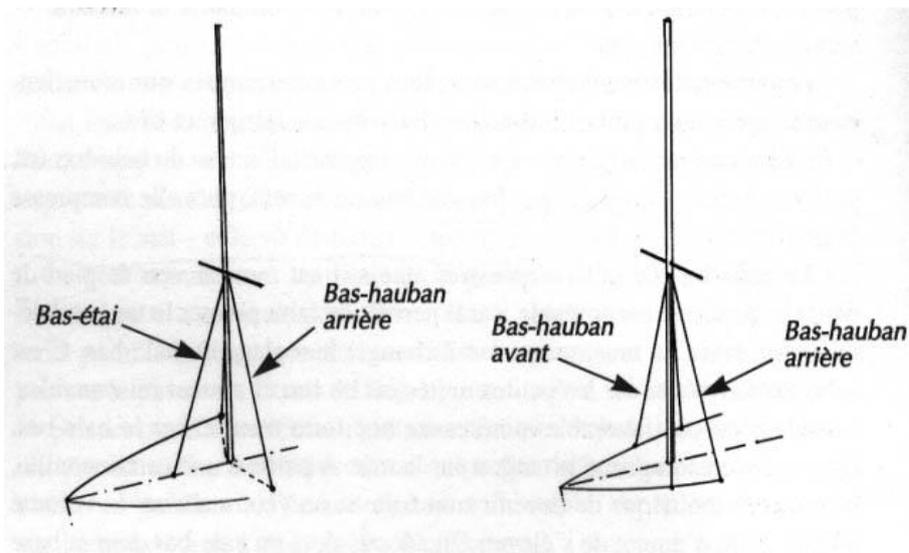


Fig181/ZZ212 page184 : Bas étai et bas-haubans (ou diagonaux).

Tirant le milieu du mât vers l'arrière, ils s'opposent à l'action des barres de flèche qui le poussent vers l'avant. Le panneau inférieur du mât subit alors une forte compression si la tension des haubans et celle des bas-haubans sont fortes. Sa courbure forcée et bloquée le rend alors plus raide, moins sensible aux déformations : il est précontraint (voir figure ci-dessous). Ces bas-haubans empêchent également le cintrage latéral du panneau inférieur.

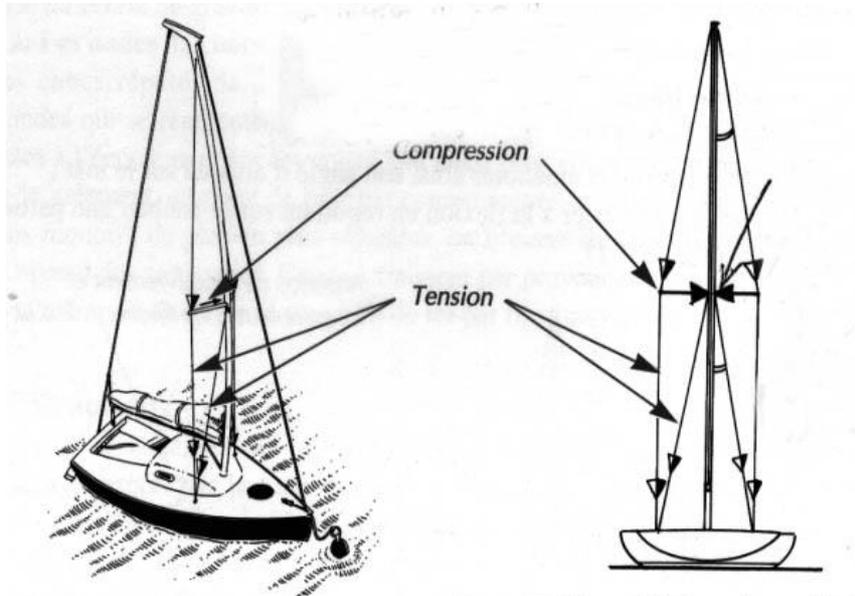


Fig178/ZZ212 page176 : Précontrainte par action opposée des BF et d'un bas-hauban.

L'ajustement de la tension des bas-haubans permet donc le contrôle du cintre longitudinal et latéral de la partie basse du mât (voir aussi paragraphe V – 9 – 4). La présence d'un bas-étai, qui tire le mât vers l'avant, accentue au contraire ce cintrage.

En croiseur lourd, avec des voiles d'avant à recouvrement, on ne peut installer des barres de flèche longues qui empêcheraient de rentrer suffisamment les points de tire du génois. On est alors contraint de diviser le mât en plusieurs panneaux pour lui assurer un maintien latéral correct. Chaque panneau est délimité par deux étages de barres de flèche. Dans les panneaux supérieurs, pour chaque panneau nous avons des haubans intermédiaires. Leur extrémité inférieure est fixée au bout des barres de flèche de l'étage inférieur et leur extrémité supérieure est fixée sur le mât au niveau de l'étage supérieur (paragraphe V – 16). Ces intermédiaires jouent le même rôle que celui des bas-haubans pour l'étage inférieur : ils raidissent le panneau. On se retrouve alors avec des compressions très fortes qui s'ajoutent de haut en bas, et limitent considérablement les possibilités de réglage en navigation.

V – 7) Effets de la flexion (provoquée ou non) du mât sur la forme de la grand-voile

V – 7 – 1) Effet du cintre longitudinal du mât

Considérons une grand-voile établie sur un mât suffisamment souple pour pouvoir cintrer en longitudinal, et regardons ce qui se passe quand le vent monte et que nous bordons davantage.

Dans un vent faible, la tension de chute n'est généralement pas assez forte pour faire fléchir le mât. Le mât qui reste droit induit un creux relativement important. La faible tension de chute a tendance à diffuser plus facilement vers le cœur de la voile au lieu de rester localisée sur la

chute (paragraphe III – 2). L'arrière est donc relativement plat, la chute peut facilement ouvrir dans une légère survente.

Si le vent augmente un peu, nous bordons davantage pour limiter le dévers de la chute. Dans un premier temps le mât va résister à la flexion. La tension de chute est davantage localisée sur l'arrière, diffuse moins vers le cœur de la voile pour l'aplatir : il apparaît un creux plus important un peu en avant de la chute. En conséquence, le creux global reste assez important (puisque le mât n'a pas fléchi) et recule (sous l'effet de la tension de chute). En tête où tensions de guindant, de chute et tensions perpendiculaires générées par la force vélique sont quasiment parallèles et verticales, il n'y a pas de tensions horizontales pour rééquilibrer le tissu, donc le creux augmente (paragraphe III – 2). Il est facile de s'en rendre compte : si à terre nous orientons le bateau au près et bordons un peu la voile, le haut se galbe.

Ce recul général du creux et cette augmentation en tête sont d'autant plus marqués que la bordure est relâchée, puisque, associé à une tension de chute plus forte, ce réglage permet de répercuter plus haut l'augmentation de creux obtenue en bas (paragraphe III – 2).

Le vent monte encore, on borde davantage. Supposons maintenant que le mât commence à fléchir vers l'arrière. Le guindant devient convexe, la distance mât – chute augmente, la grand-voile s'affine. Si la flexion est localisée en tête (ce qui peut être le cas d'un mât rétreint, ou d'un mât dont les flexions basses sont plus ou moins retenues par une béquille, des bas-haubans tendus, un calage à l'étambrai, des barres de flèche pas trop poussantes), la grand-voile s'aplatit essentiellement en tête et sur l'arrière des profils. La zone affinée s'inscrit dans le triangle tête – point de flexion – point d'écoute (figure ci-dessous). L'avant des profils n'est que peu modifié dans ce processus.

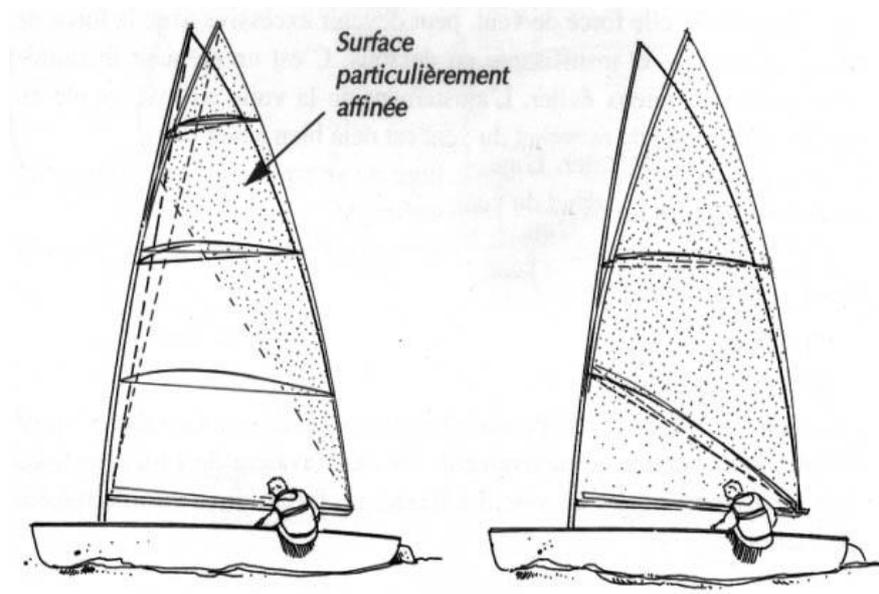


Fig182/ZZ212 page214 : Surface de GV affinée et vrillée par cintrage localisé en tête.

A l'intérieur de cette zone aplatie, l'angle de sortie des profils diminue. L'angle d'attaque reste à peu près constant puisque l'avant des profils bouge peu. Géométriquement, ceci est équivalent à un vrillage.

Puisque cette zone affinée demande plus de tension de chute pour être maintenue en position (paragraphe III – 2), si maintenant une survente intervient sans qu'on borde davantage, la tête

de la voile dans son ensemble et toute la partie arrière de la voile partiront plus facilement sous le vent (par rapport à une grand-voile établie sur un mât raide).

Ce dévers sera évidemment encore plus important si sous l'effet de la survente le mât cintre davantage vers l'arrière, puisque dans ce cas la distance point de drisse – point d'écoute, donc la tension de chute, diminuent.

Nous avons examiné le cintrage longitudinal du mât sous l'effet de la tension de chute, mais les conclusions générales sont les mêmes si d'autres réglages sont responsables de la flexion :

- une flexion localisée en tête affine et vrille géométriquement la tête et la chute de la grand-voile, favorise leur dévers à la survente. Ce type de flexion peut être recherché sur certains bateaux car il permet de conserver de la puissance en bas de la grand-voile tout en la réduisant en haut, là où elle influe le plus sur le couple de gîte. Un mât rétreint bien calculé peut être avantageux à ce titre.

- Si le mât fléchit dans son ensemble, par extension du raisonnement, on conçoit que l'ensemble de la grand-voile s'affine et déverse plus facilement à la risée. Cette fois par contre, l'avant des profils est lui aussi modifié car nous avons affinement généralisé : les angles d'entrée et de sortie diminuant à peu près de la même valeur, il n'y a pas de vrillage « géométrique » : l'incidence globale des profils reste la même.

V – 7 – 2) Effet du cintre latéral du mât

Sous l'effet du vent, le mât ne fléchit pas uniquement en longitudinal : il prend aussi une flexion latérale.

Quand le vent monte, la chute de la grand-voile veut déverser naturellement sous le vent, surtout en tête. Sa poussée latérale entraîne la tête de mât sous le vent.

En tête, le mât subit donc une flexion longitudinale vers l'arrière sous l'effet des réglages décrits au paragraphe V – 9 (en particulier de la tension de chute), et une flexion latérale sous le vent sous l'effet de la traction exercée par la partie supérieure de la voile qui tend à déverser.

Que se passe-t-il plus bas dans le mât ?

V – 7 – 2 – 1) Mât non haubané

Si on a affaire à un mât non haubané, nous devinons qu'il fléchit dans son ensemble, sa flexion est régulière. Sous l'effet de la composante latérale de la flexion, l'attaque de la grand-voile part de plus en plus sous le vent de bas en haut du mât, mais la chute de la grand-voile part aussi, et davantage, sous le vent. Le résultat est que nous avons une diminution d'incidence des profils, la grand-voile se trouve vrillée dans son ensemble. D'autre part, puisque la tête de mât est également entraînée vers l'arrière sous l'effet de la composante longitudinale de la flexion, la distance point de drisse – point d'écoute diminue (si dans le même temps on ne touche pas au palan d'écoute) donc la grand-voile est vrillée (par diminution de la tension de chute) et affinée (par délocalisation de la tension de chute, voir paragraphe III – 2). La figure ci-dessous illustre l'apparition d'un vrillage induit par la flexion arrière du mât :



Fig. 1b

Fig81/ZZ83 : Vrillage sous l'effet du cintrage longitudinal du mât induit par la force du vent ou les réglages.

La figure ci-dessous montre que le cintrage longitudinal du mât réduit le creux :

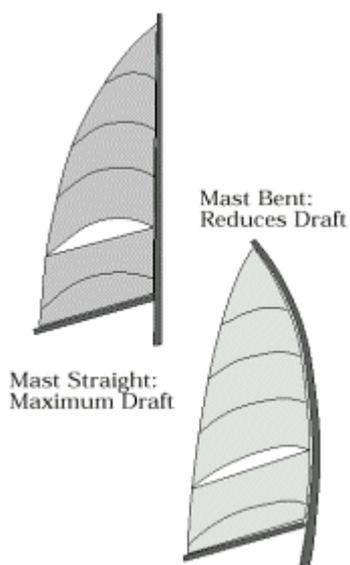


Fig89/ZZ94 : Cintre le mât réduit le creux.

V – 7 – 2 – 2) Mât haubané, panneau supérieur long

Avec un mât haubané, le capelage qui est un point fixe constitue un point de pivotement. Si le panneau libre supérieur est, proportionnellement à la hauteur totale du mât, de grande longueur (cas fréquent en dériveur), son effet de levier est plus important. Sous le capelage nous avons donc une flexion opposée à celle de la tête. Le panneau inférieur part en avant et au vent. La distance mât – chute augmente, tirant sur le tissu et aplatissant la voile d'autant plus que son matériau est peu déformable. Puisque l'attaque des profils inférieurs est attirée

au vent, ceci les place sous incidence plus faible (voir figure ci-dessous). Leur vrillage est accentué.

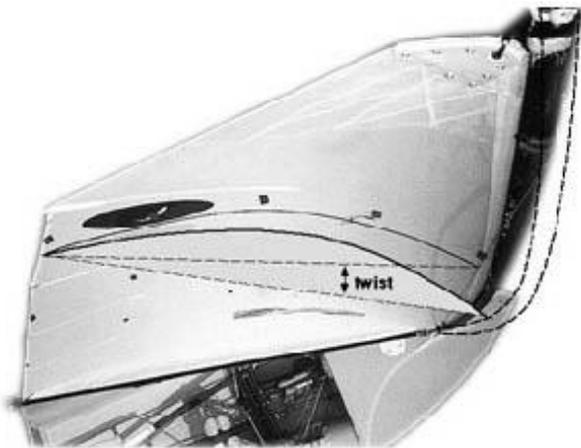


Fig82/ZZ86 : Cintrage du milieu du mât au vent engendrant du vrillage. (j'aurais préféré un mât haubané).

Avec ce type de mât, comme pour un mât non haubané, on a donc affinement et vrillage de l'ensemble des profils de bas en haut de la grand-voile. Le dernier effet de la flexion latérale au vent du panneau inférieur est d'élargir le couloir entre les deux voiles, ce qui est également un effet recherché dans la brise (paragraphe I – 10 – 1). Sur certains bateaux, on favorise intentionnellement ce cintrage latéral pour obtenir cet effet.

Si ce dévers latéral est souhaitable dans la brise, il ne l'est pas dans le médium où on recherche la puissance maximale. Nous verrons (paragraphe V – 9 – 6) qu'avec des barres de flèche courtes on favorise le cintrage latéral au vent du panneau inférieur, tandis qu'avec des barres de flèche plus longues on favorise un cintrage latéral sous le vent. Utiliser des barres de flèche plus longues et/ou reprendre la tension des bas-haubans quand ils existent (paragraphe V – 9 – 4) permet donc de limiter le dévers latéral en partie basse et médiane.

Un mât dont la souplesse est bien calculée, fléchit à la risée à partir de la surpuissance, pas avant. Il permet alors dans la brise d'adapter quasiment automatiquement la puissance du gréement à celle du vent.

V – 7 – 2 – 3) Mât haubané, panneau supérieur court

Si le panneau supérieur est court (cas des catamarans de sport) son effet de levier est plus faible, il a moins tendance à obliger le panneau inférieur à prendre une flexion opposée. Au contraire, la poussée de la force vélique tend plutôt à entraîner également le panneau inférieur, long, sous le vent. Sur le bateau, on constate que la tension du câble de losange au vent diminue, il peut même devenir mou s'il était peu tendu au repos. Si le vent n'est pas très fort et la tension de losange faible, l'effet de levier du panneau inférieur peut même entraîner la tête de mât au vent (figure ci-dessous). Avec un vent plus fort, le panneau supérieur part quand même sous le vent et le mât fait un S avec un point d'inflexion situé sous le capelage, siège de la compression maximum. C'est d'ailleurs le plus souvent à cet endroit que les mâts cassent.

L'attaque de la grand-voile, dans sa partie inférieure, est ainsi décalée sous le vent, alors que la chute reste globalement dans sa position d'origine. En tête l'attaque est également décalée

sous le vent, mais la chute l'est encore davantage. On a donc bien vrillage en tête, mais dans la partie inférieure on a une augmentation de l'incidence, du creux et de la puissance. Pour cette raison, sur certains bateaux le cintrage latéral sous le vent est préconisé dans le petit temps (Melges 24, Soling, Etchell 22...). On relâchera les bas-haubans pour l'obtenir.

La figure ci-dessous compare les effets sur l'incidence donc sur le vrillage d'un cintrage latéral sous le vent de la partie inférieure du mât (cas des multicoques, à gauche sur la figure) et d'un cintrage latéral au vent (cas fréquent en dériveur, à droite sur la figure) :

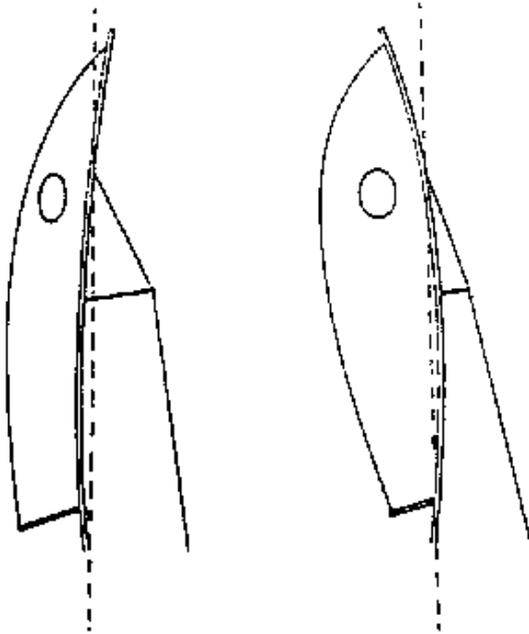


Fig100/ZZ134 : Effet du cintrage latéral du mât sur le dévers de chute.

Lorsqu'il existe, le cintrage latéral sous le vent de la partie basse du mât entraîne des conséquences très importantes sur d'autres réglages. Sur un catamaran, qui possède un mât profilé tournant, nous avons déjà vu au paragraphe I – 5) que lorsque nous centrons le mât dans la brise, nous diminuons l'angle d'entrée du profil d'ensemble (en termes plus parlants, le profil est aplati sur son avant). Le creux diminue et recule (voir aussi paragraphe V – 8). Cet aplatissement augmente l'incidence à l'attaque, il faut choquer le chariot pour restaurer l'incidence initiale.

Mais le cintrage latéral sous le vent de la partie inférieure du mât nous donne une deuxième raison de le faire. Il est favorisé quand nous centrons le mât dans la brise, puisque celui-ci présente alors sa plus faible section au vent. On obtient bien un affinement et un vrillage en tête car le panneau supérieur part quand même sous le vent. C'est un effet bénéfique, mais sous le capelage, en l'absence de losange ou si le losange est relativement peu tendu, nous avons une augmentation supplémentaire d'incidence qui redonne de la puissance. Il faut alors choquer le chariot de grand-voile pour restaurer l'incidence d'origine, retrouver une puissance maîtrisable et mieux l'orienter vers l'avant.

Puisque ce cintrage latéral sous le vent tend à refermer le couloir, nous devons donc le rouvrir en déplaçant le point de tire du foc sous le vent ou vers l'arrière. Rappelons que cette ouverture du couloir était déjà une nécessité dans la brise (paragraphe I – 10 – 1) : nous comprenons mieux à présent l'importance de ce réglage, surtout sur les mâts non losangés qui cintrent plus en latéral.

Contrairement au mât non haubané, nous n'avons pas ici une adaptation quasi-automatique de la puissance du gréement : nous devons exercer deux actions supplémentaires (choquer le chariot de grand-voile et davantage encore celui du foc).

V – 8) Cas particulier des catamarans à mâts losangés pivotants : rotation et flexion du mât et leurs effets

Nous savons déjà que le réglage de rotation du mât vise, dans un premier temps, à positionner l'extrados de la grand-voile dans le prolongement de celui du mât (paragraphe I – 6 et V – 4). En dehors de cette position de référence, utilisable seulement en sous-puissance, ce réglage a aussi une influence sur le creux du profil et sur les possibilités de cintrage du mât.

En effet, nous avons vu aussi (paragraphe I – 5 et V – 7 – 2 – 3) que lorsque nous centrons le mât nous réduisons et reculons le creux global de l'ensemble mât – grand-voile, et diminuons son angle d'attaque (voir figure ci-dessous). Evidemment, nous devons pour cela rompre la continuité de l'extrados.

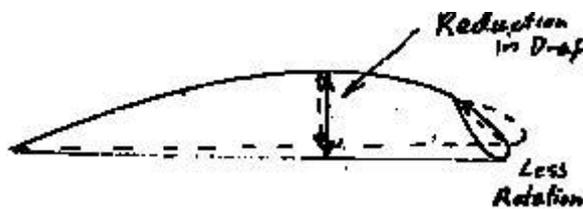


Fig107/ZZ88 : Effet de la rotation de mât sur le creux global et l'angle d'attaque.

Mais nous avons également un effet plus subtil. Lorsque nous centrons le mât, puisque sa plus grande longueur est maintenant dans l'axe du bateau, nous diminuons la distance entre le guindant et la chute de la grand-voile. Au maximum, entre la rotation 90° et la rotation 0°, nous la diminuons de la différence entre la largeur et la longueur du mât.

Cet effet est relativement peu sensible dans le bas de la voile, mais les profils courts du haut se trouvent proportionnellement plus raccourcis. Il en résulte une augmentation du creux en tête, bien visible sur les photographies ci-dessous (le mât est centré sur la photo de gauche) :

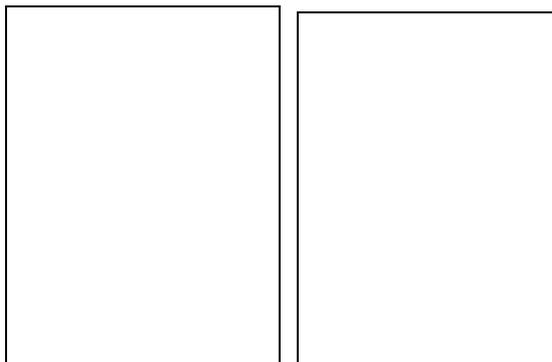


Fig83/ZZ87 : Effet de la rotation de mât sur le creux en tête. (refaire ces photos sur mon A ?).

En partie basse et médiane, l'effet de réduction globale du creux domine, tandis qu'en tête c'est plutôt l'effet de son augmentation.

Ce type de mât qui équipe les catamarans de sport possède en général un panneau supérieur proportionnellement court par rapport à l'ensemble du mât.

Nous pouvons agir sur les flexions latérales des deux panneaux en jouant sur la rotation du mât, sur la longueur des barres de flèche et sur la tension du losange.

Nous avons vu (paragraphe V – 7 – 2 – 3) que sur ce type de mât c'est le panneau inférieur, usuellement deux fois plus long, qui cintre sous le vent et qui par effet de levier commande plus ou moins la flexion latérale du panneau supérieur. Le creux et l'incidence de la partie médiane de la grand-voile augmentent, le couloir se ferme.

Lorsque nous centrons le mât, en tête, nous favorisons son cintrage sous le vent (et un peu en arrière) ce qui affine et vrille la partie supérieure de la grand-voile (figure ci-dessous). Dans la brise, il est donc utile de border le mât pour diminuer la puissance du gréement. L'avantage procuré par cette réduction de puissance et de creux global du profil surpasse l'inconvénient aérodynamique lié à la perturbation de la continuité de l'extrados.

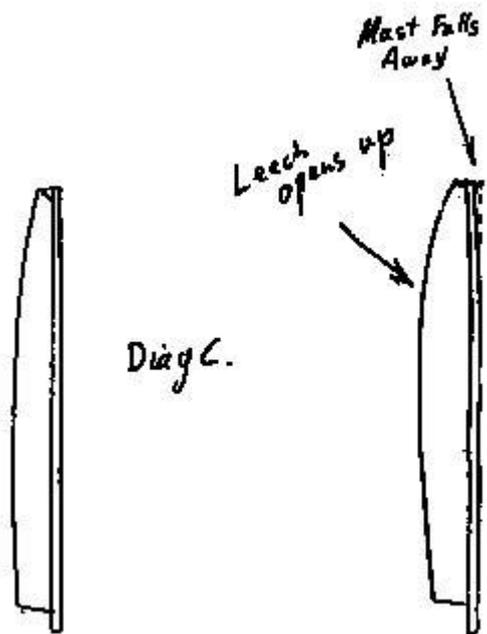


Fig84/ZZ88 : Ouverture de chute par dévers de la tête de mât sous le vent.

Ce cintrage sous le vent en tête, utile dans la brise, est d'autant plus important que la partie inférieure du mât, sous le capelage, est bloquée par une forte tension du gréement. En effet, nous avons vu au paragraphe V – 7 – 2 – 3) que si le losange est détendu, le grand panneau inférieur, possédant un fort effet de levier, part davantage sous le vent et peut même, si le vent n'est pas très fort, faire « monter » le panneau inférieur au vent (figure ci-dessous).

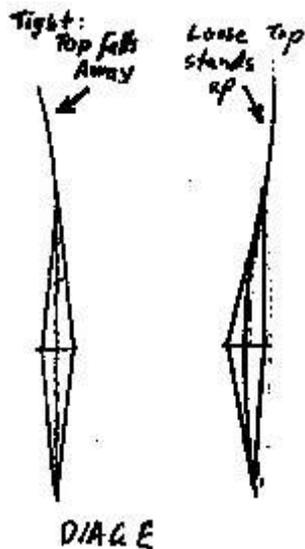


Fig85/ZZ88 : Plus de tension de losange facilite le dévers sous le vent de la tête de mât.

En allongeant les barres de flèche et/ou en augmentant la tension du losange on bloque plus ou moins le dévers latéral du panneau inférieur. Celui-ci a donc moins tendance, par effet de levier, à faire cintrer la tête de mât au vent. Au contraire, le panneau supérieur part plus facilement sous le vent.

Barres de flèche plus longues, tension de losange plus forte, mât plus centré favorisent le vrillage de la tête de la grand-voile et limitent les effets négatifs de la flexion sous le vent du panneau inférieur. Les poids légers ont donc intérêt à adopter une tension de losange plus forte pour favoriser à la fois le cintrage longitudinal en partie médiane et le cintrage latéral sous le vent en tête.

N'oublions pas que si le losange est peu tendu, lorsque le mât est centré, le dévers latéral du panneau inférieur oblige à choquer le chariot de grand-voile pour restaurer l'incidence globale, et celui du foc pour retrouver une largeur de couloir satisfaisante.

Centrer le mât en bloquant et en cintrant sa partie basse n'est pas la seule solution pour diminuer la puissance dans la brise. Sur certains bateaux (Hobie 18 par exemple), on préfère au contraire laisser partir le mât à fond et détendre le losange. Le mât cintré alors davantage dans son sens latéral, mais du fait de sa forte rotation ce cintrage latéral devient un cintrage vers l'avant et aplatit la grand-voile. Cependant, nous n'avons quasiment pas de dévers de tête car alors le mât présente à la pression du vent son axe de plus grande résistance. Dans cette optique de réglage, les poids légers doivent au contraire diminuer la tension du losange pour favoriser le cintrage du mât et aplatir la grand-voile.

Les deux solutions ont parfois été envisagées au fil du temps sur le même bateau. Ainsi, en Tornado, on privilégiait il y a quelques années une forte rotation associée à une faible tension du losange. A présent, on préfère centrer le mât avec une forte tension du losange : cette solution est aujourd'hui prédominante sur la majorité des bateaux.

V – 9) Contrôle du cintrage longitudinal : les moyens d'action

Après avoir examiné *pourquoi* nous devons (autant que possible) contrôler les flexions du mât, attachons-nous maintenant à comprendre *comment* nous pouvons le faire.

V – 9 – 1) Objectifs du réglage du cintre longitudinal :

Généralement, dans les vents maniables, l'objectif du réglage du mât en cintrage est d'obtenir, grâce aussi au contrôle de la flexion d'étai, un bon accord entre les flexions du mât et de l'étai et le rond de guindant des deux voiles. Dans les vents plus forts, le cintrage du mât en longitudinal et en latéral est un outil efficace de régulation de la puissance. Nous savons déjà que le cintrage du mât et une plus forte tension de l'étai aplatissent les deux voiles (figure ci-dessous).

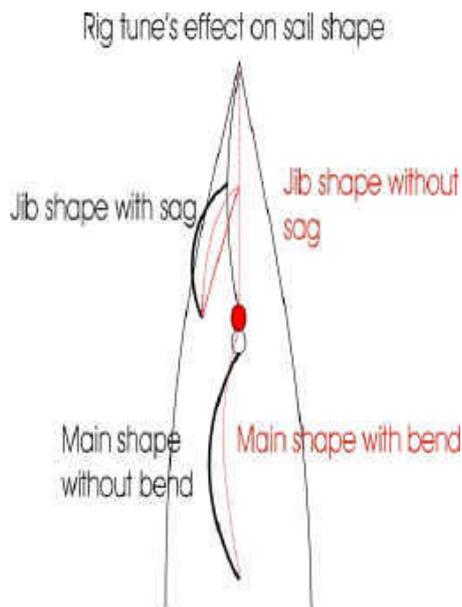


Fig94/ZZ106 : Effet du cintre de mât et de la flexion d'étai sur la forme des voiles.

Nous allons maintenant détailler les réglages dont nous disposons pour contrôler le cintrage du mât, essentiellement en longitudinal.

V – 9 – 2) Cintrage longitudinal par décalage pied de mât – étambrai – capelage

Si ces trois points ne sont pas alignés, le mât va cintrer. Ainsi, par exemple, si nous mettons à l'étambrai une cale plus épaisse en arrière du mât, nous poussons vers l'avant sa partie inférieure. Si nous reculons le pied de mât sans changer son calage ni la position de son capelage, nous induisons également un cintrage longitudinal vers l'avant. Enfin, sur un mât bloqué au pied et à l'étambrai, détendre l'étai provoque le déplacement vers l'arrière du capelage, donc cintrage le mât vers l'avant. Le cintrage longitudinal obtenu concerne surtout la partie inférieure du mât. Ce cintrage affine et favorise le vrillage de la partie inférieure de la grand-voile.

Ces réglages sont très utilisés en dériveur et sur certains croiseurs. On peut les utiliser pour précintrer le mât dans le petit temps (surtout sur l'eau plate) sans utiliser pour cela la tension d'écoute : on obtient ainsi des profils fins mais une chute qui ne referme pas. Ils peuvent au contraire limiter un cintrage exagéré. En particulier, sur ces bateaux, le halebas est souvent utilisé au portant pour maintenir la tension de chute. Nous verrons au paragraphe suivant que cette action induit un cintrage vers l'avant du mât, qui peut devenir excessif en particulier

dans le médium où on cherche à redresser le mât pour récupérer toute la puissance, surtout sur eau agitée. On peut alors, en avançant le pied de mât et/ou en repoussant le mât vers l'arrière par calage à l'étambrai, restaurer un cintrage longitudinal adéquat.

Dans la brise on laisse à nouveau cintrer le mât : la tension du halebas augmente, par calage on limite moins le cintrage, ou même on le favorise (par exemple en reculant le pied de mât ou en le calant sur l'arrière à l'étambrai).

Souvent le pied de mât est également avancé dans la brise pour aider à combattre la tendance accrue du bateau à être ardent, par suite du recul du creux des voiles.

V – 9 – 3) Cintrage longitudinal par poussée sur la bôme (écoute et halebas)

La bôme pousse sur le mât, par l'intermédiaire du palan d'écoute si son ancrage sur la bôme est reculé (cas des multicoques de sport) et par l'intermédiaire du halebas sur les dériveurs et les croiseurs. Sur ces bateaux ne disposant pas d'un rail d'écoute assez long, le halebas prend le relais de l'écoute, au près par vent fort et au portant, pour réguler la tension de chute. Ce faisant, la tension de chute qu'il induit cintrage le mât en longitudinal donc affine la grand-voile surtout dans sa partie supérieure. Mais comme le montrent les deux figures ci-dessous, son utilisation provoque aussi un cintrage longitudinal en partie inférieure du mât. Ce cintrage longitudinal engendré par la poussée de la bôme est d'autant plus important que l'angle du halebas est horizontal – donc que son ancrage sur la bôme est reculé. Dans cette configuration où son angle de tire est plus horizontal, puisqu'on cintrage le mât (en partie basse) sans trop tirer sur la chute, le halebas peut induire au contraire un affinement en partie inférieure, une réduction de la tension de chute et un vrillage plus prononcé.

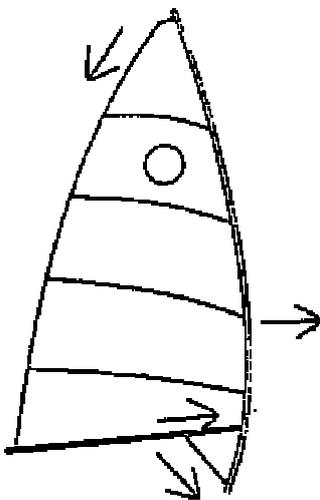


Fig103/ZZ134 : Effet du halebas sur le cintrage.

Ce cintrage en partie basse induit par poussée de la bôme sur le mât peut parfois devenir excessif.

Pour le limiter, en multicoque de sport, on peut avancer l'ancrage du palan sur la bôme ou frapper celui-ci directement au point d'écoute de la voile. Nous avons ainsi une grand-voile à bordure libre et une bôme qui n'est plus en compression – ce qui, au passage, permet de diminuer sa section et son poids.

En dériveur, la nécessaire utilisation du halebas (pour le contrôle de la tension de chute) provoque souvent un cintrage excessif dans le médium (alors que, par désir de puissance, on voudrait maintenir le mât droit). On pourra compenser par calage du mât, ou par d'autres réglages (voir ci-après).

Dans la brise, généralement, on laisse le halebas cintrer le mât sans opposition.

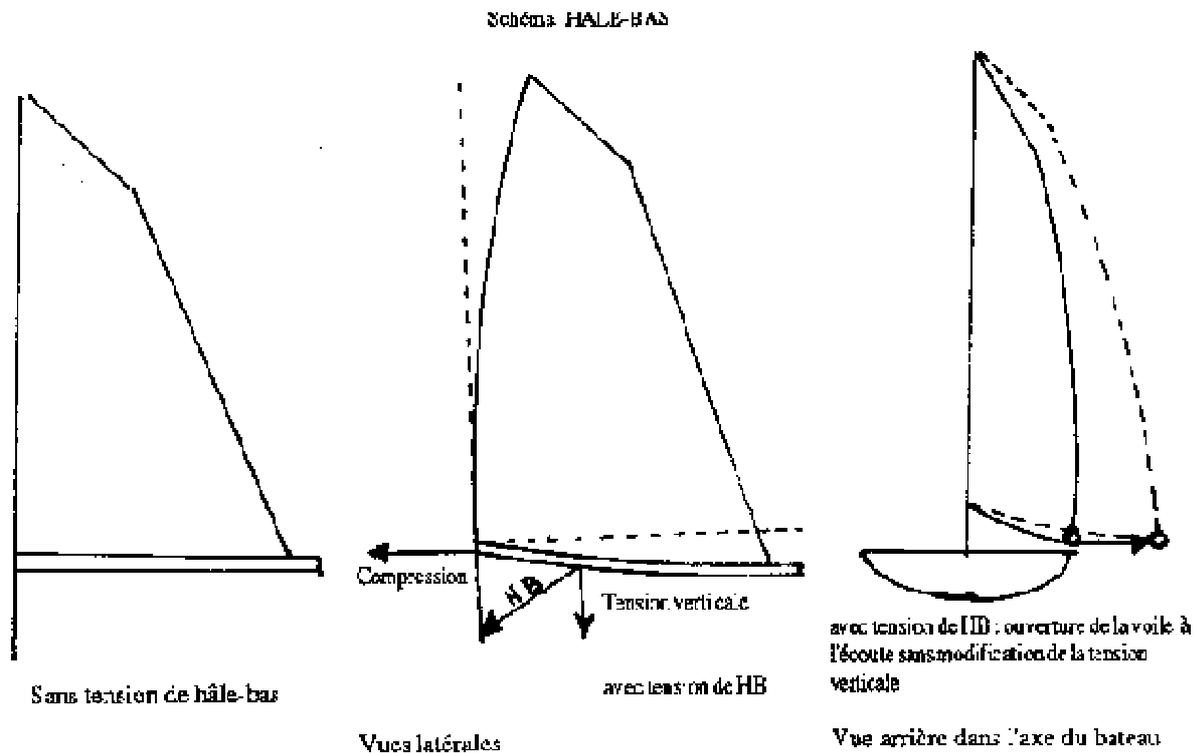


Fig104/ZZ156 : Rôle du halebas en Laser.

V – 9 – 4) Cintrage longitudinal par bas-haubans, bas-étau, basses-bastaques

Nous avons déjà signalé au paragraphe V – 6) que la présence de bas-haubans (ou de basses-bastaques sur un croiseur, ancrées plus haut dans le mât) permet de limiter le cintrage longitudinal du mât dans sa partie inférieure, tandis qu'un bas-étau l'accroît.

En relâchant les bas-haubans, on laisse le mât cintrer plus facilement vers l'avant. En tendant le bas-étau, on force le cintrage longitudinal. Une flexion du mât favorisée par ces dispositifs aplatit et vrille la partie inférieure de la grand-voile.

Des bas-haubans tendus limitent aussi le cintrage latéral de la partie inférieure du mât (figure ci-dessous). Ils mettent alors le mât en précontrainte, bloquant le panneau inférieur en latéral et en longitudinal, et reportent le cintrage du mât en partie supérieure, ce qui a des répercussions sur l'action du pataras (voir paragraphe V – 9 – 7).

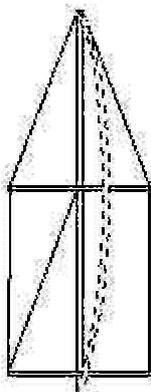


Fig80/ZZ79 : Les diagonaux contrôlent le cintre latéral en partie médiane.

Ces bas-haubans ont également une action sur la tension du gréement, donc sur la flexion de l'étai. Sur la figure ci-dessous, on voit que, partant d'un mât possédant déjà un certain cintrage longitudinal, si on retend les bas-haubans, on redresse le mât. Dans le même temps, on induit une tension plus forte sur les haubans. Si ceux-ci ont un ancrage reculé par rapport au mât, l'étai est mis sous tension plus forte, ce qui tend à aplatir la voile d'avant. Ainsi, sur certains croiseurs, on recommande de précintrer le mât par un relâchement des bas-haubans dans le petit temps et la brise. Ceci mollit un peu l'étai, ce qui peut être utile pour la puissance de la voile d'avant dans le petit temps, mais généralement nuisible dans la brise – où l'étai est alors remis en tension par le pataras. Inversement, on redresse le mât dans le médium en retendant les bas-haubans.

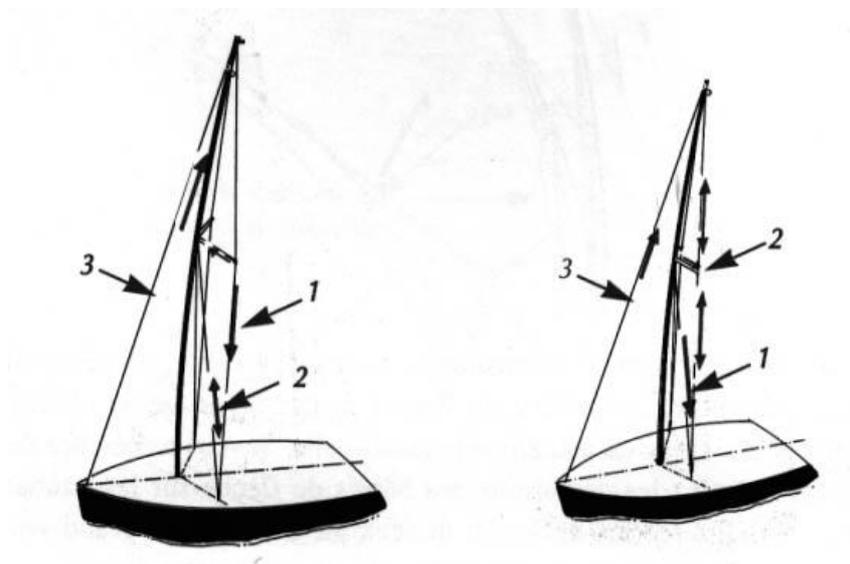


Fig202/ZZ212 page194 : Opposition des haubans et des bas-haubans.

V – 9 – 5) Cintrage longitudinal par béquille ou tirant

Certains dériveurs (470, Fireball, 505...) possèdent des béquilles ou des tirants (parfois appelés béliers), qui sont des leviers installés entre le mât et le pont, soit en avant soit en arrière du mât (voir figure ci-dessous).

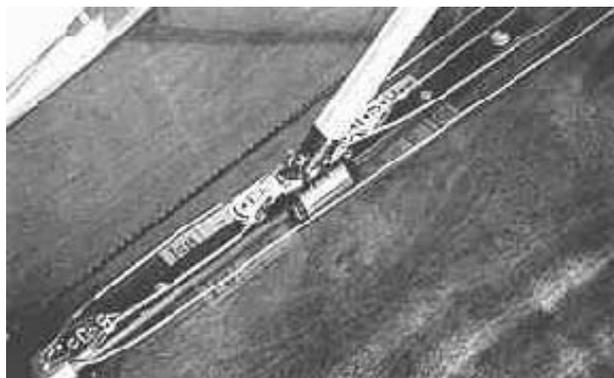


Fig98/ZZ132 : Béliers avant pour contrôle du cintrage de mât (Fireball).

Ils permettent de contrôler facilement, en navigation, le cintrage longitudinal de la partie inférieure :

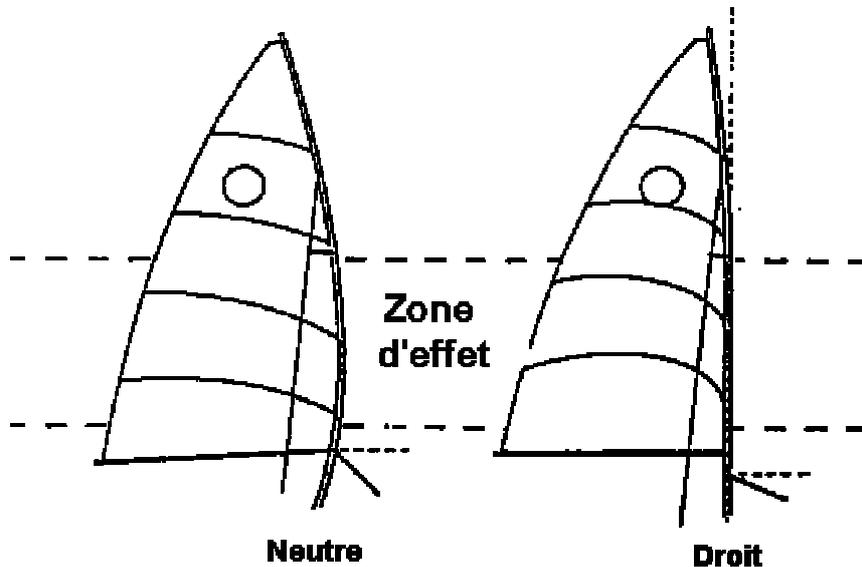


Fig102/ZZ134 : Effet du calage du mât avec un bélier.

On peut les utiliser pour précintrer le mât dans le petit temps, en association avec son calage au pied ou à l'étambrai. Dans ces conditions, ils permettent d'éviter d'avoir à précintrer le mât par le halebas ou la tension d'écoute – ce qui refermerait trop la chute.

Au portant sous spi, la poussée du tangon sur le mât, orientée vers l'arrière, peut favoriser son cintrage inversé, très dangereux pour sa tenue. Ces dispositifs permettent de s'opposer à cette poussée.

En dériveur, ils sont ajustés pour obtenir un précintre dans le petit temps et la brise et pour redresser le mât dans le médium, où on les utilise pour contrer l'effet de cintrage du halebas.

V – 9 – 6) Cintrage longitudinal (et latéral) par poussée des barres de flèche

Si l'extrémité des barres de flèche se situe en arrière de la ligne droite joignant le capelage et les cadènes de haubans (pour un dériveur ou un croiseur) ou en arrière du mât (pour un mât losangé, cas des multicoques de sport), les barres de flèche défléchissent vers l'arrière les câbles qui les traversent. La tension de ces câbles pousse donc les barres de flèche vers l'avant et induit un cintrage longitudinal. Ce cintrage est d'autant plus prononcé que la tension des câbles est forte et que la déflexion des barres de flèche (distance B sur la figure ci-dessous) est importante.

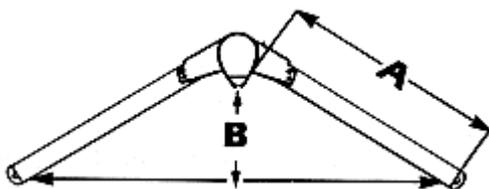


Fig96/ZZ132 : Longueur et déflexion des barres de flèche.

La déflexion est mesurée en tendant un fil entre les deux extrémités des barres de flèche et en mesurant la distance qui sépare ce fil de l'arrière du mât (figure ci-dessous). Il est évident qu'elle dépend à la fois de l'angulation et de la longueur des barres de flèche, mais c'est bien la déflexion, telle que nous venons de la définir, qui détermine le cintrage longitudinal.

Mast spreader rake

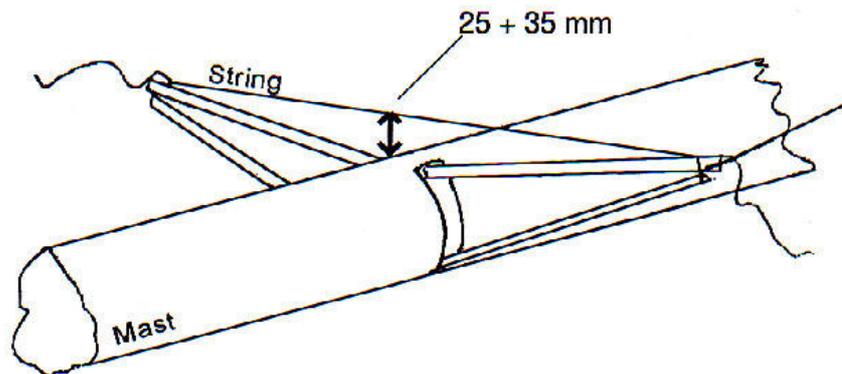


Fig108/ZZ168 : Déflexion des barres de flèche.

Des barres de flèche poussantes cintent le mât surtout en partie médiane. Dans un premier temps, ceci permet d'adapter la courbure du mât au rond de guindant de la grand-voile. Avec plus de cintrage induit par des barres de flèche poussantes, la grand-voile est aplatie en partie médiane (figure ci-dessous).

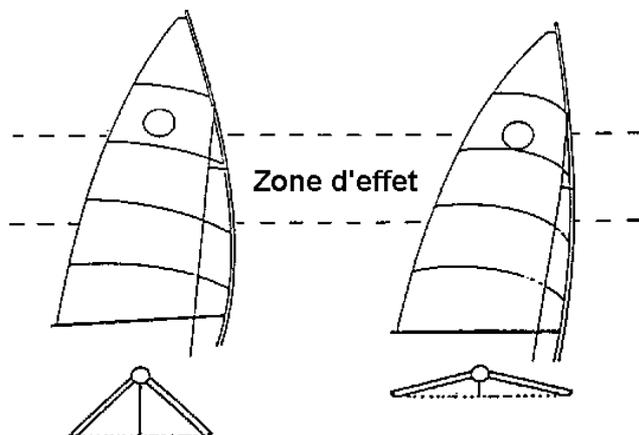


Fig101/ZZ134 : Angulation des barres de flèche, cintrage et effet sur la voile.

Comme pour les autres réglages, on utilise les barres de flèche en précintrage dans le petit temps sur eau plate ; on redresse un peu le mât pour le médium et on cintre à nouveau pour la brise.

La déflexion des barres de flèche contrôle le cintrage longitudinal, mais leur longueur contrôle le cintrage latéral. Si elles sont trop courtes, elles sont moins efficaces, le cintrage latéral du mât est facilité et peut devenir excessif. Si elles sont trop longues, dans le cas des

dériveurs, la tension supérieure du hauban au vent peut induire un cintrage latéral sous le vent, qui peut être contraire au but recherché car cela referme le couloir et diminue le vrillage (voir paragraphe V – 7 – 2 – 3).

En dériveur, pour favoriser plutôt un cintrage au vent en partie basse et mieux limiter la puissance, les équipages légers choisissent donc des barres de flèche plus courtes.

En multicoque de sport, on doit calculer précisément leur longueur en fonction du cintrage latéral que l'on recherche.

Nous avons vu (paragraphe V – 8), que sur les catamarans où on borde le mât dans la brise pour réduire la puissance, le blocage en latéral du mât sous les barres de flèche favorise le dévers de la tête, donc limite la puissance. Les poids légers pourront donc au contraire adopter des barres de flèche plus longues, qui bloqueront mieux le mât et favoriseront ce dévers. En les angulant davantage et/ou en augmentant la tension du losange, ils obtiendront aussi un cintrage longitudinal, donc un affinement de la grand-voile en partie médiane.

Sur d'autres catamarans, on recommande au contraire de pivoter le mât à fond et de détendre le losange pour laisser cintrer le mât en latéral – donc laisser partir le mât sur l'avant, puisqu'il est à présent pivoté à quasiment 90°. Dans ces conditions un équipage léger choisira au contraire des barres de flèche plus courtes.

Revenons à présent au cintrage longitudinal. Les barres de flèche, comme tous les réglages précédents, peuvent être utilisées pour précintrer le mât. Elles devront être ajustées précisément (déflexion et tension des câbles) pour obtenir le précintre recherché. En effet, sur les croiseurs lourds, des barres de flèche qui induisent trop peu de précintre obligent à augmenter la tension de gréement, ou à utiliser le pataras pour l'obtenir. L'étai se trouve alors trop tendu et le foc trop plat, alors qu'on le voudrait plus puissant. Inversement, avec trop de précintre, puisque le pataras doit être utilisé dans la brise pour tendre l'étai et aplatir le foc, l'ajout de cintrage induit par cette tension de pataras peut aboutir à un cintrage excessif de l'ensemble du mât.

En catamaran de sport, l'ajustement précis des barres de flèche visera surtout à bien accorder le rond de guindant à la flexion du mât, et ensuite à contrôler la puissance dans la brise, comme nous venons de le voir.

Nous avons vu que dans le cas des dériveurs, ce sont les haubans et non des câbles de losange qui traversent les barres de flèche. Lorsque le mât cinte vers l'avant sous l'effet du vent (et donc de la tension de chute), il emporte les barres de flèche avec lui. Les extrémités des barres de flèche peuvent arriver à se trouver en avant de la ligne droite joignant le capelage et les cadènes de hauban. Dans ces conditions la tension des haubans cherche à tirer les barres de flèche sur l'arrière, donc empêche que le milieu du mât parte davantage sur l'avant. Il y a une limitation « automatique » du cintrage longitudinal (voir figure ci-dessous).

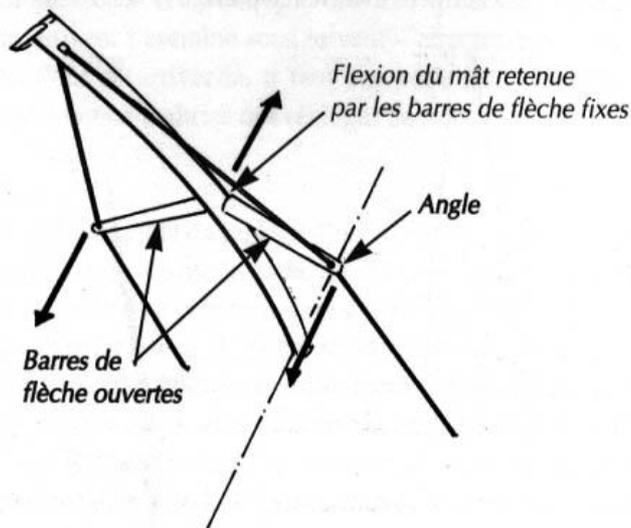


Fig180/ZZ212 page192 : Autoajustement du cintre AV : les haubans finissent par tirer le mât en AR pour le retenir.

Dans le même esprit, sur certains bateaux (Soling) on recule l'ancrage des haubans dans la brise. On tire ainsi davantage les barres de flèche sur l'arrière, donc on limite le cintre qui dans ces conditions tend à devenir excessif.

En dériveur toujours, où généralement les cadènes de haubans sont ancrées en arrière du mât, la quète arrière a une influence essentielle sur ce phénomène d'autolimitation du cintrage. Lorsqu'on met le mât en quète arrière, on bascule les extrémités des barres de flèche vers l'arrière. Elles se trouvent alors plus en arrière de la ligne droite capelage – cadènes, donc les haubans poussent davantage sur le mât : la quète arrière favorise le cintrage longitudinal. En catamaran de sport, la quète arrière n'a aucune incidence sur le cintrage, puisque quand on bascule le mât en arrière le losange suit le mouvement dans son intégralité. Par contre, nous pouvons également avoir une autolimitation du cintrage sous l'effet des barres de flèche, mais uniquement dans le cas où elles sont neutres ou très peu poussantes. Pour expliciter ce point, prenons le cas de barres de flèche parfaitement neutres. Quand le mât cintre, l'extrémité des barres de flèche se retrouve en avant de la ligne droite joignant le capelage et l'ancrage inférieur du losange (ces deux points pouvant être considérés comme fixes quand le mât cintre). Le losange tire alors les barres de flèche sur l'arrière et empêche le mât de cintrer davantage sur l'avant, comme si les barres de flèche devenaient tirantes. Quand les barres de flèche sont fortement poussantes au départ (cas général des catamarans de sport), lorsque le mât cintre elles deviennent de moins en moins poussantes, mais dans le même temps les câbles du losange se détendent, ce qui n'empêche pas le mât de continuer à cintrer.

V – 9 – 7) Cintrage longitudinal par le pataras

Sur les gréements en tête, la tension du pataras ne sert qu'à ajuster celle de l'étai. Sur les gréements fractionnés, le pataras reprend d'abord, dans une certaine mesure, la tension de l'étai. Son effet sur le cintrage est nul tant que l'étai n'a pas atteint une certaine tension. Avec une tension de pataras plus forte, du fait de la présence d'un panneau supérieur libre, on cintre la partie supérieure du mât si la base est bloquée par les diagonaux inférieurs, ou sa globalité si la tension des diagonaux inférieurs est moins forte. Ainsi, sur les bateaux (par

exemple J24, Soling) dont le mât a tendance à trop cintrer dans la brise, on bloque la partie inférieure par tension des galhaubans. Le pataras permet alors de vider uniquement la partie supérieure de la grand-voile.

On obtient ainsi l'affinement et le vrillage de la tête ou de l'ensemble de la grand-voile. Le vrillage obtenu est d'autant plus fort que l'écoute n'est pas reprise dans le même temps car alors la distance point de drisse – point d'écoute diminue.

Simultanément, la voile d'avant est aplatie puisque l'étau est retendu (paragraphe VI – 2 – 1). Il est donc logique d'augmenter la tension du pataras quand le vent monte.

Cependant, une partie de la tension du pataras étant absorbée dans le cintrage du mât, elle a par conséquent moins de répercussions sur la tension de l'étau. Il est donc plus difficile d'obtenir, avec le pataras, un étau parfaitement raide sur un gréement fractionné.

Le pataras peut aussi être utilisé dans le petit temps, en conjonction avec les autres réglages, pour précintrer le mât, sans qu'on doive pour cela border la grand-voile (ce qui refermerait trop sa chute).

V – 9 – 8) Cintrage longitudinal par tension de chute

La tension de chute fait office de pataras, surtout sur les petits bateaux. La tension de chute cintré le mât : cet effet est particulièrement sensible sur les mâts non haubanés (dériveurs solitaires). Tension de chute et pataras ne peuvent cependant être comparés jusqu'au bout : s'ils permettent tous deux de cintrer le mât, une surtension du pataras aplatit et vrille la chute alors qu'une surtension de chute ... retend la chute !

La tension de chute influe essentiellement sur les volumes arrière et sur le vrillage de la grand-voile.

Sur tous les types de mâts, lorsqu'on augmente la tension de chute on réduit les vrillages d'attaque et de chute.

La bonne quantité de vrillage est souvent déterminée par l'angle que fait la latte supérieure de grand-voile avec la bôme (repère très utilisé en croiseurs et dériveurs) ou par des penons de chute qui permettent de vérifier la condition de Kutta (utilisables sur tous les types de bateaux).

L'influence de la tension de chute sur les volumes dépend par contre des caractéristiques de flexion du mât.

Sur un mât raide, nous avons vu aux paragraphes III – 2 et V – 7 – 1) que lorsqu'elle augmente, nous avons une augmentation du creux (surtout en tête), un recul général du creux et logiquement moins de vrillage, aussi bien à l'attaque que sur la chute.

Sur un mât souple, la tension de chute ferme naturellement la chute dans un premier temps et contrôle le vrillage d'attaque et de chute.

Mais si le mât vient à fléchir longitudinalement en tête, on obtient un affinement et un vrillage « géométrique » de la tête et de la chute de la grand-voile dans le triangle point de drisse – point de flexion – point d'écoute ; la tête et la chute déversent plus facilement à la survente (paragraphe V – 7 – 1).

Si le mât fléchit dans son ensemble il y a affinement général : la grand-voile pourra déverser globalement sous l'effet d'une survente.

Nous verrons au paragraphe V - 10) qu'une forte tension de chute permet également de répercuter plus haut le volume inférieur donné par le relâchement de la bordure.

Quand l'angle de tire du halebas est plus vertical, il peut prendre le relais de l'écoute pour maintenir la tension de chute, l'écoute ne servant plus qu'à régler l'incidence globale. Ce réglage est très utilisé sur les dériveurs ou les croiseurs en l'absence d'un rail d'écoute assez long, surtout au portant ou au près dans la brise où on veut ouvrir la grand-voile mais sans générer un vrillage excessif. Sa tension augmente naturellement avec la force du vent. Rappelons que s'il cintre trop le mât dans le médium, on peut utiliser d'autres réglages en opposition pour redresser le mât.

Remarquons enfin que lorsque le rond de chute est important (cas de beaucoup de grand-voiles de catamarans de sport), il faut plus de tension de chute pour l'empêcher de déverser, car cette tension passe alors plus loin de l'extrémité arrière de la voile. Avec ce type de grand-voile et les grand-voiles à corne, quand le vent baisse on risque donc de voir la chute monter au vent si l'écoute n'est pas choquée : ces voiles demandent plus de vigilance sur la tension d'écoute dans les vents faibles.

Rappelons (paragraphe I – 9 – 6 – 1) que ce type de voile accentue l'effet néfaste du tourbillon marginal, mais réduit celui des tourbillons libres, grâce à une chute plus verticale. Elles captent mieux le vent apparent plus fort en haut dans le petit temps, et déverseront « automatiquement » dans la brise.

V – 9 – 9) Cintrage longitudinal par le Cunningham

Nous avons vu (paragraphe III – 3 – 2) que dans un premier temps la tension parallèle du Cunningham équilibre les tensions perpendiculaires produites par la force vélique (sur tous les mâts) et par l'attraction du tissu vers l'avant sous l'effet du cintrage longitudinal (dans le cas des mâts souples). Ce faisant, il permet au rond de guindant de s'inscrire correctement dans la courbure du mât. Quand le vent monte, il remet le tissu en formes et empêche le creux de reculer.

Avec plus de tension, sur un mât raide il avance le creux, affine l'arrière (voir figures ci-dessous), donc facilite le vrillage de la chute, d'autant plus que le tissu est déformable.

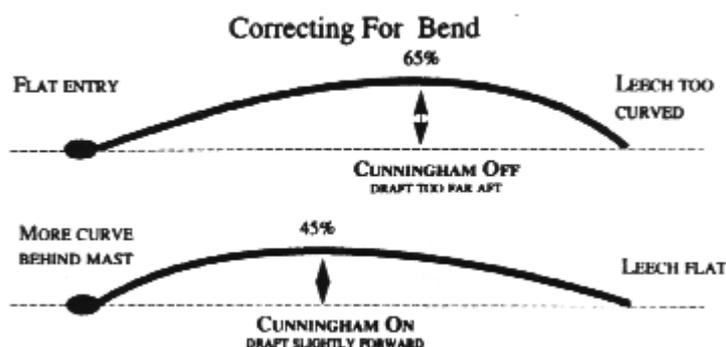


Fig93/ZZ102 : Prendre du Cunningham avance le creux et aplatit l'arrière.

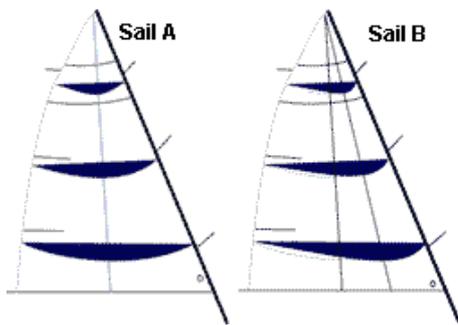
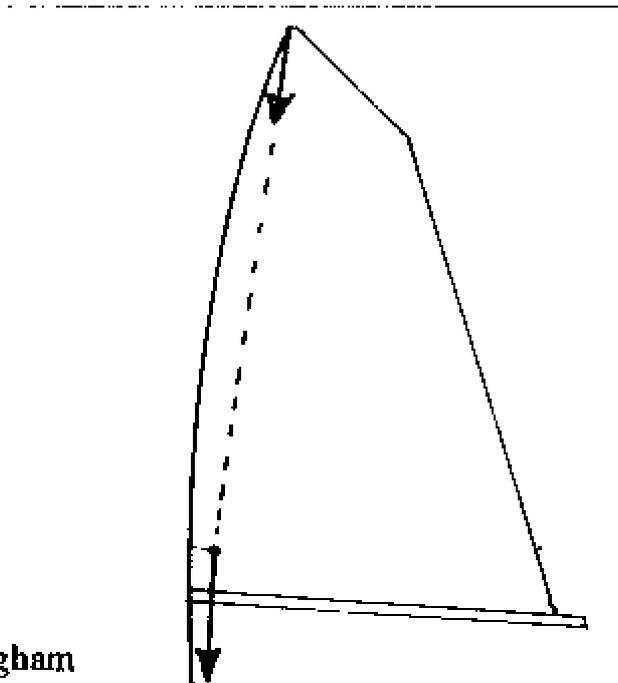


Fig87/ZZ93 : Effet du Cunningham et/ou de la tension de drisse sur une GV.

Sur un mât souple, en prenant du Cunningham nous accentuons le cintrage du mât. Et plus le mât cintre, plus le Cunningham peut « bander » le mât comme un arc car son axe d'effort principal passe quelque peu en arrière du guindant (voir figure ci-dessous).

**Axe d'effort
du cunningham**



Tension de cunningham

Fig105/ZZ156 : Axe d'effort du Cunningham et cintrage du mât.

Il y a toujours avancement du creux et affinement de la partie arrière, mais en plus un affinement et une tendance au vrillage (si l'écoute n'est pas reprise) plus marqués du fait du cintrage, essentiellement dans le triangle point de drisse – point de flexion – point d'écoute (paragraphe V – 7 – 1). L'affinement est d'autant plus important que le tissu est peu déformable.

Quand on reprend du Cunningham dans une risée, on affine la grand-voile et sa chute déverse. Quand on choque l'écoute dans les surventes, un mât souple a tendance à se redresser, ce qui redonne du creux donc de la puissance. Le dernier intérêt du Cunningham, dans ces circonstances, est de retenir une partie du cintre.

Pour avancer le creux donc augmenter la tolérance, pour affiner et vriller l'arrière sur un mât raide, pour affiner, vriller plus largement et retenir une partie du cintre sur un mât souple, nous avons intérêt à augmenter la tension du Cunningham quand le vent monte, surtout sur eau agitée.

Ceci dit, lorsque le recouvrement est important, trop avancer le creux peut aboutir à une attaque trop ronde pour la grand-voile, donc à la fermeture du couloir. On aura alors une mise en refus trop importante de la grand-voile, qui se matérialise par l'inversion néfaste de son attaque.

V – 9 – 10) Cintrage longitudinal par poussée du tangon

En croiseur et dériveur, l'extrémité du tangon est maintenue dans un plan vertical par une balancine (qui supporte le tangon) et un halebas (qui le tire vers le bas). Lorsque le spi est établi, ces deux câbles peuvent être soumis à forte tension quand le spi tire le tangon vers le bas ou vers le haut. La balancine est toujours frappée sur le mât, le halebas aussi (du moins sur les petits bateaux). Leur tension met donc le tangon en compression, celui-ci tend à faire prendre au mât un cintrage longitudinal inversé, vers l'arrière.

Toujours en dériveur et croiseur, lorsqu'on quitte le vent arrière pour se rapprocher du vent de travers, le tangon est de plus en plus pivoté vers l'avant jusqu'à se retrouver proche de l'étai. Le bras de spi le tire alors vers l'arrière sous un angle plus fermé et le met donc davantage en compression.

En multicoque de sport où le tangon est fixe, il n'y a pas de bras de spi. Le tangon subit une compression à peu près constante liée à la tension du bout qui sert à maintenir le point d'amure du spi au voisinage de l'extrémité du tangon.

Nous avons vu précédemment qu'on peut s'opposer à cette néfaste tendance à l'inversion par un cintrage vers l'avant provoqué, selon les configurations de gréement et les réglages disponibles, par l'action du calage, de la béquille, du halebas, du bas-étai, de la poussée des barres de flèche.

V – 9 – 11) Méthode de mesure du précintrage longitudinal

Au repos, le précintrage du mât induit par les barres de flèche peut être mesuré en tendant un bout (la drisse de grand-voile par exemple) entre la tête et le pied du mât puis en mesurant la distance qui sépare ce bout de l'arrière du mât (figure ci-dessous). Cette mesure est surtout utile en catamaran de sport où elle permet d'ajuster l'angulation des barres de flèche et la tension du losange pour se conformer à une recommandation de réglage de précintre. Sur les gréements plus complexes de certains dériveurs et croiseurs, la présence de réglages supplémentaires (calage, béquille, bas-haubans et bas-étai, halebas) qui modifient le cintre en navigation, réduisent considérablement son intérêt.

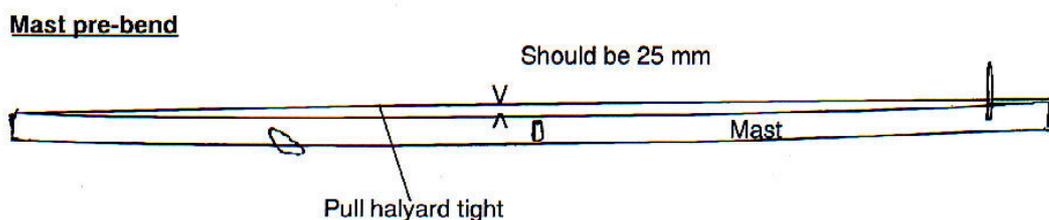


Fig109/ZZ168 : Méthode de mesure du cintre de mât.

V - 10) La bordure

La bordure régule le creux du tiers inférieur de la grand-voile. Nous avons vu au paragraphe III – 2 que lorsque la bordure est creusée, la tension de chute est davantage localisée sur l'arrière, ce qui tend à fermer la chute. Nous avons vu aussi (paragraphe III – 2, V – 7 – 1 et V – 9 – 8) que lorsqu'on borde l'écoute, la tension de chute plus importante et plus localisée sur l'arrière creuse la grand-voile, surtout en tête, et fait reculer le creux. Dans les conditions où la chute est tendue, lorsqu'on relâche la bordure on creuse donc la grand-voile sur une assez grande hauteur, et on ferme davantage la chute. Si la chute est détendue, ce sont les effets de vrillage et d'avancement du creux (induits par la faible tension de chute) et d'affinement (si le mât est cintré par un ou plusieurs des réglages décrits précédemment) qui dominent au niveau des profils supérieurs : le creusement reste alors davantage localisé en partie inférieure.

Relâcher la bordure donne donc plus ou moins de volume en fonction de la tension de chute appliquée. Ce creusement implique que l'angle d'attaque de la voile augmente (autrement dit l'incidence diminue à l'attaque) : la voile est plus puissante mais fait moins de cap.

En général, la bordure reste tout le temps tendue au près, sauf dans des conditions de clapot où une puissance supérieure est exigée. En sloop avec un fort recouvrement, on devra également faire attention à une possible inversion de l'attaque provoquée par un creusement excessif de la bordure.

V - 11) Les lattes

Nous savons (paragraphe III – 1) que les lattes, en fléchissant, absorbent une partie des tensions perpendiculaires qui tendent à attirer le tissu de la grand-voile vers le cœur, donc à la creuser comme un sac : il faut ainsi moins de tension de chute (tension parallèle) pour équilibrer ces tensions perpendiculaires et maintenir le tissu dans ses formes.

Nous venons de voir (paragraphe V – 9 – 8) que la tension de chute passe assez loin de l'extrémité arrière de la voile surtout si le rond de chute est important.

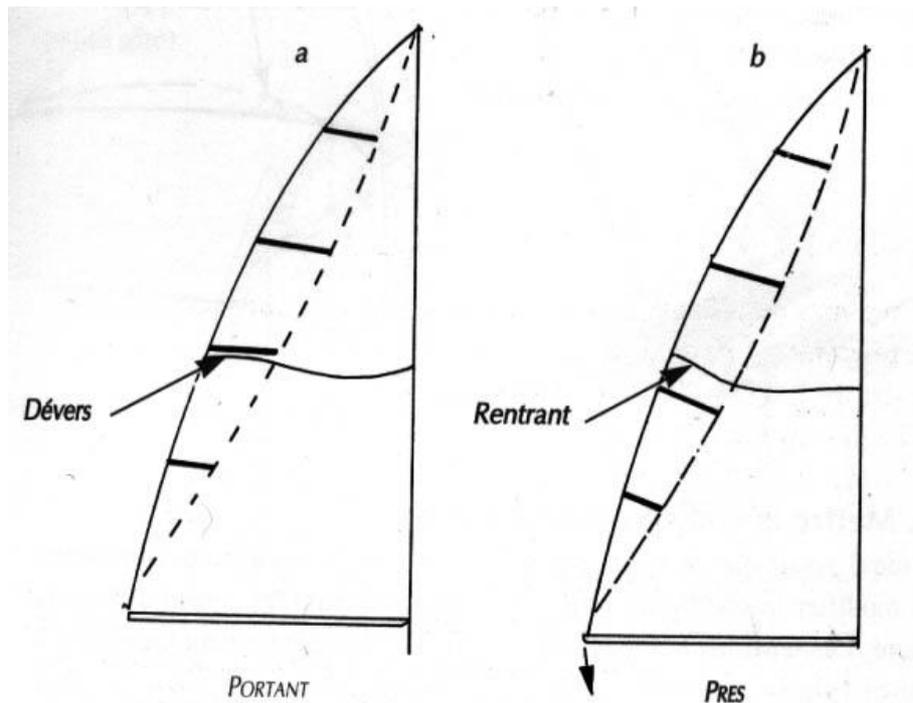


Fig183/ZZ212 page 239 : Ligne de tension de chute, rééquilibrage par les lattes.

Lorsque l'extrémité des lattes passe devant la ligne d'effort de la tension de chute, elles rééquilibrent également les tensions parallèles, à plus forte raison s'il s'agit de lattes forcées (cas des catamarans de sport).

Par conséquent, une voile lattée est bien plus facilement maintenue en formes qu'une voile non lattée. En particulier, les lattes limitent fortement le recul du creux dans la brise. Par contre, il sera plus difficile au Cunningham d'avancer le creux, puisque pour ce faire il faudrait modifier le profil de flexion naturel des lattes – ce à quoi elles résistent par leur raideur.

Quand le vent monte, sous l'effet du vent et de la tension de chute que nous lui opposons, les tensions dans la voile sont de plus en plus verticales, notamment en tête. En l'absence de lattes, la voile se creuse en tête quand on borde. Pour rééquilibrer ces tensions verticales par des tensions horizontales, les lattes doivent être de plus en plus tendues quand le vent monte. Elles doivent aussi être de plus en plus raides pour résister à la flexion, en particulier pour éviter le recul du creux, donc la fermeture de la chute. Ainsi, nous limitons l'augmentation du creux sous la pression du vent ou des tensions de guindant et de chute.

On voit que les lattes ont pour rôle essentiel de *maintenir* le profil quand le vent monte.

Dans une moindre mesure, elles peuvent permettre de *modifier* le creux.

Dans les profils courts du haut, mettre des lattes plus raides aplatit légèrement la grand-voile. Par contre, si on veut creuser une grand-voile au-delà de ses formes de moule, on pourra le faire un peu (si le tissu n'est pas complètement bloqué) en utilisant des lattes plus raides et fortement tendues. L'erreur classique étant d'utiliser des lattes souples, qui par forçage feront un S et n'empêcheront pas le tissu de prendre ses formes naturelles.

En principe le profilage des lattes vise à leur donner un profil de flexion qui s'accorde à la répartition horizontale du creux de la grand-voile. Ici encore il est possible, dans une faible mesure, d'agir par ce profilage sur cette répartition horizontale : on ponce la latte de façon à lui donner une épaisseur non constante, ce qui lui donne un profil de flexion non symétrique

(voir figure ci-dessous). Si le tissu n'est pas bloqué, on pourra ainsi légèrement avancer ou reculer le creux.

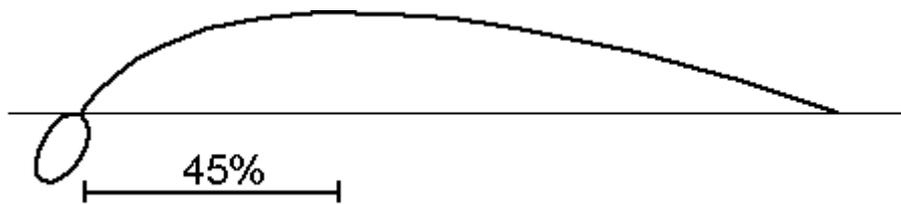


Fig115/ZZ175 : Profilage des lattes pour accorder leur forme au dessin du creux de la GV.

Pendant cette opération, on doit contrôler la raideur globale de la latte (en mesurant la force nécessaire pour la fléchir) et sa position de creux maximum (figure ci-dessous).

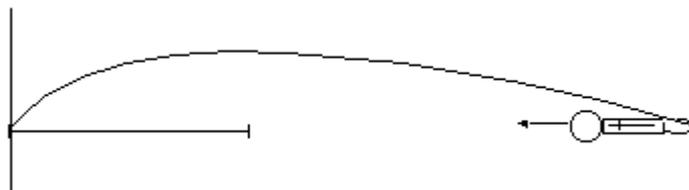


Fig117/ZZ175 : Méthode de mesure de la raideur et de la position du creux des lattes.

Remarquons que si une raideur plus grande limite leur flexion, rien n'empêche au contraire de les redresser. Quand le mât cintre, les lattes se tendent, s'affinent avec la grand-voile.

Enfin, bien sûr les lattes tiennent le rond de chute et l'empêchent de déverser.

Accessoirement, elles servent aussi de repère pour le contrôle du vrillage (par la mesure en navigation de l'angle que fait la latte supérieure avec la bôme).

V - 12) Influence de la quête arrière

La quête de mât n'a pas d'influence directe sur les formes de la grand-voile. Elle est cependant fréquemment ajustée en même temps que d'autres réglages. Nous avons souvent parlé, et parlerons encore un peu, de la quête arrière dans nos différents chapitres, il est donc souhaitable de rassembler ci-dessous tous les effets qu'elle a sur la puissance et la tolérance. Rappelons que la quête arrière :

- favorise la tolérance par mise en turbulence plus rapide au bord d'attaque (paragraphe I – 4 – 1) ;
- réduit la traînée due aux tourbillons libres (paragraphe I – 9 – 6 – 2), favorise l'adonnante d'attaque des profils supérieurs par effet triangulaire (paragraphe I – 9 – 6 – 2) ;
- lisse la discontinuité géométrique du profil d'ensemble grand-voile / foc (paragraphe I – 10 – 2) ;
- favorise le cintre longitudinal quand ce sont les haubans qui passent par les barres de flèche (paragraphe V – 9 – 6) ;
- joue un rôle dans l'équilibre de route (paragraphe IV – 3) ;
- et nous verrons au paragraphe VI – 2 – 3) que prendre de la quête arrière équivaut à reculer les points de tire du foc.

Par contre, un excès de quête dégrade la puissance. En effet, lorsque les profils basculent vers l'arrière, selon une direction horizontale qui est celle de la propagation du vent, le creux, donc

la puissance, diminuent. Pour comprendre ce dernier point, imaginons une quête de 90 °, évidemment impossible physiquement (le mât est horizontal, la bôme verticale) : le creux présenté au vent par la voile est maintenant celui qu'elle possède entre sa base (bord d'attaque) et sa têtère (bord de fuite), et il est facile de se rendre compte qu'il est plus faible.

Tous ces effets étant bénéfiques quand le vent monte, il est donc logique d'augmenter la quête avec la force du vent, davantage encore sur eau agitée (pour la tolérance).

V - 13) L'incidence

Sur un sloop, l'incidence donnée à la grand-voile influence la largeur du couloir donc le rendement du foc, l'équilibre de route, la gîte. Rappelons que la grand-voile mise en refus doit toujours être plus centrée. En cat-boat le réglage d'incidence est bien sûr plus critique au niveau de la portance et de son orientation, et de la traînée. La grand-voile est plus ouverte. L'incidence est réglée par la position du chariot d'écoute, ou par l'écoute elle-même quand sa fonction de régulation de la tension de chute est reprise par un halebas.

V – 14) Avantages et inconvénients des gréements souples

V – 14 – 1) Pour l'action du Cunningham

Nous avons vu au paragraphe III - 3 – 2) que sur tous les types de mâts (raides et souples) le Cunningham permet dans un premier temps d'équilibrer les tensions perpendiculaires et parallèles, donc de remettre le tissu en formes. Avec une surtension il permet d'avancer le creux au-delà de son emplacement d'origine déterminé par la coupe de la grand-voile, donc d'aplatir l'arrière et d'ouvrir la chute.

Avec un mât souple nous avons en plus affinement local ou global par cintrage, d'autant plus que le tissu est peu déformable, et vrillage plus important lié à la réduction de la distance point de drisse – point d'écoute.

Un Cunningham en action sur un mât souple nous donne davantage de possibilités de réduire la puissance du grément. On pourra dans une certaine mesure maintenir cette réduction de puissance quand on est obligé de choquer l'écoute (ce qui tend à redresser le mât) puisque la tension du Cunningham retient une partie du cintre (paragraphe V – 9 – 9).

V – 14 – 2) Pour l'action de la tension d'écoute

Lorsqu'on borde la grand-voile sur un mât souple, évidemment nous limitons le dévers de la chute (comme sur un mât raide) mais le cintrage induit aplatit la grand-voile dans son ensemble. Avec ce type de grément, il est donc recommandé d'éviter, dans la mesure du possible, de choquer à la risée (même si le Cunningham maintient une partie du cintre). On préférera limiter au maximum la puissance par les autres réglages, ce qui évite de se trouver trop souvent en surpuissance. En dériveur, on pourra par exemple maintenir la tension de chute (et le cintrage) par un halebas. En catamaran de sport, surtout sur les bateaux ne disposant pas de réglages de Cunningham et de rotation de mât facilement accessibles, on ouvre le chariot pour diminuer l'incidence dans la brise. On peut alors conserver une chute tendue et un mât cintré, donc une voile aplatie et une puissance maîtrisable pour le vent moyen ; l'écoute n'étant choquée que dans les risées les plus brutales.

V – 14 – 3) Pour l’action du halebas

Nous avons vu au paragraphe V – 9 – 3) que selon son angle de tire, le halebas augmente la tension de chute et cintre le mât en partie supérieure (avec un angle de tire plus vertical) et cintre le mât en partie basse sans trop augmenter, et même parfois en diminuant, la tension de chute (avec un angle de tire plus horizontal).

Avec un angle de tire plus vertical, on a donc une limitation de vrillage et un affinement de la partie supérieure de la grand-voile. Le halebas prend ainsi le relais de l’écoute sur les bateaux sans rail d’écoute, ou possédant un rail trop court. Avec un angle de tire plus horizontal, on a un affinement de la partie inférieure de la grand-voile et un vrillage plus prononcé.

Sur un mât raide, le halebas ne peut avoir qu’une action sur la tension de chute et non sur les volumes. Pour cette raison, son angle de tire doit se rapprocher de la verticale. Il sera moins efficace en termes de régulation de puissance sur un mât raide que sur un mât souple.

V – 14 - 4) Inconvénient pour la flexion d’étai

Lorsqu’un mât souple cintre sous l’effet de la pression du vent ou des réglages, le capelage d’étai a tendance à descendre par compression du tube.

Si la grand-voile reste bien bordée, sa tension de chute permet de conserver une certaine raideur à l’étai, utile dans la brise pour conserver un foc plat (voir chapitre VI).

Si nous choquons la grand-voile à la risée, nous redonnons de la puissance à la grand-voile en redressant le mât, mais nous réduisons aussi la tension sur l’étai et creusons le foc – deux effets négatifs. Nous avons ici une raison supplémentaire d’éviter de choquer la grand-voile sur un catamaran de sport ou un dériveur grées en sloop et possédant un mât souple.

En présence d’un pataras, le contrôle de la flexion d’étai est amélioré (paragraphe V – 9 – 7), mais du fait de la flexion de la partie supérieure du mât, nous avons vu qu’il subsistera quand même une flexion résiduelle dans l’étai. Avec un grément raide, comme le grément en tête d’un croiseur lourd, il est beaucoup plus facile de conserver un étai raide par action du pataras. Par contre, le pataras est plus efficace pour réduire la puissance de la grand-voile sur un mât souple, puisque, après avoir repris une certaine tension de l’étai, il cintre la partie supérieure du mât (base bloquée) ou son ensemble (base non bloquée).

V – 14 – 5) En ce qui concerne la puissance

Un mât trop souple va déverser trop vite, dans une force de vent inférieure à celle que l’équipage pourrait maîtriser avant d’être obligé à diminuer la puissance. En dériveur, on essaie ainsi d’adapter la raideur du mât à la capacité de rappel de l’équipage. En catamaran de sport, nous avons vu que centrer le mât facilite son dévers latéral sous le vent (surtout en tête). Pour diminuer la puissance, la démarche idéale est la suivante quand le vent augmente progressivement :

- commencer par centrer un peu le mât pour diminuer le creux global du profil, sans atteindre le point où les deux extradados sont en trop forte discontinuité ;
- avec un peu plus de vent, obtenir un dévers naturel de tête sans être obligé de centrer davantage (pour conserver les qualités aérodynamiques du profil d’ensemble) ; pour cela, on retend la bordure, le Cunningham et le losange ;
- et bien sûr avec encore plus de vent, on sacrifie la continuité des extradados en centrant beaucoup le mât pour vider plus largement le haut de la grand-voile. Ce sacrifice est moins coûteux avec un sloop puisque la présence du foc réduit l’influence de la perturbation du mât sur la grand-voile.

Avec un mât trop souple, on risquerait d'être obligé de choquer le mât au-delà de sa position aérodynamique idéale pour l'empêcher de déverser trop tôt.

Par conséquent, si l'intérêt des mâts rétreints est de diminuer la perturbation aérodynamique en tête, il convient de renforcer les têtes de mât dans le sens latéral pour éviter un dévers trop précoce.

V – 15) Installation des gréements fractionnés à barres de flèches et bas-haubans

A titre indicatif, on donne ici quelques indications sur la méthode d'installation de ce type de gréement en croiseur lourd. Elle est plus difficile qu'en dériveur puisqu'il sera plus délicat de retoucher les réglages en navigation. Elle doit donc être pratiquée avec plus de rigueur et de logique, et de ce fait, sa description peut également profiter à ceux qui naviguent sur des bateaux plus légers.

- 1) On doit d'abord commencer par définir la quête en fonction de l'équilibre de route requis. On peut l'ajuster soit par la longueur de l'étai soit par la position du pied de mât.
- 2) Sans précintrer le mât par calage, on fixe le mât sur son emplanture.
- 3) On centre la tête de mât par une légère tension des haubans principaux (ou galhaubans).
- 4) On aligne latéralement le panneau inférieur avec une tension des bas-haubans (ou diagonaux inférieurs). Pendant cette opération, le mât ne doit toujours pas être calé à l'étambrai.
- 5) Caler le pied de mât et l'étambrai pour obtenir un précintrage inférieur à celui désiré (attention, le mât ne doit pas faire de S).
- 6) Reprendre ensuite la tension des galhaubans ce qui rajoute du cintrage longitudinal si les barres de flèche sont poussantes. Vérifier pendant cette opération que la tête de mât reste bien centrée.
- 7) On restaure le cintrage désiré par une reprise de la tension des diagonaux inférieurs.
- 8) Le réglage du pataras permet ensuite de figner le cintrage, notamment en tête, ce qui permet d'adapter au mieux le cintre du mât à la coupe de la grand-voile.
- 9) On peut également reprendre la flexion de l'étai (soit en ajustant sa longueur soit en ajustant la tension du pataras).

V – 16) Installation des mâts à plusieurs panneaux très précontraints

Les figures ci-dessous illustrent la complexité de tels gréements :

CONTROLLING MAST BEND

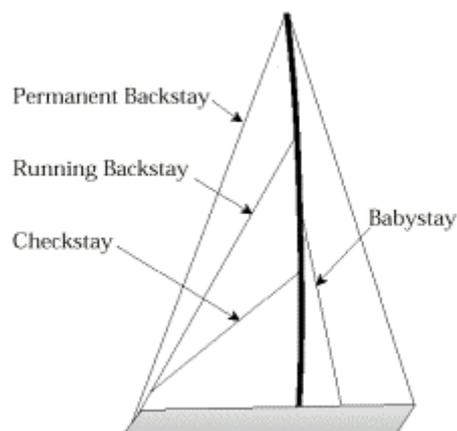


Fig77/ZZ78 : Exemple de gréement de croiseur lourd.

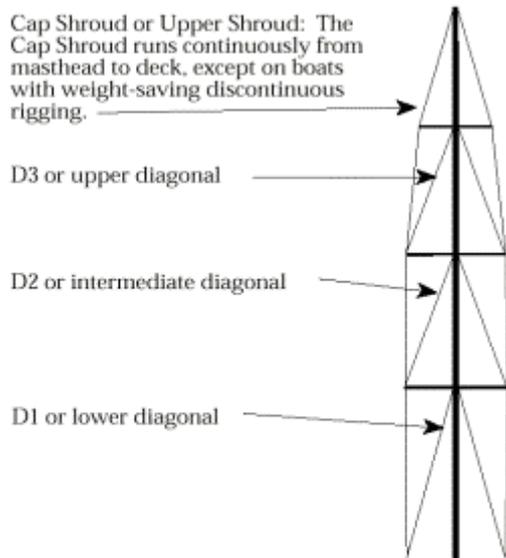


Fig78/ZZ78 : Gréement à plusieurs étages de barres de flèche.

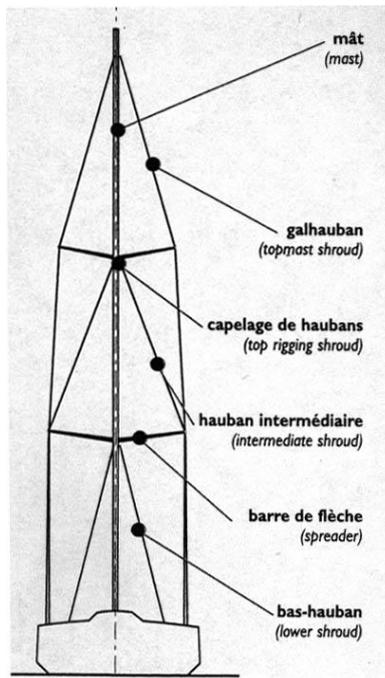


Fig190/Parler Marin page 33 : Gréement.

L'installation d'un tel gréement vise d'abord à proscrire tout dévers latéral ; on n'a que peu de moyens d'action sur le cintre longitudinal. Ici les bas-haubans et les diagonaux intermédiaires n'ont généralement qu'un rôle de maintien latéral.

Les étapes 1) à 7) sont les mêmes.

Ensuite on aligne les panneaux supérieurs, de bas en haut, par tension des intermédiaires.

La compression des différents panneaux s'additionne de haut en bas du mât, on arrive ainsi à une précontrainte énorme dans le panneau inférieur. Ceci confère une grande raideur donc peu de possibilités pour le régleur d'agir sur le cintre du mât.

Après cet alignement des différents panneaux, on termine par le réglage du pataras et éventuellement de la longueur de l'étai pour obtenir le bon cintrage (en tête uniquement, la base étant bloquée de fait) et la bonne flexion d'étai.

Le bon réglage des différentes tensions de câbles ne peut s'apprécier véritablement que sur l'eau, avec un vent soutenu.

Toute flexion latérale est à proscrire sur ce type de gréement, en particulier au niveau du panneau supérieur. Nous avons vu que la tension des haubans principaux contrôle la position de la tête de mât (figure ci-dessous).

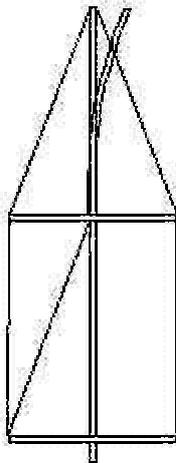


Fig79/ZZ79 : Les haubans principaux centrent la tête de mât.

Si nous avons un dévers latéral en tête, au niveau du panneau supérieur le hauban principal travaillera sous un angle trop fermé. La tête, moins bien tenue, peut flamber (voir figure ci-dessous).



Fig69/ZZ75 : Tension des haubans supérieurs.

Lorsqu'un tel défaut est constaté, on reprend sur l'eau la tension du hauban sous le vent, puis on vire et on fait de même sur l'autre bord. Une règle couramment admise précise que le hauban sous le vent doit rester tendu jusqu'à 15 nœuds de vent (cette limite dépend toutefois de la raideur à la toile du voilier).

Si la flexion latérale est constatée plus bas dans le mât, on reprend la tension des diagonaux dans le ou les panneaux concernés.

Il faut cependant se méfier car les causes d'une flexion latérale peuvent être multiples.

Ainsi, par exemple, si la tête du mât part sous le vent, ce peut être parce que les haubans principaux ne sont pas assez tendus mais aussi parce que les diagonaux inférieurs le sont trop, entraînant la partie inférieure du mât au vent et donc, par effet de levier, la partie supérieure sous le vent.

Si des flexions longitudinales excessives sont constatées (le mât « pompe » au passage dans les vagues par exemple), une augmentation de tension du bas-étai et/ou du halebas, forçant un peu le longitudinal en partie inférieure, réduit ce phénomène.

V - 17) Résumé des points essentiels utiles pour le régleur

- Des haubans ancrés plus haut que l'étai favorisent un cintrage latéral sous le vent.

- Avec des haubans reculés, la tension du gréement commande celle de l'étai donc la puissance, la tolérance et le cap du foc.

- Avec un mât non haubané ou un mât où le panneau supérieur est long (dériveurs), sous l'effet du vent et des réglages la tête part en arrière et sous le vent, le panneau inférieur en avant et au vent. Il en résulte un affinement et un vrillage général de la grand-voile et l'élargissement du couloir, effets recherchés dans la brise. Ce type de mât s'adapte naturellement à la force du vent.

Avec un panneau supérieur court (catamarans de sport), quand le mât est centré sa tête part en arrière et sous le vent, le bas part aussi sous le vent. On a affinement et vrillage en tête mais augmentation d'incidence et fermeture du couloir en bas. Il faut ouvrir le chariot de grand-voile et encore plus celui du foc.

- Le contrôle du cintre longitudinal vise à accorder les flexions du mât et de l'étai aux ronds de guindant des deux voiles. C'est aussi un outil de régulation de puissance.

- On peut forcer (pour un précintringe dans le petit temps et la brise) ou limiter (pour contrer l'effet du halebas) le cintre longitudinal par calage au pied de mât et à l'étambrai, ou par l'utilisation de béquilles ou de tirants.

- Le halebas cintre longitudinalement le mât en partie basse sans trop agir sur la tension de chute si son angle de tire est proche de l'horizontale. Ceci affine la partie basse de la voile et maintient ses possibilités de vrillage. Si son angle de tire est proche de la verticale, le halebas augmente la tension de chute et cintre le mât dans son ensemble : on a un affinement généralisé mais une tendance au vrillage moindre.

- La tension des bas-haubans permet de limiter le cintre longitudinal et latéral de la partie basse du mât. Si les haubans principaux sont eux-mêmes tendus, la partie inférieure du mât est bloquée en précontrainte. La présence d'un bas-étai, qui tire le bas du mât vers l'avant, accentue au contraire ce cintrage. Si on relâche les bas-haubans on obtient un précintre utile dans le petit temps mais on détend aussi l'étai, donc dans la brise il faudra retendre le pataras si la tension des bas-haubans n'est pas reprise.

Un cintrage longitudinal en partie inférieure du mât, obtenu par calage, action d'une béquille ou d'un halebas, une tension d'un bas-étai, un relâchement des bas-haubans, affine et favorise le vrillage de la partie inférieure de la grand-voile.

- Les barres de flèche aident au maintien latéral et favorisent un cintrage longitudinal vers l'avant si elles sont poussantes. La tension du gréement accentue ce cintre en dériveur, en catamaran de sport c'est la tension du losange. Des barres de flèche poussantes cintrent le mât, affinent et facilitent le vrillage de la grand-voile en partie médiane.

La déflexion des barres de flèche contrôle le cintrage longitudinal, leur longueur le cintrage latéral. En catamaran de sport des barres de flèche plus longues, une tension de losange plus forte, un mât plus centré bloquent le bas en latéral et favorisent le dévers sous le vent du panneau supérieur, donc le vrillage et l'affinement en tête utiles dans la brise.

En dériveur et en catamaran de sport les barres de flèche opposent une résistance de plus en plus grande au fur et à mesure que le mât cintre. Il y a autolimitation du cintrage. En dériveur uniquement où ce sont les haubans principaux qui passent par les barres de flèche, la quète arrière favorise le cintrage longitudinal.

- Le pataras tend d'abord l'étau, plus efficacement sur les gréements en tête, ce qui affine le foc. Avec une tension plus forte il cintre ensuite l'ensemble du mât (si sa base n'est pas bloquée) donc affine et vrille l'ensemble de la grand-voile. Si la base est bloquée il affine et vrille uniquement la partie supérieure de la grand-voile.

- Augmenter la tension de chute réduit les vrillages d'attaque et de chute. Si le mât est raide il y a augmentation (surtout en tête) et recul du creux. Sur un mât souple qui cintre en tête il y a affinement et vrillage dans le triangle point de drisse – point de flexion – point d'écoute. Dans cette zone le dévers sous l'effet d'une survente est facilité. Si le mât fléchit dans son ensemble il y a affinement général : la grand-voile pourra déverser globalement sous l'effet d'une survente.

- Le Cunningham restaure d'abord les formes de la grand-voile, avec plus de tension il avance le creux, affine l'arrière et libère la chute. Sur un mât souple il y a en plus affinement et vrillage plus importants par cintrage. Sur un mât souple il retient une partie du cintre quand on choque l'écoute.

- Les lattes équilibrent les tensions qui augmentent dans la voile quand le vent monte et empêchent le creux de reculer et d'augmenter. Elles doivent alors être de plus en plus raides et tendues.

Dans une faible mesure, en les profilant on peut modifier la répartition horizontale du creux. Elles maintiennent le rond de chute et l'empêchent de déverser.

Accessoirement, elles servent aussi de repère pour le contrôle du vrillage (mesure en navigation de l'angle entre la latte supérieure et la bôme).

- Le réglage de rotation d'un mât profilé remplit trois fonctions : assurer la continuité des extradors mât – grand-voile, diminuer et reculer un peu le creux global du profil quand on centre le mât (on a toutefois une légère augmentation de creux en tête), et contrôler son dévers latéral. En centrant le mât l'incidence augmente à l'attaque, on doit corriger en choquant le chariot. On facilite aussi le dévers sous le vent du panneau inférieur, et également du panneau supérieur si le vent est assez fort et/ou le losange bien tendu.

- Relâcher la bordure augmente le creux dans le tiers inférieur et tend à fermer la chute. Si la tension de chute est forte il y a augmentation de creux sur une plus grande hauteur.

- La quête de mât favorise la tolérance, réduit la traînée et la puissance, favorise le cintre longitudinal en dériveur, revient à reculer les points de tire du foc et agit sur l'équilibre de route.

- Un mât souple amplifie le rôle du Cunningham, du halebas et de la tension de chute: ils aplatissent la voile. Le Cunningham permet aussi de vriller davantage une grand-voile sur un mât souple que sur un mât raide. Par contre le contrôle de la flexion d'étai est plus délicat sur un mât souple. Ce moins bon contrôle de l'étai et la nécessité de conserver le cintrage dans la brise imposent qu'avec ce type de mât, on doit s'efforcer de choquer l'écoute le moins souvent possible. Trop de souplesse peut par ailleurs générer un cintrage latéral trop précoce, inconvénient qu'on peut en partie corriger en choquant le mât au prix d'une perte de continuité du profil d'ensemble à l'extrados.

- Du fait de sa mise en refus par le foc la grand-voile d'un sloop est plus centrée et affinée sur l'avant que celle d'un cat-boat. Au-dessus du capelage, selon les besoins, on doit la creuser, la vriller ou avancer son creux.

V - 18) Principes généraux de réglage pour une grand-voile établie sur un mât souple

Si on recherche plus de puissance, on règle la grand-voile avec plus d'incidence. On augmente le creux en bas par un relâchement de la bordure, on cherche à redresser le mât et à augmenter la tension de chute pour accentuer le volume au milieu et en tête, et répercuter plus haut le volume inférieur donné par la bordure. Ne pas oublier qu'un bateau naturellement rapide nécessite des voiles plus fines.

Selon les conditions régnantes, on cherchera les réglages suivants avec un mât souple :

- Eau plate, priorité cap : profils fins, creux à 50 % (meilleur rapport portance / traînée et meilleur cap). On creuse la bordure et on retend la chute (sans la refermer) pour induire plus de volume si la voile est jugée trop plate de moule. La chute à la limite de la fermeture favorise le cap. L'incidence est régulée par le chariot qui peut être choqué si le vent monte. Quand c'est possible techniquement, obtenir la finesse par précintrage (calage pied de mât et/ou étambrai, halebas quand son angle de tire est horizontal, barres de flèche poussantes, bas-haubans relâchés, tension du gréement en dériveur et du losange en catamaran de sport). Plus le vent monte plus on affine. Dans des conditions de vent irrégulier (vent de terre) augmenter le vrillage pour donner de la tolérance qui permet de mieux absorber les brutales variations d'incidence.

- Eau plate, priorité vitesse : profils 50% un peu moins fins, pour plus de portance et moins de cap. Plus de creux que précédemment (surtout si le bateau est lent) par relâchement de la bordure et du Cunningham, et un peu plus de tension de chute. Cette tension de chute supplémentaire augmente le creux notamment en tête, utile pour récupérer l'adonnante d'attaque et le vent plus fort en haut, dans des conditions de vent assez faible. Attention toutefois à ne pas augmenter le creux au point de générer une inversion à l'attaque de la grand-voile.

On redresse le mât quand c'est possible techniquement, pour limiter le cintre à sa valeur nominale prévue pour le guindant de grand-voile (blocage à l'étambrai, halebas un peu relâché, bas-haubans tendus, béquille, gréement ou losange un peu moins tendus).

Quand le vent monte, on s'approche de la vitesse maximale du bateau au près et de la surpuissance : on commence à cintrer le mât, aplatir et vriller, d'abord par le haut (Cunningham, tension de chute, pataras retendus).

- Médium, clapot : même creux que précédemment mais chercher à l'avancer davantage pour plus de tolérance. Il faut donc plus de tension de Cunningham et moins d'écoute pour maintenir le mât droit et vriller la partie arrière de la grand-voile (tolérance). La bordure reste relâchée, surtout si le bateau est lent ou la voile fine de moule. Les autres réglages (calage, halebas, béquille, bas-haubans) limitent le cintrage longitudinal. Avec un mât pivotant rotatif, ne pas trop centrer le mât (pour conserver un creux raisonnable et avancé et pour éviter le dévers latéral). Le chariot est plus centré que sur l'eau plate. On prend plus de quête pour favoriser la tolérance.

- Vent faible, clapot : priorité vitesse, il faut encore plus de puissance et de tolérance, donc un creux important et avancé. La bordure est très relâchée, l'écoute choquée pour redresser le mât mais essayer de limiter le vrillage pour garder de la puissance. Une certaine tension de Cunningham reste nécessaire pour positionner le creux sur l'avant. L'attaque de la grand-voile étant plus ronde, il faut vriller davantage le foc pour maintenir une largeur de couloir suffisante.

- Brise : On laisse à nouveau cintrer le mât, dans son ensemble sur eau plate et en partie supérieure par fort clapot (on veut conserver de la puissance en bas pour passer les vagues). On trouve ici un intérêt aux réglages de blocage du cintre en partie inférieure (calage de pied ou d'étambrai, béquille, bas-haubans) et au pataras qui cintre le mât sans tendre la chute. Bordure, Cunningham et écoute sont fortement tendus. Avec un mât pivotant losangé on centre le mât pour favoriser le dévers latéral en tête ; on tend le losange pour bloquer le dévers latéral du bas et le cintrer en longitudinal ; on choque le chariot pour restaurer une incidence faible.

- Au portant, creux et vrillage plus prononcés surtout si le bateau est lent.

Chapitre VI : Réglage des voiles d'avant

VI – 1) Utilisation des penons dans la grand-voile et les voiles d'avant

Nous avons vu au paragraphe I – 6) tout l'intérêt de placer des penons dans les voiles.

Rappelons que les penons de chute matérialisent les décrochages extrados sous incidence trop forte, plus probables dans le petit temps et le médium. Ils sont surtout utiles dans la grand-voile pour vérifier la condition de Kutta, moins dans un foc car celui-ci n'est pas tenu de la respecter (voir paragraphe I – 10 – 1).

Ces penons permettent d'ajuster le vrillage des deux voiles en conditions maniables (dans la brise il est plutôt déterminé par les capacités et la volonté de l'équipage).

En effet, si le penon de chute placé en tête se cache derrière la voile alors qu'un penon placé plus bas est correct, nous en concluons que le haut de la voile est en décrochage extrados à cause d'une incidence trop forte. Le vrillage n'est pas assez important, il faut choquer de l'écoute.

Si le penon de chute inférieur décroche alors que le penon supérieur est bon, ceci peut indiquer un vrillage trop fort demandant une tension d'écoute plus grande. Ceci dit, ce comportement des penons peut apparaître même si la tension d'écoute est jugée satisfaisante par l'équipage (qui ne voit pas alors quoi faire de manière évidente). En effet, si notre voile a trop de creux en bas et pas assez en haut, elle aura donc dans le bas un angle de sortie plus fort avec des risques de décollement accentués, matérialisés par le décrochage du penon de chute.

Les penons de chute peuvent donc non seulement aider à ajuster le vrillage mais donnent aussi des informations sur l'adéquation de la répartition verticale du creux aux conditions régnautes.

Nous avons vu aussi qu'à l'attaque des voiles, les penons d'attaque au vent peuvent monter ou même repartir vers l'avant. Il y a deux causes possibles à ce phénomène : le déplacement au vent du point de stagnation qui témoigne de la qualité de la succion extrados, et la croissance de la bulle de séparation turbulente aux alentours de la jonction mâ – voile, qui s'étend sous incidence trop faible (voir paragraphe I – 5).

Si le penon d'attaque est placé très près du bord d'attaque, il risque d'être aspiré vers l'extrados et de pointer vers l'avant, sans que ce comportement en apparence incorrect indique un mauvais fonctionnement de la voile, surtout si des penons placés plus en arrière flottent correctement. Si par contre, fixé plus en arrière, il danse constamment, il se trouve probablement contaminé par la croissance de la bulle de séparation turbulente, il faut augmenter l'incidence (border ou abattre).

On voit donc qu'à l'attaque du foc, plus les penons sont près de l'étai, plus ils sont sensibles (parfois trop dans le clapot) : on peut alors être conduit à en rajouter une deuxième paire plus reculée.

Comme les penons de chute, les penons d'attaque peuvent donner une indication sur les volumes. Si par exemple le penon d'attaque au vent, en haut du foc, danse constamment alors que ceux placés plus bas sont corrects, cela signifie que l'attaque est placée sous incidence trop faible en partie haute. Ceci provient la plupart du temps d'un vrillage trop fort : on peut avancer le point de tire et retendre un peu la chute (figure ci-dessous et paragraphe VI – 2 – 3).

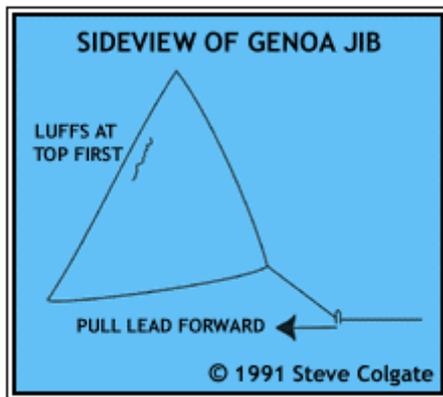


Fig67/ZZ72 : Utilisation du penon d'attaque en réglage du point de tire (ici trop de vrillage, à corriger).

Mais ceci peut aussi provenir d'un vrillage d'attaque, prévu lors de la conception de la voile, trop important pour le vent régnant. Ainsi les voiles de brise ont toujours un vrillage d'attaque plus fort, pour augmenter leur dévers global et limiter leur puissance. Mais dans des vents plus faibles, ce vrillage de conception peut s'avérer exagéré : le haut des voiles est sous incidence trop faible et le penon d'attaque au vent décroche. Pour corriger, il faut limiter le vrillage global comme précédemment, mais on peut aussi chercher à reculer le creux (drisse détendue, plus de tension de chute, paragraphes VI – 2 – 2 et VI – 2 – 3).

Si la plage d'incidence à l'intérieur de laquelle les penons d'attaque flottent correctement paraît trop réduite, cela signifie que le foc est peu tolérant parce que son attaque est trop fine. On peut être conduit à augmenter la tension de guindant pour arrondir l'attaque (paragraphe VI – 2 – 2).

VI – 2) Réglages du foc

VI – 2 – 1) Influence de la flexion d'étai

Sous l'effet de la force aérodynamique, donc des tensions perpendiculaires qui apparaissent sur le guindant, l'étai tend à prendre une flexion vers l'arrière et sous le vent. La flexion vers l'arrière est plus prononcée au niveau de la hauteur du centre vélique, car c'est à cette hauteur que les tensions perpendiculaires sont les plus horizontales. Cette flexion induit une modification des volumes du foc.

Puisque l'étai fléchit vers l'arrière, la distance guindant – chute est raccourcie et le creux du foc augmente, notamment en partie médiane où la flexion est la plus grande. Ce phénomène est exactement l'inverse de celui décrit au niveau de la grand-voile qui s'aplatit sous l'effet du cintrage du mât vers l'avant.

Cette augmentation du creux du foc localise davantage la tension de chute sur l'arrière, la chute vrille moins.

D'autre part, elle augmente aussi l'angle d'entrée puisque l'attaque s'arrondit comme l'ensemble du foc : il y a diminution d'incidence à l'attaque. On peut se retrouver avec une attaque trop ronde pour les conditions régnantes, ce qui oblige à diminuer la tension de guindant pour reculer le creux (paragraphe VI – 2 – 2) suivant). Rappelons qu'un foc plus creux fait moins de cap.

La flexion de l'étai doit s'accorder à la coupe du guindant du foc (le négatif prévu par le maître-voilier à la coupe). Dans le petit temps, la flexion de l'étai est moindre. Si le foc est coupé avec du négatif, on peut être amené à détendre volontairement l'étai (et à le retendre bien sûr dans la brise). Nous faisons pour le foc la même chose que pour la grand-voile : adapter la flexion de son soutien à la courbure du guindant.

Les focs coupés avec beaucoup de négatif demandent un étai moins tendu.

Puisque l'étai fléchit sous le vent, l'attaque (l'avant des profils) est elle-même entraînée sous le vent (comme celle de la grand-voile lorsque le mât fléchit en latéral sous le vent). La chute (arrière des profils) restant à peu près à la même place, nous avons une augmentation de l'incidence *globale* des profils (angle entre le vent apparent et leur corde). Si nous préférons restaurer l'incidence initiale, alors quand l'étai fléchit nous devons ouvrir davantage le foc. Par contre, nous venons de voir ci-dessus *qu'à l'attaque*, l'augmentation du creux entraîne plutôt une diminution d'incidence.

Si le foc est conçu au départ avec un négatif prévu pour une certaine flexion d'étai, nous n'aurons ni un creux global ni une rondeur d'attaque excessifs quand l'étai fléchit, donc nous n'aurons pas une diminution d'incidence trop forte à l'attaque. Par contre, nous aurons bien un décalage sous le vent de l'avant des profils. Dans ces conditions, le foc peut faire un meilleur cap, sans qu'on soit obligé de rentrer son point de tire, ce qui risquerait de trop refermer le couloir. Une certaine flexion d'étai est alors bénéfique.

Si par contre son guindant est droit, le creux augmente trop par flexion de l'étai et même si l'avant des profils est basculé sous le vent, le foc fait moins de cap et peut devenir trop puissant. L'étai doit être maintenu raide.

Nous comprenons ainsi que les focs coupés avec beaucoup de négatif sont performants dans la brise, puisqu'en raidissant l'étai on peut les aplatir fortement. Par contre, dans le petit temps, il faudrait détendre beaucoup l'étai donc les haubans pour retrouver un certain volume, ce qui nuirait à la performance de la grand-voile car alors le précintrage du mât serait réduit, à moins d'utiliser d'autres réglages tels qu'une béquille, le calage du mât ou des barres de flèche poussantes sur les bateaux qui en possèdent. Pour cette raison, la tendance actuelle en dériveur est de couper les focs sans négatif. Même sur les catamarans qui possèdent en général des barres de flèche poussantes, on observe la même tendance pour des raisons de simplicité : l'équipage doit ainsi simplement veiller à conserver le gréement tendu. Ceci lui est plus facile que d'avoir à surveiller et ajuster constamment une flexion d'étai donnée.

La figure ci-dessous illustre les tensions perpendiculaires qui règnent dans le foc, la flexion d'étai qu'elles entraînent et les conséquences de cette flexion sur l'augmentation du creux en partie médiane et le décalage sous le vent de l'attaque des profils.

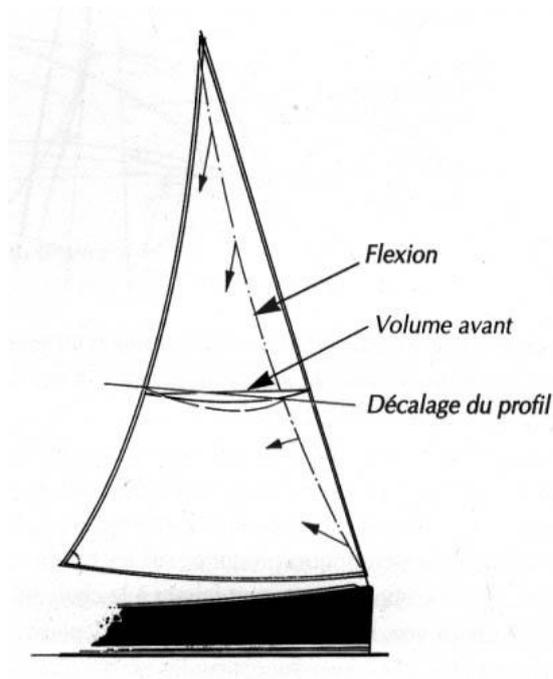


Fig177/ZZ212 page153 : La flexion d'étai creuse et « borde » la voile d'AV.

Nous avons vu (paragraphe V – 6) qu'en dériveur et en catamaran de sport c'est la tension du gréement qui détermine la raideur de l'étai. Si l'on veut conserver une flexion d'étai constante, il est logique d'augmenter la tension de gréement plus le vent monte. Selon les configurations de haubannage, on retend les haubans ou la drisse de foc quand celle-ci remplace l'étai. Lorsqu'on effectue ces réglages, on devra garder en tête que la première solution augmente la quête arrière alors que la seconde la diminue.

En croiseur, le pataras peut être utilisé pour reprendre la flexion d'étai, avec plus d'efficacité sur un gréement en tête.

Sur un gréement fractionné, nous avons vu (paragraphe V – 9 – 7) que dans la brise il aplatit les deux voiles. Le foc est aplatit par tension de l'étai et la grand-voile par cintrage longitudinal du mât, général ou localisé en tête si la base du mât est bloquée.

La tension du pataras augmente donc logiquement avec la force du vent.

VI – 2 – 2) Influence de la tension de guindant

Comme pour la grand-voile (paragraphe III – 3 – 2), une tension parallèle exercée sur le guindant du foc équilibre dans un premier temps les tensions perpendiculaires engendrées dans le tissu par la force aérodynamique et remet le tissu en formes.

Avec plus de tension, on aplatit logiquement le guindant sur une faible largeur, mais en arrière de cette zone on attire, par déformation du tissu, les formes de la voile vers l'avant : on avance le creux, d'autant plus que le tissu est déformable. Ce faisant, on arrondit l'attaque et on aplatit l'arrière. Le foc devient plus tolérant, moins sensible aux décrochages, mais ses possibilités de cap se dégradent. Ce réglage sera donc adopté de préférence sur eau agitée. Avec une tension extrême, l'apport excessif de tissu vers l'avant engendre un pli vertical juste en arrière du guindant.

En tête (fig177/ZZ212 page153 ci-dessus) nous avons vu que les tensions perpendiculaires sont presque verticales. La tension du guindant et la tension de chute l'étant aussi, nous avons

localisation de toutes ces tensions sur le guindant et la chute, donc une augmentation du creux si la tension de guindant augmente (voir paragraphe III – 2).

La tension du guindant augmente le creux en tête et avance le creux dans le reste du foc (figure ci-dessous).

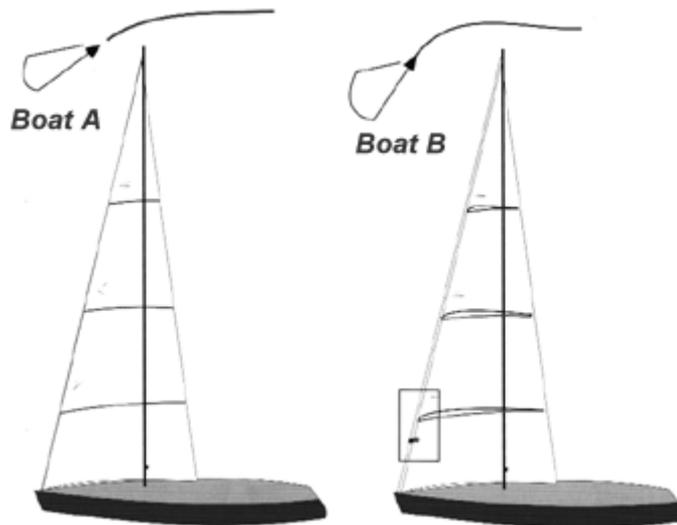


Fig90/ZZ95 : Tension de drisse, position du creux, finesse d'attaque de la voile d'AV.

Lorsqu'on tend l'étai pour diminuer le creux global du profil, dans la brise ou le petit temps sur eau plate, l'attaque devient moins ronde puisque le creux global diminue. Pour conserver une certaine tolérance, on retend le guindant du foc.

Inversement si un besoin supérieur de puissance exige de détendre l'étai, l'augmentation du creux global peut donner une attaque trop ronde qu'on doit faire reculer en détendant le guindant.

Tension d'étai et tension de guindant vont donc généralement de pair, elles augmentent toutes deux avec la force du vent. Cependant, dans les circonstances où les formes du foc ne sont pas jugées satisfaisantes, ces deux réglages peuvent au contraire être utilisés de manière antagoniste.

Par exemple, si sur l'eau nous trouvons que le foc est trop plat, notamment à l'attaque, nous manquons de puissance et de tolérance. Ceci peut être dû à un étai trop raide pour le négatif du guindant (influence sur le creux global) et/ou une tension de guindant trop faible (influence sur le positionnement horizontal du creux). On peut essayer de détendre l'étai et d'augmenter la tension de guindant pour retrouver plus de puissance et une attaque plus ronde et plus tolérante qui favorise le pilotage sur eau agitée et la lisibilité des penons du foc.

Nous pouvons avoir deux moyens pour augmenter la tension du guindant : tirer le point d'amure vers le bas avec un Cunningham (figure ci-dessous) ou tirer le point de drisse vers le haut.

Avec la première solution, les effets sur les formes du foc sont ceux que nous venons de décrire. Avec la deuxième, nous avons également augmentation de la tension de chute (la distance point de drisse – point d'écoute augmente), donc moins de vrillage et augmentation plus importante du creux en tête. Ces phénomènes « annexes » compliquent la vie du régleur qui devra donc privilégier la première solution.

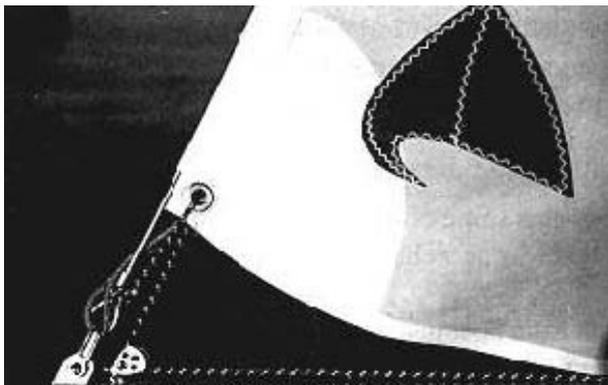


Fig99/ZZ132 : Cunningham de foc ramené au pied de mât.

VI – 2 – 3) Réglage des points de tire et tension de chute

La tension de chute, directement liée à la tension d'écoute, et sa direction d'application, qui dépend de la position du point de tire, ont un effet prononcé sur les volumes de la voile d'avant.

Les points de tire peuvent être avancés ou reculés (figure ci-dessous).

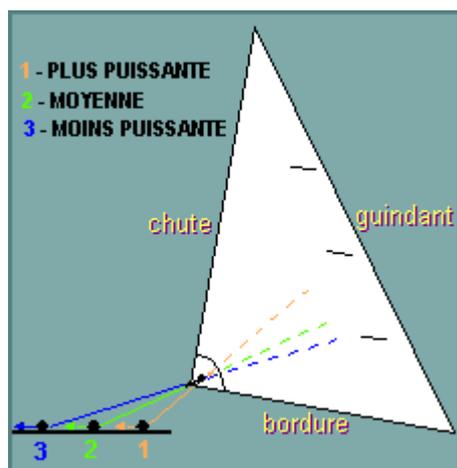


Fig70/ZZ75 : Réglage des points de tire de la voile d'AV.

Si on avance le point de tire sans modifier la tension d'écoute, on creuse le bas de la voile et on tend la chute (puisque l'angle de tire de l'écoute est plus vertical). D'autre part, du fait que la bordure a été creusée, la tension de chute reste davantage localisée sur l'arrière (voir paragraphe III – 2). Pour ces deux raisons, la tension de chute diffuse moins vers le cœur de la voile, on observe une augmentation de creux, notamment en tête où tensions perpendiculaires, tension de guindant et tension de chute sont quasiment verticales, sans tensions horizontales pour rééquilibrer le tissu (voir paragraphe III – 2). Pour une position donnée du point de tire, augmenter la tension de chute augmente le creux surtout en tête, répercute plus haut le volume induit par l'avancement du point de tire et diminue le vrillage. Le creux a également tendance à reculer (pour les mêmes raisons qui font que la tension de guindant avance le creux).

Tout ceci fait que, comme nous l'avons vu pour la grand-voile (paragraphes III – 2 et V - 10), l'augmentation du creux de la bordure quand on avance le point de tire est répercutée plus haut dans la voile si la tension de chute reste élevée.

Si maintenant on diminue la tension d'écoute, la voile reste creusée en bas, mais elle est affinée et vrillée en haut.

Inversement, si on recule le point de tire le bas de la voile est logiquement aplati, puisque l'écoute tire plus horizontalement. Si dans le même temps on diminue la tension de chute, celle-ci se diffuse plus largement dans la voile et l'aplatit dans son ensemble, la chute moins tenue vrille davantage.

Nous venons de voir qu'en ajustant la position du point de tire et la tension de chute, on contrôle le vrillage du foc et par conséquent la largeur du couloir entre les deux voiles. Rappelons (paragraphe I – 10 – 1) qu'un couloir trop étroit, par une mise en refus trop importante, peut générer l'inversion de l'attaque de la grand-voile (figure ci-dessous). Avec un couloir trop large, la bonification du foc par la grand-voile est réduite : ses performances diminuent, ceci peut être utilisé dans la brise pour diminuer sa puissance.

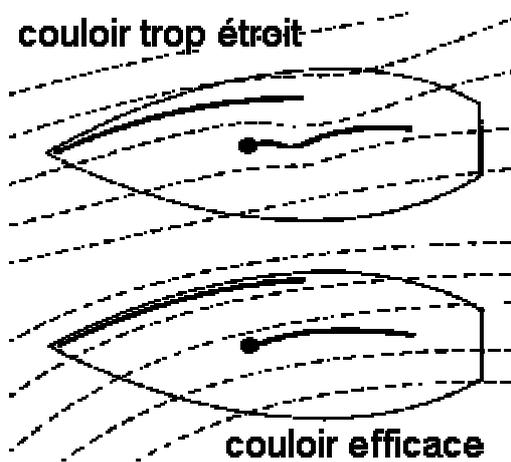


Fig71/ZZ75 : Largeur du couloir.

On cherche donc généralement, par le vrillage du foc, à conserver une largeur de couloir constante de bas en haut (figure ci-dessous).

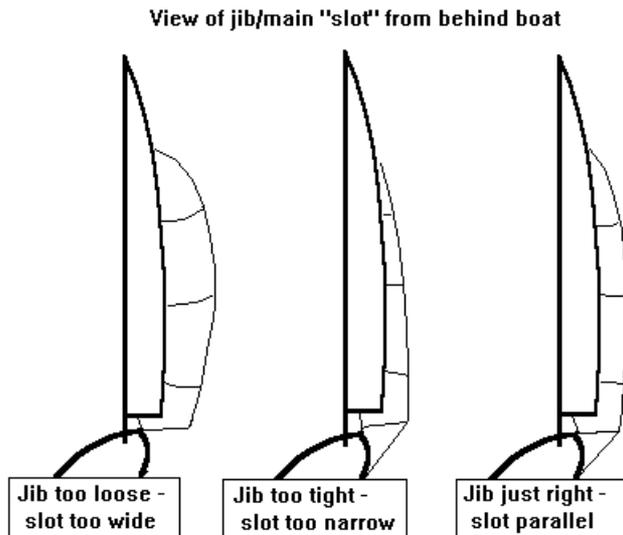


Fig75/ZZ76 : Réglage du couloir.

Mais le bon vrillage du foc, via le réglage du point de tire, doit aussi viser à obtenir un vrillage d'attaque adéquat, afin d'accommoder le gradient de vent et l'adonnante d'attaque (paragraphe I – 10 – 2). Les penons d'attaque permettent d'ajuster ce vrillage (paragraphe VI – 1 et Fig67/ZZ72)

Remarquons que lorsque nous mettons le mât en quête arrière, nous inclinons le guindant vers l'arrière. Le point d'écoute descend, l'angle de tire de l'écoute devient plus horizontal. Mettre de la quête arrière est donc équivalent à reculer le point de tire : ce réglage favorise le vrillage de la voile d'avant, donc l'ouverture du couloir.

Sur certains bateaux (Soling, certains catamarans de sport...) les points de tire peuvent aussi être déplacés latéralement. Sur certains catamarans de sport, ce déplacement latéral est même le seul possible. Cependant, un tel déplacement latéral change assez peu l'angle de tire de l'écoute.

Sur ces bateaux, on installe donc généralement plusieurs points d'écoute, qui permettent de retrouver une marge de manœuvre sur l'angle de tire de l'écoute, donc sur le vrillage. La largeur du couloir est par contre plus facilement contrôlée avec un tel dispositif. Il permet par exemple de fermer un peu le couloir pour le cap (sur eau plate) ou de l'ouvrir par forte brise.

Sur les bateaux qui en sont démunis, on peut utiliser la contre-écoute pour fermer un peu plus le couloir dans le médium, ou creuser un peu la bordure pour récupérer de la puissance. Un barber de foc peut également permettre d'écarter le point de tire dans la brise.

Enfin, le réglage du foc n'est pas indépendant de celui de la grand-voile. Par exemple, si la grand-voile a été aplatie par précintringe, notamment sur l'avant, on pourra centrer davantage le foc ou le border davantage. Si par contre elle a été creusée et son creux avancé, pour plus de puissance et de tolérance dans le clapot, il faudra ouvrir ou vriller le foc pour éviter l'inversion de l'attaque de la grand-voile.

VI – 3) Réglages du spi

VI – 3 - 1) Interférences spi / grand-voile

Lorsqu'on navigue en poussée, le spi bloque l'écoulement de l'air à son vent. Il se forme une poche d'air mort entre les deux voiles, surtout dans la partie du spi directement déventée par la grand-voile. Du côté du point d'amure, l'écoulement sur le spi reste relativement sain et peut réamorcer la zone déventée, par contagion moléculaire, si le vent est assez fort.

Par vent plus faible, la circulation ayant plus de mal à s'établir et à se maintenir, c'est la zone déventée du spi qui peut l'entraîner tout entier dans le dégonflement.

On conçoit que sur un spi en poussée c'est la zone du point d'amure, dégagée de la grand-voile, qui tire le mieux. On a donc intérêt, par vent faible, à la favoriser en brassant le tangon au vent. On peut aussi, au contraire, laisser partir le tangon sur l'avant pour augmenter la largeur du couloir entre les deux voiles. Ce type de stratégie, utile sur un croiseur ou un dériveur, n'a pas lieu d'être sur un catamaran de sport où on navigue en finesse avec un spi asymétrique établi sur un tangon fixe. Les allongements faibles étant plus performants en poussée (paragraphe I – 9 – 6 – 1), les spis de grand-largue ou de vent arrière ont souvent des formes ramassées.

En finesse, le couloir entre les deux voiles est étranglé, d'autant plus que le spi est creux et large et/ou la grand-voile choquée. Ce bouchon bonifie les performances du spi mais dégrade celles de la grand-voile (paragraphe 1 – 10). En catamaran de sport, où la vitesse est élevée et la grand-voile de surface importante, on a intérêt à conserver ses performances au mieux en utilisant des spis plus étroits et plus plats, qui décrochent moins vite et sont mieux adaptés à des écoulements rapides. Leur allongement favorise leurs performances.

Plus le tangon est long, plus le couloir entre les deux voiles est ouvert et la performance de l'ensemble optimisée. Pour cette même raison, il est préférable de rouler le foc quand on navigue sous spi. En effet, situé au vent du spi, son écoulement est de toute façon perturbé et nous n'aurons pas de différence significative de vitesse entre ses deux faces ; d'autre part il fermera davantage le couloir, dégradant encore les performances de la grand-voile.

La grand-voile, mise en refus très important par le spi, doit être plus centrée – il n'est pas rare, en catamaran de sport, de naviguer sous spi avec le chariot de grand-voile pratiquement dans l'axe.

VI – 3 - 2) Conception et utilisation du spi

Contrairement à une grand-voile ou un foc supportés par des espars ou un étai, le spi n'est maintenu que par ses trois points. Comme ses lisières sont convexes (on dit que le spi est « épaulé »), il faut lui donner du creux de moule pour éviter qu'elles se replient sous le vent. Pour cette même raison, on s'arrange, par une judicieuse répartition du volume, pour que les tensions soient plus fortes sur les lisières qu'à cœur, pour mieux les maintenir. Ceci implique, pour localiser ces tensions sur ces lisières, que le creux y soit important, d'autant plus qu'elles sont convexes.

En navigation, le volume ne peut être modifié que par ajustement de la distance qui sépare le point de drisse du point d'amure, le point de drisse du point d'écoute, et le point d'amure du point d'écoute.

Un spi qui possède une surface importante en partie haute est intéressant au vent arrière car cette partie est mieux dégagée de la grand-voile. On ne peut l'obtenir qu'avec une forte convexité des deux lisières (un angle important entre ces deux lisières au point de drisse), donc aussi un creux important pour les maintenir. Par contre, en finesse ce creux important

nuit au cap : la chute et le bord d'attaque risquent de trop refermer, les décrochages extradoss sont plus précoces et les tourbillons marginaux plus importants (paragraphe I – 9 – 6 – 1). La perturbation induite sur la grand-voile est plus importante, notamment sur un gréement fractionné où elle nuit au rendement de la partie médiane, la plus propulsive. Enfin le creux en tête limite les possibilités de vrillage de la partie supérieure du spi.

Pour ces raisons, sur ces bateaux les spis sont généralement coupés assez plats en tête avec un angle faible au point de drisse.

La partie médiane du spi est la plus propulsive. On doit y conserver un certain volume pour que la « pompe » qu'il permet d'amorcer donne au spi la possibilité de se maintenir en position (stabilité). C'est la partie du spi la plus éloignée des trois points, son creux est donc le plus difficile à ajuster par les réglages : par conséquent il faut apporter un soin particulier à sa répartition lors de la conception de la voile.

En dériveur et en croiseur, dès qu'on quitte le large serré il devient impossible d'écarter suffisamment le point de tire sous le vent. Pour orienter correctement le bord d'attaque, il faut border l'écoute. Celle-ci tend alors à faire rentrer le point d'écoute dans le bateau, donc à creuser exagérément la bordure du spi. Pour cette raison, il est généralement inutile de prévoir du creux de moule dans cette partie.

En multicoque de sport, la largeur de la plate-forme permet d'écarter suffisamment le point de tire, mais du fait qu'on navigue toujours en finesse avec une grande vitesse, on évitera également un creux de moule trop important en partie basse.

Le dessin du spi dépend évidemment de ses conditions d'utilisation. Les spis de large, et à plus forte raison les asymétriques des catamarans de sport, sont taillés assez plats (creux inférieur à 25 %). Ces spis peuvent être portés plus près du vent grâce à une attaque plus fine. Cependant, une attaque fine est aussi plus sensible à l'inversion (elle « ourle » plus facilement), plus difficile à maintenir sous le bon angle d'attaque : on devra lui conserver une certaine rondeur. Ces spis peuvent aussi être portés sur des angles plus abattus, car ils décrochent moins sur la chute. Ils sont donc plus tolérants et en même temps plus adaptés aux grandes vitesses. Puisqu'ils défléchissent moins l'écoulement, ils sont moins puissants mais perturbent moins la grand-voile, qui peut rester plus ouverte et conserver une portance mieux orientée vers l'avant.

N'oublions pas que c'est au portant que l'influence du gradient de vent (couche limite terrestre) est la plus sensible (paragraphe IX – 6 – 1). En tête on a donc une adonnante marquée qui implique de vriller le spi : celui-ci doit donc être assez plat en partie supérieure. L'intérêt des spis asymétriques, dont le guindant est plus long que la chute, est de mieux exploiter l'écoulement toujours plus sain et plus adonnant au bord d'attaque. La chute, plus courte, entraîne moins de perturbation de la grand-voile.

Tous les spis de large doivent être tenus à la limite du dévent (prise à contre) de l'attaque. En effet, si on les borde davantage, certes l'attaque n'ourle plus de temps en temps, mais du fait de la courbure importante du spi (par rapport à une voile classique), il y a un fort risque de décrochage à l'extrados. Par ailleurs, la propulsion du spi est plus latérale, ce qui nuit évidemment à la vitesse et favorise la gîte.

Lorsque la circulation est établie, du fait de la forte courbure la dépression est très forte à l'extrados. Cette forte dépression aide à maintenir temporairement la circulation quand on choque le spi pour mieux l'orienter vers l'avant. Mais si l'incidence devient trop faible, le spi dégonfle et il faut le reborder bien au-delà de l'incidence d'origine pour rétablir les écoulements. Bien exécutée sans que le spi crève, cette manœuvre de « pompage » améliore la vitesse.

VI – 3 – 3) Effet du spi sur l'équilibre de route

Au vent arrière, puisque l'écoulement est plus efficace côté point d'amure, le spi est attiré au vent et son centre vélique est lui aussi au vent (figure ci-dessous). Il apparaît un couple d'abattée entre la force vélique du spi et la résistance de carène (voir aussi paragraphe IV – 4 – 2). Lorsque la surface du spi est proportionnellement importante par rapport à celle de la grand-voile, la grand-voile (déportée sous le vent) ne suffit pas à équilibrer le spi et il peut y avoir départ à l'abattée avec empannage intempestif.

Ce phénomène ne concerne pas les multicoques de sport qui naviguent en finesse avec les deux voiles déportées sous le vent. Ils subissent plutôt un couple de lof relativement faible, surtout s'ils marchent sur une coque (paragraphe IV – 4 – 1).

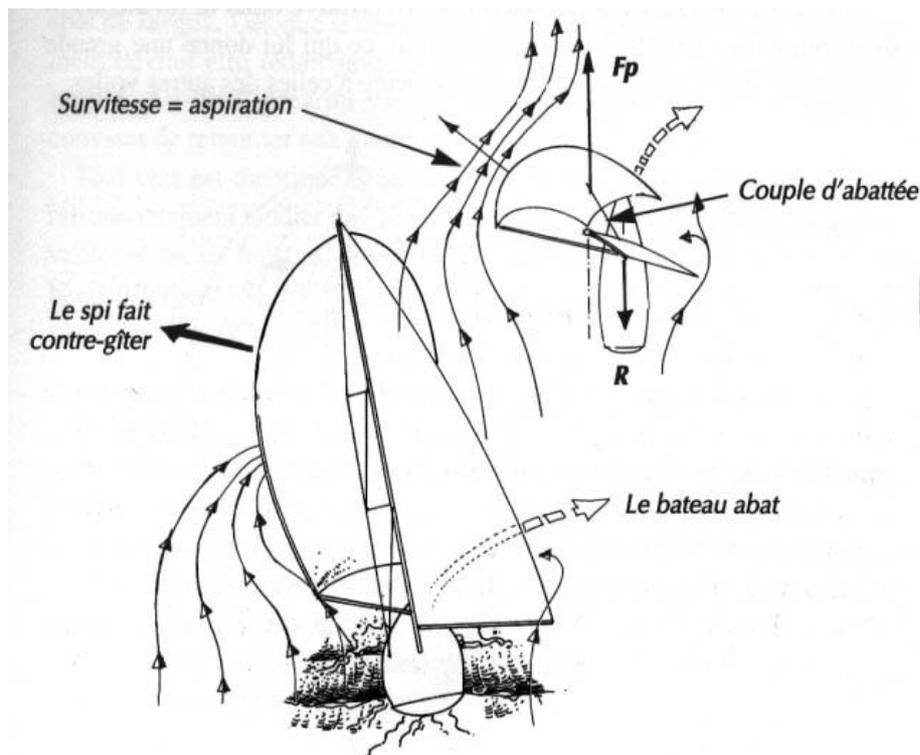


Fig184/ZZ212 page 253 : Dissymétrie de la force vélique du spi et couple d'abattée.

VI – 3 - 4) Les moyens d'action

VI – 3 – 4 - 1) Tension des lisières

Nous avons déjà signalé que nous pouvons modifier la répartition de creux d'un spi en jouant sur les distances qui séparent, deux à deux, ses différents points de fixation.

Contrairement à ce qu'on peut penser intuitivement, lorsqu'on tend une lisière verticale on induit plus de volume.

En effet ces lisières sont généralement convexes. En les tendant, on force les épaules – la portion de tissu qui dépasse de la ligne droite qui joint les deux points de fixation – à rentrer dans le triangle de base. Cet apport de tissu ajoute nécessairement du creux au volume de moule prévu par conception.

Si par exemple on abaisse le point d'amure et le point d'écoute, vu de profil le spi paraît bien sûr plus plat puisque la courbure (verticale) de front diminue (le spi gonfle moins vers

l'avant). Mais puisque le vent s'écoule horizontalement, c'est la courbure horizontale qu'il faut considérer – et celle-ci augmente, rendant bien le spi plus puissant.

Il en va différemment pour la lisière inférieure (la bordure) qui est généralement peu ou pas convexe. Si on avance le point de tire, ou bien si on rentre le point d'écoute vers l'intérieur du bateau, logiquement on induit une courbure horizontale, donc du creux, dans la partie inférieure du spi. Comme pour la grand-voile et le foc (paragraphe V – 10) et VI – 2 – 3), ce volume inférieur est davantage répercuté vers le haut si les lisières, donc le guindant et la chute, sont tendues.

En croiseur et dériveur, avec un spi de largue ou un asymétrique coupés plats, on pourra ainsi descendre le tangon au largue sans induire trop de puissance. Ceci arrondit l'attaque et la rend plus tolérante, ce qui aide à établir et stabiliser le spi notamment dans le petit temps et le clapot. Dans le même temps, on détend la chute pour vriller, affiner et améliorer la tolérance de la partie arrière. Le spi peut moins partir sous le vent par l'amure, sa portance reste orientée vers l'avant.

Avec un spi creux, il faudra se garder de descendre l'amure sous peine d'induire encore plus de puissance.

En multicoque de sport, les asymétriques étant coupés plats, les lisières sont peu convexes. De plus le guindant est souvent grée assez tendu. Quand on descend l'amure, on atteint rapidement des tensions assez fortes qui, agissant comme un Cunningham, avancent le creux, affinent et vrillent la partie arrière (réglage utile pour la brise) d'autant plus que l'écoute n'est pas trop tendue. Sur les largues plus arrivés où le spi est plus orienté vers l'avant et où la gîte n'est plus un souci, remonter l'amure donnera plus de puissance utile.

VI – 3 – 4 - 2) Position du tangon en pivotement

Quand on peut positionner le tangon sur le mât à des hauteurs différentes, on essaie de le fixer horizontalement pour éloigner le plus possible le spi de la grand-voile.

Avec un spi asymétrique, on positionne l'extrémité du tangon de telle sorte que sa hauteur permette de tendre le guindant : on peut ainsi bénéficier de l'effet « Cunningham » décrit dans le paragraphe précédent.

Avec des spis classiques établis sur des tangons qui peuvent pivoter, en dériveur ou en croiseur on recommande souvent de positionner le tangon perpendiculairement au vent apparent. En fait, on peut avoir intérêt à débrasser un peu le tangon à partir de cette position, donc à le laisser partir un peu sous le vent. En effet, aux allures arrivées, sur le spi il y aura perte en surface dégagée de la grand-voile, mais le spi étant avancé, il y a moins de perturbation sur la grand-voile et une meilleure performance d'ensemble. Par ailleurs, le centre vélique du spi étant ainsi déporté sous le vent, le couple d'abattée sera moins important et l'équilibre de route meilleur. Au vent de travers, ne pas laisser partir le tangon complètement sur l'étai car alors le spi tire très latéralement.

Evidemment les catamarans de sport, avec leur tangon fixe, ne sont pas concernés ici.

VI – 3 – 4 - 3) Position du point de tire (barber)

Sur les largues relativement serrés, avec un point de tire bien reculé, quand on borde on tire le point d'écoute vers l'arrière. En l'écartant du point d'amure, on aplatit le bas du spi. Ceci étant un effet recherché, cette situation ne pose pas de problèmes. Ainsi sur un catamaran de sport, quand c'est possible on cherche à reculer les points de tire quand le vent monte.

En revanche, en croiseur et en dériveur, sur les largues plus arrivés on incurve au contraire la bordure en tirant sur l'écoute, donc on creuse le bas du spi. Si on cherche au contraire à aplatir le spi (dans la brise par exemple), on limitera cet effet en reculant le point de tire, ce qui permet à l'écoute de tirer le point d'écoute autant vers l'arrière que vers l'intérieur du bateau. Par ailleurs, l'écoute tirant maintenant sur le spi selon un angle plus horizontal, la chute sera moins tendue, la distance point d'écoute – point de drisse plus grande donc la partie arrière du spi plus plate : le spi continuera à vriller. On retrouve ici les mêmes principes que pour un foc (paragraphe VI – 2 – 3).

Sur ces bateaux, au vent arrière il faut bien avancer à nouveau le point de tire, pour pouvoir contrôler la position en hauteur du point d'écoute.

VI – 4) Résumé des points essentiels pour le réglage

- Si l'étai fléchit, le creux global et l'incidence du foc augmentent. L'augmentation du creux induit une limitation du vrillage. En particulier, l'attaque s'arrondit. Avec une attaque ronde, le foc est plus puissant, plus tolérant mais fait moins de cap.
- Avec plus de tension de guindant, on augmente le creux en tête et on avance le creux dans le reste du foc. En particulier l'attaque est arrondie.
- Tension d'étai et tension de guindant du foc augmentent toutes deux avec la force du vent. Une correction de formes inadéquates peut entraîner cependant leur utilisation antagoniste.
- Position des points de tire et tension de chute déterminent creux et vrillage du foc. Point de tire avancé et forte tension de chute = augmentation générale du creux et moins de vrillage. Point de tire reculé et faible tension de chute = affinement général et vrillage. Plus de tension de chute = augmentation du creux surtout en tête et léger recul du creux, répercute plus haut le volume bas induit par le creusement de la bordure.
- Prendre de la quète arrière est équivalent à reculer les points de tire du foc.
- Ajuster le vrillage par la position des points de tire et la tension de chute pour obtenir la bonne largeur du couloir. Utiliser aussi les penons d'attaque du foc pour ajuster le vrillage : ils doivent déventer simultanément à l'intrados. Plus près de l'attaque, ils sont plus sensibles mais moins tolérants.
- Les spis de largue sont plus étroits et plus plats, ce qui les rend plus tolérants et plus adaptés à la vitesse. Ils perturbent moins la grand-voile. Il faut conserver une certaine rondeur à l'attaque pour que l'avant du spi conserve une certaine stabilité. Ils sont plats en tête pour pouvoir vriller et accommoder l'adonnante qui s'y trouve.
- La grand-voile, mise en refus très important par le spi, doit être plus centrée.
- Lorsqu'on tend une lisière verticale on induit plus de volume, surtout si la lisière est très convexe. Avec un asymétrique (lisières peu convexes) dont le guindant est tendu entre le tangon est le point de drisse (catamarans de sport) : en descendant l'amure on a un effet de Cunningham avec avancement du creux, affinement et vrillage de la partie arrière.
- Avec un point de tire avancé et une écoute tendue, on incurve la bordure du spi, on répercute ce volume plus haut par la tension de chute et on referme la chute.

VI – 5) Adaptation des réglages des voiles d'avant aux conditions

Pour le foc :

sur l'eau plate, on donne la priorité au cap : il faut un profil fin et une attaque pas trop ronde, donc un étai plutôt raide et une tension de guindant pas trop forte.

Sur eau plus agitée (priorité vitesse) on redonne de la puissance en mollissant l'étai et de la tolérance en retendant le guindant et en augmentant le vrillage. On adopte un positionnement plus avancé des points de tire pour localiser la puissance en bas, les profils supérieurs étant affinés par la tension de chute plus faible que sur eau plate.

Dans le petit temps clapoteux, on peut sur certains bateaux mollir la tension de gréement pour avoir l'étai un peu mou plus de puissance dans le foc. Comme dans ces conditions la grand-voile est également creusée et son attaque arrondie, il faut plus de vrillage du foc.

Dans toutes les conditions plus le vent monte plus la tension d'étai et de guindant augmentent, afin d'aplatir et d'avancer le creux.

Le couloir doit être ouvert dans le petit temps et la brise, il peut être plus fermé dans le médium surtout sur eau plate (pour le cap). A partir du médium, le vrillage doit augmenter à nouveau, ce qui implique le recul ou le déplacement sous le vent du point de tire et une diminution de la tension de chute, avec dans le même temps affinement de l'ensemble de la voile d'avant.

Pour le spi :

En croiseur et dériveur, pour un spi de large coupé plat, descendre l'amure dans le petit temps et le clapot pour arrondir et stabiliser l'attaque et favoriser la tolérance.

En catamaran de sport où le guindant est plus tendu au départ, descendre l'amure plus le vent monte pour avancer le creux, affiner et vriller l'arrière.

Sur tous les bateaux reculer le point de tire, quand c'est possible, du vent arrière vers le large serré, et reculer plus le vent monte.

Chapitre VII : Réglages au près et au portant : principes généraux et quelques exemples

Du fait de l'universalité d'un grand nombre de principes aérodynamiques, nous pouvons déduire de tout ce qui précède quelques guides de réglage applicables à différents types de bateaux, qu'il s'agisse de dériveurs, de croiseurs ou de catamarans de sport. Bien entendu, chaque support a néanmoins ses caractéristiques propres et des nécessités différentes de puissance, en fonction de son poids, de la résistance à l'avancement de sa carène, du dessin de son plan de voilure. En particulier, nous ferons une étude spécifique de quelques catamarans de sport représentatifs par leurs particularités. Nous nous attarderons un peu plus sur le Classe A qui par sa simplicité apparente (une seule grand-voile) et ses nombreuses possibilités de contrôle, est une formidable plate-forme d'apprentissage des subtilités de réglage.

VII – 1) Principes généraux

A peu près tous les guides de réglage qu'on peut trouver suivent de près les recommandations suivantes :

VII – 1 – 1) Au près

VII – 1- 1- 1) Vent faible / eau plate, priorité cap

Le creux doit rester relativement faible pour ne pas trop contraindre l'écoulement du vent. Généralement on privilégie le cap.

Si le mât est souple précintrer (calage pied de mât et/ou étambrai, halebas quand son angle de tire est horizontal, barres de flèche poussantes, bas-haubans relâchés, tension du gréement en dériveur et du losange en catamaran de sport). Ne pas cintrer le mât par tension d'écoute ou halebas car la chute doit simplement être tenue à la limite de la fermeture pour favoriser le cap.

Le chariot d'écoute reste centré.

Positionner le creux vers 50 % (un peu moins sur les bateaux rapides) en ajustant la tension du cunningham.

Conserver un peu de creux en haut des deux voiles pour mieux exploiter l'adonnante en tête (par tension de chute ou rotation de mât).

Si la grand-voile est jugée trop plate creuser la bordure et retendre un peu la chute.

Recreuser temporairement les voiles pour l'accélération en sortie de manœuvre (si possible).

Plus le vent monte plus on affine.

Le foc est conservé relativement plat grâce à un étai assez raide. Ajuster la tension de guindant pour obtenir la bonne rondeur d'attaque. Attaque trop ronde = moins de cap, trop plate = pas assez de puissance et de tolérance. Point de tire assez avancé (ou assez décalé sous le vent si on ne dispose que d'un réglage latéral), léger vrillage : le couloir entre les deux voiles doit être maintenu assez ouvert.

Chercher à réduire la surface mouillée (en dégageant le tableau arrière) tant que la vitesse est notablement inférieure aux possibilités ultimes de la carène au près.

VII – 1- 1- 2) Vent faible / eau plate, priorité vitesse

En principe le cap est privilégié sur l'eau plate, cependant pour des raisons tactiques (sortie de cadre, contournement d'obstacle, contrôle de la flotte) on peut être amené à abattre un peu. Puisque nous ne devons plus serrer le vent d'aussi près, par rapport au réglage précédent, on peut utiliser des profils un peu plus creux (surtout si le bateau est lent) qui sont plus puissants. La bordure est légèrement relâchée, la chute un peu plus tendue pour augmenter un peu le creux en tête. Le Cunningham est légèrement repris si le mât cintre un peu plus. Le vrillage reste donc faible.

Pour creuser la grand-voile, on peut aussi redresser le mât afin de limiter son cintre à celui nécessaire pour le rond de guindant de la grand-voile (blocage à l'étambrai, halebas un peu relâché, bas-haubans tendus, béquille, grément ou losange un peu moins tendus).

Attention cependant, avec un sloop, de ne pas générer d'inversion à l'attaque de grand-voile. L'étai est un peu relâché pour creuser le foc ce qui arrondit son attaque, et on remet celle-ci dans ses formes d'origines en relâchant aussi un peu de tension de guindant. Le point de tire reste assez avancé, la chute du foc est un peu plus tendue.

VII – 1- 1- 3) Médium / eau plate

La priorité reste au cap. Si le bateau est lent, par rapport au réglage précédent les voiles sont creusées en particulier en redressant le mât (blocage à l'étambrai, halebas un peu relâché, bas-haubans tendus, béquille, grément ou losange un peu moins tendus). S'il est rapide, elles sont aplaties (actions inverses, plus de Cunningham et de tension de chute, éventuellement utilisation du pataras). Les chutes sont tendues, le point de tire du foc reste relativement avancé ou rentré pour favoriser le cap. C'est dans ces conditions que le couloir entre les deux voiles peut être le plus fermé. On peut même parfois utiliser un barber pour centrer davantage le point de tire. Le guindant de foc n'est pas trop tendu pour conserver une attaque fine favorable au cap.

En arrivant vers le haut-médium et la surpuissance, on commence à affiner et vriller la grand-voile par le haut (plus de Cunningham, de tension de chute sur un mât souple, de pataras, mât pivotant centré avec plus de tension de losange et chariot de grand-voile choqué, bordure reprise). La puissance est régulée en choquant le chariot de grand-voile. Le halebas commence à venir en relais de l'écoute sur les dériveurs. En catamaran de sport le chariot est choqué davantage si le panneau inférieur du mât (quand il est centré) part sous le vent. L'étai est progressivement retendu, la tension de guindant de foc aussi pour retrouver une certaine rondeur d'attaque. Le couloir doit s'ouvrir à nouveau, commencer à écarter ou reculer le point de tire du foc. Ceci aplatit le bas du foc et favorise le vrillage du haut. Commencer à vriller et affiner (par ajustement de la tension de chute).

Si le creux de la grand-voile est avancé, si le panneau inférieur du mât part sous le vent, ce sont des raisons supplémentaires pour reculer le point de tire du foc ou l'écarter sous le vent. Les lattes doivent être de plus en plus raides et tendues quand le vent monte.

VII – 1- 1- 4) Brise / eau plate

On s'arrange pour adapter la puissance du grément au niveau de base du vent, de façon à ne pas être sous-puissant dans les molles. La priorité est maintenue au cap.

On continue la logique d'affinement précédente en généralisant le cintrage et l'affinement vers le bas. On laisse cintre le mât (actions sur le calage du mât, le halebas, les bas-haubans, la béquille, grément ou losange plus tendus). Le mât pivotant est centré pour laisser déverser

la tête. Bordure, Cunningham et écoute sont très tendus pour l'affinement et la tendance au vrillage maximaux. Le pataras est davantage tendu. Sur certains bateaux on préfère cependant ne cintrer que le haut par le pataras, la base restant bloquée. Ceci permet d'aplatir le foc en conservant une certaine puissance dans le bas de la grand-voile.

Plus de tension d'étai et de guindant, point de tire reculé ou écarté et chute du foc vrillée. Sur un sloop écarter le point de tire est un outil de régulation de puissance très efficace.

Dans les conditions très irrégulières (vent de terre) il faut plus de tolérance : laisser fléchir un peu l'étai pour arrondir son attaque, reculer le point de tire du foc et accentuer le vrillage des deux voiles.

VII – 1- 1- 5) Vent faible et clapot

Il faut de la puissance et de la tolérance, ce qui implique des profils creux avec un positionnement avancé, surtout si le passage de la carène est moins bon. La quête arrière du mât et le vrillage des deux voiles sont plus forts que sur eau plate (pour la tolérance). Le cap est sacrifié pour la vitesse. Avec les réglages de précintringe et de cintringe, on cherche à redresser le mât au maximum. Sur certains bateaux on peut même obtenir une augmentation de puissance de la grand-voile par cintringe latéral sous le vent.

La bordure est très relâchée, l'écoute de grand-voile choquée pour juste redresser le mât, pas davantage. Attention à ne pas trop creuser quand même, à cause des risques de décrochage liés au passage du clapot. Le Cunningham est plus tendu que sur l'eau plate. L'attaque de la grand-voile étant plus ronde, il faut vriller davantage le foc pour maintenir une largeur de couloir suffisante.

L'étai est détendu pour creuser le foc, la tension de guindant ajustée pour maintenir le creux à l'avant, ce qui donne de la tolérance au foc et facilite le pilotage dans les vagues. Puisque l'attaque du foc déverse, c'est une raison supplémentaire de vriller le foc pour restaurer l'incidence globale. Points de tire plus avancés que sur eau plate pour conserver de la puissance en bas, puisque pour les besoins de tolérance le haut est vrillé et affiné par diminution de tension de chute.

VII – 1- 1- 6) Médium et clapot

La priorité est toujours à la vitesse. Par rapport au réglage précédent, on affine légèrement (plus de tension de bordure et de Cunningham, on autorise à nouveau le mât à cintrer légèrement). L'affinement sera plus important si la carène passe mieux ou si le bateau est rapide. Avec un mât pivotant rotatif, on retarde le moment où on doit centrer le mât (pour conserver un creux raisonnable et avancé et pour éviter le dévers latéral) et on préfère d'abord aplatir par la bordure et le Cunningham. Le mât est centré plus tard que sur l'eau plate. Le chariot est plus centré que sur l'eau plate, et on régule la puissance par le vrillage. On prend plus de quête pour favoriser la tolérance.

Les deux voiles sont vrillées pour la tolérance mais pas trop quand même pour conserver un minimum de puissance en haut et ne pas trop dégrader le cap. Une certaine puissance est maintenue en bas.

Par rapport au réglage précédent, on recule le point de tire du foc en approchant de la surpuissance. L'étai et le guindant de foc sont progressivement retendus.

Dans la brise et les vagues, on continue la logique d'affinement, en conservant toujours une certaine puissance en bas (Cunningham à fond, mât centré et chariot choqué mais moins que sur l'eau plate, encore plus de quête arrière, plus de vrillage).

VII- 1 – 2) Au portant

VII – 1 – 2 – 1) Au travers (et au grand-largue sur une coque en catamaran de sport)

Au travers, le creux et le vrillage sont plus prononcés qu'au près surtout si le bateau est lent.

En dériveur ou croiseur, on maintient le vrillage par le halebas. Dégager un peu le tangon de l'étai pour ne pas faire tirer le spi trop latéralement. Descendre l'amure du spi plus bas que l'écoute dans le petit temps, surtout dans le clapot, pour arrondir l'attaque et la stabiliser. Remonter l'amure pour l'affiner dans la brise, détendre la chute. Gérer les surventes par vrillage de la grand-voile au halebas et/ou à l'écoute, puis par une abattée en ramenant le tangon au vent pour diminuer son incidence.

En catamaran de sport on navigue au seuil de décrochage extradados et avec plus de creux qu'au près, tant que la coque au vent ne s'élève pas, ensuite on revient aux réglages de près.

Au grand-largue sur une coque (Australienne) on part des mêmes réglages qu'au près car le vent apparent reste quasiment aussi fort, mais pour mieux descendre dans le vent il faut retarder le décrochage extradados, donc avancer le creux (en ne choquant pas, ou peu, le Cunningham quand le mât se redresse) et mollir un peu l'écoute (pour affiner et vriller l'arrière, ce qui redresse le mât). Le réglage du vrillage est délicat : trop, la coque au vent ne lève pas ; pas assez, la grand-voile décroche. Il faut de toute façon moins de vrillage que sur un grand-largue standard (la composante vitesse étant plus importante dans le vent apparent). On creuse la bordure par vent faible ou si la voile est plate de moule, pour aider la coque à décoller, mais dès que le vent est suffisant pour maintenir la coque en l'air on la retend à nouveau.

Avec un spi asymétrique, normalement fin de moule, descendre l'amure (ou remonter la drisse) au largue serré, plus le vent monte, pour arrondir un peu l'attaque et surtout affiner et vriller la partie arrière du spi (effet Cunningham). Reculer les points de tire quand on peut le faire.

Gérer les surventes par vrillage (si l'étrave supporte la tendance accrue à l'enfournement), sinon par ouverture du chariot de grand-voile, et abattre en choquant un peu le spi.

VII – 1 – 2 – 2) Au grand-largue

On redresse le mât. Les voiles peuvent être creusées davantage qu'au travers ou qu'au grand-largue sur une coque.

En dériveur et croiseur, si le spi est déventé par la grand-voile dans une adonnante, brasser le tangon au vent.

Remonter l'amure du spi pour l'affiner globalement par vent fort. Les points de tire sont plus avancés qu'au travers ; on les recule plus le vent monte.

Pratiquer le pumping du spi.

En catamaran de sport on navigue toujours en finesse : se reporter alors au paragraphe précédent.

VII – 2) De bons réflexes

Nous l'avons démontré, régler une voile est complexe car beaucoup de réglages interfèrent entre eux. Par exemple, nous avons vu que creuser la bordure retend la chute, et que la voile est creusée sur une plus ou moins grande hauteur en fonction de la tension de chute. Nous

avons vu aussi que centrer un mât pivotant losangé n'a pas le même effet sur le cintre du mât selon la tension du losange. Les chapitres précédents contiennent beaucoup d'autres exemples de ce type. Une action sur un réglage donné doit souvent s'accompagner d'une réaction sur un ou plusieurs autres réglages.

Le régleur doit s'efforcer de garder présent à l'esprit toutes ces interactions entre ces différents réglages, et c'est souvent cela qui rend sa tâche difficile, car il peut trouver le nombre de paramètres à maîtriser trop important. Les équipages expérimentés finissent par développer un « feeling » qui n'est autre qu'une connaissance empirique, devenue plus ou moins instinctive. Sur l'eau, elle leur permet d'approcher plus rapidement le réglage « idéal » qui correspond aux conditions régnantes et à leur manière de naviguer. La complexité du problème et son approche le plus souvent empirique sont d'ailleurs les raisons principales qui font que les meilleurs semblent avoir tant de mal à expliquer pourquoi ils vont vite !

L'optimisation des réglages est facilitée si on peut saisir les formes des voiles et le cintrage du mât en navigation à l'aide d'une caméra embarquée (voir aussi paragraphe III – 5). Ceci permet avec des logiciels appropriés de calculer théoriquement les forces aérodynamiques appliquées. Si par ailleurs, ces résultats sont confrontés à l'expérience par l'analyse pratique de la performance sur l'eau, évaluée par speed-test avec un partenaire d'entraînement possédant le même support et une vitesse voisine, on arrive beaucoup plus vite à cerner les besoins du bateau en fonction des conditions.

En l'absence d'une telle possibilité, le speed-test reste quand même incontournable. En effet, le résultat d'une régate dépend de trop nombreux paramètres, notamment stratégiques et tactiques (chapitres IX et X), pour permettre au régleur de tirer des conclusions définitives sur l'efficacité de tel ou tel réglage. Pendant un speed-test, l'un des deux bateaux ne modifie pas ses réglages pendant que l'autre essaie diverses possibilités. Il est essentiel de tester longtemps (au moins 10 minutes au près par exemple) l'effet d'un réglage, pour éliminer les paramètres parasites tels que risées localisées, mauvais démarrage d'un des deux bateaux... Il est préférable, pour limiter le nombre de paramètres, de consacrer une séance donnée à un nombre de réglages réduits (par exemple, la quête du mât, ou bien la tension de grément, ou bien la raideur et la tension des lattes...). Il est également préférable que les deux bateaux aient une façon de naviguer relativement proche. Il est en effet inutile de comparer, parce qu'ils sont trop différents, les réglages d'un équipage habitué à « piper » au près avec ceux d'un équipage qui « court » en faisant de la vitesse.

De retour à terre, il est indispensable de noter les impressions ressenties sur une « feuille de test » qui permet de consigner les conditions de vent et de mer, la configuration de réglages essayée et la performance évaluée sur l'eau. Dans les premiers temps de pratique, il est normal, surtout si on a peu d'expérience du bateau, de trouver les résultats un peu confus, mais avec le temps des tendances fortes se dégagent. Nous espérons que les chapitres précédents aideront à accélérer ce processus !

VII – 3) Réglages spécifiques des catamarans de sport

Les catamarans de sport n'échappent pas aux principes généraux de réglage que nous avons exposés aux chapitres V et VI, dont nous reprenons ci-dessous uniquement les points essentiels pour les lecteurs qui abordent directement ce paragraphe.

VII – 3 – 1) Rappels : effets des principaux réglages

- La quête de mâât favorise la tolérance, réduit la traînée et la puissance, revient à reculer les points de tire du foc et agit sur l'équilibre de route. Un peu d'ardeur est souhaitable pour la sécurité notamment en conditions très irrégulières.

- La tension du gréement commande celle de l'étau donc la puissance, la tolérance et le cap du foc. En sloop elle est toujours forte (mais pas assez pour interdire la rotation du mâât) car les focs sont rarement coupés avec du négatif. De plus on veut éviter que le mâât s'incline sous le vent avec perte de puissance. En catboat, en l'absence d'autres réglages tels que rotation de mâât ou losange, mollir le gréement peut être une des seules solutions pour diminuer la puissance.

- Les barres de flèche aident au maintien latéral et favorisent un cintrage longitudinal vers l'avant si elles sont poussantes. Elles permettent dans un premier temps de précintrer le mâât pour accorder sa flexion au rond de guindant de la grand-voile. Usuellement on recommande un précintre de mâât (voir sa mesure au paragraphe V – 9 – 11) égal à peu près au tiers de la valeur du rond de guindant. Avec plus de tension de losange, des barres de flèche poussantes cintent le mâât, affinent et facilitent le vrillage en partie médiane. La déflexion des barres de flèche contrôle le cintrage longitudinal, leur longueur le cintrage latéral.

- Le réglage de rotation d'un mâât profilé losangé remplit trois fonctions : assurer la continuité des extrados mâât – grand-voile, diminuer et reculer un peu le creux global du profil quand on centre le mâât (avec toutefois une légère augmentation de creux en tête), et contrôler son dévers latéral. Centrer le mâât augmente l'incidence à l'attaque, choquer le chariot pour restaurer l'incidence globale. Un losange bien tendu cinte le panneau inférieur, affine la grand-voile en partie médiane et facilite le dévers de la chute. Il facilite aussi le dévers latéral du panneau supérieur quand le mâât est centré, ce qui affine et aide à vriller la partie supérieure de la grand-voile. C'est donc un réglage utile dans la brise.

Par contre, centrer le mâât avec un losange moins tendu entraîne le dévers sous le vent du panneau inférieur. Il y a augmentation supplémentaire d'incidence donc de puissance, et fermeture du couloir (choquer davantage encore les chariots de grand-voile et de foc). Cela limite aussi le dévers sous le vent du panneau supérieur.

Rotation de mâât, tension du losange, longueur et angulation des barres de flèche sont des réglages intimement liés.

- Avec un mâât non losangé la réduction de puissance s'obtient au près en laissant au contraire le mâât pivoter à fond, en bordant fort l'écoute et le Cunningham et en choquant le chariot autant que nécessaire pour maîtriser la gîte. Ceci favorise le cintrage du mâât dans son sens latéral, qui devient un cinte vers l'avant puisqu'il est fortement pivoté, affine la grand-voile et facilite son vrillage dans les surventes.

- Plus de tension de chute si le mâât résiste = moins de vrillage, augmentation (surtout en tête) et recul du creux.

S'il fléchit, plus de tension de chute = moins de vrillage, affinement dans le triangle point de drisse – point de flexion – point d'écoute, tendance accentuée au vrillage sous l'effet d'une survente.

- Le Cunningham restaure d'abord les formes de la grand-voile.

Plus de Cunningham = avancement du creux (davantage avec un tissu déformable), affinement de l'arrière et libération de la chute.

Sur un mât souple plus de Cunningham = affinement et tendance au vrillage plus marqués, maintien d'une partie du cintre et avancement supplémentaire du creux quand on choque l'écoute. Par contre le contrôle de la flexion d'étai est plus délicat sur un mât souple.

- Relâcher la bordure augmente le creux dans le tiers inférieur et ferme la chute. Si la tension de chute est forte il y a augmentation de creux sur une plus grande hauteur.

- Les lattes empêchent le creux de reculer et d'augmenter quand le vent monte. Elles doivent être alors de plus en plus raides et tendues.

- Si l'étai fléchit, le creux global, la puissance et l'incidence du foc augmentent. Le foc vrille moins facilement. L'attaque plus ronde augmente la tolérance mais dégrade les possibilités de cap.

- Plus de tension de guindant = plus de creux en tête, avancement du creux (attaque arrondie) dans le reste du foc. Tension d'étai et tension de guindant du foc augmentent toutes deux avec la force du vent.

- Position des points de tire et tension de chute déterminent creux et vrillage du foc.
Point de tire avancé et forte tension de chute = augmentation générale du creux et moins de vrillage.
Point de tire reculé et faible tension de chute = affinement général et vrillage.
Comme dans la grand-voile, plus de tension de chute = augmentation du creux surtout en tête et léger recul du creux, répercute plus haut le volume bas induit par le creusement de la bordure. Ajuster le vrillage par la position des points de tire et la tension de chute pour obtenir la bonne largeur du couloir.

- Sous spi asymétrique : amure plus basse = avancement du creux, affinement et vrillage de la partie arrière (effet Cunningham, bon pour le large serré et la brise).
Largues plus arrivés : point de tire avancé et écoute tendue = bordure creusée, volume induit plus haut et fermeture de la chute (meilleur par vent faible à médium).

VII – 3 – 2) Le Tornado

Construit en 1967, ce bateau de 6,10 m de long et 3,05 m de large pèse entre 160 et 170 kilos et dispose d'une voilure d'environ 22 mètres carrés. Olympique depuis 1972, il le reste en 2004 en version double-trapèze et spi (Tornado Sport).



Fig205/eGroups cata : Un Tornado au près.



Fig206/www.tornadosport.com/ : Tornado Sport sous spi.

A terre, une des premières choses à faire est d'ajuster le précintre longitudinal du mât, pour l'adapter au rond de guindant de la grand-voile. Avec trop de précintre on peut se retrouver avec des plis entre le guindant et le point d'écoute, la grand-voile peut même « casser ». Quant au cintre latéral, il doit être réduit. On l'apprécie en naviguant au près par bon vent, mât cintré en longitudinal par l'écoute et le Cunningham pris à fond. Le mât fléchissant sous le vent au niveau du panneau inférieur, c'est le losange au vent qui est le moins tendu. Il faut augmenter la tension du losange jusqu'à ce que le câble au vent ne batte plus. Ceci constitue

un réglage de base relativement polyvalent. Les équipages légers adopteront des barres de flèche plus poussantes et une tension de losange plus forte.

La tension de gréement est toujours très forte pour annuler toute flexion d'étai.

La quête arrière est mesurée par la « méthode du trapèze » : on centre le mât, on détache un des trapèzes, on vient toucher la cadène d'étai au niveau du pont avec ce câble. Le câble de trapèze est ensuite reporté en arrière, et on détermine le point où il touche le liston. La distance qui sépare ce point de la poutre arrière (ou de la poutre avant, comme on préfère) constitue un repère qui permet de retrouver très vite un réglage de quête, ou de le comparer entre différents bateaux. Comme sur beaucoup d'autres bateaux, on recommande d'être légèrement ardent au près (pour la sécurité, et la portance développée sur les safrans, paragraphe IV – 5). Certains recommandent aussi un léger pincement des safrans (inférieur à 5 mm).

La raideur des lattes supérieures peut varier du simple au double selon les conditions rencontrées. Elles sont plus raides avec plus de vent, leur creux de profil maintenu à 45-50%.

Au près et au travers:

Petit temps : sur l'eau plate, la chute peut être légèrement tendue, de telle sorte que les penons en haut de la chute décrochent environ la moitié du temps. Il faut assez de tension de Cunningham, un peu plus que celle nécessaire pour effacer les plis, de manière à cintrer un peu le mât pour conserver un profil de grand-voile assez fin. La bordure est légèrement relâchée, un peu plus si la voile est coupée très fine.

Par petit temps clapoteux il faut un peu plus de vrillage, de Cunningham et de quête arrière pour la tolérance, relâcher davantage de bordure pour la puissance. Le chariot de grand-voile reste centré.

Le couloir entre les deux voiles doit rester assez ouvert (la chute du foc reste à environ 5 cm des barres de flèche). Le guindant du foc n'est pas très tendu sur l'eau plate (pour la finesse de l'attaque donc le cap) mais il l'est davantage dans le clapot.

Médium et brise : la finesse des coques et leur très bon passage dans la vague ne nécessite pas de modifier les réglages en fonction de l'état du plan d'eau. Quand le barreur monte au rappel, ceci correspond en même temps à une force de vent dans laquelle la vitesse du Tornado augmente sensiblement. Il faut donc affiner les voiles en aplatissant la bordure. Puisque la tension de chute augmente et que le mât cintré, il faut évidemment reprendre du cunningham. Ces différentes tensions augmentent régulièrement avec la force du vent, et dans le même temps le mât est progressivement centré. Avec un vent très fort, on peut être amené à prendre plus de quête arrière et de tension de losange.

Le couloir est refermé dans le bas-médium, mais ensuite il faut l'ouvrir progressivement pour réguler la puissance. La tension du guindant augmente aussi pour avancer le creux et aplatir la partie arrière du foc.

Au grand-largue :

Le mât est redressé en relâchant un peu de tension d'écoute et de cunningham. La bordure est creusée, sauf au grand-largue sur une coque. Evidemment le point de tire du foc et le chariot de grand-voile sont écartés sous le vent (moins au grand-largue sur une coque) et la rotation de mât est maximale (pour la continuité des profils à l'extrados et un creux maximal à l'attaque).

VII – 3 – 3) Le Hobie Cat 16

Ce bateau possède des coques asymétriques, ce qui permet à la coque sous le vent de développer une portance au vent quand la coque au vent décolle (paragraphe IV – 5). Ceci implique aussi une déflexion de l'écoulement vers l'extérieur au niveau du tableau arrière, donc le pincement des safrans (on recommande habituellement autour de 3 mm). Sur ce bateau sans dérives, les grands safrans peuvent supporter une partie non négligeable de la force anti-dérive ; pour cela, ils doivent fonctionner sous incidence permanente, ce qui nécessite un bateau ardent.



Fig207/www.hobiecat.com/ : En attente du vent...

Par ailleurs, la panoplie de réglages étant assez réduite (en particulier il n'y a ni rotation de mât ni losange), la quête arrière du mât devient un réglage prépondérant et de ce fait mérite qu'on s'y attarde un peu.

Elle permet en premier lieu d'obtenir l'ardeur nécessaire en chargeant les safrans, de réduire la puissance dans la brise, d'augmenter la tolérance dans le clapot. Le Hobie Cat 16 qui a tendance à chevaucher les vagues plutôt qu'à les traverser secoue beaucoup son gréement et a donc un besoin de tolérance important.

On ajuste donc la quête de mât en particulier pour rendre le bateau ardent, et la compensation des safrans pour réduire l'effort qui est nécessaire au barreur pour conserver sa trajectoire. Rappelons que cette compensation des safrans ne change pas le caractère ardent ou mou du bateau, lié aux positions du centre d'effort et du centre de voilure, mais qu'elle répartit simplement la portance du safran de façon plus équitable en avant et en arrière de l'axe de rotation de la lame (paragraphe IV – 5).

La quête importante qu'on met sur ces bateaux positionne la chute plus verticalement, diminue la traînée liée aux tourbillons marginaux, ce qui est un facteur de vitesse dans la brise (paragraphe I – 9 – 6 – 1). Elle diminue également la puissance par diminution du creux utile, apprécié dans le plan horizontal qui est celui de la propagation du vent (paragraphe V-12).

Au portant, la quête arrière soulage les étraves, sensibles à l'enfournement.

Ceci dit, un excès de quête comporte des inconvénients sérieux, en particulier sur ce catamaran :

Tout d'abord, le bateau peut devenir trop ardent donc le safran trop angulé, sa portance au vent est certes plus forte mais sa traînée augmente très vite : le bateau fait du cap, mais sans vitesse.

Ensuite, le foc étant de surface importante et sa chute venant balayer le mât, un excès de quête augmente significativement le recouvrement entre les deux voiles, donc dégrade les performances de la grand-voile (paragraphe I – 10 – 1).

Pour finir, il faut pouvoir conserver la possibilité de border à fond en cintrant le mât, pour limiter la puissance dans la brise.

Néanmoins, tout en gardant à l'esprit ces limitations, plus le vent monte et plus on prend de quête arrière, plus rapidement encore sur eau agitée.

Le point d'amure du foc peut être positionné dans les cadènes d'étai à des hauteurs différentes. Ce réglage doit viser à distribuer la tension d'écoute de foc de manière équitable entre la bordure et la chute. Lorsque la grand-voile est bordée et le gréement tendu, cela signifie que l'écoute de foc tire à peu près suivant la bissectrice entre la bordure et la chute. C'est le réglage de base, mais on peut abaisser un peu le foc dans la brise et le relever dans le petit temps. Il ne faut pas oublier qu'en prenant de la quête, ceci revient à reculer le point de tire, ou dans notre cas à abaisser le point d'amure.

Quand le vent monte, on utilise des lattes plus raides en partie supérieure pour équilibrer les tensions verticales et empêcher le recul du creux. Le creux de moule de la grand-voile étant assez reculé, la partie arrière de ces lattes doit être la plus raide possible pour ouvrir la chute, et en particulier l'empêcher de refermer dans le petit temps.

En navigation les possibilités de réglage sont assez limitées.

Du fait que le creux de la grand-voile est assez reculé, la tension du Cunningham est toujours assez forte au près sauf dans le petit temps. De façon logique elle augmente avec le vent pour aider à cintrer le mât, mais avec une tension trop forte le mât fortement précontraint peut devenir difficile à faire pivoter au virement de bord.

Au portant, dans le petit temps et le médium, on relâche un peu de Cunningham puisque, la tension de chute étant plus faible, le mât se redresse. On cherche à vriller les voiles, donc les chariots ne sont pas choqués à fond.

La bordure n'est jamais choquée au près même dans le petit temps, car le creux de moule de la grand-voile est important. On peut avoir intérêt à la choquer au portant dans le petit temps uniquement, car à partir du médium il devient impossible de la reborder à la bouée sous le vent sans choquer complètement l'écoute.

Dans le petit temps la chute de la grand-voile est tenue à la limite du décrochage des penons de chute, ensuite plus le vent monte plus il faut border pour progressivement cintrer le mât et affiner la grand-voile. Ceci implique qu'il faut éviter autant que possible de choquer l'écoute, ce qui dans un premier temps redresserait le mât et redonnerait de la puissance : une véritable réduction de puissance ne peut être obtenue qu'en choquant une longueur d'écoute très importante, ce qui n'est pas très reposant pour le régleur. Comme par ailleurs il faut éviter de se retrouver sous-puissant dans les molles, en surpuissance on choque les chariots de telle sorte qu'avec les écoutes bordées à fond, le couple de gîte est juste équilibré pour le niveau de base du vent. Dans les surventes, on préfère étaler plutôt en lof, en choquant le foc plutôt que la grand-voile.

Cette stratégie implique de ne pas vouloir suivre un cap trop serré, sous peine de voir le bateau se planter face au vent quand on lofe dans les risées.

Puisque le foc vient en recouvrement, il faut dans toutes les conditions se garder de trop centrer le chariot de foc en espérant faire plus de cap. Ce faisant, on fera certes plus de cap mais sans vitesse du fait de la perturbation de la grand-voile, qui fait reculer son centre de voilure et charge encore plus les safrans : le bateau laboure, ne « glisse » pas. Au contraire, en

surpuissance, la premier réflexe est d'ouvrir le chariot de foc pour réduire la puissance de ce foc de grande surface.

VII – 3 – 4) Le Dart 18

Ce 18 pieds présente de nombreuses différences avec son confrère le Hobie Cat 16, qui impliquent une autre philosophie de réglage. Ses coques sont symétriques, et son plan antidérive réparti sur toute la longueur de la carène (à l'exception de son extrémité arrière). Son centre d'effort se déplace beaucoup en fonction de l'assiette, donc du placement de l'équipage. La carène passe mieux dans les vagues, donc les besoins de tolérance sont moindres. Ses safrans sont plus petits, moins cruciaux dans leur fonction antidérive. Le gréement est plus modeste: la voilure est plus petite et son creux plus faible, il est également plus avancé, donc naturellement moins puissant et plus tolérant. Le foc est sans recouvrement, ce qui dégrade moins les performances de la grand-voile. Le mât est raide, on ne peut compter sur son cintrage pour limiter la puissance. Le tissu de la grand-voile est peu déformable, limitant l'efficacité du cunningham. La coupe de la grand-voile, proche d'une charge elliptique, engendre moins de traînée. Les possibilités de réglage sont très réduites, ce qui peut rendre ce bateau séduisant par sa simplicité mais complique la vie des équipages légers dans la brise.



Fig188/ZZ214 : Un Dart au près.

Tout ceci fait que le réglage de quête est bien moins fondamental, car les besoins d'ardeur, de réduction de puissance et de tolérance sont moindres.

Ceci dit la quête (avec le réglage des points de tire du foc) reste une possibilité de réduction de la puissance dans la brise. On en mettra davantage dans le clapot pour augmenter la tolérance. Le bateau devenant alors plus ardent, l'équipage doit se reculer pour faire reculer le centre d'effort (contrairement au cas du Hobie Cat 16 où ce sont les grands safrans qui absorbent l'ardeur par leur angulation, en Dart 18 les safrans sont plutôt conçus pour être angulés le moins possible). Ce recul de l'équipage et du mât dégage les étraves pour aider à passer le clapot, mais sur l'eau plate la longueur de flottaison serait inutilement raccourcie : mettre plus de quête arrière n'est donc pas recommandé sur l'eau plate.

Le capelage étant fixé sur une patte faisant saillie en avant du mât, ce dispositif crée un couple qui limite la rotation du mât lorsque le gréement est très tendu. La tension de gréement doit

donc rester toujours la plus ferme possible, pour limiter la flexion de l'étai, mais sans interdire la rotation du mât.

Plus le vent monte plus on recule le point de tire du foc, et plus on libère la chute du foc pour ouvrir le couloir entre les deux voiles. On peut ainsi aller jusqu'au dévent de l'attaque du foc. La tension de guindant de foc et celle du Cunningham de grand-voile augmentent avec la force du vent pour éviter le recul du creux, ce réglage étant plus efficace dans le foc car son tissu est plus déformable. Dans la brise, cela peut aboutir à la formation d'un pli vertical en arrière du guindant de foc.

Le mât étant raide, il ne permet pas de limiter la puissance par cintrage dans la brise, mais quand on choque l'écoute on obtient une réduction immédiate de puissance par vrillage (contrairement au Hobie Cat 16). Donc quand le vent monte, au lieu de choquer du chariot, on préfère choquer un peu d'écoute. De cette manière le couloir n'est pas refermé. Le chariot n'est choqué que par forte surpuissance. La tension d'écoute est ajustée pour être à la limite de la surpuissance pour les molles. On étale les surventes en lof, éventuellement en choquant le foc (ce qui aide à lofer, et diminue la puissance par ouverture du couloir) et en dernier lieu en choquant la grand-voile.

La gestion de la puissance sera différente en solitaire, où l'absence de foc oblige à moins centrer la grand-voile d'une part, et où l'absence de couloir n'interdit pas de choquer le chariot de grand-voile. A nouveau, on préfère border fort, et positionner le chariot pour être en limite de surpuissance dans les molles. Dans les surventes, on étale en lof en se reculant un peu pour charger les safrans et éviter que le bateau ne vienne face au vent.

VII – 3 – 5) Le Classe A



Fig208/Czibor : Départ de régates en Classe A.

Le Classe A est apparu en 1963 aux Etats-Unis. Le premier modèle s'appelait le « A-Lion », il fut présenté en 1964 dans la confrontation « Un par série » organisée par l'I.Y.R.U. Séduite

par le comportement de ce bateau, l'I.Y.R.U décida d'adopter ses dimensions pour en faire une série internationale.

L'engouement pour cette série fut très rapide aux Etats-Unis et en Nouvelle-Zélande, puis gagna l'Europe. Aujourd'hui la IACA (International A-Cat Association) compte plus de 500 membres répartis sur une quinzaine de nations, dont les deux-tiers en Europe.

Les règles de jauge de la Classe A sont simplifiées à l'extrême :

Le Classe A est un Catamaran en solitaire.

Longueur maxi : 5,49 m

Largeur maxi : 2,30 m

Surface de voile maxi : 13,94 m².

Poids total minimum : 75 Kg.

Cette liberté de manœuvre fait du Classe A un formidable laboratoire de recherche au niveau des formes de carène et du profil des voiles. De nombreuses innovations (voiles à corne, mâts carbone, coques inclinées) ont d'abord été mises au point ou généralisées dans cette série avant d'être adaptées sur d'autres bateaux.

On compte actuellement 8 constructeurs, bientôt davantage car certains se laissent régulièrement tenter par l'aventure :

Bimare (Italie)

Scheurer (Suisse)

Ventilo (Suisse)

Auscat (Australie)

Marström (Suède)

Flyer Competition (Allemagne)

Mikan (Allemagne)

Waterat (Etats-Unis)

Ces bateaux sont construits en Sandwich, mousse ou Airex, avec en stratification du verre/vinylester, du carbone/epoxy ou du carbone/kevlar/epoxy. Ces procédés de construction soignés assurent une grande solidité à ces bateaux, contrairement à la réputation qui leur est souvent faite.

Il y a quelques années, on pouvait noter quelques différences notables de conception entre les bateaux européens, construits plutôt pour l'eau plate, et les bateaux Australiens conçus pour des plans d'eau agités. Les premiers étaient caractérisés par des volumes avant relativement importants et une carène en U sous la flottaison, avec comme objectif de diminuer la surface mouillée. Les seconds étaient plutôt des carènes en V, moins manœuvrantes et supportant moins le poids, mais passant beaucoup mieux dans la vague.

Aujourd'hui on tend, avec les derniers modèles, vers une certaine uniformité. Les volumes avant restent relativement importants sous la flottaison mais se réduisent considérablement au-dessus, afin de ne pas retarder l'immersion de l'étrave dans le clapot. On cherche ici à diminuer le tangage au maximum. A partir de la poutre avant et jusque sur l'arrière, les surfaces immergées se sont nettement aplanies, afin de favoriser le départ au planning à partir de 10 nœuds de vitesse (le Classe A étant extrêmement léger et rapide, c'est, de tous les catamarans de sport usuels, le plus susceptible de planer).

Les gréements ont aussi considérablement évolué. On ne trouve plus aujourd'hui que des mâts carbone dont l'échantillonnage et les raideurs longitudinales et latérales sont à présent très au point. De nombreux maîtres-voiliers ont fait progresser la grand-voile et les réglages. Même si le trapèze est nécessaire à partir de force 2, la puissance reste gérable sans problèmes jusqu'à force 6.

Contrairement à une idée très répandue, les barreaux lourds ne sont pas forcément avantageés dans la brise. En effet, les nombreuses possibilités de réglage permettent à un barreur léger de facilement évacuer la puissance. En adoptant une voile plus fine, ils maîtriseront le bateau jusqu'à force 6. Puisque ce bateau permet le planning, avec un poids moindre la surface mouillée est plus faible et le planning plus précoce et plus efficace. Sur l'eau plate, on constate généralement que les barreaux légers sont plus rapides dans la plupart des conditions, si leur voile a été bien choisie.

Dans le très petit temps, les barreaux lourds récupèrent un avantage lié à l'inertie, qui leur permet de se déhaler entre deux risées. Ils ont aussi un avantage dans le petit temps clapoteux, où leur gréement est moins secoué. Mais là où le poids est vraiment nécessaire, c'est dans le médium très clapoteux qui exige une puissance maximale : les barreaux légers, qui ont le plus souvent choisi une voile fine, ne peuvent ni l'obtenir ni la maîtriser. Dans les grands championnats qui se courent dans ces conditions, on constate généralement qu'ils sont fortement pénalisés. Evidemment, ce désavantage est moins critique si le barreur léger utilise une plate-forme de type « perce-vague ».

Le Classe A est un bateau qui avantage plutôt les poids légers sur l'eau plate et les poids lourds dans le clapot.

Réglages à terre :

- *Quête du mât :*

Du fait de l'absence d'un foc qui pourrait régulariser l'écoulement, la grand-voile est relativement sensible au décrochage. Le bateau étant extrêmement léger, sa faible inertie entraîne des mouvements de tangage qui peuvent être marqués dans le clapot, notamment pour les bateaux volumineux de l'avant et les barreaux légers.

Le besoin de tolérance est donc assez important.

Le réglage de base de la quête est neutre (mât droit par rapport au pont ou légèrement en avant). On l'obtient à l'aide de la méthode de mesure mentionnée au paragraphe VII – 3 – 2). Ce réglage est valable pour l'eau plate ; dès que le clapot commence à secouer le gréement, il faut prendre plus de quête arrière (environ 10 cm de plus sur la mesure). Etant donné que les barreaux légers ressentiront le tangage pour une force de vent plus faible, ils prendront plus vite de la quête.

Il semble qu'une quête arrière encore plus prononcée n'améliore pas davantage le près, mais commence à dégrader la vitesse au portant.

- *Tension du gréement :*

En théorie, relâcher la tension du gréement pourrait avoir deux avantages : pouvoir prendre de la quête au près tout en rebasculant le mât sur l'avant au portant, et mieux évacuer la surpuissance au près.

En pratique, les gréements et les voiles (cintrage latéral sous le vent en tête, dévers de la corne) évacuent déjà suffisamment de puissance. D'autre part, laisser partir le mât sous le vent augmente le poids apparent du bateau (paragraphe I – 10 – 3), ce qui fait perdre une

partie de l'avantage lié à la légèreté. Enfin, on navigue maintenant bien bordé au portant, ce qui empêche de laisser partir le mât sur l'avant. Pour ces différentes raisons, la tension de gréement reste donc toujours forte. Les excès de tension sont cependant à déconseiller car ils fatiguent inutilement les câbles et la plate-forme.

- *Barres de flèche et tension du losange :*

La règle de base est de précintrer le mât vers l'avant (voir la méthode de mesure mentionnée au paragraphe V – 9 – 11) d'une valeur comprise entre un tiers et la moitié de celle du rond de guindant de la grand-voile.

Quand le mât est fortement pivoté, c'est la tension du losange qui limite le cintre latéral induit par la tension de chute et par le Cunningham : ce cintre latéral du mât correspond, dans ces conditions, à une flexion vers l'avant.

Quand le mât est presque centré, c'est la tension du losange associée à l'angulation des barres de flèche qui produit un cintre longitudinal vers l'avant.

En pratique, on détermine la tension du losange et l'angulation des barres de flèche jusqu'à obtenir la flexion longitudinale souhaitée. Notons qu'on peut obtenir le même précintre longitudinal de plusieurs façons :

- avec un losange très tendu et des barres de flèche pas trop poussantes ;
- avec un losange moins tendu mais des barres de flèche plus poussantes.

La première solution donne un panneau inférieur plus bloqué, ce qui favorise l'évacuation de la puissance excédentaire dans la brise par dévers latéral de la tête de mât (paragraphe V – 8). Par contre, dans le petit temps où le mât est fortement pivoté, le cintrage latéral de ce panneau inférieur, donc sa flexion vers l'avant, sont limités par la forte tension du losange : le précintrage peut être insuffisant surtout si la voile laisse beaucoup pivoter le mât au près (voir ci-dessous). Ce type de réglage est donc plutôt un réglage de brise ou de poids légers.

Avec la deuxième solution, quand le mât est plus centré dans les vents assez forts, le précintre longitudinal est correct dans un premier temps. Avec encore plus de vent, le dévers latéral du panneau supérieur est retardé, ce qui peut être utile pour des barreurs lourds. Attention cependant ! Avec ce réglage le panneau inférieur pourra lui aussi partir plus facilement sous le vent : le mât fait donc un S, ce qui peut devenir dangereux pour sa tenue si le losange est trop détendu.

Dans la pratique, pour une voile donnée, les barreurs légers adopteront une angulation de barres de flèche plus faible mais une tension de losange plus importante que les barreurs lourds. Ceci donne un réglage polyvalent, efficace dans toutes les conditions. Pour donner des points de repère, la déflexion des barres de flèche est comprise entre 4 et 8 cm, la tension du losange entre 100 et 140 kilos, ce qui donne un précintre compris entre 20 et 40 mm (selon les voiles utilisées).

Cependant, en fonction des conditions de vent, les barreurs très motivés pourront obtenir un surcroît de performance en ajustant la tension du losange, sans retoucher l'angulation des barres de flèche. Examinons à présent comment ceci peut être fait.

Nous devons pour cela considérer deux catégories de voiles :

- celles qui laissent beaucoup pivoter le mât au près, quand la rotation du mât est choquée. Il s'agit généralement de voiles coupées rondes d'attaque. Dans ces conditions la flexion du mât vers l'avant est obtenue par cintrage latéral, donc en détendant le losange ;
- celles qui retiennent davantage le mât (voiles coupées plus plates à l'attaque) : si celui-ci pivote de moins de 45°, sa flexion vers l'avant est surtout obtenue par cintrage longitudinal, donc en retendant le losange.

Prenons d'abord le premier cas de figure.

Dans le petit temps, surtout sur eau plate, on peut détendre un peu le losange pour favoriser le cintrage latéral du bas (qui, rappelons-le, est une flexion vers l'avant dans ces conditions) et obtenir le nécessaire précintrage pour obtenir un profil assez fin.

Quand il faut de la puissance, dans le petit temps ou le bas-médium clapoteux, le mât reste choqué mais il faut chercher à redresser sa partie basse en latéral pour creuser la voile : on retend le losange, mais sans excès sinon on commence à précintrer en longitudinal, ce qui aplatiserait la voile...

En surpuissance, le mât étant beaucoup plus centré, il faut tendre le losange encore davantage pour précintrer plus en longitudinal et favoriser le dévers de tête.

Pour résumer, l'angulation des barres de flèche est déterminée une fois pour toutes. La tension du losange augmente avec le vent, plus rapidement sur eau agitée.

Avec la deuxième catégorie de voiles, pour obtenir du précintrage vers l'avant dans le petit temps, la tension du losange doit être plus forte.

Quand il faut de la puissance, on enlève du précintre longitudinal en détendant le losange. Et dans la brise, mât davantage centré, le losange est fortement retendu.

Avant de régler son losange, chaque barreur doit donc faire des essais préalables sur l'eau pour déterminer comment sa voile réagit avec son mât, et en particulier de quelle façon elle retient le mât en rotation.

- *Lattes* :

Les 4 ou 5 dernières lattes du haut sont de plus en plus raides et tendues quand le vent monte. Sur les voiles à corne où elles sont pratiquement seules à s'opposer au dévers de la chute, elles sont logiquement beaucoup plus raides : leur raideur peut atteindre 8 à 9 kilos, alors qu'elle est environ moitié moindre sur des voiles classiques.

Il faut installer des lattes plus raides dès que le barreur monte au trapèze, afin de tenter d'affiner le haut de la grand-voile qui ne doit absolument pas refermer, sinon le bateau monte sur une coque sans glisser vers l'avant : il « laboure » le plan d'eau.

Sur un plan d'eau agité, il vaut mieux également éviter des lattes trop souples en haut, car, en se déformant sous l'effet du tangage du mât, elles déstabilisent le profil qui ne demande déjà qu'à décrocher.

Dans la pratique, on peut conserver le même jeu de lattes dans pratiquement toutes les conditions, à l'exception du petit temps sur eau plate où on peut essayer des lattes plus souples en haut.

La raideur des lattes dépend beaucoup des voiles utilisées, les voiles plus plates exigeant des lattes plus raides.

En navigation :

Très petit temps :

La quête du mât est au réglage de base. Le mât est précintré comme requis par le rond de guindant de la grand-voile. Les lattes peuvent être plus souples et moins tendues.

La rotation de mât est laissée libre et le chariot centré. L'écoute est choquée pour obtenir une chute largement ouverte. Le Cunningham est assez tendu pour affiner et ouvrir la partie

arrière, au-delà de ce qui est requis pour effacer les plis du guindant. La bordure est légèrement choquée uniquement sur les voiles naturellement fines.

Petit temps, eau plate :

Cette plage couvre les forces de vent depuis les conditions où il devient possible, en déplaçant le lest mobile et en tendant la chute, de partir sur une coque, jusqu'aux conditions de trapèze en sous-puissance.

On utilise déjà le deuxième jeu de lattes en haut, plus raides et plus tendues. La bordure est progressivement retendue, elle est plate dès qu'on monte au trapèze. La rotation de mât peut être reprise de quelques degrés seulement si le gradient vertical de vent est faible, ce qui a pour effet de creuser et refermer le haut de la voile. La tension d'écoute est plus forte, le vrillage peut être nul, ce qui favorise le cap. Il faut donc également reprendre un peu de Cunningham, mais sans excès puisqu'on cherche une chute non vrillée. Les autres réglages (quête, losange) ne sont pas modifiés.

Au portant, il n'y a pas encore assez de vent pour pratiquer le grand-largue sur une coque. La vitesse restant faible, on relâche de la bordure et du Cunningham (davantage sur une voile naturellement fine).

Médium, eau plate :

Quête et losange non modifiés. Lattes progressivement plus tendues. L'excès de puissance est d'abord absorbé par une tension plus forte du cunningham. La bordure reste plate et la chute tendue, la priorité reste au cap. On s'efforce de choquer l'écoute le moins souvent possible.

Au portant sur une coque, on peut choquer de la bordure pour creuser un peu le bas de la voile. Evidemment, le mât est laissé libre en rotation. Le Cunningham reste tendu car la tension d'écoute est quasiment aussi forte qu'au près. D'autre part, choquer le Cunningham creuserait l'arrière de la voile et augmenterait les risques de décrochage, ce qui doit être proscrit car, à cette allure, on navigue déjà au seuil des décrochages extrados.

Brise, eau plate :

La quête de mât n'est pas modifiée. La tension du losange augmente pour accentuer le précintre longitudinal et favoriser le dévers latéral de la tête. La bordure est plate, le Cunningham maintenant très tendu. Le mât est progressivement centré, ce qui implique de simultanément choquer le chariot. Si le mât est bien calculé, le dévers latéral est obtenu pour un centrage pas trop fort (disons 30 degrés) : en partie basse, les extrados du mât et de la voile restent en prolongement correct et le bas peut continuer à « tirer » efficacement. On choque le moins possible, on continue à privilégier le cap. Ceci oblige le barreur à anticiper les risées : il corrige sa trajectoire quelques secondes avant qu'elles frappent.

Dès que le haut de la voile part en dévers latéral et se vide, le barreur recule un peu.

Au portant, il est inutile de retoucher aux réglages.

Petit temps, clapot :

Il faut basculer le mât plus en arrière (environ 10 cm de plus sur la mesure de quête) pour améliorer la tolérance. Les lattes ne doivent pas être trop souples car elles doivent maintenir la répartition horizontale du creux d'une voile fortement secouée par les mouvements de tangage.

Il faut également plus de puissance. La rotation de mât est laissée libre. Si le mât pivote naturellement beaucoup au près, on retend un peu le losange pour limiter sa flexion latérale. S'il pivote moins, on détend un peu pour enlever du précintre longitudinal.

Le mât étant moins cintré que sur l'eau plate, le point d'amure descend forcément moins bas sous tension du Cunningham, mais il faut quand même de la tension sur le guindant pour avancer le creux (besoin de tolérance), donc bien au-delà de ce qui est nécessaire pour effacer les plis du guindant. La bordure est davantage choquée que sur l'eau plate.

Le réglage de la tension d'écoute est critique. Avec plus de tension, on obtient plus de puissance par hypersustentation, mais aussi davantage de risques de décrochage. Le barreur doit donc s'efforcer de tenir sa voile à l'extrême limite du décrochage, et choquer lors des mouvements de tangage les plus prononcés. Le déplacement longitudinal du barreur doit être constant afin de limiter le tangage au maximum.

Au portant, on est obligé de beaucoup vriller pour limiter le décrochage : il faut une faible tension d'écoute, donc on relâche du cunningham. On relâche aussi de la bordure pour rester puissant en bas.

Ce sont les conditions qui demandent le plus de concentration.

Médium, clapot :

Ce sont des conditions très délicates. Il faut de la puissance, mais il faut pouvoir la maîtriser. On ne peut généralement tenir la puissance maximale : on restaure donc le précintre requis par le rond de guindant de la grand-voile. Le mât reste en quête arrière. Les lattes sont raides et tendues.

Le Cunningham est très tendu, plus que sur l'eau plate, pour avancer le creux et affiner l'arrière (besoin de tolérance). La bordure est par contre davantage choquée que sur l'eau plate, pour essayer de maintenir une certaine puissance dans le bas de la voile.

Le mât est moins centré que sur l'eau plate pour maintenir plus de puissance, nécessaire pour passer le clapot tout en limitant le tangage. Par conséquent, le chariot de grand-voile est moins choqué.

Les excès momentanés de puissance sont absorbés en choquant l'écoute (alors qu'ils sont absorbés en lof sur l'eau plate).

Les barreurs légers, avec moins d'inertie et moins de puissance maîtrisable, seront plus fortement secoués par le clapot. Ils ont besoin de plus de tolérance, avec plus de quête arrière, plus de tension de Cunningham et encore plus de vigilance sur l'écoute et leur déplacement longitudinal. Malgré tout, ils risquent d'être désavantagés par rapport aux barreurs lourds, surtout si la plate-forme est volumineuse de l'avant.

Au portant, on choque un peu plus de bordure. On détend aussi le Cunningham, sauf si on parvient à naviguer sur une coque.

Brise, vagues :

On conserve le réglage précédent, en centrant progressivement le mât (et donc en choquant progressivement le chariot), et en retendant la bordure.

Le tableau ci-dessous récapitule les réglages en fonction des conditions au près.

Le symbole 0 correspond au réglage de base (pour la quête, le losange), un mât libre en rotation, un chariot centré, des lattes peu tendues, un Cunningham pris pour juste effacer les plis, une écoute choquée, une bordure tendue.

Le symbole + signifie plus de quête arrière, un mât plus centré, un chariot choqué, plus de tension de losange, de lattes, de Cunningham et d'écoute, une bordure plus choquée.

	Très petit temps	Petit temps eau plate	Médium eau plate	Brise, eau plate	Petit temps clapot	Médium clapot	Brise, clapot
Quête AR	0	0	0	0	+	+	+
Tension du losange	0	0	0	+	+ (si mât très pivoté) - (sinon)	0	0
Lattes : Tension/raideur	0/0	+/+	+/+	++/++	+/+	++/++	++/++
Centrage du mât	0	0	+ → ++	++ → +++	0	0 → +	++
Chariot de GV	0	0	+ → ++	++ → +++	0	0 → +	++
Tension de Cunningham	+	+	++	++	++	+++	+++
Creux de bordure	+	+ → 0	0	0	++	+	0
Tension d'écoute	0	+	++	++	0 → +	+ → ++	+ → ++

Chapitre VIII : Conduite du voilier : optimisation de la vitesse

En régate, nous devons d'abord régler correctement notre bateau (objet des chapitres précédents) puis déterminer la trajectoire qui nous amènera le plus vite d'un point à un autre, aux différentes allures. Ce n'est que lorsque ces bases indispensables sont acquises que l'on peut s'intéresser aux autres aspects du jeu : météorologie locale et tactique. On ne peut rien apprendre de bon en tactique en naviguant en arrière de la flotte par manque de vitesse !

Dans ce chapitre, nous apportons quelques réponses aux questions suivantes, qui concernent l'optimisation de la vitesse aux différentes allures :

Quels sont les meilleurs compromis cap-vitesse au près et au vent arrière ? Comment traiter les variations de force et de direction du vent ? Comment optimiser les manœuvres ?

VIII – 1) Optimisation des caps-vitesse au près et au vent arrière par vent stable

Les polaires de vitesse (figure ci-dessous) définissent la vitesse atteinte par le voilier, pour une force de vent réel donnée. Elles représentent la vitesse du bateau pour chaque cap suivi (défini par l'angle entre la route suivie et la direction du vent réel).

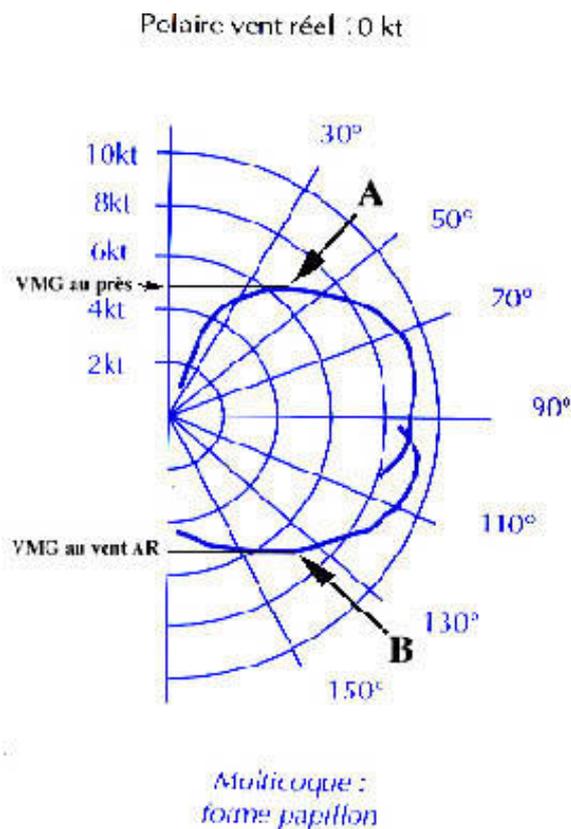


Fig203/Bernot : Polaire de vitesse typique des multicoques.

Le meilleur gain au vent (Velocity Made Good ou VMG) s'obtient, au près comme au vent arrière, en traçant une tangente à la polaire perpendiculaire au vent réel (donc horizontale sur la figure ci-dessus).

Le point A correspond donc au meilleur cap vitesse au près, le point B au meilleur cap vitesse au vent arrière. Ces points définissent à la fois le meilleur cap à suivre par rapport au vent, *mais aussi la meilleure vitesse* à avoir (qui n'est évidemment pas la plus élevée possible).

Comment, en navigation, trouver le meilleur cap-vitesse ?

En théorie, si la polaire du bateau est connue, il suffit de relever au compas de relèvement la direction du vent réel, puis d'utiliser le compas de route pour définir le cap à suivre. En pratique, c'est délicat car la direction du vent réel est difficile à obtenir avec précision tandis que le compas de route est le plus souvent entaché d'erreurs d'étalonnage ou de déviations difficilement corrigibles.

La direction du vent apparent est plus facile à relever (surtout en cat-boat, avec des penons d'étai allant au moins jusqu'au mât, ou bien avec une bonne girouette bien placée) mais là aussi, chacun sait que si on abat un peu, la vitesse augmente, donc le vent apparent refuse... Ce n'est donc pas non plus un repère suffisamment stable et indépendant des autres paramètres de navigation.

Le GPS portable apporte une amélioration dans le sens qu'il indique le cap vrai par rapport au fond, la vitesse vraie par rapport au fond, et qu'il calcule la VMG en temps réel. Si on moyenne ses informations sur un laps de temps suffisamment long pour minimiser l'erreur de positionnement du GPS, on peut facilement comparer avec précision, à l'entraînement, plusieurs caps-vitesse. En régate, cependant, les sollicitations tactiques et stratégiques sont trop nombreuses, et on ne peut pas se permettre de mobiliser l'attention d'un équipier (ou du barreur lui-même en solo) ; de plus il nous faut un ajustement *immédiat* du cap-vitesse...

L'utilisation de la seule VMG est par ailleurs périlleuse: à partir du meilleur cap-vitesse, si on lofe, la VMG va d'abord augmenter puisque le cap s'améliore tandis que la vitesse ne diminue pas tout de suite du fait de l'inertie du bateau. On peut être ainsi tenté de lofer exagérément, jusqu'à ce que la vitesse s'écroule complètement; le temps de relancer, on a perdu 30 mètres...

On a donc besoin d'un indicateur indépendant des autres paramètres, mesurable avec précision, et qui répond immédiatement aux modifications du cap-vitesse. De façon évidente, cet indicateur est la *vitesse du bateau*, surtout sur un catamaran qui, par sa faible inertie, réagit de suite en ajustant sa vitesse au cap suivi par son barreur.

La mesure de la vitesse s'obtient avec une précision raisonnable avec un GPS. A force d'entraînement, progressivement les sensations de l'équipage pourront (et devront...) remplacer la mesure.

La vitesse optimum au près et au vent arrière, celle qui donne le meilleur VMG, est déterminée par la position des points A (pour le près) et B (pour le vent arrière) de la polaire. Un des objectifs de l'entraînement est de déterminer ces deux vitesses pour chaque force de vent, soit par la mesure, soit par l'expérimentation (speed-tests).

Lorsque la vitesse cible est atteinte de manière stable, au près et au vent arrière, on relèvera la direction du vent apparent par l'intermédiaire d'une girouette ou de penons fixés dans la pantoire. Nous obtiendrons ainsi un repère supplémentaire qui nous aidera aussi à confirmer, par la suite, que nous sommes bien au meilleur compromis pour la force de vent en cours.

En régate, on ajustera son cap pour obtenir cette vitesse cible. Si au près, on va trop vite par rapport à cette vitesse cible, on lofera pour l'atteindre, puis on modifiera les réglages du bateau en conséquence.

Pour résumer : déterminer à l'entraînement les vitesses cibles au près et au vent arrière, pour chaque force de vent. Ajuster d'abord le cap en régate pour atteindre cette vitesse puis régler. Relever la position des penons de pantoire ou de la girouette (par rapport au mât au près, par rapport aux pantoires au vent arrière), qui servira de repère visuel confirmant l'information vitesse.

VIII - 2) Vents variables en force (et non en direction)

VIII – 2 - 1) Au près

- Si le vent réel mollit sans changer de direction, le vent apparent refuse (voir figure ci-dessous) :

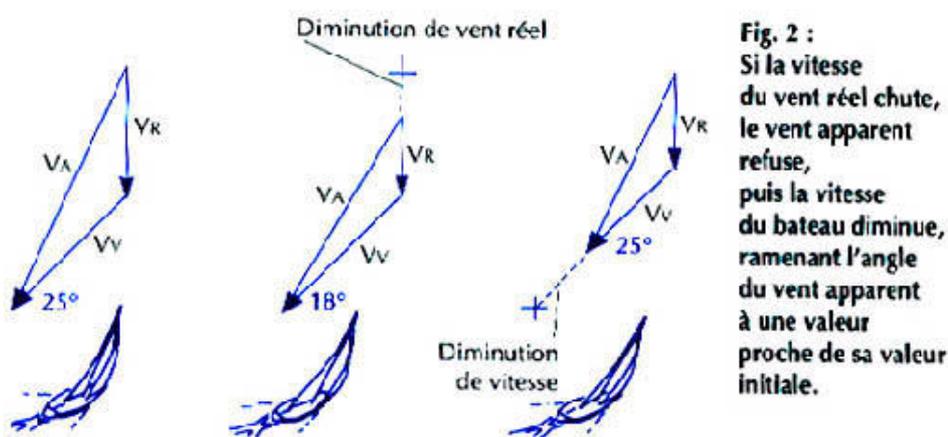


Fig204/Bernot : Influence d'une diminution de vent réel sur la direction et la force du vent apparent.

On est donc tenté d'abattre, ou même de virer, ce qui serait catastrophique car il ne s'agit pas ici d'une rotation du vent réel...

Que doit-on faire ?

Il est clair qu'on doit le plus rapidement possible retrouver le nouveau cap-vitesse idéal. Or, dans le cas général, les variations en force du vent sont faibles en valeur relative (par exemple le vent passe de 10 à 8 nœuds, soit une diminution de 20%). Les polaires de vitesse classiques des multicoques indiquent qu'alors *le nouveau cap idéal diffère probablement très peu de l'ancien*. Par conséquent, pendant la phase transitoire de réponse du bateau aux nouvelles conditions, tout changement de cap, en particulier toute abattée, est forcément pénalisante... Pourquoi changer de cap si c'est pour y revenir quelques secondes plus tard ?

La meilleure chose à faire est donc de rester sur le même cap sans modifier les réglages d'écoute, d'attendre que le bateau ralentisse et retrouve de lui-même sa vitesse cible, puis d'affiner les réglages si nécessaire.

Dès que la nouvelle vitesse cible est atteinte, le vent apparent reprend un angle “normal” par rapport au bateau, le plus souvent identique au précédent.

Ceci revient, pendant la phase transitoire, à *utiliser l’inertie du bateau pour gagner au vent* (puisque l’on n’abat pas dans le refus de vent apparent). Cette stratégie est valable dans toutes les forces de vent, puisque un mollissement du vent réel ne s’accompagne pas de phénomènes désagréables tels qu’un gros coup de gîte (qui obligerait à une stratégie différente).

Bien noter que l’inertie d’un catamaran étant faible, la phase transitoire ne dure que quelques secondes, pendant lesquelles l’équipage doit déterminer si le refus qu’il expérimente est dû à une diminution de force ou à une rotation du vent réel. Les sensations n’étant pas les mêmes dans ces deux situations, il est essentiel de développer leur acquisition et leur interprétation par un entraînement soutenu.

- Si le vent réel force sans changer de direction, le vent apparent adonne.

C’est la même chose : à moins d’une variation énorme de force, le nouveau cap idéal est très proche de l’ancien.

On doit donc récupérer rapidement la nouvelle vitesse cible sans changer de cap. L’inertie du bateau qui était une alliée dans le cas précédent devient ici l’ennemie à vaincre le plus rapidement possible.

La meilleure chose à faire est de rester sur le même cap, de choquer un peu pour aider le bateau à accélérer, puis de reborder quand la nouvelle vitesse cible est atteinte et que le vent apparent a de nouveau refusé pour revenir à peu près à sa position initiale.

Il existe cependant une limitation physique à cette stratégie, dans la brise où une augmentation de vent réel ne s’accompagne pas forcément d’une augmentation de vitesse du bateau, car il a déjà atteint sa vitesse limite au près (chacun sait qu’au près on ne va pas plus vite à force 7, et même probablement moins, qu’à force 5). La nouvelle vitesse-cible n’est donc pas plus élevée que l’ancienne. Le vent apparent va rester adonnant, et sa force plus grande entraîne une augmentation de gîte. Contrairement à ce qui précède, on doit donc lofer pour amortir le coup de gîte, en veillant à ne pas trop perdre de vitesse, et convertir l’augmentation de vent apparent en cap. Et si le vent baisse, il faut abattre un peu.

VIII – 2 – 2) Au travers

Quand le vent réel monte, on expérimente une adonnante.

D’autre part, pour un bateau léger et rapide (cas des catamarans de sport), les polaires de vitesses indiquent que les meilleures vitesses aux allures proches du travers sont obtenues sur des caps plus abattus quand le vent réel monte. Ceci est vrai bien sûr tant que l’équipage maîtrise la puissance.

Réciproquement, quand le vent réel faiblit, on expérimente un refus. Bien sûr la vitesse diminue, mais un peu moins si on lofe un peu.

Par ailleurs, les risées exploitables frappant forcément au vent, un bateau situé plus au vent les captera en premier.

Par conséquent, lorsque la survente arrive, il est préférable d’abattre un peu (pour accélérer franchement et accompagner la risée plus longtemps). Evidemment ceci nous éloigne un peu de la trajectoire idéale. On lofe dans les molles pour essayer de conserver de la vitesse, pour revenir sur la trajectoire et pour capter plus vite la prochaine risée.

Cette stratégie implique évidemment un allongement de route. Cet allongement sera d'autant moins pénalisant que le bateau modifie beaucoup sa vitesse en adaptant son cap.

Avec un bateau lourd dont la vitesse n'évolue guère, il est donc préférable de conserver la trajectoire la plus courte et d'accompagner adonnantes et refus aux écoutes (figure ci-dessous).

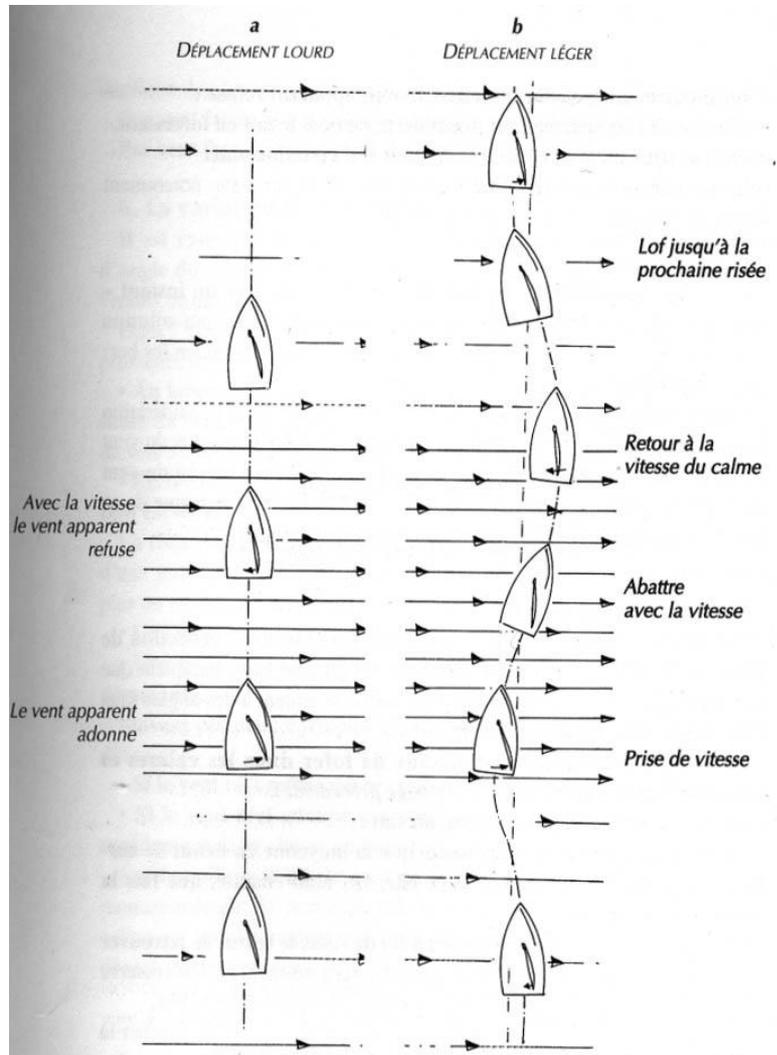


Fig187/ZZ212 page383 : Ajustements de route dans les risées au large (changement de force, pas de direction).

VIII – 2 – 3) Au vent arrière

On parle ici des situations où on tire des bords de grand-largue (cas général en catamaran de sport).

La situation est légèrement différente de celle qui prévaut au près. En effet, de manière beaucoup plus évidente qu'au près, on constate que plus le vent force plus les angles de descente optimaux diminuent (on "descend" mieux).

- si le vent réel diminue, le vent apparent refuse.

Le nouvel angle optimal sera moins bon qu'avant (on serrera moins bien le vent arrière). A terme, il faut lofer.

Cependant, comme au près, on cherchera à récupérer le plus rapidement possible la nouvelle vitesse-cible, plus faible. On ne doit donc pas lofer de suite dans ce vent refusant, ce qui retarderait bien sûr le ralentissement du bateau mais serait très pénalisant au niveau du cap suivi.

La meilleure chose à faire est d'utiliser l'inertie du bateau et d'attendre qu'il ralentisse, sans changer de cap (ou même en abattant un peu) et sans changer les réglages d'écoute, puis, dès que la nouvelle vitesse cible est atteinte, de lofer un peu pour rejoindre le nouveau cap idéal qui sera un peu moins abattu qu'avant.

Comme au près, on convertit l'inertie du bateau en gain sous le vent pendant la phase transitoire.

Par contre, dès que la nouvelle vitesse cible est atteinte, ne pas traîner pour rejoindre le nouveau cap idéal, sinon la relance sera difficile. En effet, si le cap reste trop longtemps trop abattu, il est fort probable que les voiles vont décrocher.

- si le vent réel augmente, le vent apparent adonne.

Le nouveau cap idéal sera plus abattu que l'ancien. Mais comme toujours, on devra rejoindre la nouvelle vitesse cible (plus grande) le plus vite possible. Il ne faut donc pas rester sur le même cap, ou pire, abattre, car alors les voiles décrochent dans ce nouveau vent adonnant (parce que, comme au près, l'inertie empêchera le bateau d'accélérer immédiatement).

La meilleure chose à faire est donc de lofer et border légèrement pour accélérer franchement, puis d'abattre rapidement sur le nouveau cap idéal.

Comme au près cette stratégie n'est plus valable dans la brise. En effet, si au portant dans la brise on lofe dans une survente, il y a risque d'enfournement fatal, surtout si le bateau est déjà à sa vitesse limite. On préférera plutôt abattre, en choquant largement si c'est encore possible, pour limiter l'augmentation de vent apparent, et ne pas augmenter la vitesse du bateau. Le décrochage des voiles est ici un avantage, car il limite la poussée des voiles vers l'avant.

Il nous faut faire un cas particulier pour les situations où, en catamaran, le grand-largue est pratiqué sur une coque (Australienne).

L'Australienne est une technique qui apporte un gain considérable sous le vent, mais qui pour être efficace nécessite d'avoir la coque au vent levée en permanence. Les ajustements de cap nécessaires doivent d'abord prendre en compte ce paramètre et non chercher à rejoindre le plus rapidement possible la vitesse cible.

Si, à partir d'une situation stable avec la coque levée, le vent réel diminue, ne pas changer de cap ou même abattre un peu comme préconisé ci-dessus reposera lourdement la coque dans l'eau, avec une relance très difficile. Le nouveau cap idéal étant moins abattu que l'ancien, pour éviter cela on lofera immédiatement sur ce nouveau cap.

Si le vent forçait, ne pas changer de cap ou même lofer comme préconisé ci-dessus aboutira au dessalage. On abattra rapidement sur le nouveau cap initial en choquant un peu pour maintenir l'angle de gîte.

Pour résumer, dans les cas généraux (hors brise ou Australienne) dans une variation de vent en FORCE:

au près, on maintient le cap initial en attendant de récupérer la nouvelle vitesse cible. Puis on ajuste finement le cap et l'écoute.

Au portant, on commence par suivre à la barre les variations de vent apparent en ajustant les voiles au besoin. Vitesse cible atteinte, on exerce rapidement une action opposée à la barre pour rejoindre au plus vite le nouveau cap idéal.

Sur les bateaux à inertie très faible (Classe A par exemple) ces principes restent valables: ce qui change est la durée des phases transitoires, plus faible (à peine quelques secondes). On pourrait alors dire qu'en Classe A on pourrait directement rejoindre, à la barre, les caps finaux idéaux. Ce sera moins pénalisant que sur un bateau plus lourd, on peut même avoir la sensation de bien "traiter la variation", mais cela reste malgré tout un peu moins performant que la stratégie ci-dessus.

VIII – 3) Variations en direction (et non en force)

VIII – 3 – 1) Au près

Si le vent réel adonne sans forcer, sur l'eau plate on suit immédiatement en lof pour conserver tout le temps le meilleur compromis cap-vitesse (qui, rappelons-le, privilégie le cap dans ces conditions). Sur eau agitée, on peut retarder un peu cette phase de lof : le surcroît de vitesse obtenu facilitant temporairement le franchissement du clapot. Mais à terme, il faudra de toute façon rejoindre le cap et la vitesse cibles.

En cas de refus, sur eau plate on peut retarder un peu l'abattée ce qui permet, grâce à l'inertie du bateau, de grignoter un peu dans le vent. Evidemment plus le bateau est lourd plus ceci est payant.

Dans le cas où les fluctuations de direction du vent sont rapides et de faible amplitude, on applique une stratégie plus évoluée : la technique « Wally » (voir paragraphes X – 4 – 3 – 1) et X – 4 – 3 – 2).

VIII – 3 – 2) Au travers

Puisque nous sommes dans un cas où il n'y a pas de variation de force de vent, il n'y a pas de modification de la polaire de vitesses, nous ne sommes donc pas tenus de modifier l'incidence du bateau par rapport au vent apparent pour chercher ou maintenir une vitesse plus grande. Contrairement au cas que nous avons envisagé ci-dessus (paragraphe VIII – 2 – 2) on cherche plutôt à limiter l'allongement de la route, ce qui signifie de « filtrer » à la barre les variations de vent et de les accompagner plutôt aux écoutes.

La situation est un peu différente si on s'attend, sur ce bord de travers, à une rotation continue et persistante du vent (paragraphe X – 4 – 5).

VIII – 3 – 3) Au vent arrière

Si le vent réel adonne sans forcer, à terme il faut lofer. On peut cependant retarder le lof pour profiter un peu de l'inertie du bateau et grignoter un peu sous le vent.

S'il refuse, on abat tout de suite pour conserver le cap-cible, surtout sur l'eau plate. Sur eau plus agitée, on pourra essayer de retarder un peu l'abattée si, au même moment, on rattrape une vague un peu haute qu'un surcroît de vitesse aidera à passer.

VIII - 4) Variations en force et direction

VIII – 4 – 1) Au près

En pratique, lorsqu'une risée frappe le plan d'eau, il s'agit souvent d'une descente d'air d'altitude, qui dans l'hémisphère Nord tourne normalement à droite (voir aussi paragraphe IX – 6 – 4). On peut s'attendre à une adonnante en tribord et un refus en bâbord (pour le vent réel). Tribord amures, cette rotation de vent réel s'ajoute à l'adonnante liée à l'augmentation de vent réel : on peut s'attendre à une forte adonnante. Bâbord amures, elle se retranche : selon les cas, on aura adonnante ou refus. Bien sûr, les risées provenant d'effets de canalisation ou de convergence (paragraphe IX – 6 – 5) échappent à ce raisonnement.

Ceci dit, pour prévoir plus finement la rotation de vent que l'on va subir, il faut considérer la position du bateau par rapport à celle du point d'impact de la risée.

En effet, les risées d'altitude se déversent concentriquement sur la surface de l'eau (figure ci-dessous, où on considère des bateaux navigant tribord amures). Evidemment, nous n'envisageons ici que le cas d'une risée qui frappe au vent (car au près, celles qui frappent sous le vent sont perdues).

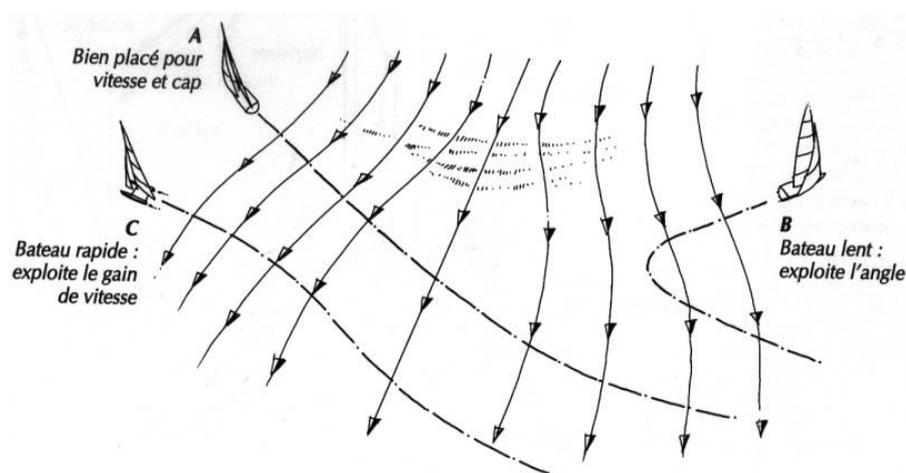


Fig191/ZZ212 page361 : Etalement concentrique d'une risée.

Sur cette figure, on constate que si la risée frappe plutôt sur l'avant du bateau, sa direction est un peu plus à gauche, donc elle peut être refusante (même si dans l'Hémisphère Nord une risée d'altitude tourne normalement à droite). Par contre, si elle frappe par le travers ou encore plus en arrière, elle sera plutôt adonnante.

Par conséquent, si l'équipage s'attend à une adonnante, dans le médium et la brise, il a intérêt à lofer *préventivement* pour éviter un gros coup de gîte. S'il s'est laissé surprendre, il doit d'abord choquer les écoute pour limiter la gîte, avant de corriger son cap (l'inverse aboutit à un bateau « vautré »). De cette façon, le haut des voiles, vrillé, évacue la surpuissance tandis que dans le bas, notamment de la grand-voile, subsiste un appui arrière qui facilite le lof. Dans des vents plus faibles, on préfère attendre que la risée frappe pour lofer, et pendant le temps nécessaire à cette phase de lof, on accompagne l'adonnante du vent apparent en choquant un peu les voiles, ce qui permet de récupérer plus vite la nouvelle vitesse cible. Dans les refus, on profite de l'inertie sur eau plate, mais sur eau agitée attention à ne pas se planter dans une vague, puis face au vent !

VIII – 4 - 2) Au travers

Comme nous l'avons vu précédemment, le plus souvent une risée tourne à droite dans l'Hémisphère Nord, surtout si elle frappe par le travers ou plus en arrière.

Le bord de travers d'un parcours olympique normal s'effectuant tribord amures, on expérimente donc des variations assez brutales de direction de vent (adonnantes dans les risées, refus dans les molles). En bâbord amures, en principe les variations sont moins brutales, puisque l'effet adonnant lié à l'augmentation de vent réel peut être compensé par le refus de la risée qui tourne à droite.

Tribord amures, suivre exactement toutes ces variations peut conduire à un allongement trop important de la route, il est préférable de les « filtrer » un peu à la barre.

VIII – 4 - 3) Au vent arrière

Nous avons vu au paragraphe VIII – 2 – 3) que dans le cas de risées sans changement de direction, quand le vent monte il est préférable de lofer pour accélérer et rejoindre rapidement la nouvelle vitesse-cible, puis d'abattre franchement sur le nouveau cap cible plus abattu. Quand il baisse, on se contente de rejoindre la nouvelle vitesse-cible sur l'inertie, puis de lofer ensuite.

Comme pour les autres allures, nous allons voir comment affiner cette stratégie en fonction des changements de direction du vent réel qui accompagnent généralement les risées.

Tribord amures, une risée est normalement adonnante dans l'hémisphère Nord.

Au grand-largue, les risées exploitables sont celles qui frappent par le travers et plus en arrière, celles qui frappent devant sont perdues. Plus elles frappent en arrière du bateau, plus elles sont adonnantes.

Ainsi, bâbord amures, comme aux autres allures une risée peut-être refusante, surtout si elle frappe par le travers, bien que l'augmentation de force du vent réel implique une adonnante.

Prenons le cas d'une risée adonnante. Du fait que le vent monte, le nouveau cap-cible sera plus abattu que l'ancien. Mais puisque le vent adonne, il faut lofer. Les deux phénomènes se compensant plus ou moins, la correction de trajectoire par rapport au fond peut être minime. Il est préférable de lofer d'abord pour accélérer plus vite, puis de revenir sur la trajectoire initiale ensuite. Les catamarans de sport, dont les réactions sont rapides, exploiteront plus vite la risée.

Dans une refusante, à terme il faut franchement abattre. En catamaran de sport, puisque les accélérations sont rapides, on peut le faire immédiatement. Avec un bateau lourd, il faut attendre d'avoir pris de la vitesse avant d'abattre.

VIII - 5) Comportement dans le clapot et la houle

Au près, le comportement que doit adopter l'équipage dans le clapot dépend de la capacité de la carène à le franchir, donc en particulier de la répartition de ses volumes avant. Nous savons déjà que ces conditions nécessitent plus de puissance, de tolérance, de vitesse et un cap plus abattu.

Si la carène peut traverser le clapot sans trop ralentir, il vaut mieux charger l'avant pour limiter le tangage. Dans ces conditions, les réglages et le compromis cap-vitesse pourront se rapprocher de ceux en vigueur sur l'eau plate.

Si au contraire, les volumes avant sont importants, il vaut mieux chevaucher le clapot plutôt que risquer de s'y planter. L'équipage se recule, les besoins de puissance et de tolérance sont plus forts. C'est dans le médium clapoteux que les équipages lourds ont l'avantage le plus

significatif, car ils peuvent tenir plus de puissance ; par ailleurs leur inertie plus grande limite les mouvements de tangage et les fluctuations de vitesse : leur gréement est moins secoué.

Dans une houle plus longue (bien supérieure à la longueur du bateau), il faut commencer à considérer les courants d'ondulation. Au près, ils sont contraires en montant la vague, et favorables en la descendant.

D'autre part, le creux des vagues constituent un évasement pour les lignes de courant du vent : le vent réel est plus faible dans le creux des vagues.

Partant du creux d'une vague, lorsqu'on s'élève vers la crête on expérimente donc une augmentation de vent réel, et un ralentissement du bateau qui comme une bicyclette peine à monter la côte et qui de plus subit un courant d'ondulation contraire. Ces deux phénomènes entraînent une adonnante du vent réel.

Après la crête, le bateau accélère dans la descente et dans un courant favorable, et va rencontrer un vent réel plus faible. Il subit donc un refus assez marqué.

Il est donc logique, au près, de lofer en montant la vague et d'abattre en la descendant.

L'abattée dans la descente donnant par ailleurs un surcroît de vitesse qui facilite l'escalade de la vague suivante.

Dans la brise, cette pratique est aussi une nécessité pour la sécurité, car lofer dans la montée permet de réduire un peu la vitesse, donc les risques de décollage et surtout d'atterrissage brutaux.

Sur une houle longue, les bateaux aux avants volumineux retrouvent un comportement performant, car ils la chevauchent avec des mouvements relativement doux. Des volumes très fins à l'avant pourront entraîner une immersion plus profonde, avec risques de ralentissement et de tangage plus grands.

Au portant, le surcroît de vitesse lié à la descente de la vague, le courant d'ondulation portant, la diminution du vent réel, sont tous des facteurs qui entraînent un refus du vent apparent. On exploite les vagues en surf en abattant assez largement. Par contre, avec un bateau rapide capable de rattraper les vagues (cas des catamarans de sport) il faudra lofer assez tôt dans le creux de la vague, pour récupérer une vitesse susceptible de permettre le franchissement de la suivante.

VIII – 6) Les manœuvres

Pour bien réussir une manœuvre, il faut maîtriser les écoulements de l'eau sur la coque et les appendices, de l'air sur les voiles, bien utiliser l'inertie du bateau, déterminer le moment propice pour la déclencher, maîtriser la gîte, savoir comment relancer au plus vite.

Le but ultime est de raccourcir la durée de la manœuvre pour récupérer la vitesse-cible le plus vite possible sur la nouvelle amure.

Les quelques idées ci-dessous concernent essentiellement les catamarans de sport, bien que beaucoup d'entre elles soient aussi applicables aux autres bateaux.

VIII – 6 – 1) Virements

Il n'y a pas de méthode universelle pour réussir un virement, puisque la technique utilisée dépend en particulier des caractéristiques de la carène (inertie, masse d'eau déplacée pendant la rotation) des appendices, notamment des safrans (tolérance ou au contraire décrochage sous forte rotation) et du plan de voilure (présence ou non d'un foc, répartition horizontale du creux).

On peut néanmoins énoncer des principes généraux toujours valables.

Dans un virement de bord, l'inertie est une alliée en début de manœuvre. Il est clair que la vitesse d'entrée dans le virement doit être la plus grande possible, surtout dans le clapot, pour fournir la plus grande inertie possible. On peut être amené à abattre temporairement, juste avant le virement, pour accélérer.

Dans le clapot, puisqu'en montant la vague on lofe (paragraphe VIII – 5), il est souhaitable de continuer ce virement en lof, afin de parvenir à passer le lit du vent dans le creux de la vague. La vague suivante fait abattre l'étrave sous la nouvelle amure pour aider à achever la manœuvre. Il est évidemment préférable de choisir un train de vagues plus basses pour déclencher la manœuvre.

De façon générale, dans le petit temps on déclenche plutôt le virement dans les risées (pour en réduire la durée totale) et dans les molles dans la brise (pour une question de sécurité). Quand on passe le lit du vent, si on se trouve dans le dévent d'un adversaire, la traînée négative sera moins forte.

Puisque l'angle de décrochage des safrans augmente quand la vitesse diminue (comme pour tout profil en écoulement), on angule ceux-ci de plus en plus au fur et à mesure que la vitesse diminue pendant la phase de rotation. Les voiles restent bordées jusqu'au passage du lit du vent, ensuite elles sont largement choquées pour autoriser l'abattée sur la nouvelle amure, qui permettra de récupérer plus vite la vitesse cible.

Cette abattée est d'ailleurs plus marquée dans le clapot et dans le vent faible où la relance est plus difficile. Ici l'inertie redevient une ennemie.

En sortie de virement, la puissance est nécessaire pour récupérer la vitesse cible, mais on ne peut la maîtriser tant que le couple de rappel n'a pas été rétabli. Il faut donc monter au rappel ou au trapèze avant de reborder les voiles. Quand c'est possible, il est utile d'augmenter temporairement la puissance du gréement pour plus d'accélération en phase de relance. Sur un catamaran de sport équipé d'un mât losangé, le plus simple est de libérer un peu de rotation de mât pour recreuser l'avant des profils. Sur les autres bateaux, on pourra libérer un peu de Cunningham ou de bordure (selon celui qui est le plus accessible).

VIII – 6 – 2) Empannages

Par vent faible, la durée de la manœuvre étant plus longue, la perte de vitesse est plus importante. Il faut relancer plus haut en sortie, pour récupérer plus vite la vitesse cible. Pour la même raison, on déclenche la manœuvre de préférence dans une risée, ce qui réduit la rotation à effectuer (puisque les angles de descente sont meilleurs).

Lorsqu'il y a du clapot par vent faible, il est rare que le bateau puisse aller plus vite que les vagues. Il vaut mieux déclencher l'empannage en escaladant une vague, de telle sorte qu'en sortie de manœuvre la vague précédente, qui rattrape le bateau, lui permette de se relancer dans sa pente descendante.

Par vent fort, pour des raisons de sécurité, on déclenche la manœuvre juste au début d'une molle et/ou en descendant une vague. Il s'agit de diminuer la vitesse du vent apparent pendant l'empannage. Pour ce faire, si le vent n'est pas assez fort pour que l'enfournement soit une menace réelle, on peut lofer pour accélérer juste avant la manœuvre. Par très forte brise, il n'y a guère d'autre moyen, partant d'un grand-largue très abattu, que de venir doucement sur la fausse panne et de balancer la bôme sur l'autre amure en la contrôlant du mieux qu'on peut.

Chapitre IX : Comportement du vent et prévision

Le vent ne se laisse pas dompter facilement. Ami ou ennemi, ses bascules et ses risées tout à tour nous avantagent ou nous pénalisent. Le régatier expérimenté tire un meilleur usage de ses variations en force et direction. Avec une meilleure connaissance des mécanismes atmosphériques généraux et locaux, on peut mieux anticiper les réglages et optimiser les trajectoires.

IX – 1) Bilan radiatif de la Terre, circulation méridienne, vents dominants

Le vent n'existe que grâce à la convection engendrée par des inégalités locales d'ensoleillement.

La Terre reçoit du Soleil un rayonnement incident S qui dépend en premier lieu de la latitude. Il est bien sûr plus fort à l'équateur qu'aux pôles, du fait de la variation d'angle d'incidence du rayonnement.

La Terre renvoie directement dans l'espace environ 30 % de ce rayonnement, sous forme de diffusion par l'atmosphère et de réflexion par les nuages et la surface terrestre. C'est le rayonnement réfléchi R .

La différence (70%) est absorbée par la Terre sous forme d'énergie thermique. La terre se réchauffe, et réémet dans l'infrarouge un rayonnement thermique T dont l'intensité augmente avec sa température. Cette émission de rayonnement thermique assure que la Terre ne se réchauffe pas indéfiniment. En moyenne, le rayonnement réémis T est exactement égal au rayonnement absorbé, ce qui entraîne que la Terre est en équilibre thermique (sa température moyenne est stable).

La différence entre ce que la Terre reçoit du Soleil (rayonnement incident S) et ce qu'elle renvoie dans l'espace (somme des rayonnements réfléchi R et réémis T) est appelée *bilan radiatif*. Globalement, nous venons de voir que cette différence est nulle :

$$B = S - (R + T) = 0.$$

Localement, le bilan radiatif en certaines régions de la Terre est positif ou négatif. Ainsi, surtout en été, dans les zones de basses latitudes où l'incidence des rayons solaires est forte, la surface reçoit plus d'énergie qu'elle ne peut en renvoyer, il y a réchauffement. Dans les zones de hautes latitudes et surtout en hiver, on a la situation inverse avec refroidissement.

En l'absence de mécanismes de redistribution de l'énergie thermique, cette situation aboutirait à des différences de température entre les basses et hautes latitudes bien supérieures à celles que nous connaissons, qui rendraient notre planète inhabitable.

L'altitude et la température ont un effet direct sur le poids de l'air, donc sur sa pression.

La pression atmosphérique en kilos par centimètres carrés, ressentie à une altitude donnée, n'est autre que le poids, à cette altitude, de la colonne d'air cylindrique mesurant un centimètre carré à sa base. En montagne, l'épaisseur de la couche d'air atmosphérique est diminuée de la valeur de l'altitude : la colonne d'air est plus légère, la pression plus faible. L'air froid est plus lourd, il a tendance à descendre. L'air chaud a tendance à s'élever ; mais en s'élevant sa pression diminue avec l'altitude et il se refroidit.

A l'équateur, le bilan radiatif étant en général positif, il y a génération d'air chaud qui s'élève en altitude. La pression atmosphérique y est minimale. Cet air chaud se refroidit un peu en altitude et redescend vers les tropiques, siège de pressions plus fortes. En arrivant au sol, il

cherche à rejoindre l'équateur pour fermer la boucle de circulation (cellules équatoriales de Hadley, voir figure ci-dessous), s'écoulant des hautes vers les basses pressions. Par ce mécanisme de circulation, l'équateur évacue vers les tropiques, moins ensoleillés, son excédent d'énergie thermique, ce qui lui évite de se réchauffer indéfiniment.

Aux alentours du 60^{ème} parallèle, nous avons aussi un minimum de pression, avec une montée d'air dont une partie redescend vers les pôles pour les réchauffer (cellules polaires boréales) et une autre vers les tropiques pour les refroidir (cellule des latitudes moyennes). Au sol, l'air s'écoule des hautes pressions (tropiques et pôles) vers les basses pressions (latitudes tempérées).

Nous avons donc une circulation horizontale (les vents dominants), intimement liée à une circulation verticale. Elle contribue en partie à un meilleur équilibre thermique et hygrométrique entre les différentes latitudes.

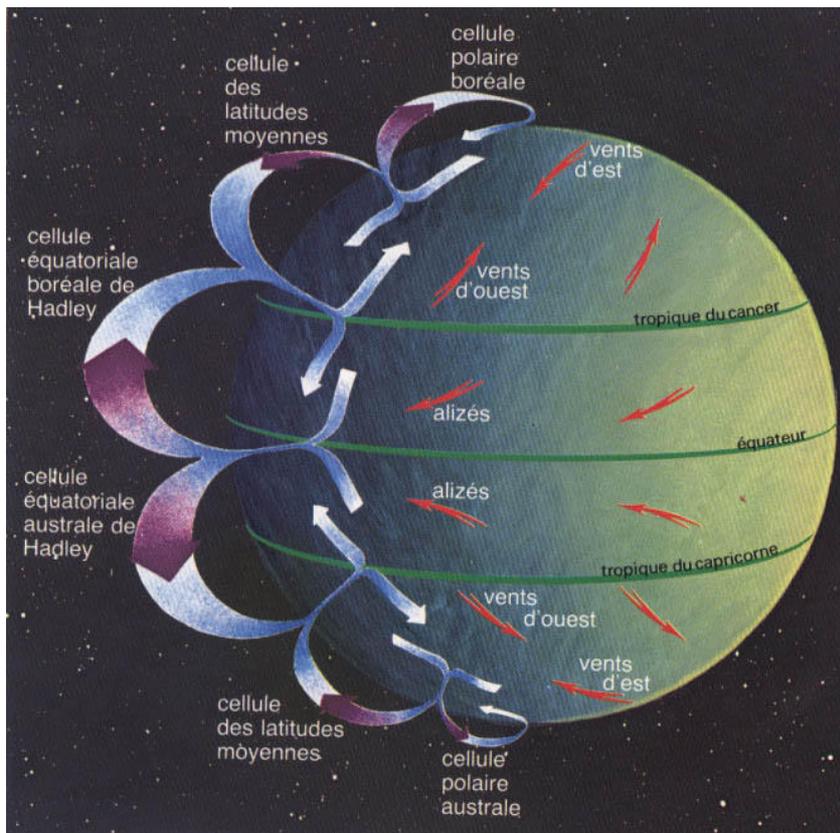


Fig163/ZZ210 (page8) : Circulation verticale méridienne générale.

Dans l'hémisphère Nord, nous verrons au paragraphe suivant que la force de Coriolis dévie les vents vers la droite. Dans l'hémisphère Sud, ils sont déviés vers la gauche.

Entre les tropiques et l'équateur, on se retrouve donc avec une circulation de vents dominants de Nord-Est dans l'hémisphère Nord et de Sud-Est dans l'hémisphère Sud (les alizés). Aux latitudes moyennes, les vents dominants sont de secteur Ouest dans les deux hémisphères. Au-dessus du 60^{ème} parallèle, ils sont de secteur Est.

Les tropiques et les alentours du 60^{ème} parallèle constituent des zones d'affrontement entre des masses d'air de température et d'hygrométrie différentes, et qui circulent en sens contraire.

IX – 2) Forces appliquées aux particules d'air

Ce sont les forces horizontales qui produisent le vent. Dans les basses couches de l'atmosphère, celles qui nous intéressent, une particule d'air subit 3 forces :

- une force de pression horizontale F_p , qui tend à faire s'écouler de l'air des hautes vers les basses pressions pour combler ces dernières. Elle est d'autant plus forte que le gradient de pression (matérialisé par le resserrement des isobares sur les cartes météo) est plus grand, produisant des vents plus violents ;
- une force de frottement F_f , plus importante au sol, qui freine l'air proportionnellement à sa vitesse ;
- la force de Coriolis F_c liée à la rotation de la Terre. Pour expliciter l'action de cette force, imaginons un observateur immobile (l'araignée sur la figure ci-dessous) situé au pôle Nord et qui observe le déplacement d'une masse nuageuse (la mouche sur la figure ci-dessous). Au départ, supposons que l'observateur se place dos au vent (situation 1 sur la figure). Un peu plus tard, puisque la Terre tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, l'observateur qui tourne avec elle apercevra la masse nuageuse légèrement sur sa gauche (situation 2), puis devant lui (situation 3) et enfin sur sa droite (situation 4). Pour cet observateur, tout se passe comme si la masse nuageuse avait infléchi sa trajectoire sur la droite (dernier croquis de la figure).

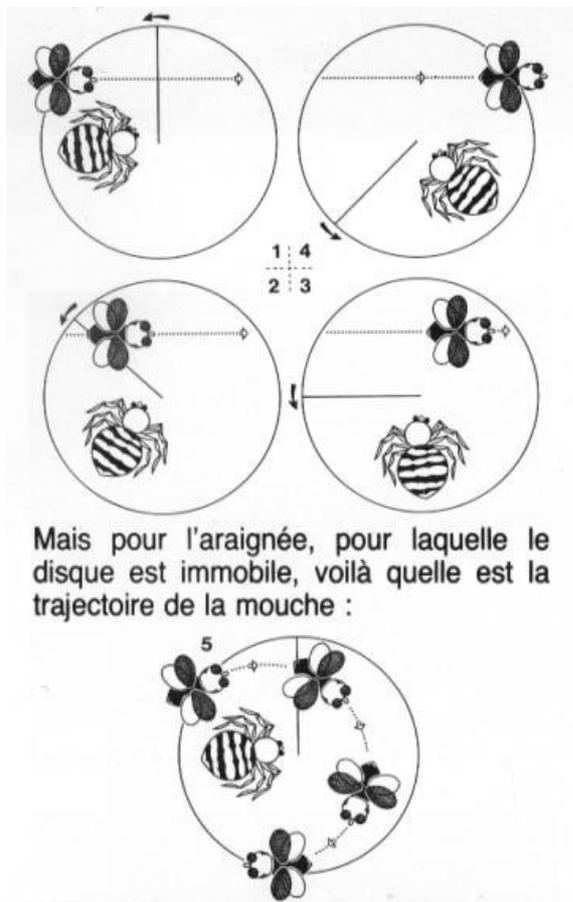


Fig165/ZZ210 (page17): Explication de la force de Coriolis.

La force de Coriolis est proportionnelle et perpendiculaire à la vitesse de la masse d'air : les vents plus forts sont aussi les plus déviés. Ceci signifie qu'en altitude, dans l'hémisphère Nord, les vents sont toujours plus à droite qu'au sol. Ce ne sont pas les nuages situés directement dans l'axe du vent au sol qui sont les plus à surveiller, mais ceux qui viennent légèrement de la droite.

La force de Coriolis est maximale aux pôles, et nulle à l'équateur puisque la surface du globe y est parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Les alizés sont donc moins déviés que les vents dominants des hautes latitudes.

Lorsque le vent a atteint une vitesse stable, son accélération est nulle, ce qui signifie que le bilan des forces appliquées aux particules d'air est nul. On a :

$$F_p + F_f + F_c = 0.$$

En altitude où on peut négliger le frottement, on a $F_p + F_c = 0$. Il s'agit d'un bilan vectoriel : la force de Coriolis est exactement opposée, en intensité et en direction, à la force de pression. Puisque la force de pression est dirigée exactement selon la droite qui relie les centres de hautes et de basses pressions, il en est de même de la force de Coriolis.

Et puisque la vitesse du vent est perpendiculaire à la force de Coriolis, la direction du vent est perpendiculaire à la droite qui joint les deux centres de pression, donc parallèle aux isobares (figure ci-dessous).

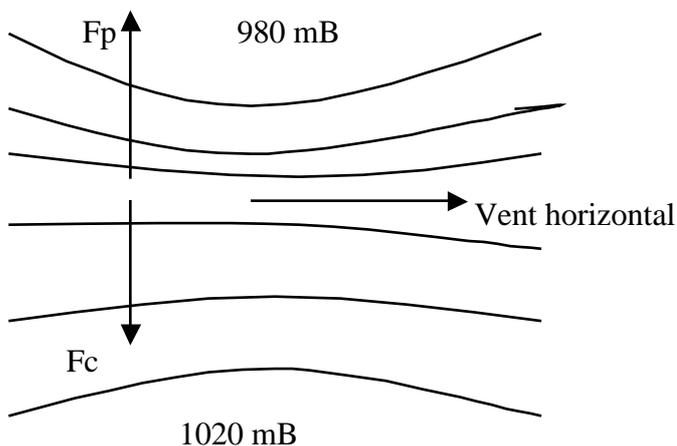


Fig209/ZZ210 (page17) : Force de Coriolis et direction du vent en altitude.

En surface, on ne peut plus négliger la force de frottement F_f parallèle, opposée et proportionnelle à la vitesse du vent. Pour respecter l'équation $F_p + F_f + F_c = 0$, la direction de la force de pression ne changeant pas, nous constatons sur la figure ci-dessous que la direction d'application de la force de Coriolis, et donc aussi la direction du vent qui doit lui rester perpendiculaire, doivent toutes deux tourner vers la gauche : le vent est défléchi en direction des basses pressions.

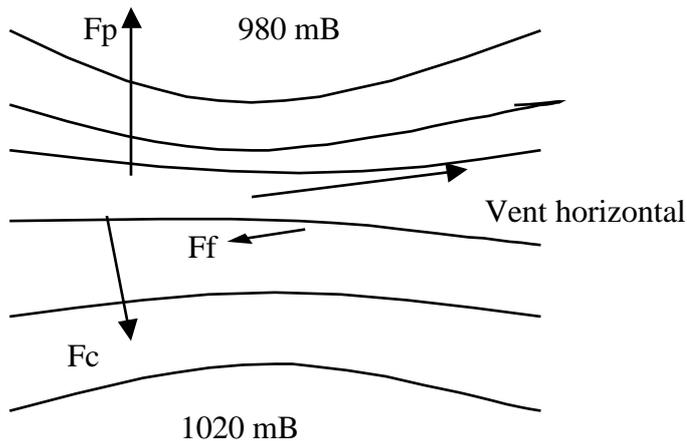


Fig210/ZZ210 (page17) : Force de Coriolis et direction du vent au sol.

Le vent freiné au sol est plus à gauche que le vent d'altitude.

Un vent dont la vitesse augmente tourne de plus en plus à droite. Ainsi, un vent marin qui aborde une côte ralentit par frottement, et dans l'Hémisphère Nord tourne en principe vers la gauche (hors cas particuliers de canalisation).

IX – 3) Perturbations, anticyclones et dépressions

Les perturbations naissent d'une ondulation (instabilité) de la frontière qui sépare deux grandes masses d'air (paragraphe IX – 5). En mélangeant ces masses d'air et en favorisant des vents forts, ces perturbations (anticyclones et dépressions) assurent en fait une grande partie de la redistribution de chaleur et d'humidité entre l'équateur et les pôles. A ce titre, elles ont un rôle plus important que celui de la circulation méridienne.

Les courants océaniques de surface (Gulf Stream) transportent de l'eau plus chaude des basses vers les hautes latitudes. Ces flux chauds sont équilibrés en profondeur par des courants froids. Ces courants superficiels et profonds transportent à peu près autant de calories que les perturbations atmosphériques (figure ci-dessous).

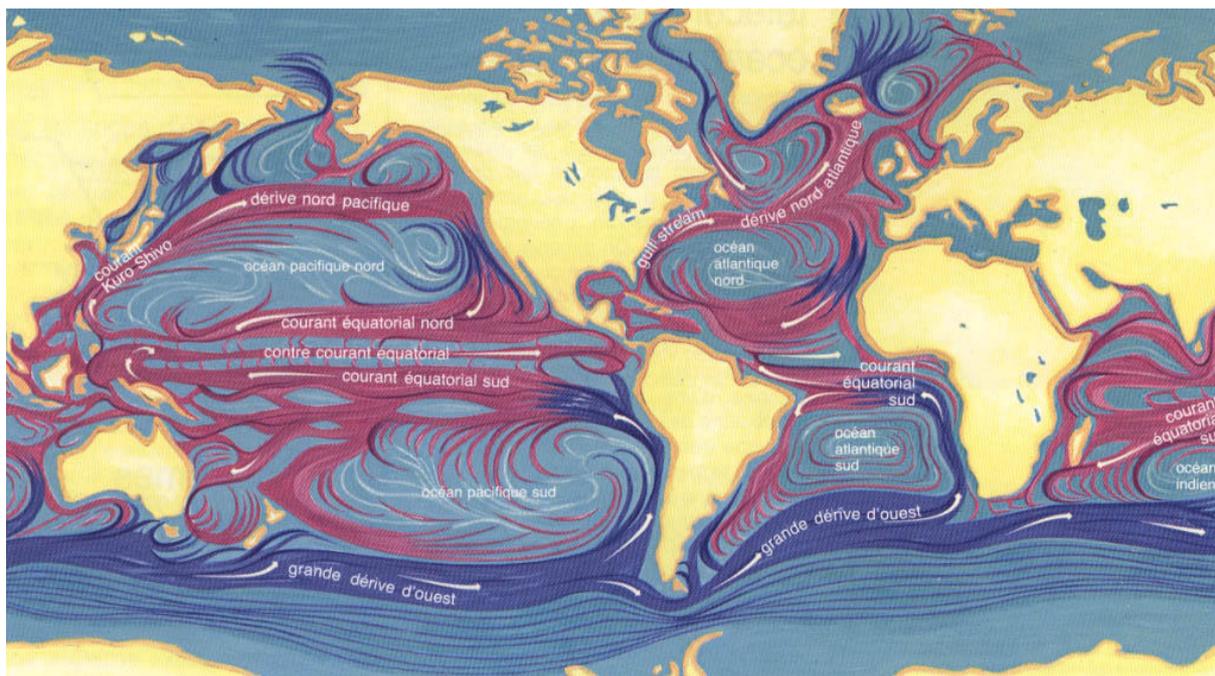


Fig164/ZZ210 (page11): Transport de chaleur par les courants océaniques.

Les anticyclones prennent naissance dans une masse d'air froid, donc de hautes pressions. L'air a toujours tendance à s'écouler des hautes vers les basses pressions. Dans un anticyclone, on devrait donc avoir un écoulement centripète (l'air a tendance à « fuir » le centre de l'anticyclone). Cependant, dans l'hémisphère Nord, la force de Coriolis dévie les vents vers la droite : par conséquent, il se crée autour du centre de hautes pressions une circulation dans le sens des aiguilles d'une montre. Les vents sont faibles, le temps clair. Pour une dépression, qui naît dans une masse d'air chaud de basse pression, c'est l'inverse : la circulation est antihoraire. Par conséquent, un observateur qui fait face à un vent d'origine dépressionnaire sait que le centre de la dépression est sur sa droite (c'est l'inverse pour un anticyclone). C'est la loi de Buys-Ballot (figure ci-dessous).

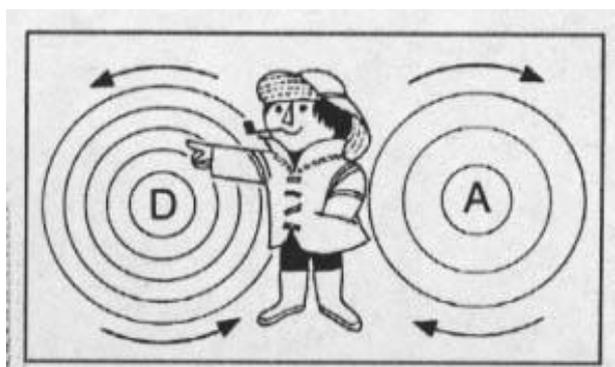


Fig162/ZZ209 : Loi de Buys-Ballot.

IX – 4) Mouvements verticaux

Du fait que la surface de la Terre absorbe davantage de rayonnement solaire et réémet moins de rayonnement infrarouge que l'atmosphère, il y a déséquilibre thermique entre le sol, qui a tendance à se réchauffer, et l'atmosphère qui a tendance à se refroidir.

L'air réchauffé en surface, plus léger, a tendance à monter. En montant, il se refroidit d'environ 1° par tranche de 100 mètres, moins s'il y a condensation simultanée de vapeur d'eau car ce changement d'état entraîne un dégagement de chaleur. Il se détend également puisque la pression atmosphérique diminue avec l'altitude.

Les précipitations naissent de la condensation dans une masse d'air qui devient saturée en vapeur d'eau. Cette condensation est essentiellement provoquée par trois phénomènes :

- un refroidissement à pression constante. C'est par exemple le cas des brouillards qui se forment la nuit dans une masse d'air humide ;
- la rencontre et donc le refroidissement d'une masse d'air chaud et humide avec une masse d'air froid ;
- la détente de l'air lors de son ascension, qui génère des nuages stratiformes en situation de stabilité et des nuages à fort développement vertical, convectifs, en situation d'instabilité. On peut citer par exemple la bande de cumulus qui se développe le long du littoral du fait de la montée d'air chaud liée à l'établissement de la brise thermique.

L'ampleur des mouvements verticaux de l'air et son influence sur le vent horizontal sont plus ou moins importants en fonction des caractéristiques de la masse d'air.

En effet, une masse d'air donnée a toujours un gradient vertical de température. Considérons le cas où ce gradient est très important, c'est-à-dire lorsque la température ambiante, dans la masse d'air, décroît très vite avec l'altitude. Au sol, une particule d'air réchauffée par ensoleillement va se mettre à monter ; par détente sa température va décroître, en l'absence de condensation, de 1° tous les 100 mètres. Si la température ambiante dans la masse d'air diminue plus vite, alors la particule qui monte sera toujours plus chaude que l'air ambiant qui l'entoure et voudra continuer à monter. Ceci génère des mouvements convectifs verticaux de grande ampleur, caractéristiques d'une instabilité verticale.

C'est par exemple le cas d'une masse d'air polaire qui, en descendant vers le Sud, se réchauffe en surface en été. L'air réchauffé y monte très haut générant des cumulus ou cumulonimbus : cette masse d'air est instable.

A l'inverse, quand en hiver une masse d'air tropical se dirige vers le pôle, elle se refroidit par la base en restant plus chaude en altitude : aucune particule d'air ne peut monter, car elle serait plus froide donc plus lourde que l'air qui l'entoure. Il n'y a pas de convection, la masse d'air est stable. Le refroidissement au sol engendre une couche homogène et plus fine de nuages bas (stratus).

Donc de façon générale une masse d'air plus chaude que la surface sur laquelle elle arrive sera stable. Inversement une masse d'air froide voit sa base se réchauffer au contact du sol : l'air de cette base peut monter haut. Nous avons une forte convection verticale, cette masse d'air est instable.

Ces critères de stabilité ont un retentissement sur la force du vent. De façon globale celle-ci est donnée par le gradient (resserrement des isobares) mais si on est en présence d'une masse d'air stable (plus chaude que la surface) le vent sera un peu plus faible.

IX – 5) Développement d'une perturbation

Nous avons déjà signalé (paragraphe IX – 3) que les perturbations naissent d'une ondulation de la frontière qui sépare deux grandes masses d'air dont le sens de circulation dominant est

opposé. Dans l'hémisphère Nord, voici par exemple comment se développent les perturbations qui interviennent aux latitudes tempérées :
 Considérons la masse d'air polaire froid avec sa circulation générale (méridienne) d'Est.
 Considérons l'air tempéré au-dessous, plus chaud, avec sa circulation générale d'Ouest.
 Considérons la frontière entre les 2 masses, en vue de dessus (figure ci-dessous).

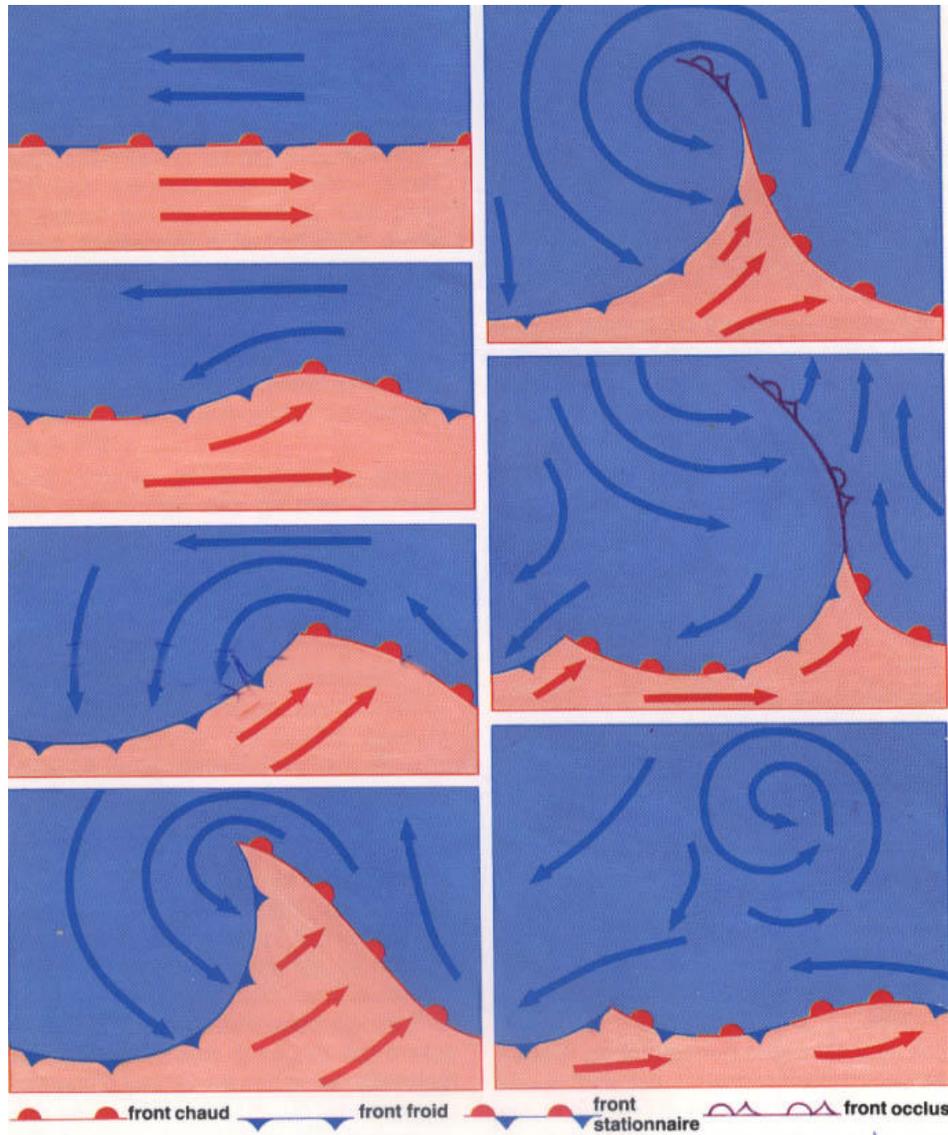


Fig166/ZZ210 (page24): Développement d'une perturbation en vue de dessus.

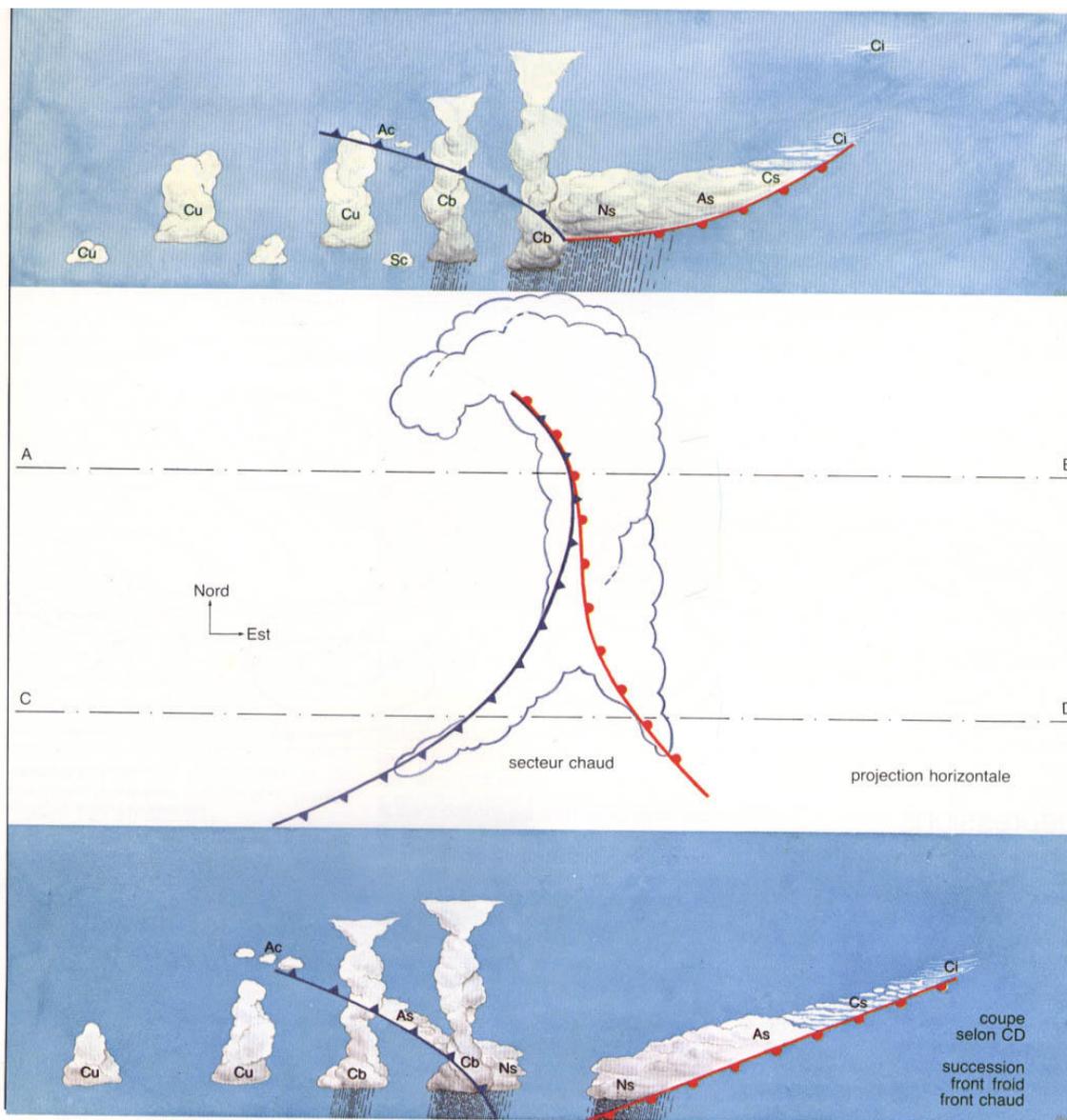
Si cette frontière se met à onduler, à faire une vague, alors sur le côté Est de cette vague, l'air chaud tempéré, plus léger, va avoir tendance à monter au-dessus de l'air froid en le repoussant (l'air froid dessous formant un coin d'angle très réduit). C'est le front chaud.

L'ondulation étant cisailée par les vents contraires régnant dans les deux masses d'air en conflit, il se développe rapidement, dans cette ondulation, une spirale (dépression) qui va tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Du fait de cette rotation, à l'Ouest de l'ondulation, l'air froid s'enfonce en coin (plus abrupt) sous l'air chaud, et le soulève. C'est le front froid.

La circulation générale d'Ouest présente dans la couche d'air tempérée entraîne cette spirale et ses deux fronts vers l'Est. Le front froid progresse plus vite que le front chaud, il peut le

rattraper : l'air froid s'enfonçant en coin sous l'air chaud, vers l'arrière de la perturbation, rattrape l'air froid par-dessus lequel l'air chaud s'élève à l'avant : il y a alors occlusion. L'air chaud se trouve de ce fait partout rejeté en altitude et les précipitations redoublent. Mais parallèlement, lorsque l'occlusion devient totale, l'ondulation disparaît et on revient à la stabilité antérieure.

Un observateur immobile au sol, voyant arriver une perturbation, fait les observations suivantes (figure ci-dessous) dans le cas où il n'y a pas occlusion :



ill. 30 Perturbations associées aux fronts chauds, fronts froids et occlusions.

Fig167/ZZ210 (page25): Formations nuageuses au passage d'une perturbation.

L'air chaud qui monte au contact de l'air froid condense en se refroidissant par détente, il donne d'abord des nuages d'altitude (cirrus) dans la zone avant où l'air chaud est monté haut au-dessus de l'air froid. Au fur et à mesure que le front chaud avance vers l'Est, au-dessus de l'observateur l'altitude de la frontière air chaud-air froid diminue (l'épaisseur du coin diminue, le plafond nuageux s'abaisse) : apparaissent des nuages bas et épais (stratus) avec de

la pluie. Derrière ce front chaud, si l'occlusion n'est pas totale, l'observateur se trouve temporairement immergé dans la masse d'air chaud qui est toujours au sol. Cette masse d'air chaud est normalement refroidie par le sol (sauf en été sur le continent), donc elle est stable. On peut observer des stratus et stratocumulus avec baisse des précipitations, sous forme de crachin. La pression baisse car cette masse d'air tempérée plus chaude est de pression plus faible. Quand le front froid arrive, la température baisse (l'air froid polaire est au sol) ; la pression augmente (l'air polaire est plus dense). Cette masse d'air est normalement plus froide que le sol, donc elle est instable : on observe des nuages de grand développement vertical (cumulus, cumulonimbus, giboulées, orage, ciel de traîne). Derrière le front froid il y a retour à la stabilité avec augmentation de pression.

La dépression avançant vers l'Est et s'enroulant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, l'observateur situé légèrement au Sud de la trajectoire du centre de la dépression expérimente d'abord des vents de Sud-Ouest tournant progressivement vers le Nord-Ouest (rotation à droite). S'il est au Nord du centre dépressionnaire, il voit d'abord des vents de Sud-Est puis de Nord-Est (rotation à gauche).

Les cartes météo matérialisent les positions des centres de basses et hautes pressions, des isobares et des fronts chauds et froids (figure ci-dessous).

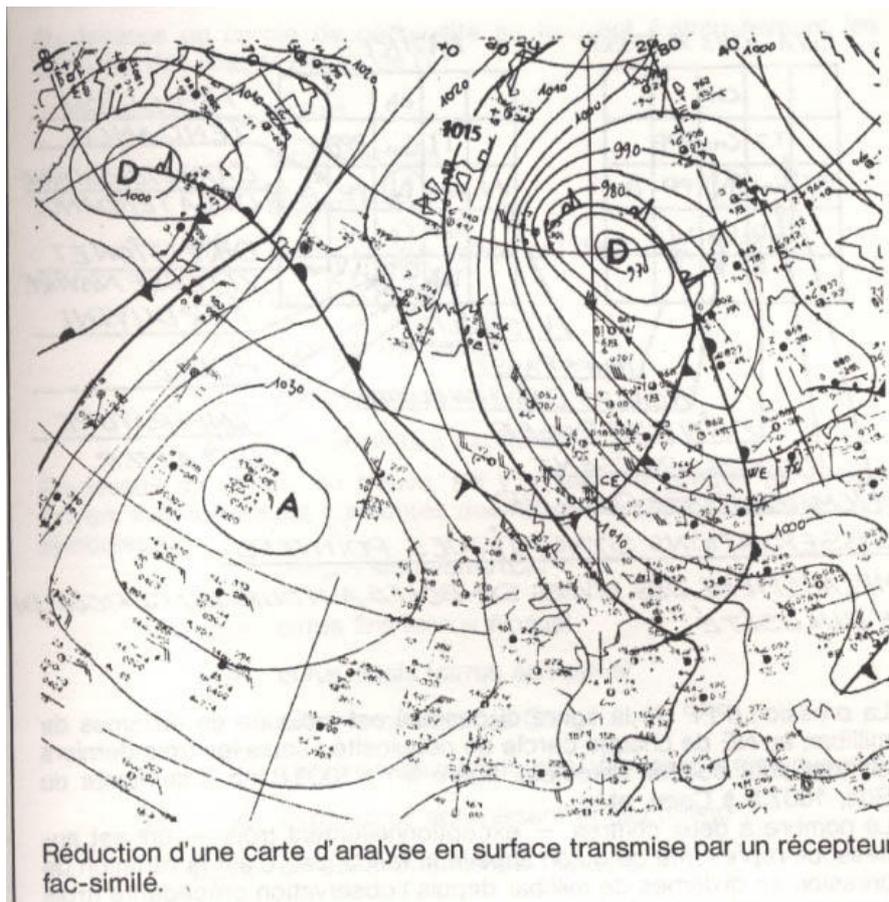


Fig168/ZZ211 (page63) : Exemple de carte météo.

IX – 6) Effets locaux

Nous venons de décrire l'effet des phénomènes météorologiques de grande ampleur sur le vent en surface. Cependant, sur ces vents synoptiques, se superposent des effets locaux dont l'influence sur le résultat d'une régates est souvent plus grande, car ils induisent des variations plus brutales et plus rapides.

IX – 6 – 1) Couche limite terrestre

De la même façon que la vitesse de l'écoulement de l'air sur les voiles est nulle au voisinage immédiat de la surface, la vitesse du vent est nulle au sol et augmente avec l'altitude. Il existe toujours une couche limite terrestre au sein de laquelle le gradient vertical de vitesse de vent dépend d'un certain nombre de paramètres (figure ci-dessous).

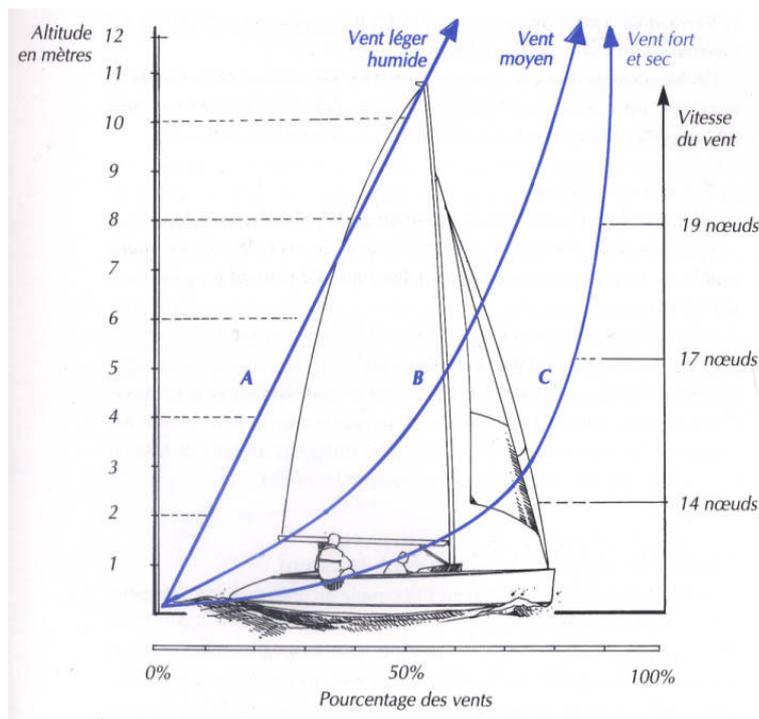


Fig186/ZZ212 page339 : Gradient de vent en fonction des caractéristiques du vent.

Plus le vent est fort et sec, plus il acquiert sa vitesse près de la surface : il y a peu de différence de force de vent entre le bas et le haut des voiles, le gradient est faible. Inversement, dans une masse d'air très humide le gradient est généralement important : le vent plus fort et plus adonnant en haut impose un certain vrillage. Dans une masse d'air instable où des redescentes d'air froid d'altitude viennent remplacer les montées d'air réchauffé par la base, les risées assez brutales se déversent jusqu'au sol : le gradient vertical est faible. Enfin, dans un fort clapot, le frottement du vent sur les vagues ralentit les basses couches et génère un gradient plus important.

Dans les cas où le gradient vertical est important, nous venons de voir que dans l'hémisphère Nord, le vent d'altitude moins freiné sera normalement dévié vers la droite. Le vrillage sera donc plus fort sur tribord que sur bâbord.

IX – 6 – 2) Structure du vent

Selon la stabilité de la masse d'air dans laquelle il souffle, et selon les obstacles qu'il rencontre, le vent n'a pas le même comportement.

Un vent de mer bien établi, peu freiné, présente de faibles variations de force et direction. C'est par exemple le cas de la phase centrale d'une brise thermique.

Un vent de terre est ralenti par endroits par frottement, et donc dévié vers la gauche. Il possède un caractère oscillatoire plus marqué, avec des retours à droite lorsqu'on traverse des zones moins perturbées.

Sur ces paramètres topographiques se superposent des paramètres atmosphériques : dans le secteur chaud d'une dépression (entre les deux fronts) nous venons de voir que la masse d'air est généralement stable, ce qui donne des vents plutôt plus faibles avec une variabilité limitée.

A l'inverse, après le passage du front froid, dans une masse d'air instable, la convection verticale provoque des redescentes d'air froid d'altitude, notamment entre les nuages, sous formes de risées violentes et fortement déviées vers la droite. Les fluctuations de force et de direction sont importantes.

On comprend bien que la connaissance du caractère plus ou moins évolutif du vent aide le régatier à planifier sa stratégie et sa tactique.

IX – 6 – 3) La brise thermique

Par bon ensoleillement, l'air se réchauffe plus vite sur la terre que sur la mer. De ce fait, il s'élève sur la terre, et il est remplacé au sol par de l'air plus frais en provenance de la mer. En altitude, s'établit un courant inverse (antibrise) qui permet d'équilibrer les flux. Il se forme ainsi une boucle de circulation (figure ci-dessous) :

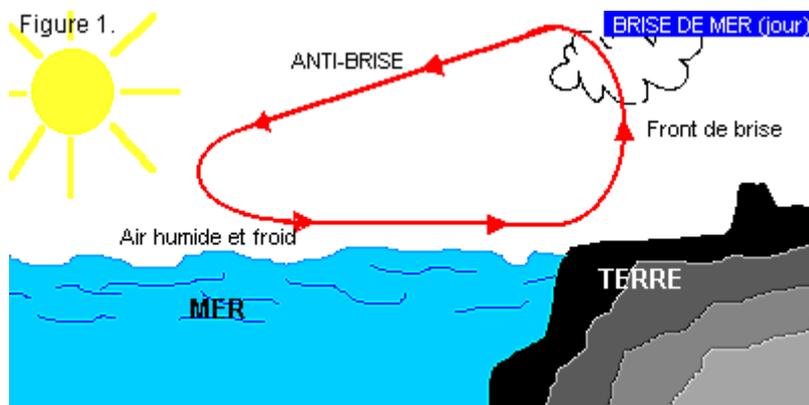


Fig154/ZZ208 : Mécanisme de la brise thermique.

On conçoit bien que la brise thermique est d'autant plus forte que le contraste thermique mer/terre est important. Ainsi, par exemple, tous les facteurs qui refroidissent la mer (marée montante, mistral dans les jours précédents) sont favorables à son établissement.

Ceci dit, le caractère stable ou instable de la masse d'air est encore plus déterminant dans le mécanisme de formation de la brise thermique. Pour qu'elle s'établisse, il faut que l'air réchauffé en surface, à terre, puisse monter, c'est-à-dire que les couches d'air immédiatement au-dessus ne soient pas encore plus chaudes (paragraphe IX – 4). En effet l'air qui monte se

refroidit par détente : s'il devient plus froid que l'air qui l'entoure, il va redescendre. Les cumulus indiquent des ascendances, donc des instabilités propices. Si on les observe sur le littoral tôt le matin et qu'ils se développent assez vite, la brise a de grandes chances d'être précoce et forte. Cependant, s'ils prennent une telle ampleur qu'ils arrêtent significativement les rayons solaires, ils atténueront les contrastes thermiques...

Les masses d'air froid sont plus instables que les masses d'air chaud, puisque l'air réchauffé au sol peut monter librement. A l'inverse les stratus bas qui dénotent une masse d'air stable, ou les chaudes journées anticycloniques (masses d'air chaud) ne sont pas propices.

Un vent synoptique qui souffle dans la même direction que la brise thermique peut empêcher son établissement car il gêne le courant de retour (antibrise). De plus un tel vent synoptique venant de la mer, s'il est assez fort, a tendance à égaliser les températures de la terre et de la mer et donc à diminuer le contraste thermique.

A l'inverse, un vent synoptique faible et opposé favorise le courant de retour donc la formation de la brise, même si au sol, dans une bande de quelques centaines de mètres, le vent est faible et très variable par suite de l'opposition entre ces deux vents (figure ci-dessous). Bien sûr, avec un vent synoptique opposé et fort le matin, il y a peu de chances que la brise s'établisse : on risque simplement d'avoir un affaiblissement marqué du vent dans l'après-midi.

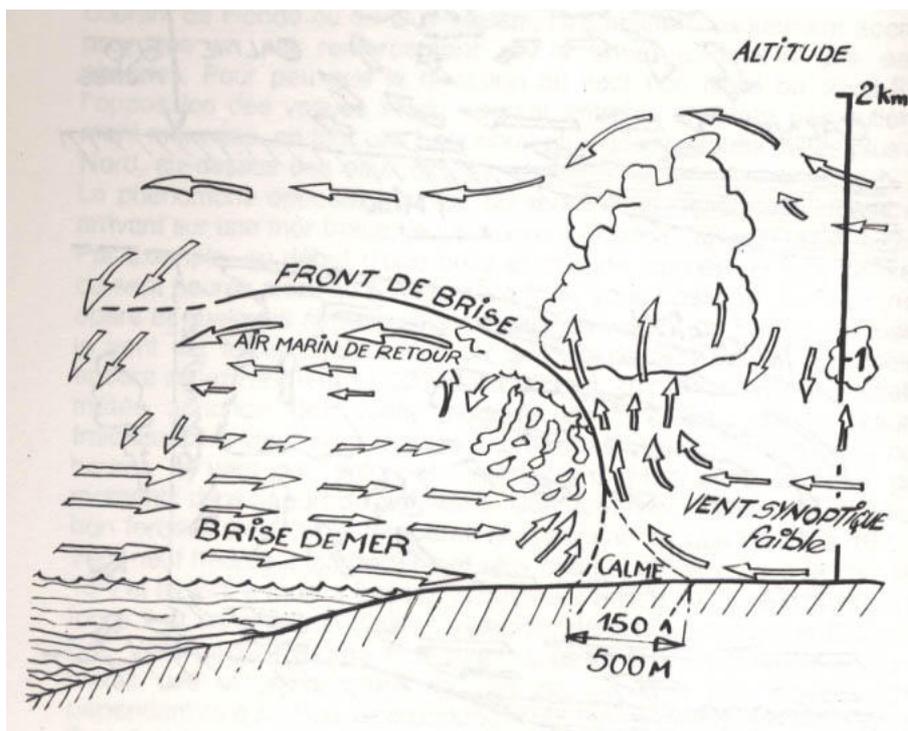


Fig169/ZZ211 (page108) : Mécanisme de la brise thermique.

Si les conditions d'établissement de la brise thermique sont réunies, elle rentrera en s'accompagnant d'une rotation du vent.

Si le vent synoptique du matin n'est pas directement opposé au sens de la brise thermique, pendant sa phase d'établissement le vent tournera généralement selon le sens qui minimise la rotation à effectuer (figure ci-dessous).

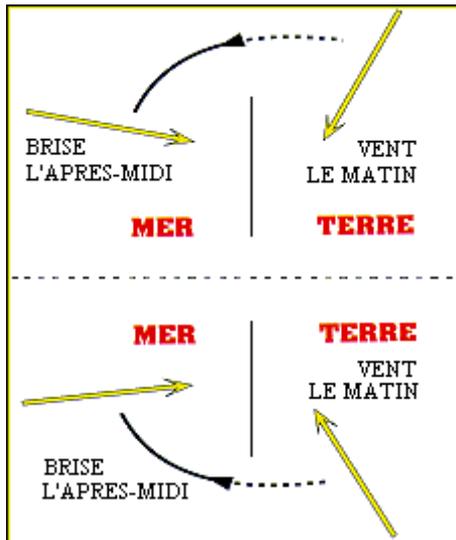


Fig155/ZZ208: Etablissement de la brise thermique par la loi de la rotation minimale.

Une fois la brise *établie*, au fur et à mesure qu'elle se renforce, elle est de plus en plus déviée par la force de Coriolis. Elle tourne donc progressivement vers la droite et peut même devenir presque parallèle à la côte. Si la mer est au Sud ou à l'Ouest, on a alors l'impression que la brise suit le soleil, qui lui aussi « tourne » à droite dans l'après-midi (d'où la dénomination parfois utilisée de « brise solaire »). Si la mer est à l'Est, la brise va tourner progressivement de l'Est au Sud en se renforçant.

IX – 6 – 4) Effet des nuages

Les nuages, notamment dans le ciel de traîne d'une dépression (situation d'instabilité), sont la matérialisation d'ascendances et descendances marquées.

En particulier, en avant d'un nuage, il y a très souvent une redescente d'air d'altitude, plus rapide donc plus à droite (dans l'hémisphère Nord) que le vent moyen (figure ci-dessous).

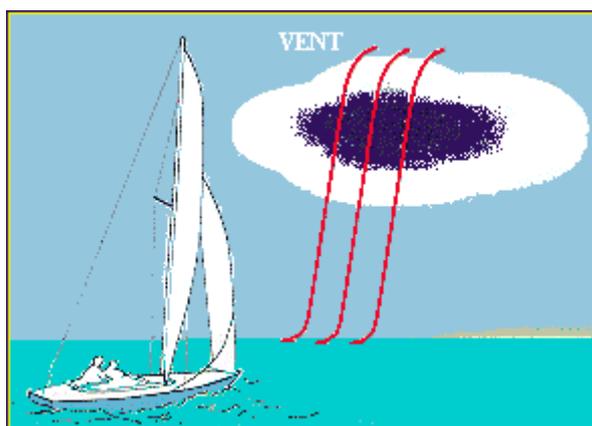


Fig156/ZZ208 : De l'air froid plus rapide et plus à droite descend en avant du nuage.

Sous le nuage, il y a ascendance : le vent est ralenti en surface et tourne à gauche. Derrière le nuage, la vitesse et la direction du vent retournent à celles du vent moyen (figure ci-dessous).

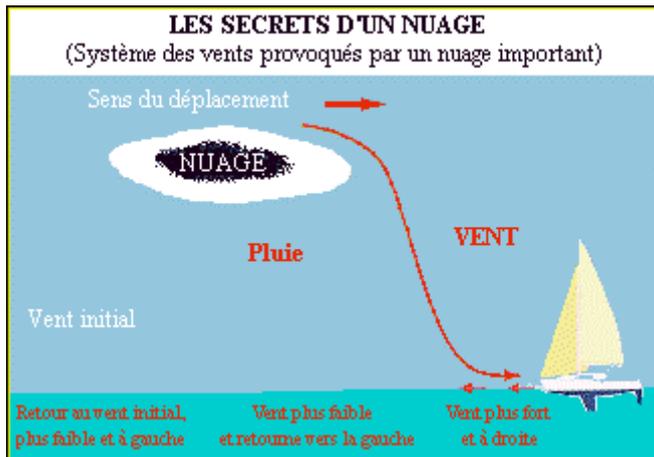


Fig157/ZZ208 : Comportement du vent sous un nuage.

Tactiquement, il est donc avantageux d'entrer sous un nuage en tribord amures, sur le bord adonnant, puis de virer bâbord lorsque la rotation à gauche s'amorce. Après le nuage, de retour dans le vent initial, on peut à nouveau choisir le bord qui répond le mieux à la stratégie d'ensemble.

IX – 6 – 5) Effets de site

La présence d'une côte élevée défléchit le vent. Si le vent du large est à peu près perpendiculaire à la côte, il se forme au vent de celle-ci un coussin d'air mort (comme celui qui se forme au vent d'un spi au vent arrière). Il y a un trou de vent sur le littoral. Par contre, si le vent attaque la côte sous un angle plus réduit, il y généralement canalisation par la côte, resserrement des lignes de courant du vent et accélération. Le vent est plus fort et plus parallèle au pied de la côte (figure ci-dessous).

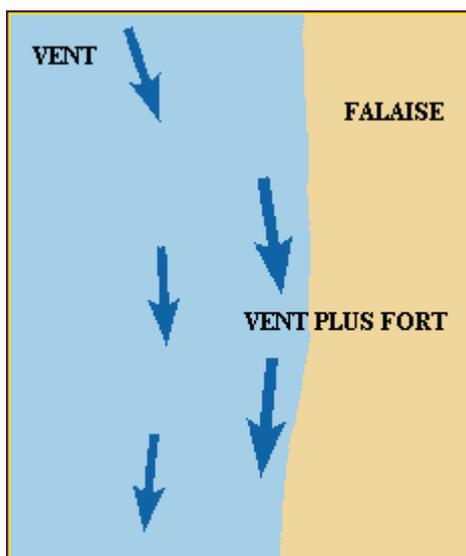


Fig158/ZZ208 : Déflexion et accélération du vent par une falaise.

La falaise génère donc une bascule persistante par effet de site qu'il est intéressant d'exploiter tactiquement (paragraphe X – 4 – 2).

Par contre, si le vent vient de terre, au voisinage immédiat d'une côte élevée il y a généralement un dévent important.

Dans les cas où le vent est à peu près parallèle à la côte, la présence d'un cap qui force le vent à le contourner produit également un resserrement des lignes de courant et une accélération par convergence (figure ci-dessous). Il y a à nouveau une bascule persistante par effet de site que l'on doit exploiter au mieux.

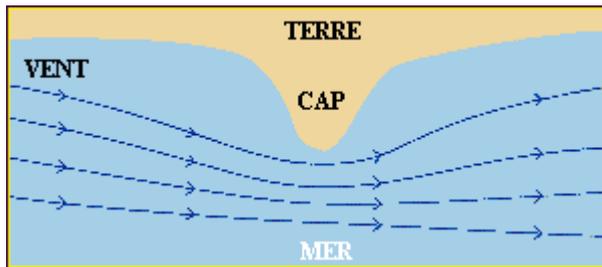


Fig159/ZZ208 : Accélération et courbure du vent par un cap.

Nous verrons au chapitre X que l'on doit toujours chercher à traiter une bascule persistante en se rapprochant le plus possible du centre de la courbure. Ce qui, dans le cas d'un vent défléchi par un cap, donne la tactique suivante pour des bateaux qui naviguent au près (figure ci-dessous). Ces bateaux rencontrent un vent de plus en plus défléchi vers la droite : on constate que le bateau bleu, ayant effectué le bord refusant (bâbord amures) en premier, a joué la meilleure tactique en direction du centre de la courbure (voir aussi paragraphe X – 4 – 2).

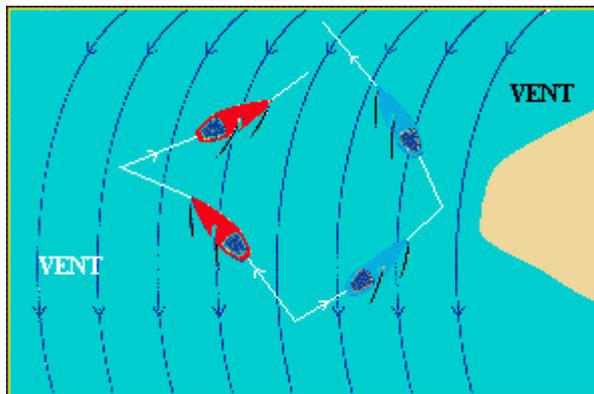


Fig160/ZZ208 : Chercher le centre de la courbure induite par l'effet de site.

En ce qui concerne les vents de terre, ils peuvent subir plusieurs phénomènes :

- nous avons déjà signalé le dévent situé au pied d'une côte élevée ;
- si la côte est découpée, le vent sera canalisé dans les vallées : il sera donc plus rapide au débouché immédiat de ces vallées, puis faiblira à quelque distance de la côte par divergence (étalement) sur le plan d'eau ;
- de façon générale, le vent est freiné sur la terre par les obstacles, donc en arrivant sur la surface de l'eau il accélère et tourne logiquement à droite. Au près, en s'approchant de terre,

on expérimente en principe une bascule à gauche qu'il faut donc exploiter en tirant vers la gauche du plan d'eau (figure ci-dessous) ;

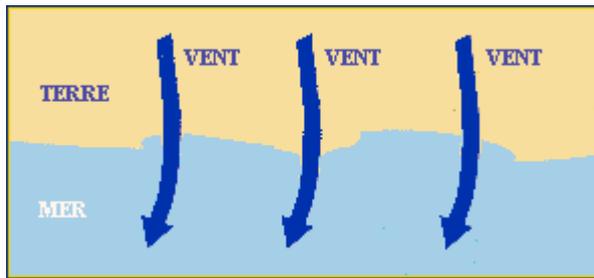


Fig161/ZZ208 : Rotation du vent à gauche près de terre (frottement/Coriolis).

- il y a une exception au cas précédent, lorsque par une journée très chaude un vent de terre se refroidit par contact avec la surface de la mer. Devenant plus dense, il peut alors ralentir sur la mer : contrairement au cas précédent il y a plus de vent à terre qu'au large, et en se rapprochant de terre on expérimente une bascule à droite.

Chapitre X : Stratégie et tactique

X – 1) Préambule

Dans le chapitre précédent, nous avons passé en revue les phénomènes météorologiques globaux et locaux qui induisent des variations de force et direction de vent. Il s'agit essentiellement des bascules persistantes liées au passage de fronts, à l'établissement de la brise thermique, ou encore à des effets de site, et des bascules temporaires liées au passage d'un nuage ou au caractère plus ou moins instable du vent.

Dans ce chapitre, nous essayons de voir comment le régatier expérimenté, qui a réussi à anticiper au mieux ces variations, peut en tirer parti pour élaborer une stratégie gagnante. Nous verrons aussi comment il peut défendre sa position – et attaquer les adversaires qui le précèdent.

X – 2) Etude locale du plan d'eau et des conditions

Une régates doit se préparer plusieurs jours à l'avance. En se procurant les cartes météo quotidiennes, pendant les quelques jours qui précèdent une régates, on acquiert une connaissance de l'évolution météorologique générale qui donne un certain nombre d'informations intéressantes (figure ci-dessous).

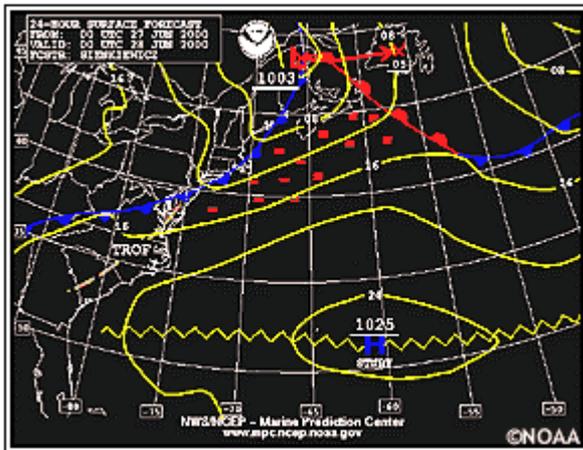


Fig121/ZZ181 : Prédications à long terme.

Dans un système de hautes pressions, les masses d'air, donc la force et la direction du vent, sont généralement plus stables ; le vent bascule davantage dans des conditions dépressionnaires. Si par exemple, on s'attend à une transition de hautes vers des basses pressions, on peut escompter du vent assez fort et stable ; la transition inverse donnant généralement un vent plus faible et instable.

Un relevé des températures de l'eau et de l'air est également très utile, car si l'écart entre les deux augmente, ceci encourage l'établissement d'une brise thermique.

Ensuite, il faut chercher à acquérir une connaissance des effets locaux. Pour ce faire, quand c'est possible, l'observation du plan d'eau depuis un point haut est très utile, car les risées sont très facilement repérables. On peut non seulement noter leurs emplacements préférentiels, mais aussi les bascules générées par les effets de côte, matérialisées par des

changements de direction des ondulations de surface (par petit temps) ou de la crête des vagues (par vent plus fort).

Ce travail préparatoire terminé, il est maintenant temps de partir sur l'eau, le plus tôt possible avant le départ, afin de commencer à planifier une stratégie.

Une des premières choses à faire est de relever le comportement du vent, en notant périodiquement sa direction et sa force au moins sur la période d'une heure qui précède le départ. On obtient ainsi une idée de la durée et de l'amplitude des oscillations, qui dépendent (paragraphe IX – 6 – 2) du caractère stable ou instable de la masse d'air. Dans une masse d'air stable, l'amplitude des oscillations est, en moyenne, de 3 à 5 degrés, tandis que leur durée est de quelques minutes. En régime instable, l'amplitude et la durée sont généralement plus grandes. Grâce à ces informations, le régatier peut déterminer une ébauche de stratégie.

Si par exemple la durée des oscillations est supérieure à celle d'un bord, on les traitera comme des bascules persistantes (paragraphe X – 4 – 1), sinon comme des bascules oscillantes, dans lesquelles on virera si l'amplitude de l'oscillation permet un gain supérieur à la perte de temps liée au virement de bord (paragraphe X – 4 – 3).

Ces informations permettent aussi la mise en place d'une stratégie plus subtile : par exemple, lorsqu'on enroule la bouée sous le vent, la lecture du compas indique à l'équipage où en est le vent par rapport à l'oscillation en cours (au début, en phase centrale, à la fin ?). De cette façon, l'équipage peut anticiper sur la rotation en cours, donc se positionner intelligemment par rapport à la flotte.

Il arrive fréquemment qu'une rotation persistante se superpose sur un système oscillant, par exemple dans la phase d'établissement ou d'affaiblissement de la brise thermique, ou lors du passage de fronts (figure ci-dessous).

Direction (degrés)

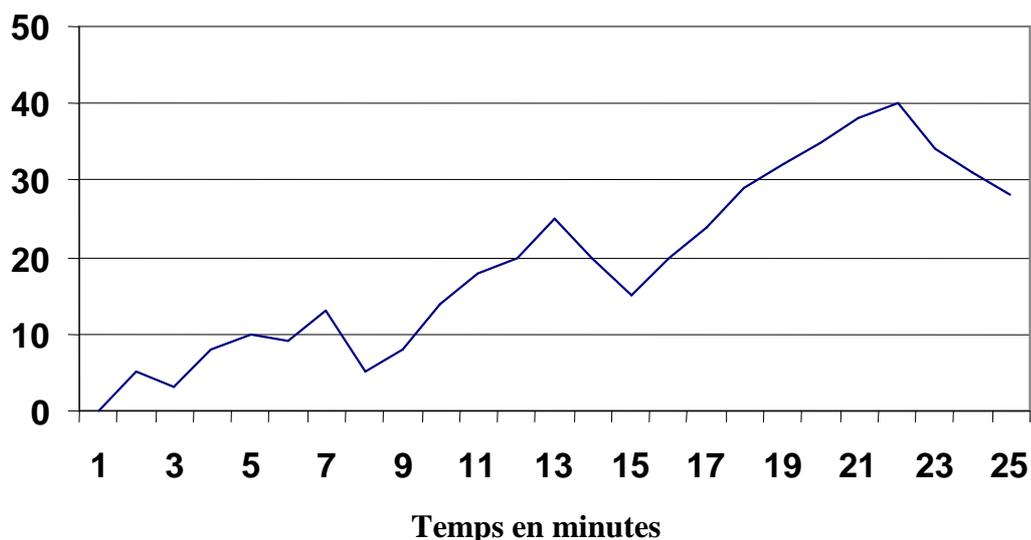


Fig149/ZZ200 : Régime évolutif ou basculant.

Ce type d'évolution est traité comme une bascule persistante, les retours momentanés du vent pouvant être exploités pour se recentrer. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, on a affaire à une

bascule à droite, donc une adonnante tribord. Les petits retours à gauche, négociés bâbord amures, permettent de se recentrer un peu sur la droite, donc de se retrouver intérieur adonnant par rapport à la flotte lorsqu'on revient en tribord (voir aussi paragraphe X – 4 – 1).

Sortir tôt sur l'eau permet également de mieux relever les effets de site (effets de côte, courants). A ce titre, consigner toutes les données tactiques après une régata (bords favorables, bascules, courants...) est fort utile si par la suite on doit revenir sur le même plan d'eau.

On s'efforce également de surveiller les nuages, notamment ceux qui possèdent un fort développement vertical, et de vérifier le comportement du vent lors de leur traversée. En principe (paragraphe IX – 6 – 4) on expérimente un vent plus fort et plus à droite que le vent moyen en avant du nuage, un vent plus faible et plus à gauche dans l'ascendance sous le nuage, et un retour au vent moyen avec rotation à droite ensuite (dans l'hémisphère Nord). Si les conditions d'instabilité verticale favorisent les descentes d'air d'altitude, il faudra essayer de se positionner plutôt par le travers sous le vent du point d'impact de ces risées, pour bénéficier d'une adonnante plus forte (paragraphe VIII – 4 – 1).

Pour une prévision à plus court terme, notamment avant le départ, on doit s'efforcer de collecter le maximum d'informations à l'aide de tout ce qui se trouve sur le plan d'eau, en particulier au vent (figure ci-dessous).



Fig118/ZZ179 : Regarder au vent pour prévoir à court terme.

Les bateaux qui testent le plan d'eau au vent, renseignent par leur trajectoire sur les rotations à venir.

Des fumées de cheminées, des drapeaux, l'alignement des bateaux au mouillage, peuvent également indiquer des rotations de vent (figure ci-dessous).



Fig119/ZZ180 : Signes utiles pour prédire la direction du vent.

Si le comité de course donne un cap-compas pour la bouée au vent notablement différent de celui qui règne dans la zone de départ à un instant donné, c'est probablement parce qu'il s'attend à une rotation.

Enfin, notamment dans la zone de départ, il est fort utile de relever la force et la direction du courant, en se positionnant par exemple à l'arrêt près de la bouée de bout de ligne. En effet, selon son sens et sa vitesse, le courant modifie considérablement, surtout dans le petit temps, la vitesse d'approche de la ligne de départ.

X – 3) Le départ

X – 3 – 1) Détermination du côté avantageé de la ligne

L'objectif du bord de près étant de remonter au vent, on doit chercher à déterminer quelle est l'extrémité de la ligne qui est située la plus au vent pour bénéficier d'un avantage initial. Si la ligne est mouillée parfaitement perpendiculaire au vent, il n'y a pas d'extrémité avantageée. Si ce n'est pas le cas, plus la ligne est longue plus le bénéfice procuré par un départ du bon côté est important.

Il existe essentiellement deux méthodes pour déterminer le « bon côté » d'une ligne de départ. La première utilise un compas. On commence par relever la direction du vent, puis on se place sur la ligne de départ à proximité du bateau comité et on relève l'azimut de la bouée de bout de ligne. Si la différence entre les deux angles est inférieure à 90 degrés, la ligne est favorable à la bouée (figure ci-dessous) ; dans le cas contraire elle est favorable au bateau comité.

Il est clair que cette méthode est difficile à utiliser dans une flotte très nombreuse où il y a toujours un ou plusieurs bateaux pour masquer la bouée de bout de ligne. Cependant, quand on peut l'appliquer, elle est très précise.

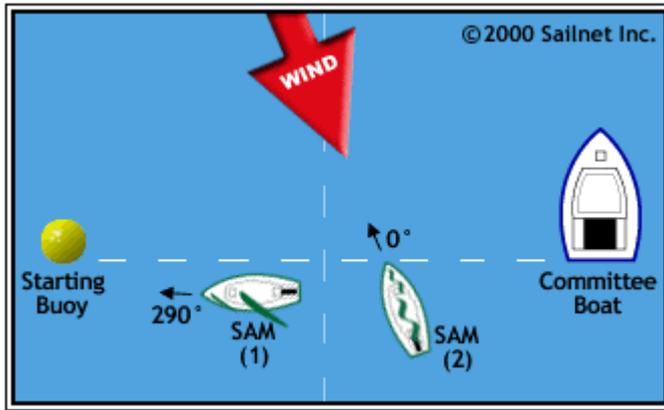


Fig123/ZZ187 : Détermination au compas du côté favorable d'une ligne de départ.

L'autre méthode n'utilise pas le compas. Elle implique d'abord de longer la ligne en tribord amures, en ajustant parfaitement et en repérant le réglage des voiles, puis de virer ou d'empanner au voisinage immédiat de la bouée de bout de ligne. On repart bâbord amures en restaurant d'abord le réglage des voiles, puis on ajuste le cap de façon à ce que les voiles portent de la même façon que sur le bord tribord initial (les penons retrouvent le même comportement). Si le bord bâbord nous amène au vent de la ligne de départ, alors celle-ci est avantagée à la bouée. Dans le cas contraire, elle est avantagée au bateau comité.

X – 3 – 2) Prise d'amers

Dés lors qu'on ne peut ou ne veut partir exactement à une extrémité, il est très difficile de se situer exactement par rapport à la ligne de départ. Dans cette situation, il est souhaitable de prendre un amer dans le prolongement de la bouée de bout de ligne. Pour ce faire, on se place au bateau comité dans le prolongement de la ligne, et on vise à terre un point remarquable (figure ci-dessous).

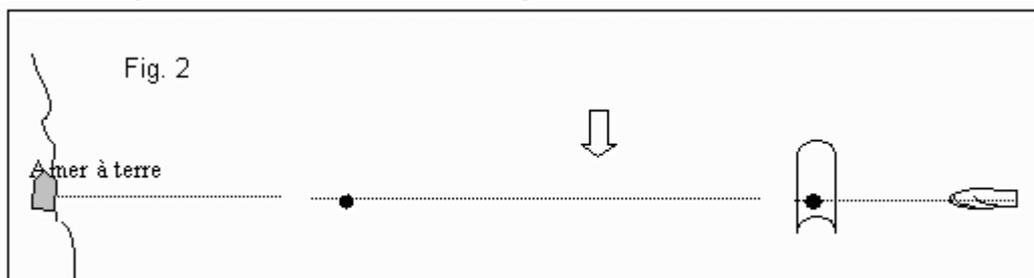


Fig126/ZZ192 : Prise d'amer à terre dans le prolongement de la bouée.

De cette façon, en milieu de ligne, on se procure souvent un avantage sur la flotte, qui, ayant du mal à se positionner, produit par mesure de sécurité un « ventre » sous le vent. On prend le départ en ayant l'amer dans le prolongement exact de la bouée de bout de ligne (figure ci-dessous).

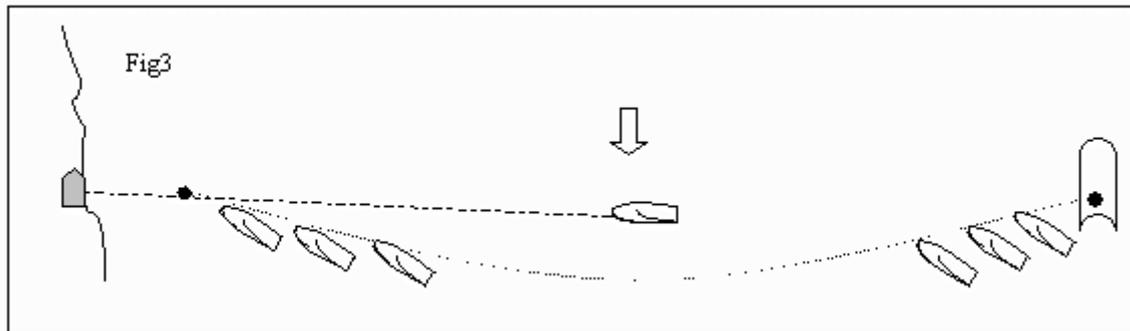


Fig127/ZZ192 : Avantage en milieu de ligne procuré par l'amer à terre.

Cette tactique comporte cependant une difficulté et un danger.

La difficulté est que dans les flottes de haut niveau, agressives et nombreuses, dans les deux minutes qui précèdent le départ l'amer à terre est très souvent masqué par de nombreux bateaux.

La danger est que si on prend le départ exactement aligné sur l'amer pris à terre, ce sont en fait les yeux du barreur qui se trouvent exactement sur la ligne de départ. Ceci signifie que l'étrave, elle, a mordu la ligne.

Puisqu'il est impossible de prendre un amer en se positionnant exactement sur l'étrave, une solution à ce problème consiste à prendre un deuxième amer, en se positionnant au bateau comité au même endroit que précédemment, mais après avoir dérivé de deux longueurs sous le vent. Ce deuxième amer constitue en quelque sorte une « marge de sécurité ». Par ailleurs, puisqu'il est forcément situé au vent du premier, il reste plus longtemps visible pendant la phase d'approche terminale.

X – 3 – 3) La nécessaire maîtrise du bateau

Dans l'urgence qui précède les départs, il faut aussi déterminer un certain nombre de paramètres.

En premier lieu, on doit savoir quel est le temps nécessaire pour parcourir la ligne dans toute sa longueur, dans les cas de flottes peu nombreuses avec départ à la bouée.

Avec des flottes agressives et nombreuses, il n'est pas possible de longer la ligne au travers. Il faut alors déterminer, au près serré, la vitesse de défilement des amers pris précédemment, de façon à optimiser un départ lancé à pleine vitesse.

Il est aussi impératif de maîtriser le freinage et les phases d'arrêt avec un minimum de dérive. En particulier, on peut minimiser la dérive à l'arrêt par des allers-retour avant-arrière, qui conservent un peu de vitesse d'écoulement, donc d'efficacité, sur les appendices. On a intérêt à pratiquer cette manœuvre à l'entraînement près d'une bouée, car elle permet d'agrandir un espace sous le vent qui permet d'y lancer le bateau, dans les départs quasiment arrêtés qui sont fréquents dans les grands championnats.

Cette notion d'espace sous le vent est fondamentale dans ces cas. Il faut être capable de lofer le bateau au vent plus fort que le lof que nous impose le bateau sous le vent, sans pour autant risquer un arrêt face au vent, ou même un virement incontrôlable et catastrophique.

Et lorsque nous avons créé un espace sous le vent, il faut être capable d'interdire à quiconque de s'y glisser. Pour cela, lorsqu'un bateau bâbord amures s'approche avec l'intention de virer pour prendre ce trou, ou lorsqu'un bateau tribord s'approche sous le vent, le mieux à faire est d'abattre (sans vitesse, donc en choquant largement les voiles) de manière à combler une partie du trou que nous venons de créer grâce à la longueur d'étrave. Le danger passé, on revient près du vent, ce qui rouvre cet espace.

X – 3 – 4) L'attitude face aux risques

Dans les flottes agressives et nombreuses, on trouve souvent un paquet compact de bateaux à l'extrémité avantagée de la ligne (figure ci-dessous).



Fig125/ZZ188 : Ici rechercher un départ un peu plus sous le vent du bateau !

Partir dans un tel paquet est dangereux car tous ces bateaux ont tendance à adopter juste après le départ une attitude défensive qui les pousse à se contrôler en lof et à se ralentir mutuellement. De plus, c'est souvent à cet endroit que se trouvent les meilleurs : on court donc un grand risque de se trouver couvert et de ne pas pouvoir virer pour se dégager ou rejoindre le côté favorable du plan d'eau, quand celui-ci est à droite. Seul un petit nombre de bateaux pourra émerger du paquet avec de la vitesse.

Dans ces conditions, il est préférable de partir un peu plus loin de l'extrémité avantagée. Ceci minimise également les risques d'être identifié en rappel individuel : par conséquent, dans les dernières secondes qui précèdent le départ, on surveille davantage les voisins que le chrono, et on monte avec eux sur la ligne. De préférence, on choisit des voisins moins rapides et surtout, qui font moins de cap.

Partir un peu plus loin de la bouée de bout de ligne quand elle est avantagée est d'autant plus nécessaire que le côté favorable du plan d'eau est à droite, ce qui implique de virer tôt.

Le bon emplacement sur la ligne de départ ne dépend donc pas uniquement de l'angle qu'elle fait par rapport au vent, mais aussi du côté favorable du parcours.

Prenons le premier exemple d'un vent stable, et d'une bouée au vent située plus à droite que le vent (figure ci-dessous).

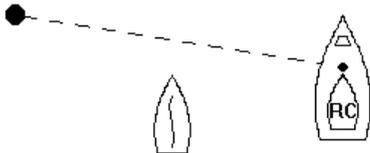


Fig141/ZZ76 : Où partir ? A la bouée et bâbord, mais s'il y a trop de bateaux, partir tribord au vent du paquet qui va se former à la bouée pour pouvoir virer tôt.

Dans ce cas, il est préférable de partir le plus rapidement possible sur la droite du plan d'eau, sur un bord bâbord amures qui rapproche le plus de la bouée au vent et retarde l'arrivée sur le bord du cadre (voir aussi paragraphe X – 6).

Un départ bâbord à la bouée qui est l'extrémité avantagée serait bien sûr l'idéal, mais il faut s'attendre à un encombrement important de bateaux tribord amures au voisinage de cette bouée. Il est donc très probable que cette stratégie est trop risquée : il est préférable de partir tribord un peu plus loin de la bouée, au vent du paquet qui s'y forme, ce qui permet de virer plus tôt.

Un départ bâbord est également possible, non pas exactement à la bouée mais un peu plus loin, là où il commence à se former des trous dans l'alignement des bateaux tribord amures. Ce type de départ reste très risqué dans des flottes nombreuses, mais s'il réussit, il garantit immédiatement de l'air frais et la possibilité de rejoindre le côté favorable du parcours, que celui-ci soit à gauche ou à droite.

Nous avons vu qu'il est nécessaire d'identifier le côté favorable du parcours avant le départ. Dans les situations où le vent n'est pas complètement stable, il ne faut absolument pas confondre le côté favorable du parcours avec le bord qui rapproche le plus de la bouée (c'est une erreur courante chez les équipages les moins expérimentés).

Afin d'explicitier ceci, prenons un deuxième exemple où la bouée au vent est toujours située à droite du vent, mais supposons maintenant qu'une bascule persistante à gauche va intervenir pendant le premier près (figure ci-dessous).

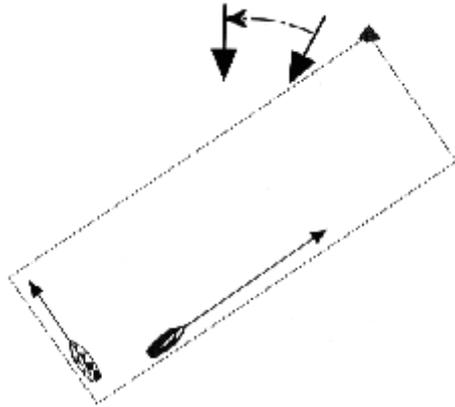


Fig130/ZZ195 : Ne pas confondre bord favorable et bord rapprochant le plus de la bouée.

Nous verrons au paragraphe suivant que l'arrivée de cette bascule implique de rejoindre d'abord la gauche du plan d'eau, même si ce bord tribord amures n'est pas celui qui rapproche le plus de la bouée. Dans ces conditions, on cherchera à partir plus près que précédemment de la bouée de bout de ligne. Celui qui « gagne la bouée » (le plus proche de la bouée) va partir sous le vent de la flotte dans un vent refusant qui l'avantage donc de plus en plus, et atteint le premier le cadre : le premier à virer, c'est aussi le premier à bénéficier de l'adonnante qui ramène la flotte sur la bouée au vent. Il a de fortes chances d'y parvenir fort bien placé.

La détermination du côté favorable du parcours est grandement facilitée si, peu avant le départ, on effectue un speed-test sur des bords opposés avec un adversaire qui possède une vitesse voisine. On part du même point sur des bords opposés, et au bout d'un temps déterminé à l'avance on vire : celui qui croise devant est parti du bon côté. Evidemment cette stratégie est surtout valable dans des cas de bascules plus déterminées, moins aléatoires, telles que celles que produisent les effets de côte.

La force du vent est aussi un paramètre à considérer dans la détermination du bon emplacement sur la ligne de départ.

Dans le petit temps, nous savons que les angles de remontée au vent sont plus ouverts, surtout en catamaran de sport. Dans ces conditions, juste après le départ, la flotte tribord amures a davantage tendance à s'aligner, ce qui renforce la position favorable sous le vent de ceux qui sont partis sous le paquet. Ceux qui partent au vent, vers le bateau comité, courent davantage de risques de recevoir des renvois nocifs.

Dans la gestion des risques, on se doit d'établir des priorités dans les cas où les différents facteurs influant sur la prise de décision sont contradictoires. Dans la majorité des cas, considérer ces priorités dans l'ordre suivant donne de bons résultats, d'autant plus que la flotte est nombreuse et expérimentée :

- partir avec du vent frais ;
- rejoindre plus vite le côté favorable du plan d'eau ;
- partir plus près de l'extrémité favorable de la ligne.

X – 4) Stratégie après le départ

Comme nous allons le voir, elle dépend à la fois du vent et des courants (figure ci-dessous).

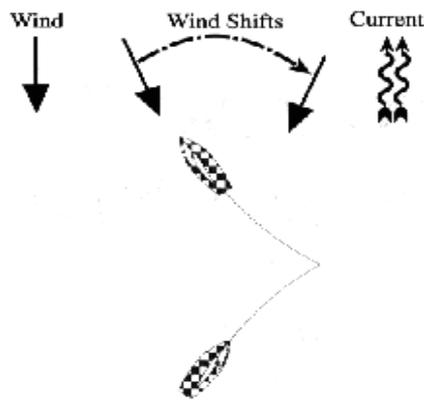


Fig128/ZZ195 : La stratégie dépend du vent et des courants.

Nous allons voir qu'il faut toujours essayer de négocier une bascule en se rapprochant du centre de la courbure (voir aussi paragraphe IX – 6 – 5).

Usuellement, puisque dans l'hémisphère Nord les risées plus fortes sont généralement des adonnantes tribord (hors effets de site), pour être intérieur adonnant dans une risée il faut se positionner plutôt à droite de la flotte. Dans l'hémisphère Nord, de ce fait, le côté droit du plan d'eau est souvent le côté favorable au près.

Cependant, les choses ne sont pas aussi simples, et nous devons considérer cette question plus en détail.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux conséquences stratégiques des bascules persistantes et oscillantes. Nous appelons bascule persistante une oscillation dont la durée est supérieure à celle du bord de près ou du bord de vent arrière, donc nous supposons que le vent n'aura pas le temps de revenir à sa direction initiale avant qu'on ait atteint la bouée.

X – 4 – 1) Bascules persistantes par rotation du vent

On les rencontre par exemple lors du passage d'un front froid qui entraîne une rotation du Sud-Ouest au Nord-Ouest, qui peut parfois s'effectuer très rapidement (moins d'une heure).

Quand la brise thermique s'établit, nous avons aussi une rotation au moindre effort, et pendant sa phase de renforcement, généralement une rotation à droite (paragraphe IX – 6 – 3).

Des bascules plus rapides peuvent avoir lieu au passage de nuages et de grains dans un front froid (paragraphe IX – 6 – 4).

Les effets de terre (plans d'eau cisailés) qui peuvent provoquer une rotation au fur et à mesure d'une progression dans un bord, impliquent une stratégie différente, que nous étudierons au paragraphe X – 4 – 2) suivant.

Prenons le cas d'un bord de près avec une rotation progressive à gauche (le vent tourne graduellement de la direction V1 vers la direction V2).

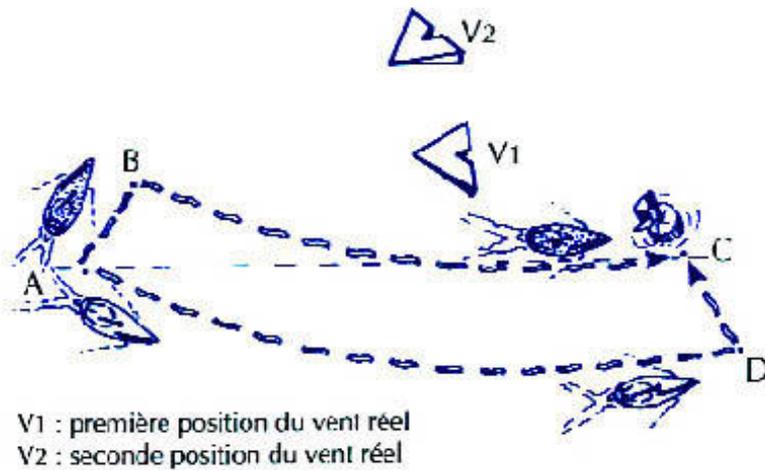


Fig192/Bernot : Traitement d'une bascule persistante à gauche au près.

Du fait de la rotation continue à gauche on attend donc une adonnante de plus en plus prononcée en bâbord amure. On est donc tenté de partir de suite bâbord, vers la droite du parcours, pour bénéficier immédiatement de cette adonnante.

Cependant, il faudra bien revenir sur la bouée dans un bord refusant (DC) désastreux.

L'autre bateau parti de suite à gauche (*donc du côté de la rotation*) fait d'abord un bord tribord (AB) refusant, mais pas encore trop et en tout cas moins que DC. Après son virement, il "prend le virage" à l'intérieur par rapport à l'autre bateau (bord BC beaucoup plus court que AD).

Dans le cas d'une bascule persistante on commence donc au près par le mauvais bord (refusant) sur lequel on a intérêt à faire de la vitesse pour se trouver rapidement plus loin « à l'intérieur du virage », après le virement. Sur le bord adonnant, on cherchera davantage le cap pour augmenter l'écart latéral avec les concurrents (car plus cet écart latéral est grand, plus on est à l'intérieur du virage, et plus on gagne sur les adversaires).

Au vent arrière, quand on tire des bords de grand-largue, on cherchera encore à "prendre le virage à l'intérieur":

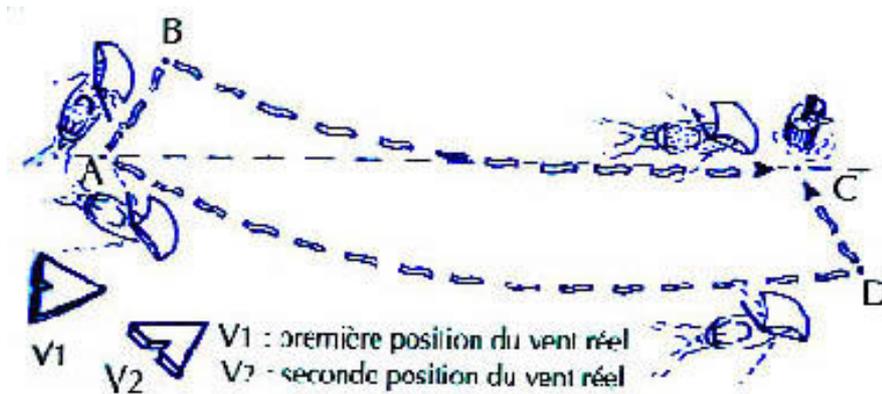


Fig193/Bernot : Traitement d'une bascule persistante à gauche au vent arrière.

Comme au près, on voit que ABC est plus court que ADC.

Maintenant, si on considère l'intégralité du parcours (réduit ici à une banane pour simplifier), comment mémoriser facilement la stratégie à suivre ? La figure ci-dessous donne quelques astuces qui facilitent la tâche du régatier :

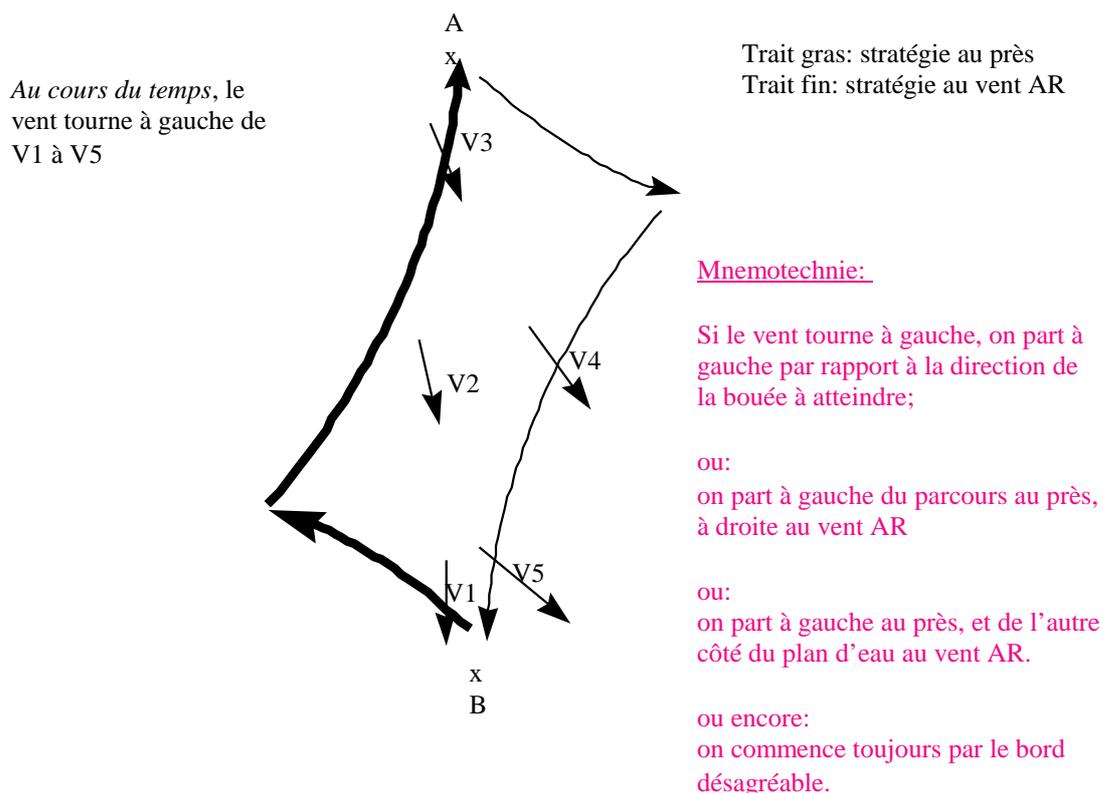


Fig194/Régate Chapitre 3 : Stratégie d'ensemble pour une bascule persistante à gauche.

Il y a cependant quelques risques et limites à cette stratégie, dont il faut être bien conscient :

- si le vent tourne tellement qu'on arrive à faire la bouée en un seul bord (au près comme au vent arrière): celui qui est d'abord parti sur le bord désagréable se retrouve hors cadre et perdant (cas relativement rare toutefois).
- L'inconvénient d'effectuer d'abord le bord refusant est que l'endroit du virement est difficile à déterminer car on est loin de la bouée. Il faut dans tous les cas virer avant d'atteindre la position théorique correspondant à un vent stable, sous peine de sortir du cadre et de perdre l'avantage de cette stratégie.
- Il faut être bien certain que le vent ne retournera pas à sa direction initiale après le virement. On se trouverait alors en fait dans une situation de bascules oscillantes. En partant d'abord sur le bord refusant, après le virement on se retrouverait à nouveau sur un bord refusant catastrophique.
- Si ce qu'on croit être une bascule persistante n'est qu'un effet de terrain, alors le vent qui tournait à gauche en montant au près, retourne forcément à droite en descendant au vent arrière, ce qui implique une stratégie opposée au vent arrière (voir paragraphe X – 4 – 2) suivant).

On insiste donc à nouveau sur la nécessité de collecter le maximum d'infos sur la météo générale et locale, et de partir tôt sur le plan d'eau pour essayer d'identifier le comportement du vent et de l'anticiper.

Si on suppose une bascule persistante, on devra essayer d'évaluer la vitesse de rotation du vent par rapport à la durée du parcours et juger si la stratégie ci-dessus vaut la peine d'être appliquée.

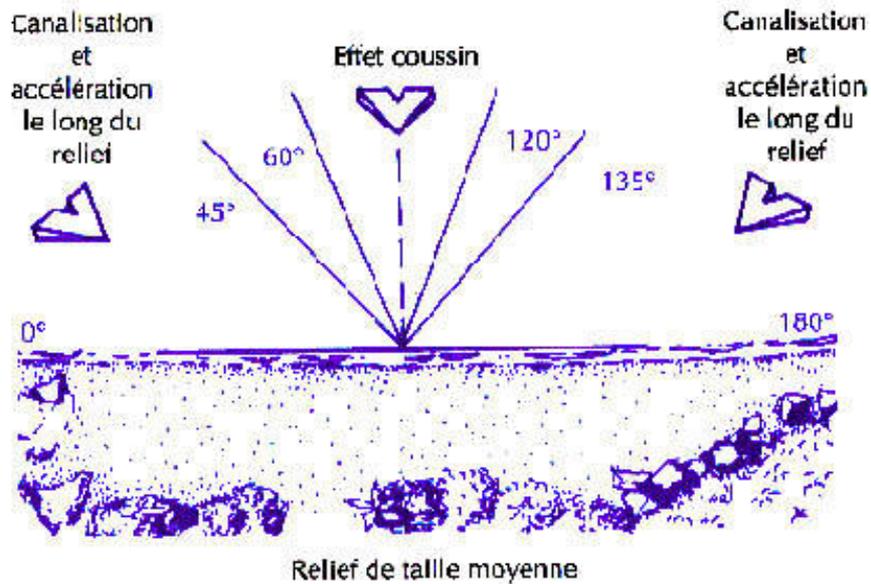
On peut penser qu'elle est surtout applicable aux plans d'eau marins, ouverts. Sur les plans d'eau intérieurs, les bascules oscillantes et surtout les effets côtiers seront prépondérants.

Quoiqu'il en soit, l'important est de ne pas se tromper sur la catégorie dans laquelle on "range" le comportement du vent observé, et ne pas hésiter à passer en cours de régates d'une stratégie à l'autre.

X – 4 – 2) Bascules persistantes par effet de site

La présence d'une côte dévie la direction du vent, de manière souvent heureusement prévisible (voir aussi paragraphe IX – 6 – 5). Les figures ci-dessous illustrent quelques exemples où l'on voit que si le vent attaque la côte sous un angle inférieur à 45-60° ce vent est accéléré et défléchi parallèlement à la côte. Il se crée donc une courbure continue de la direction du vent et une bascule persistante, qui contrairement au cas précédent n'évolue pas dans le temps mais dans l'espace : ceci implique une modification de stratégie par rapport à ce qui précède.

Côte moyennement élevée-vent du large



Côte élevée-vent du large

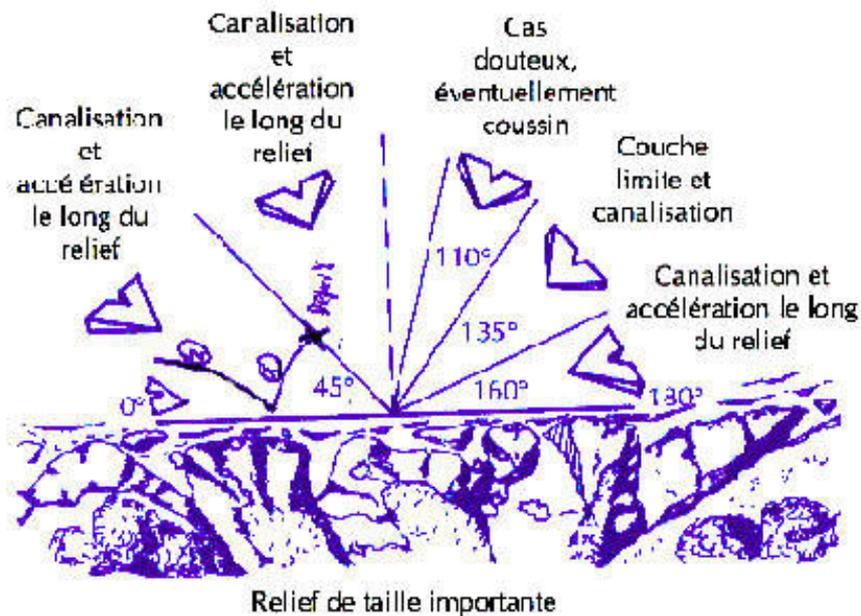


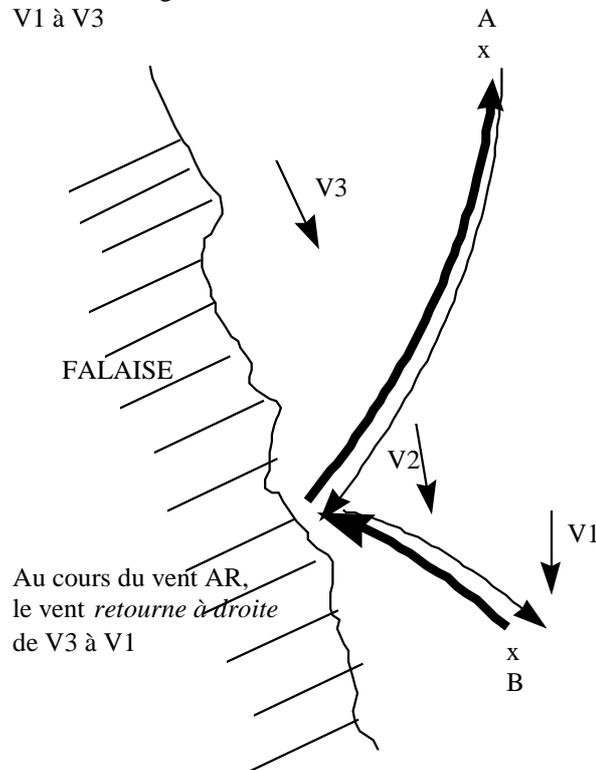
Fig211/Bernot : Influence du relief de la côte sur le vent.

Au près, si le relief fait tourner le vent à gauche, on cherchera le centre de la courbure comme précédemment décrit au paragraphe X – 4 – 1), donc on part à gauche.

La différence avec ce qui précède est qu'en redescendant au vent arrière, le vent ne continuera pas à tourner à gauche mais reviendra à droite sur sa position initiale ! Au vent arrière, le bord désagréable (adonnant) à faire en premier est donc ici un bord tribord vers la gauche du parcours, ou encore vers la droite si on regarde en direction de la bouée à atteindre.

Ce qui, traduit géométriquement, donne les tactiques ci-dessous pour le près et le vent arrière:

Au cours du bord de près, le vent tourne à gauche de V1 à V3



Trait gras: stratégie au près
Trait fin: stratégie au vent AR

Mnemotechnie:

Au près le vent tourne à gauche, on part à gauche par rapport à la direction de la bouée à atteindre;
au largue on refait le même parcours en sens inverse!

C'est le cas typique des plans d'eau de montagne: tous à la falaise !

Fig195/Régate Chapitre 4 : Traitement d'une bascule persistante par effet de côte.

X – 4 – 3) Bascules oscillantes

On les rencontre dans des masses d'air instables, par exemple passage de nuages de faible taille, vent de terre (ou vent de mer ayant traversé une certaine étendue de terre, cas des lacs landais).

Le vent oscille autour d'une direction moyenne, avec une période d'oscillations mesurée généralement en minutes.

Dans ces cas la stratégie est plus simple. La notion de bord désagréable décrite précédemment n'existe plus, il s'agit au contraire d'exploiter toutes les oscillations, en phase.

On virera donc lorsque le vent repasse dans le secteur refusant, et on empannera quand il repasse dans le secteur adonnant.

Ainsi, considérons par exemple que le vent moyen est au 0. Pour les directions de vent plus à droite (mettons de 0 à 20) on naviguera tribord amure au près. Pour les directions inférieures (340-360) on naviguera bâbord amures.

L'erreur à ne pas faire est de virer dès que le vent commence à refuser (ici de virer bâbord quand le vent repasse de 20 à 15). En effet, *par rapport au vent moyen*, la direction 15 est encore adonnante tribord ! (même si sur le bateau, on a la sensation d'un refus).

On ne doit donc virer que quand le vent repasse par sa valeur moyenne.

Cas particulier: technique "Wally" :

Si les bascules oscillantes sont de *très faible amplitude ou durée*, on hésitera à virer car la perte de temps due au virement est plus importante que le gain stratégique.

Par ailleurs, si on est dans une bascule persistante à laquelle se superposent des oscillations secondaires, on ne virera pas non plus si on est déjà du bon côté par rapport à la rotation d'ensemble, sauf si on cherche à augmenter encore l'écart latéral avec le reste de la flotte.

Comment alors négocier au mieux les variations locales de direction ?

X - 4 - 3 - 1) Technique « Wally » dans une adonnante

Considérons le schéma ci-dessous qui utilise la polaire de vitesse calée sur le vent instantané $V1$. On suppose que la rotation $V_m \rightarrow V1$ est une rotation pure sans changement de force du vent. Le cap-vitesse est donc le même pour chacun de ces 2 vents. Ce cap-vitesse idéal est représenté par le vecteur OB sur le schéma ci-dessous, qui est la polaire *calée sur le vent final* $V1$. Avant la rotation rapide, on navigue donc également à la vitesse OB , mais dans la direction OA .

Etant donné que les variations sont rapides, il y a de fortes chances qu'une refusante intervienne peu après la situation présente.

On a donc intérêt à optimiser le VMG pour le vent moyen.

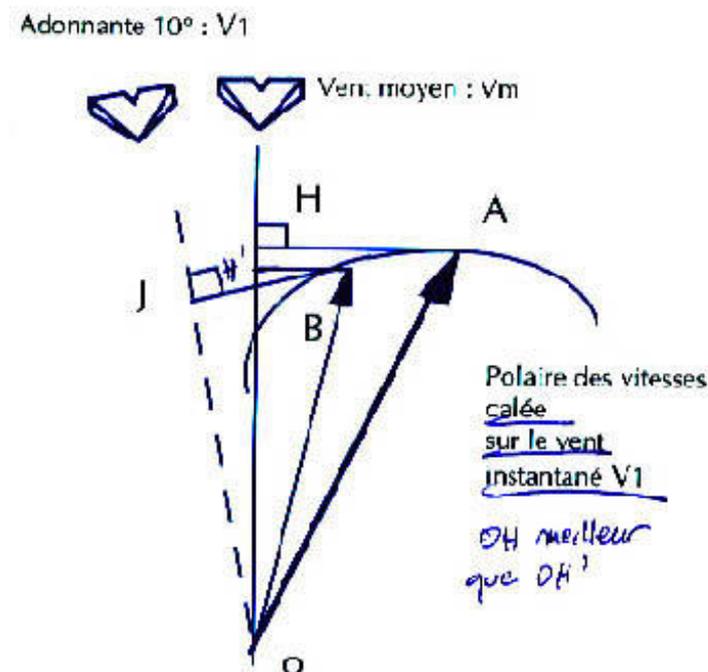


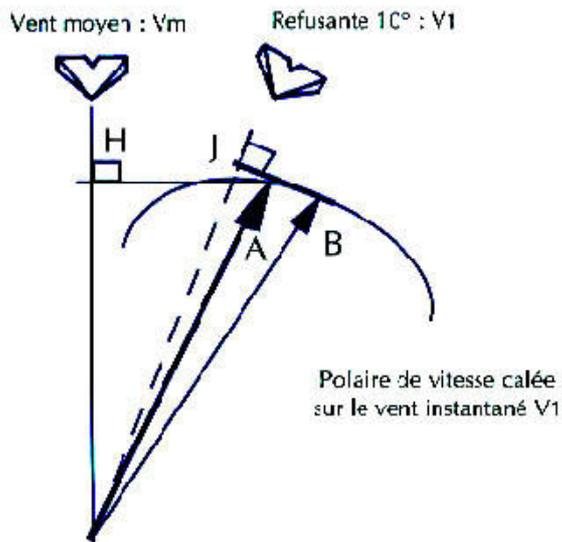
Fig196/Bernot : Wally : cas de l'adonnante.

Sur le schéma ci-dessus on voit que si on garde le cap OA la vitesse du bateau augmente puisque le vent adonne sans changer en force. La projection du vecteur OA (qui représente

cette nouvelle vitesse) *sur la direction du vent moyen* (point H) assure une progression sur la direction du vent moyen plus importante que la projection de OB (point H') qu'on obtiendrait si on lofait sur l'adonnante.

Au total, on optimise la progression sur la direction du vent moyen, donc vers la marque...

X - 4 - 3 - 2) Technique « Wally » dans une refusante



OB est la vitesse qui donne meilleur VMG (OJ) sur le vent instantané.
OA est la vitesse qui donne le meilleur VMG (OH) sur le vent moyen.
OA apporte donc un meilleur gain sur l'axe du vent moyen.
On fera donc OA.
Noter que ceci fait lofer de quelques degrés par rapport à la vitesse-cible du vent instantané.

Fig. 11 :
Refusante :
Il est meilleur de naviguer au meilleur VMG sur le vent moyen, plutôt qu'au meilleur VMG sur le vent instantané.
On devra naviguer "un peu plus serré" qu'on ne le pensait à la lecture des vitesses-cibles.

Fig197/Bernot : Wally : cas de la refusante.

Initialement, on navigue au meilleur cap-vitesse, donc à la vitesse OB mais dans la direction OA. Si le vent refuse et qu'on ne change pas de cap, on va ralentir à la vitesse OA. Mais la projection H de OA *sur la direction du vent moyen* est meilleure que celle de OB qu'on obtiendrait si on abattait dans la refusante.

Pour finir, dans les adonnantes comme dans les refus, on gagne en VMG sur le vent moyen si on maintient le cap...

Pour résumer dans le cas de bascules oscillantes rapides et de faible amplitude, si on décide de ne pas virer, il faut "filtrer" à la barre, c'est-à-dire retarder, ou au moins atténuer les changements de cap.

Evidemment ceci n'est valable que dans le cas de bascules rapides de faible amplitude. Si on prend un refus de 30° sans abatte, on s'arrête... Si le refus persiste, ou bien on continue (si on pense que le refus est une rotation de longue durée) ou bien on vire (si on pense qu'on est dans le cas oscillant).

Cette stratégie sera donc valable dans des vents légers à médium, les vents forts présentant rarement un caractère oscillant rapide.

De façon générale, lorsqu'on prévoit une bascule persistante ou oscillante, on doit partir au près dans la direction de la bascule (à droite si ça va tourner à droite), et on fait le contraire au vent arrière.

La dernière oscillation, avant la bouée au vent ou la bouée sous le vent, doit être traitée comme une bascule persistante puisque le vent n'aura pas le temps de retourner dans l'autre sens. Dans l'exemple ci-dessous, on prévoit que la dernière oscillation sera une bascule à gauche : il faut donc partir tribord vers le cadre gauche, même si ça refuse, et finir par un dernier bord adonnant. Dans le cas contraire, certes on prend une adonnante en bâbord, mais on peine à arriver sur le cadre tribord : la bouée refuse de passer par le travers du bateau, on peut faire « le tour de la bouée » sans jamais pouvoir virer pour la contourner !

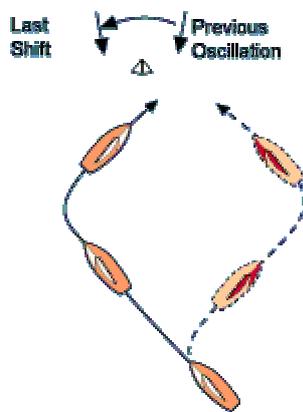


Fig135/ZZ196 : Avant la bouée au vent, traiter la dernière oscillation comme une bascule persistante.

X - 4 - 4) Stratégie court terme

Lorsqu'on n'a pas su ou pu prévoir le sens des bascules, on n'est pas pour autant complètement démuné, surtout si on est derrière au près (et devant au portant).

Au près les bateaux devant permettent de prévoir les oscillations qu'on va rencontrer. Etant donné qu'on n'a pas pu prévoir à l'avance la meilleure stratégie par rapport au vent, on va plutôt essayer d'exploiter les phénomènes affectant les adversaires à notre propre avantage. Il s'agit ici d'une tactique relative à la concurrence et non aux variations de vent prévues à l'avance.

C'est la situation courante que connaît le régatier moyen qui débarque sur un plan d'eau inconnu sans avoir étudié la météo...

X - 4 - 4 - 1) Cas des bascules persistantes

Rappelons qu'il s'agit des cas de rotation de vent dues à un phénomène météo ou à des effets de côte.

La figure ci-dessous illustre quelques situations classiques au près. Dans tous les cas de figure le bateau en avant est là pour indiquer à celui qui est derrière la marche à suivre. En particulier, il permet de déterminer le sens de la courbure de vent qu'on va rencontrer. Ceci fait, il suffit d'appliquer les règles des paragraphes X - 4 - 1), et X - 4 - 2) (bascules

persistantes ou oscillantes) qui préconisent de toujours se trouver à l'intérieur du virage par rapport aux adversaires.

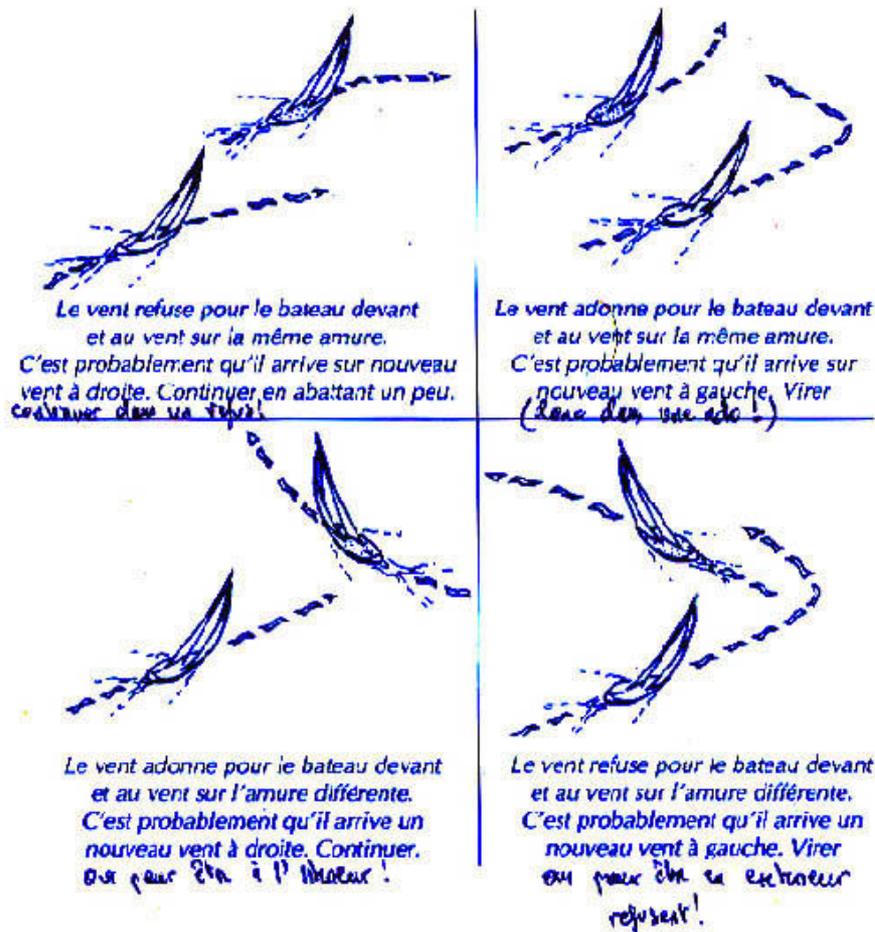


Fig198/Bernot : Utilisation des autres bateaux en stratégie court terme.

Dans le cas représenté en haut à gauche, ça refuse devant, donc il y a rotation à droite. Il faut abattre (et non virer de suite) pour toucher plus vite la bascule, puis virer si possible *après* le bateau devant (attention à ne pas sortir du cadre) pour prendre l'adonnante à son intérieur.

En haut à droite, ça adonne devant. Il faut virer quand même pour chercher le centre de la courbure et se trouver intérieur adonnant par rapport à l'adversaire !

En bas à gauche, ça adonne devant sur l'autre amure. Donc ça va refuser pour nous, continuer dans le refus et virer après avoir croisé derrière ! (on sera alors intérieur adonnant).

En bas à droite, ça refuse devant sur l'autre amure: ça va adonner pour nous; donc virer avant de croiser pour prendre le refus sous le vent de l'adversaire (en extérieur refusant), ce qui amènera en position favorable pour l'adonnante qui suivra après le virement suivant (encore et toujours intérieur adonnant) !

En résumé il faut quasiment faire le contraire que ce qu'on serait tenté de faire (si on ne réfléchissait pas...)

Nous avons insisté sur la nécessité de se retrouver, autant que possible, en intérieur adonnant ou en extérieur refusant par rapport à la flotte.

En effet, une adonnante avantage le bateau au vent, un refus celui sous le vent (figures ci-dessous).

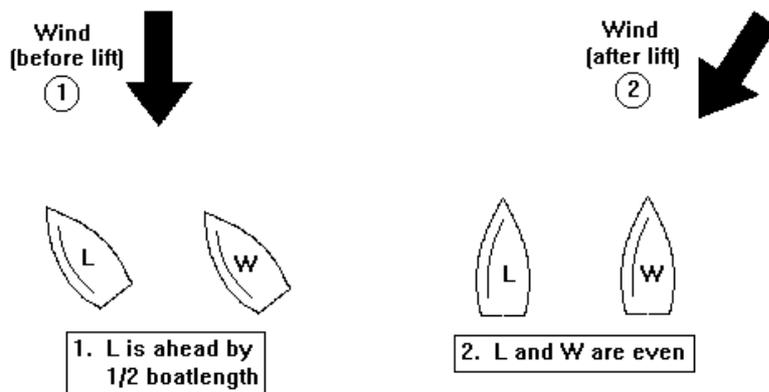


Fig143/ZZ76 : Une bascule à droite favorise le bateau le plus à droite. Une adonnante favorise le bateau au vent.

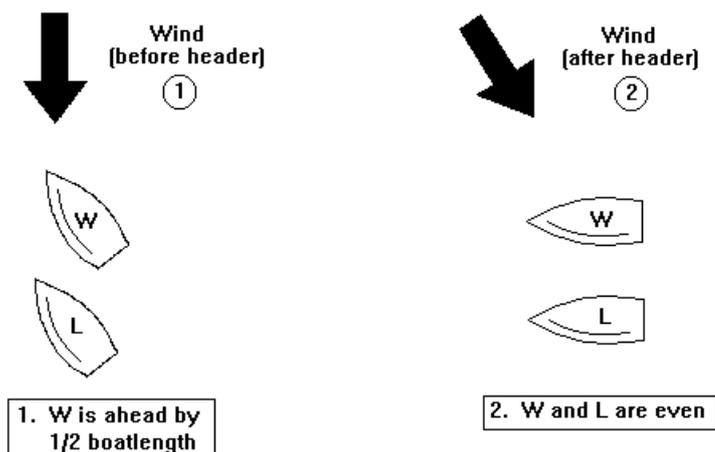


Fig144/ZZ76 : Une bascule à gauche favorise le bateau le plus à gauche. Un refus avantage le bateau sous le vent.

L'avantage procuré à l'un ou l'autre bateau dépend bien sûr de leur écart latéral. On peut calculer que pour une rotation de 10° , le gain enregistré par le bateau avantagé est de l'ordre du quart de l'écart latéral, d'où la nécessité d'en créer quand on est derrière ou de le minimiser quand on est devant (voir aussi paragraphe X – 7 – 1). Nous avons là une autre bonne raison de nous positionner du bon côté de la flotte par rapport à la bascule à venir... Si on suspecte une bascule à droite, on cherche donc à se placer à droite de la flotte.

X – 4 – 4 – 2) Cas des bascules oscillantes

Dans ce cas, la stratégie doit être modifiée car le vent va finir par retourner dans l'autre sens.

Reprenons notre premier exemple (en haut à gauche sur la fig198/Bernot). Si on sait que le refus essuyé par le bateau devant sera temporaire (soit parce qu'on voit que plus loin devant,

ça adonne à nouveau, soit parce qu'on a déjà expérimenté des oscillations) il faudra exploiter le refus, donc virer.

Si on se trompe d'interprétation, on continue dans le refus, et on est pénalisé !

On doit donc étroitement surveiller les adversaires, parfois même loin devant.

Au portant, que l'on soit dans le cas persistant ou oscillant, on appliquera les mêmes stratégies. Mais cette fois, bien sûr, on surveille derrière...

Pour résumer : dans des vents aléatoires et non prévus, on utilise les adversaires pour obtenir des prévisions à court terme.

Dans le cas persistant, on cherche l'intérieur du virage par rapport aux adversaires (ne pas perdre le cadre de vue).

Dans le cas oscillant, on exploite un refus en virant et une adonnante en lofant.

X – 4 – 5) Traitement des bascules persistantes au vent de travers

Ici, par vent stable, on va tout droit sans tirer de bords. Cependant la situation se complique un peu si on s'attend (parce qu'on voit les adversaires devant, ou parce qu'on prévoit un effet de côte ou des oscillations) à des rotations qui vont persister pendant toute la durée du bord.

Ainsi, si ça adonne devant: on va anticiper l'adonnante, mais pas complètement ("filtrage"): si le bord est relativement serré, on va abattre un peu pour accélérer *avant* que la rotation nous touche.

Ainsi, on gagne en vitesse avant la rotation; après la rotation, puisque ça adonne, on conservera une bonne vitesse lorsqu'on devra relofer vers la marque. Le gain de vitesse obtenu est généralement supérieur à la perte liée à l'allongement de route.

Si le bord est assez abattu, il faudra également abattre un peu avant la rotation. On évitera ainsi, après la rotation, de se retrouver dans une situation où on ne peut plus faire la marque sans tellement abattre qu'on n'a plus de vitesse.

Si ça refuse, évidemment on fait l'inverse: on lofera un peu.

Dans tous les cas on évitera d'anticiper complètement: c'est-à-dire que si ça adonne de 20 ° devant, on n'abat pas tout de suite de 20°, mais plutôt de 10°. Encore une fois, on filtre un peu les variations prévues. On évite ainsi de trop allonger la route et d'être trop pénalisé si les prévisions se révèlent fausses.

Rappelons (paragraphe VIII – 3 – 2) que lorsqu'on rencontre plusieurs oscillations sur le bord de travers, il est également préférable de les « filtrer » un peu à la barre pour limiter l'allongement de la route.

X – 4 – 6) Stratégie dans les cas contradictoires

Considérons par exemple un plan d'eau affecté par un effet de terre, où on attend une rotation *persistante* à droite, mais dans du vent plus faible... Va t'on à droite pour profiter de la bascule ou reste-t-on où on est pour aller plus vite ?

La réponse dépend de la force du vent. Dans les vents faibles, la vitesse du bateau est très sensible aux variations de force. On privilégie alors la vitesse par rapport aux bascules en direction : dans cet exemple, on reste dans le vent plus fort, car on gagne plus au vent en naviguant 2 fois plus vite même dans un refus de 20 °.

Dans les vents plus forts, la vitesse ne dépend plus guère de la force (on est déjà à fond ou presque) : on exploite donc la bascule en gain sous le vent ou au vent.

Pour résumer, dans les conditions où le bateau peut accélérer beaucoup, on cherche le vent plus fort, sinon on exploite les bascules.

Evidemment ce qui précède est inapplicable au cas oscillant, car il n'y a pas de corrélation évidente entre force et direction du vent : statistiquement les adonnantes ne sont pas plus fortes que les refus, on se ramène donc au cas oscillant général en exploitant les bascules.

X – 5) Effet du courant

Evidemment le courant modifie la route du bateau sur le fond, mais il agit aussi sur le vent apparent. Au près, un courant favorable qui « monte » le bateau augmente le vent apparent ; un courant défavorable le diminue. Ceci a un retentissement immédiat sur le déplacement des bords du cadre : dans un courant défavorable, au près comme au large il faut aller plus loin avant de virer ou d'empanner vers la bouée. Au près, un courant perpendiculaire au vent et qui s'écoule de gauche à droite déplace le bateau vers la droite : celui-ci reçoit donc un vent apparent plus à droite, apparemment adonnant tribord.

De façon générale, le courant ajoute une composante dans le vent apparent, qui est directement opposée à sa vitesse. Cet effet a une influence directe sur le choix de la bonne stratégie.

Pour illustrer ceci, envisageons divers cas de figure.

Pour commencer, prenons l'exemple simple où le courant est favorable au près, et plus fort du côté droit du parcours (figure ci-dessous).

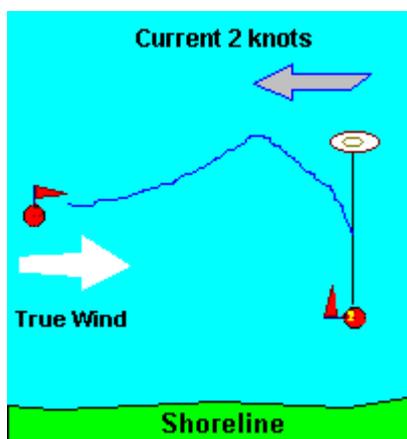


Fig153/ZZ204 : Si le courant est favorable chercher le plus fort courant au près.

Il est alors évident que le côté droit du parcours est favorisé au près, et le côté gauche au portant.

Prenons maintenant le cas un peu plus compliqué d'un courant perpendiculaire au vent, s'écoulant par exemple de droite à gauche, et plus fort en haut du parcours (figure ci-dessous).

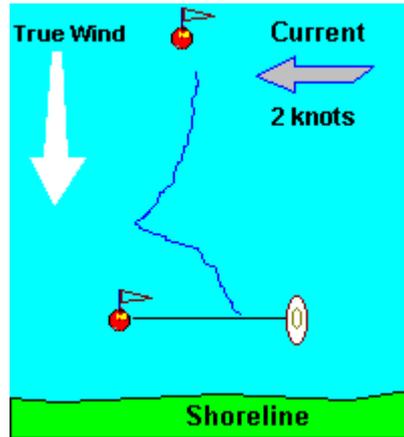


Fig152/ZZ204 : Effet d'un courant perpendiculaire de force inégale de bas en haut du près. Ici il engendre une bascule progressive à gauche en montant, donc il faut partir à gauche (effet du courant sur la rotation du vent apparent).

Le courant dirigé de droite à gauche ajoute une composante opposée dirigée de gauche à droite dans le vent apparent. Plus on s'approche de la bouée, plus on ressent une adonnante bâbord amures. On se retrouve donc dans le cas d'une bascule persistante vers la gauche, et nous savons (paragraphe X – 4 – 1) que nous devons partir au près à gauche du plan d'eau, et de l'autre côté au portant.

Envisageons maintenant le cas encore plus tordu où une bande de courant adverse, d'étendue limitée, traverse le plan d'eau en diagonale. Supposons que ce courant diagonal vient de droite par rapport au vent (figure ci-dessous). Au près, il est donc globalement défavorable.

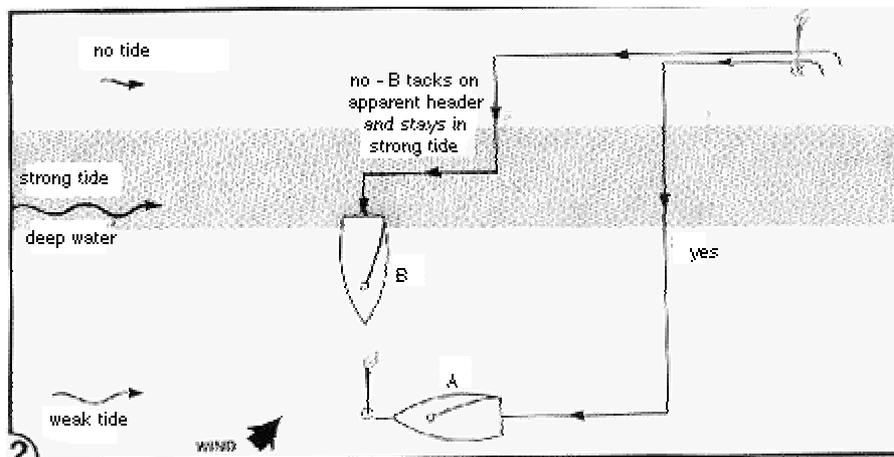


Fig151/ZZ203 : Effet d'une bande de courant adverse diagonale dans le bord de près.

Supposons qu'un bateau tribord amures aborde cette bande de courant. Puisque le courant vient de droite par rapport au vent, le bateau expérimente un refus en tribord amures. Il peut alors être tenté de virer (cas du bateau B sur la figure), mais, ce faisant, il va rester plus longtemps dans la veine de courant et perdre du terrain. Il est préférable de rester dans le refus pour s'extraire plus vite de ce courant défavorable.

Puisque nous parlons de courant diagonal, nous en profitons pour contredire une idée couramment admise.

Si nous prenons l'exemple où, au près, le courant est exactement opposé à la route suivie, nous pouvons penser qu'un lof de quelques degrés favorisera le cap, l'étrave du bateau étant « montée » vers la bouée au vent par le courant.

Or, l'effet du courant sur le vent apparent reste le même qu'on lofe ou pas, puisqu'il ne fait qu'ajouter une composante vitesse constante dans le vent apparent. Et puisqu'en lofant un peu, la vitesse du bateau évolue peu, et que d'autre par celle du vent réel reste constante, il n'y a aucune raison de constater une brutale variation de vent apparent.

Il ne faut pas non plus compter sur un quelconque effet hydrodynamique sur la carène, car n'oublions pas que lorsque la vitesse du bateau est constante, les forces antidérive des appendices et de la carène équilibrent exactement la composante de dérive de la force vélique, ce qui implique une incidence définie pour l'écoulement de l'eau sur les appendices (paragraphe IV – 1). Un lof de quelques degrés ne changera rien à cette affaire, l'incidence de l'écoulement devant rester la même. Dans le courant, le bateau se trouve sur un tapis roulant et se déplace avec lui.

Il n'y a donc aucun intérêt à lofer dans un courant diagonal pour se faire monter vers la bouée.

X – 6) Gestion du cadre

Lorsque la stratégie que nous avons précédemment définie nous approche de la bouée au vent, nous devons commencer à déterminer la meilleure façon d'aborder les bords du cadre.

Il est préférable d'aborder le cadre tribord le plus tard possible, surtout dans les cas où la direction du vent est instable.

En effet, supposons que nous effectuons le bord de près en deux bords seulement. Après le virement, nous avons donc un long bord tribord à tirer. Si une adonnante survient, on se retrouve hors-cadre (figure ci-dessous).

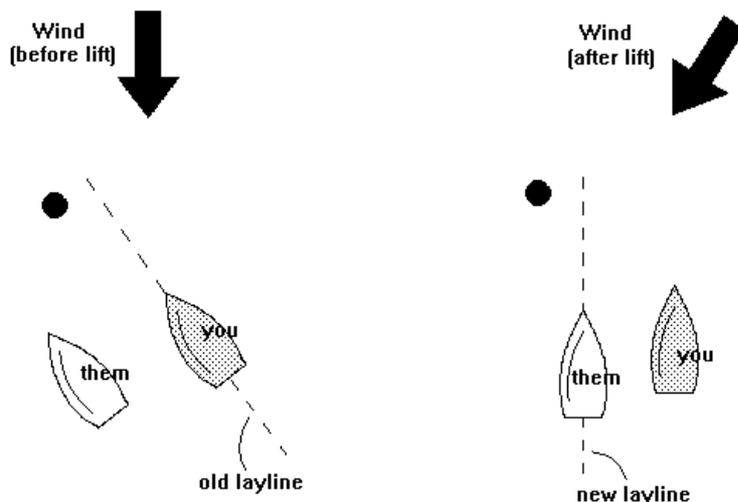


Fig146/ZZ76 : Trop tôt sur la layline une adonnante nous met hors-cadre.

Et si c'est un refus, les bateaux sous le vent qui ne sont pas encore sur le cadre vont le prendre en extérieur refusant, et seront donc avantagés.

Toute bascule est donc défavorable en bord de cadre.

Par ailleurs, s'aligner en bord de cadre derrière un ou plusieurs adversaires augmente les risques de renvoi nuisible, sans donner la possibilité de s'en échapper (figure ci-dessous).

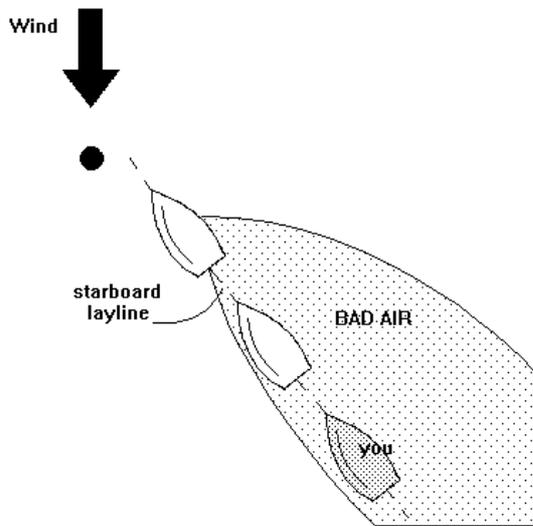


Fig145/ZZ76 : Trop tôt sur la layline les bateaux alignés devant nous empoisonnent.

On doit donc s'efforcer d'aborder le cadre tribord le plus tard possible. Même si le côté droit du parcours est favorisé, ceci peut donner le type d'approche ci-dessous, où toutes les oscillations à gauche sont anticipées en effectuant de petits contre-bords en tribord amures vers la gauche du parcours, avant de parvenir en limite de cadre.

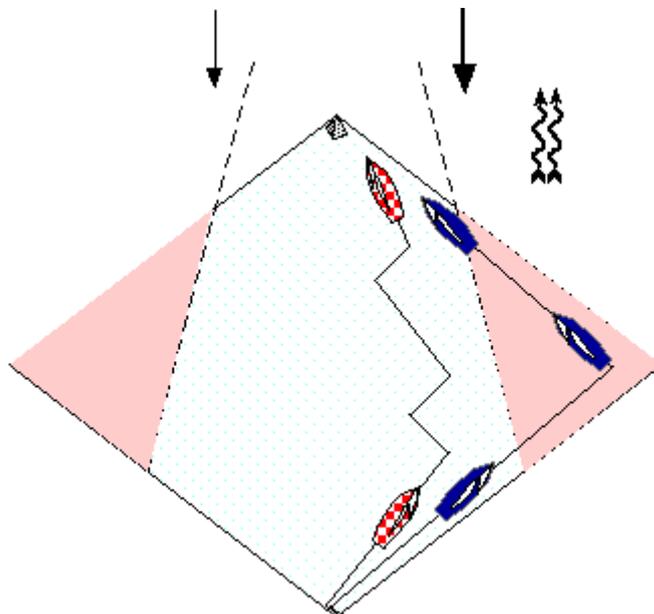


Fig129/ZZ195 : Naviguer du côté favorable mais ne pas aborder le cadre trop tôt.

X - 7) Contrôle et tactique rapprochée

X - 7 - 1) Contrôle

Nous abordons maintenant la tactique rapprochée vis-à-vis des adversaires proches. Si la stratégie précédemment définie s'est révélée bonne, nous pouvons être en mesure, en vue de l'arrivée, de contrôler nos adversaires : nous adoptons alors une attitude défensive. Les adversaires, eux, peuvent plutôt adopter une stratégie plus offensive, s'ils espèrent encore gagner des places.

En tête, il vaut mieux garder un contrôle assez lâche, sauf si l'adversaire est très près. En effet, si nous virons ou empannons exactement en même temps qu'un adversaire relativement éloigné, nous risquons de le faire à l'envers par rapport aux oscillations du vent, alors que l'adversaire est lui parfaitement en phase.

On préfère donc simplement se placer du bon côté par rapport à la flotte ou aux adversaires dangereux, par exemple à droite si on s'attend à une bascule à droite, ce qui permettra de la prendre en intérieur adonnant.

Dans les cas où on ne sait pas ce que va faire le vent, il est avantageux d'obliger un adversaire proche à nous accompagner sur un bord, en adoptant une couverture serrée sur un bord et plus lâche sur l'autre (figure ci-dessous).

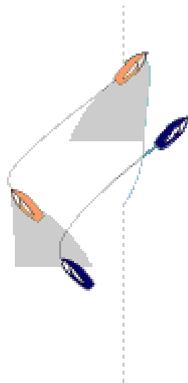


Fig137/ZZ196 : Couverture serrée en tribord et lâche en bâbord pour forcer l'adversaire à nous accompagner en bâbord (quand on ne sait pas prévoir ce que va faire le vent).

La couverture serrée contraint l'adversaire, pris dans le dévent, à virer. Il suffit de l'accompagner dans son virement pour progresser de concert vers le bord du cadre, où les risques tactiques disparaissent pour le bateau qui est devant.

Un autre moyen de forcer un adversaire à nous accompagner est de l'empêcher de virer (figure ci-dessous).

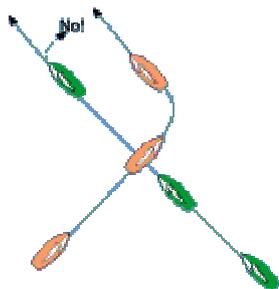


Fig138/ZZ196 : Autre moyen de forcer l'adversaire : l'empêcher de virer.

Cette tactique est particulièrement utile en approche de cadre, l'adversaire sous le vent devant attendre que le bateau au vent vienne, ce qui en sortie de virement sur le cadre le force tôt ou tard à s'aligner derrière.

Par ailleurs, puisqu'un écart latéral peut engendrer un gain très important en cas de bascule, les bateaux devant doivent chercher à réduire l'écart latéral avec les adversaires, ceux de derrière à l'augmenter (évidemment, dans le bon sens par rapport aux bascules à venir).

X – 7 – 2) Tactique rapprochée

D'autres tactiques rapprochées sont utiles, notamment à l'approche du cadre ou des bouées dans des flottes compactes. Dans ce type de flottes et de situation, ces tactiques deviennent même prépondérantes sur la stratégie générale.

Lorsque par exemple on s'approche du cadre tribord sous le vent d'un paquet important de bateaux, il est utile de virer légèrement au vent d'un adversaire déjà tribord amures (le bateau bleu sur la figure ci-dessous). En effet, en sortie de virement, on se trouve dans une position telle que ce bateau force ceux qui arrivent en bâbord amures à l'éviter soit en passant derrière (le bateau jaune) soit en virant dessous (le bateau gris). De cette façon, ce « bloqueur » nous évite les situations potentiellement gênantes engendrées par un paquet compact de bateaux bâbord amures en approche de cadre, donc agressifs.

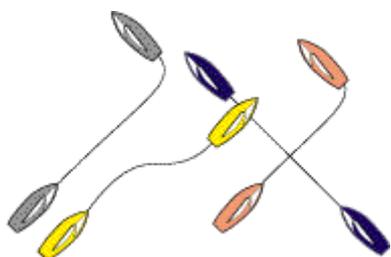


Fig133/ZZ196 : Utilisation d'un bloqueur en protection (en bleu, nous on est en orange : le bloqueur nous débarrasse du gris et du jaune).

En catamaran de sport, il peut être intéressant de sortir un peu du cadre pour le dernier virement avant la bouée au vent, car ceci garantit du vent frais.

Les bateaux tribord sur le cadre ont la possibilité de leurrer ceux qui arrivent bâbord. En effet, si on est certain de faire la bouée avec une marge de sécurité, on peut abattre avant de croiser les bâbords, qui pourront alors croire que nous ne faisons pas la bouée, et être tentés de virer plus loin, hors cadre. Inversement, quand on est trop juste, lofer avant de croiser les bâbords peut leur faire penser qu'il est temps de virer, alors que c'est encore trop tôt.

Lorsqu'on arrive bâbord amures près de la bouée au vent, il est nécessaire de viser longtemps à l'avance un trou dans la file des bateaux tribords, dans lequel on pourra croiser pour virer un peu hors-cadre. Il est en effet très difficile, surtout en catamaran de sport, de virer sous le vent

d'un paquet compact de bateaux tribord et de faire quand même la bouée au vent sans essayer une série de dévents.

En sortie de la bouée sous le vent, il est fréquent que les bateaux devant lofent pour mettre ceux qui les suivent dans leur renvoi. On est souvent contraint d'effectuer un petit contre-bord tribord amures pour ce dégager de cet alignement de bateaux, même si le côté favorable du parcours est à droite. Ici aussi, il faut prévoir un trou dans la file des bateaux qui descendent vers cette bouée sous le vent sans l'avoir encore contournée (figure ci-dessous).

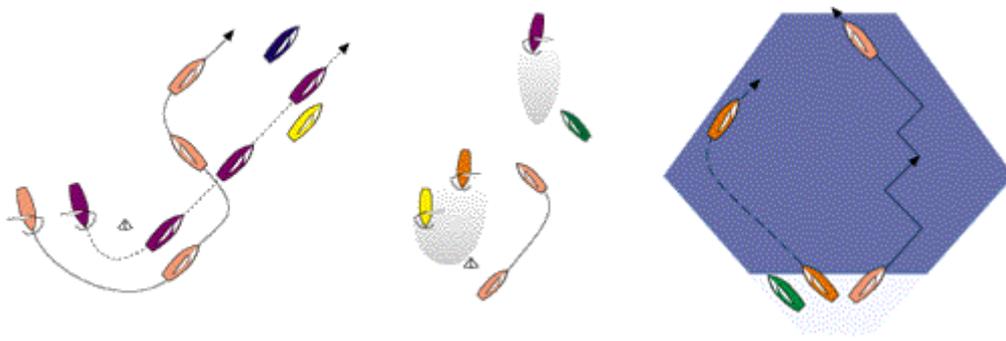


Fig134/ZZ196 : Contre-bord à la bouée sous le vent pour retrouver du vent frais ou virement tribord dans un trou.

Leurs dévents, vite traversés, ne seront peut-être pas très nocifs, mais leurs sillages qui agitent le plan d'eau dans tous les sens peuvent l'être énormément.

X – 7 – 3) Passage de bouées, ligne d'arrivée

Nous venons de voir comment on peut approcher la bouée au vent.

A la première bouée de largue, celui qui est à l'intérieur est prioritaire. On essaie donc de finir le bord engagé à l'intérieur des adversaires. C'est néanmoins une tactique qui peut s'avérer très dangereuse dans un gros peloton, car il est illusoire de croire que cinq bateaux qui enroulent ensemble la bouée se pousseront tous en chœur pour laisser passer un sixième qui s'engage à l'intérieur... contourner le paquet par l'extérieur et empanner plus tard s'avère souvent payant dans ces cas-là, et garantit de plus une route dégagée sous le vent du paquet sur le deuxième largue.

Il vaut mieux finir le deuxième largue trop lofé (donc trop vite) que trop abattu (donc trop lentement). Dans ce dernier cas la rotation à imprimer au bateau, pour repartir au près en enroulant la bouée, est très importante et empêche la relance immédiate. Néanmoins arriver, même trop lofé, à l'intérieur d'un paquet de bateaux peut s'avérer payant, car ceux qui sont à l'extérieur, non prioritaires, doivent attendre que ceux qui sont à l'intérieur aient achevé leur lof. Il vaut mieux cependant éviter de pousser cette tactique à l'extrême en arrivant tribord sur la bouée sous le vent, car même si on est prioritaire, le nécessaire empannage suivi d'une auloffée en grand arrête le bateau qui sera dépassé de toute façon sous le vent par les bâbords.

Enfin, on ne peut clôturer élégamment une manche de régates sans franchir la ligne d'arrivée du côté de son extrémité favorable, qui est son extrémité sous le vent.

Pour la déterminer, on peut s'aider des drapeaux sur le bateau d'arrivée, ou observer le cap, lorsqu'ils franchissent la ligne, de ceux qui sont devant. Mais alors ceci implique forcément que tous les bons conseils que nous venons de donner n'ont pas été si bien suivis...

Une démarche de progrès

Nous n'insisterons jamais assez sur la nécessité d'un entraînement soutenu sur l'eau. Les concepts que nous avons exposés dans cet ouvrage ne sont là que pour faciliter la tâche de l'équipage. Après de nombreuses heures de navigation, ils pourront être assimilés sous forme d'automatismes et de sensations physiques qui libèrent l'esprit des problèmes de réglage ou des considérations de tactique rapprochée. On pourra alors mieux se consacrer aux aspects stratégiques, qui deviennent de plus en plus déterminants quand le niveau des flottes auxquelles on se trouve confronté augmente.

C'est à l'entraînement qu'on teste le matériel et les réglages. Il ne faut pas hésiter à prendre le risque d'essayer des réglages très différents de ceux auxquels on est habitué. Dans cette matière, les habitudes engendrent la sécurité, mais la sécurité empêche de progresser.

S'entraîner seul est rarement profitable, et souvent ennuyeux. Un bon réglage peut améliorer la vitesse de quelques dixièmes de nœud. C'est insuffisant pour pouvoir l'apprécier seul, mais suffisant pour gagner une régates ou au contraire se retrouver dans les profondeurs du peloton. Le speed-test à plusieurs permet de déterminer les vitesses-cible pour chaque condition de vent et de mer. Un équipage bien entraîné peut remplacer la mesure de la vitesse par les sensations. Il peut alors rapidement juger, en compétition, si sa vitesse nécessite ou pas un ajustement des réglages.

Par ailleurs, lorsqu'on teste un plan d'eau, comment savoir si l'on a bien négocié une bascule quand on navigue seul ?

C'est aussi à l'entraînement qu'on apprend progressivement à minimiser les pertes de temps liées aux manœuvres et aux passages de bouées. On cherchera également à améliorer la maîtrise du bateau dans les phases statiques, particulièrement importantes dans les départs de grosses flottes.

En compétition, il est pratiquement inévitable de faire des erreurs. Il faut les accepter avec humilité, car ruminer ses fautes tout le reste de la manche ou de la régates ne fait que ruiner la concentration. Il sera toujours temps de les analyser plus tard, au calme, pour trouver le moyen de ne pas les reproduire. Suivre un bateau plus rapide ne doit pas non plus être considéré comme dégradant, et peut apporter beaucoup d'informations techniques et tactiques.

Et surtout, on ne doit jamais être certain d'avoir trouvé LA vérité, mais simplement chercher à l'approcher au plus près.

Bibliographie

Les références indispensables:

Aéro-hydrodynamic of Sailing. C.A. Marchaj. Ed. Adlard Coles.

Sailing Theory and Practice. C.A. Marchaj. Ed. Adlard Coles.

Les voiles: comprendre, régler, optimiser. Bertrand Chéret. Collection Biblio/voiles – Ed. FFV/Chiron.

Vent et régates : les stratégies. Jean-Yves Bernot. Collection Biblio/voiles – Ed. FFV/Chiron.

Le Catamaran de Sport. François Salle. Collection Biblio/voiles – Ed. FFV/Chiron.

Fera-t-il beau demain ? CNRS. Centre Georges Pompidou.

Météo pratique. René Mayençon. Editions maritimes et d'outre-mer / Neptune

Et sur Internet :

Internet regorge d'informations sur les différents sujets que nous avons abordés dans ce livre. Cependant, il s'agit d'un univers aussi mouvant que le vent et la mer : nous ne pouvons donc garantir la validité à long-terme des liens indiqués ci-dessous... Par ailleurs la grande majorité de ces pages est écrite en anglais.

Aéro-hydrodynamique

Dynamique des fluides (Université de Washington) :
<http://courses.washington.edu/phys208/volume5.html>

Sailing the Wind - 1 : <http://wings.ucdavis.edu/Book/Sports/instructor/sailing-01.html>

Chapter 6 Aerodynamics (Simon Quellen Field) :
<http://scitoys.com/scitoys/scitoys/aero/aero.html>

Team-420-aérodynamique : <http://www.team-420.org/physique/pres-comment.html>

Projet Voile (Université Le Havre) :
<http://www.multimania.com/margreg/FRANCAIS/home.html>

Le jeu du vent dans les voiles (Bertrand Chéret) : <http://www.segel.ch/jeu-du-vent/>

Laser, aéro et hydrodynamique (Jehan Vanpoperynghe) : <http://www.francelaser.org/>

Laser, équilibre de route (Jehan Vanpoperynghe) : <http://www.francelaser.org/>

Laser, équilibre de route (application) (Jehan Vanpoperynghe) : <http://www.francelaser.org/>

470 sail aerodynamics (WB Sails) : <http://www.wb-sails.fi/news/470NewsAero/470Aero.html>

Sail shape & aerodynamics (WB Sails) : http://www.wb-sails.fi/news/99_1_AeroShape/Aero.htm

The Quest for the Perfect Shape (WB Sails) : http://www.wb-sails.fi/news/98_11_PerfectShape/Main.htm

Tom Speer - Home : <http://home1.gte.net/tspeer/>

Wingmast Aerodynamics (Tom Speer) : <http://home1.gte.net/tspeer/Wingmasts/mast.htm>

Minimum Induced Drag of Sail Rigs and Hydrofoils (Tom Speer) :
<http://home1.gte.net/tspeer/Planforms/Planar.htm>

Planform (Torbjörn Linderson) : http://www.nmi.se/trinity_flyer/large_roaches.htm

Square tops (Torbjörn Linderson) : http://www.nmi.se/trinity_flyer/square_tops.htm

SailTrimSim (WB Sails) : <http://www.wb-sails.fi/news/SailTrimSim/TrimSimFrames.htm>

Sailing Aerodynamics (Hanley Innovations) :
<http://www.hanleyinnovations.com/windsurf.html>

SPLASH, the world's leading free-surface panel code (Bruce Rosen - South Bay Simulations, Inc.) : <http://www.panix.com/~brosen/>

RELAX: it's only simulation (Peter Heppel) : <http://www.seahorse.co.uk/relax12/relax1.html>

HullDrag-32 (Hans G. Zwakenberg) : <http://www.zwakenberg.de/hulldrag/>

Velocity's VPP Polar Sailboat Speed Prediction System (Peter Schwenn) :
<http://www.schwenn.com/>

VelocityPrediction Software the Boat Design and Boatbuilding Directory :
http://www.boatdesign.net/directory/Software/Velocity_Prediction/

AeroHydro's velocity prediction program (AeroHydro, Inc.) :
<http://www.aerohydro.com/products/ahvpp.htm>

Architecture, concepts

Comparison of Yacht Hull design. (Julian Kidd) :
<http://www.users.bigpond.com/jkidd/eefiles/ee.htm>

Catapaulting to the Future (Steve Callahan) : <http://www.2hulls.com/archive/GenArticle/Catapaulting.html>

La voile sans quille ni dérive (Ph. Duvaux) : <http://www.multimania.com/aoc86/>

Techniques Avancées (ENSTA) : http://www.ensta.fr/~dsim/dos_tech.html#voiles

The design of a 52ft. Aerorig cruising catamaran. (John Shuttleworth) :
<http://www.steamradio.com/JSYD/Articles/52AeroDesign.html#Intro>

Présentation conceptuelle de l'engin (Innovoile) :
<http://www.mko.freesurf.fr/innovoile/engin.html>

Naval Designer - Architecture navale (Vincent de Montard) : <http://www.navaldesigner.com/>

Yacht Design Software (Howard Young) : <http://home.att.net/~hcyoung/>

Hullform (Blue Peter Marine Systems) : <http://www.hullform.com/>

MasterSHIP (Yachting Consult) :
<http://www.yachtingconsult.com/mastership/MasterSHIP/mastership.html>

New Wave System Inc. Home Page : <http://www.newavesys.com/>

WinDesign (Université de Southampton) :
<http://www.soton.ac.uk/~wumtia/brochures/VPP.html>

Wolfson Unit M.T.I.A. : <http://www.soton.ac.uk/~wumtia/>

Virtual Marine Arsenal : <http://www.7seas.cjb.net/>

Conception de voiles, voileries

AB Sail Design – Visu : <http://www.sailserv.com/absd/visu.htm>

Doyle sails : <http://www.doylesails.com/sails-index.htm>

Doyle sails : <http://www.doylesails.com/designinfo-process.htm>

Doyle sails (Matériaux) : <http://www.doylesails.com/designinfo-sailmaterials.htm>

Doyle Sails (fibres utilisées) : <http://www.doylesails.com/designinfo-fiberguide.htm>

Elvstrom Sails France : http://www.elvstrom-sails.com/voiles_voiliers_elvstrom_sails.htm

North Sails One Design - Sailmakers : <http://www.northsailsod.com/index.html>

North Sails(conception des voiles) : <http://www.nz.northsails.com/jweia.htm>

North Sails - Race 3DL Mainsail : <http://www.northsails.co.uk/products/racer/3dl-main.htm>

North Sails - Race Tri-Radial Mainsail : <http://www.northsails.co.uk/products/racer/tri-main.htm>

La voile plume un gréement de type aile rigide épaisse (Jean-Marie Keunebrok) : <http://perso.wanadoo.fr/jean-marie.keunebrok/html/prevoile.htm>

Ross Engineering : <http://www.rossengineeringast.com/w-sails.htm>

Shore Sails Design & Construction : <http://www.shoresails.com/dp.htm>

Shore Sails (matériaux) : <http://www.shoresails.com/>

The Scientific Finn (WB Sails) : <http://www.wb-sails.fi/news/ScienceFinn/ScienceFinn.HTML>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Sailcloth Information : <http://www.uksailmakers.com/encyclopedia2.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Construction Methods : <http://www.uksailmakers.com/encyclopedia3.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 – Mainsail : <http://www.uksailmakers.com/encyclopedia4a.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Genoas and Other Jibs : <http://www.uksailmakers.com/encyclopedia4b.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Spinnakers : <http://www.uksailmakers.com/encyclopedia4c.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Asymmetrical spinnakers : <http://www.uksailmakers.com/encyclopedia4d.html>

Why use Dynawing soft wing sails? (Dynawing) : <http://www.dynawing.com/dynawingvsconventionalrig.html>

Carlson Design Plotter-Cutters : <http://www.carlsondesign.com/>

Sobstad Sailmakers - Racing and Cruising Sails : <http://www.sobstad.com/>

Benson Sails : <http://flathill.com/bensonsails/>

Calvert Sails : <http://www.calvertsails.com/RacingMultis.shtml#TechInfo>

Voilerie Rochard : <http://www.clubsnautiques.com/rochard/grdvoil.htm>

Neil Pryde Sails : <http://neilprydesails.com/productframe.htm>

Alain Le Roux Sail Design : <http://perso.club-internet.fr/alrdes/alr.htm>

Ullman Sails International : <http://www.ullmansails.com/>

Logiciel SmSw6 (conception de voiles) : <http://www.sandygoodall.com/products.htm>

Réglages (principes généraux)

The Balance of Hull and Sails (Steve Colgate) :
<http://www.vsf.vvv.com/training/learning4.htm>

Sailing Manual (Paul Kylander) : <http://amya.org/sailmanual/table.html>

The sail as an airfoil – Sailing Upwind (Spinnaker Sailing) :
http://baysail.com/keelboat/k_lessona.htm

A Mast Tuning Guide - The Light Version (Ballenger Spars) :
<http://www.sfsailing.com/ballengerspars/mtguide5-97.html>

Neil Pryde Sails Owners Manual Rig Tuning : <http://neilprydesails.com/manual/rigtune.htm>

Sail Trim (Steve Colgate) :
<http://www.sailnet.com/collections/learningtosail/index.cfm?articleID=colgat004>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Tuning the rig :
<http://www.uksailmakers.com/encyclopedia8.html>

The Quest for the Perfect Shape (WB Sails) : http://www.wb-sails.fi/news/98_11_PerfectShape/Main.htm

A note on mast sidebend (WB Sails) : http://www.wb-sails.fi/news/98_2_SideBend/SideBend.htm

The Scientific Finn (WB Sails) : <http://www.wb-sails.fi/news/ScienceFinn/ScienceFinn.HTML>
Telltale (Kim Miller) : <http://www.wagga.net.au/~stalbans/hobie/telltale.htm>

Telling Tales (WB Sails) : http://www.wb-sails.fi/news/95_11_Tellingtales/Tellingtales.html

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Sailing to telltales :
<http://www.uksailmakers.com/encyclopedia5c.html>

Les chroniques de Voile de Pierre Boucher : <http://www.lavoile.com/voile/voile.htm>

Racing Basics (Mark Johnson) :
http://www.uiowa.edu/~sail/skills/racing_basics/index1.shtml

Neil Pryde Sails Owners Manual Sail Design and Trim :
<http://neilprydesails.com/manual/trim.htm>

Performance Racing Trim Chapter 6 - Mainsail Trim & Controls (Bill Gladdestone) :
<http://www.sfsailing.com/trim/TrimChapter6.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Mainsail trim :
<http://www.uksailmakers.com/encyclopedia5a.html>

Performance Racing Trim Chapter 5 - Genoa Trim & Controls (Bill Gladdestone) :
<http://www.sfsailing.com/trim/Trimchapter5.html>

UK's Encyclopedia of Sails 1999 -- Genoa trim :
<http://www.uksailmakers.com/encyclopedia5b.html>

Performance Racing Trim - 3 (Bill Gladdestone) :
<http://www.sfsailing.com/trim/TrimChapter3.html>

Squeteague Sailmakers - Sail Owners Guide :
<http://www.squeteaguesailmakers.com/soguide.html>

Sail Theory and Tuning - 1 (Mike Hampton) : <http://www.landyachting.org/lslr607.htm>

Sail Tuning - Part 1 (Mike Hampton) : <http://www.landyachting.org/lslr43.htm>

Sail Theory and Tuning - Part III (Mike Hampton) : <http://www.landyachting.org/lslr616.htm>

Sail Theory and Tuning - Part II (Mike Hampton) : <http://www.landyachting.org/lslr612.htm>

The Tuning Cycle (Bob Sterne) : <http://www.ionet.net/~mmyc/tunecyc.htm>

SailSpy : http://auck.irl.cri.nz/mv_team/past/sailspy/

Réglage croiseurs

Guide de réglage- J24 North Sails - Rhode Island (Ken Read) :
http://www.ffvoile.net/ffv/public/habitable1/classes_monotypes/J24/J24_Reglage_North_Rodhes_Island_Traduc.htm

J24 Full Tuning Guide (Sobstad) : <http://www.sobstad.com/j24fulltg.htm>

J24 (Quantum Sails) : <http://www.quantumonedesign.com/tuningguides/j24tuningguide.pdf>

J 22 Tuning Guide (Shore Sails) : <http://www.shoresails.com/onedesign/j22guide.htm>

J22 - J24 (Dierk Polzin) : http://www.hoofers.org/sailing/j_manual/j_manual.html

J120 North Tuning Guide : <http://sailingsource.com/j120class/j120ctune.htm>

Analyse et réglage Aphrodite 101 (N.M.Moller-Andersen) :
<http://www.ifrance.com/aphrodite101/analyse.htm>

Mumm 30 (Doyle sails) : <http://www.doylesails.com/mumm30-tuning.htm>

Mumm30 (Tour Voile SA) : <http://www.tourvoile.fr/french/nine/mumm2.htm>

Mumm30 (Tour Voile SA) : <http://www.tourvoile.fr/french/nine/mumm4.htm>

Mumm30 (Tour Voile SA) : <http://www.tourvoile.fr/french/nine/mumm3.htm>

Melges 24 Tuning Guide (North Sails UK) : http://www.northsails.co.uk/one-design/m24_tune.htm

Melges 24 (Annapolis Fleet) : http://www.melges24.com/annapolis/tuning_guide.html

North Sails UK One Design - Tuning Guides : <http://www.northsails.co.uk/one-design/od-tuning.htm>

Soling (North Sails One Design Classes) :
http://www.northsailsod.com/class/soling/soling_tuning.html

Soling (Doyle sails) : <http://www.doylesails.com/soling-tuning.htm>

Star quick tuning guide (Quantum Sails) : <http://www.quantumsails.com/star/startg.htm>
Star Tuning Guide (Sobstad) : <http://www.sobstad.com/startg.htm>

Tanzer 22 : <http://www.ncf.carleton.ca/~ay364/tune.htm>

Réglages dériveurs

Dinghy technique in medium and strong winds (John Merricks and Ian Walker) :
<http://www.madforsailing.com/SAIL/Articles.nsf/LookUp/C87E8C54F4823D5B802569BD00518983?OpenDocument>

420 Tuning Guide (North Sails UK) :
http://www.europe.northsails.com/de/OD_420Tuning.htm

420 Lenam Tuning Guide : <http://clubs.mariner.co.uk/420/lenam-tuning.htm>

Winning in the 470 by Ullman Sails : <http://www.470.org/tunull.htm>

470 Tuning Guide (North Sails UK) : http://www.northsails.co.uk/one-design/470_tuning_guide.htm

470 Manual (Arthur Gurevitch) : http://www.sailingsource.com/470na/Art_Gurevitch_470_Manual.htm

505 Tuning Guide (North Sails) : <http://www.int505.org/Nrth-tun.htm>

505 Tuning Sheets and Hints : <http://sailingsource.com/int505/tunemain.htm>

Upwind Tuning with the North American 505 rig (Ali Meller) :
<http://sailingsource.com/int505/ali-tun3.htm>

Comment régler le bélier en 505 ? (Ali Meller) : <http://asso.ffv.fr/cinquo/belier.htm>

International Flying Dutchman Home page : <http://sailingsource.com/sailfd/>

Fireball (Greg Fischer) : <http://www.fireball-france.org/Technique/fisher/fisher.htm>

Fireball (Ian Pinnel) : <http://www.fireball-france.org/Technique/Pinnel/Pinnel94.htm>

Ultra Veet en Fireball (Jean-Charles Scale) : <http://www.fireball-france.org/Technique/scale/uv00.htm>

Plus vite en Fireball (Eric Robert) : <http://www.fireball-france.org/Technique/robert/PlusVite.htm>

Etchell 22 (Dirk Kneulman) : <http://www.etchells.org/racing/dirk.htm>

North Sails One Design Classes - Etchells :
http://www.northsailsod.com/class/etchells/etchells_tuning.html

Rhodes 19 (Doyle Sails) : <http://www.doylesails.com/rhodes19-tuning.htm>

Snipe (Sobstad) : <http://www.sobstad.com/>

Albacore Tuning (North Sails) : <http://www.my-town.com/sailing/tuningtips/north.htm>

Albacore Tuning Guide (Barney Harris) : <http://www.runningtide.com/msc/barneytunes.htm>

Hampton One Design (Latane Montague) : <http://www.shorenet.net/hamptonone/tuning.htm>

Interlake Instructions (Hooper Sailing Club) :
<http://www.hoopers.org/sailing/interlake/interlk5.shtml>

JY15 (North Sails) : <http://www.jysailboats.com/jy15tune.htm>

Vanguard15 Tuning and Sail Trim Manual (North Sails) :
http://www.teamvanguard.com/vanguard15/manual_toprint.asp

Jet 14 (Benson Sails) : <http://flathill.com/bensonsails/jet14.html#jet>

GP14 (Mike Mac Namara) : <http://www.gp14class.org.uk/>

GP14 (Richard Estaugh) : <http://www.gp14class.org.uk/>

B14 (Ullman Sails) : <http://b14.interalpha.net/ullmantg.htm>

B14 (North Sails) : <http://b14.interalpha.net/north.htm>

Flying Scot (Benson Sails) : <http://flathill.com/bensonsails/flyscot.html#day>

Finn (Victory sails) : <http://www.intervela.si/finnsail.htm>

Finn (North Sails One Design Classes) :
http://www.northsailsod.com/class/finn/finn_tuning.html

Laser Tuning - Cunningham - Vang tension (Dierk Polzin) :
<http://www.laser.org/archives/1994/msg00349.html>

Laser Clinic (Steve Bourdow) : http://www.uiowa.edu/~sail/skills/laser_clinic.shtml

Laser (Vanguard) : <http://www.teamvanguard.com/laser/tuning.asp#tuning12>

Laser - fonction des réglages (Olivier Faucon - Jean Paul Renou) :
<http://www.francelaser.org/>

Laser - le près (Olivier Faucon - Jean Paul Renou) : <http://www.francelaser.org/>

Laser - le près - suite (Olivier Faucon - Jean Paul Renou) : <http://www.francelaser.org/>

Laser - le portant (Olivier Faucon - Jean Paul Renou) : <http://www.francelaser.org/>

Laser - le largue (Olivier Faucon - Jean Paul Renou) : <http://www.francelaser.org/>

Laser - le largue (Olivier Faucon - Jean Paul Renou) : <http://www.francelaser.org/>

Trimming Guide Yole OK (Peter Scheuerl) : http://www.okdia.de/sailing_trim.html

Javelins (Paul Temples) : <http://javelins.org/Technical/paulsTuningGuide.html>

5000 The Handbook : http://www.lasersailing.com/Laser5000/the_handbook.htm

Réglage Catamarans

The Catamaran Tuning Guide (Michael Fragale) : <http://members.home.com/fragalem/>

Tornado Tuning Tips (Roland Gaebler) : <http://www.tornado.tc/articles/tuning.htm>

Tuning a Nacra 6.0 (Jamie Diamond) : http://www.catsailor.com/Art_TuningNacra.html

Tuning The 6.0 N.A. (Jim Downs) : <http://members.nbc.com/nacrasailor/>

Sailing the Hobie 20 in a Breeze (Bob Curry) : <http://www.catsailor.com/Curry1.html>

Sailing the Hobie 20 in Light/Moderate Wind (Bob Curry) :
<http://www.catsailor.com/Curry2.html>

Sailing the Hobie 20 in Light/Moderate Wind (Bob Curry) :
<http://www.catsailor.com/Curry3.html>

Doing the Wild Thing on the Hobie 20 (Bob Curry) : <http://www.catsailor.com/Curry4.html>

Sailing the Hobie 20 Downwind in Light Air (Bob Curry) :
<http://www.catsailor.com/Curry5.html>

Inter 20 Tuning Guidelines (Matt Struble) : <http://www.cathouse1.com/i20tune.htm>

Hobie Tiger Tuning Guide : <http://www.hobie-cat.com/Tuning.htm>

The Division 12 Hobie 18 Homepage : <http://msnhomepages.talkcity.com/RallyRd/division-12hobie18/>

Hobie16 (Gwennaël Roth / Thierry Monfret) : <http://www.egroups.fr/files/cata/Guide16f.pdf>

Basic Traveler Positions HC16 (Hobie Alter) :
<http://www.sonic.net/~hick/sailing/tips/basictraveler.html>

The Right Shape for your Main Sail (Jack Sammons) :
<http://www.sonic.net/~hick/sailing/tips/shape.html>

Some techno-batten info (Kim Miller) : <http://www.sonic.net/~hick/sailing/tips/battens.html>

A Batten Tapering Guide for Hobie Catamarans (Kim Miller) :
<http://www.wagga.net.au/~stalbans/hobie/battens.html>

What's All This About Weather Helm? (Kim Miller) :
http://www.wagga.net.au/~stalbans/hobie/weather_helm.html

What's All This About Weather Helm? (Kim Miller) :
http://www.wagga.net.au/~stalbans/hobie/weather_helm2.html

Dart (Hans Fogh) : <http://www.dartcatamaran.ca/TechTips.htm>

Les secrets du Dart Solo (Pierre Vidal / François Morisset) :
<http://www.asso.ffv.fr/afidart/Tech/Solo1.htm>

Les secrets du Dart Solo (Pierre Vidal / François Morisset) :
<http://www.asso.ffv.fr/afidart/Tech/Solo2.htm>

A-cat stuff (Håkan Fröjdh) : <http://user.tninet.se/~zdt420t/acadstuf.htm>

Sailing a Wingmast rig (Jim Boyer) : http://www.boyer-fibrecraft.com.au/Site/tips_A.html

Stratégie et tactique

Understanding Apparent Wind (Steve Colgate) :

<http://www.sailnet.com/collections/learningtosail/index.cfm?articleID=colgat003>

Wind Orientation (Mark Matthews) :

<http://www.sailnet.com/collections/learningtosail/index.cfm?articleID=matthe0572>

La prédiction du vent (Glen Bourke) : <http://www.francelaser.org/>

Seeing the wind (Phil Slater) :

<http://www.madforsailing.com/SAIL/Articles.nsf/LookUp/973E3C31DF5326D8802569CF00544057?OpenDocument>

On the run (Terry Curtis) : http://www.okdia.de/sailing_run.html

Sailing the Drifter (Kim Miller) : <http://www.wagga.net.au/~stalbans/hobie/drifter.html>

Performance Racing Tactics – (Bill Gladestone) :

<http://www.sfsailing.com/trim/TrimChapter1.html>

Performance Racing Tactics (Bill Gladestone) :

<http://www.sfsailing.com/trim/Trimchapter7.html>

Beating : speed and tactics (David Carroll) : http://www.okdia.de/sailing_beat.html

Starting a race (David Carroll) : http://www.okdia.de/sailing_start.html

Tactics - The Start (John Caig – Tim Davison) :

<http://www.madforsailing.com/SAIL/Articles.nsf/LookUp/AFFE61F0F1CF1832802569E4005D8555?OpenDocument>

Le Champ du Départ (Etienne Perdon) : <http://www.fireball-france.org/Technique/perdon/depart.htm>

So you think you know how to start ? (Trevor Gore) : http://www.hartmann-hertha.de/okdia/tm/tm5_star.html

Port-Tack Starts (Zack Leonard) :

<http://www.sailnet.com/collections/Racing/index.cfm?articleID=leonar0024>

Getting Good Starts, Part One (Zack Leonard) :

<http://www.sailnet.com/collections/articles/index.cfm?articleid=leonar006>

Getting Good Starts, Part Two (Zack Leonard) :

<http://www.sailnet.com/collections/articles/index.cfm?articleid=leonar017>

Start defending your hole to leeward (Jim Brady) :

<http://www.soling.com/manual/starting.htm>

Flotte 187 Hobie Cat (1) : <http://www.generation.net/~energie/Flotte187/flotte187-accueil.html>

Preparation the Start and First Beat (Philip Crebin) :
<http://www.hurricane59.com/assets/hips6.htm>

Sailing a Sport Boat Around the Race Course (Charles Ogletree) :
<http://www.imra.net/links/Ogletree.htm>

Performance Racing Tactics Chapter 8 - Upwind Tactics (Bill Gladestone) :
<http://www.sfsailing.com/tactics/tacticschapter8.html>

Performance Racing Tactics Chapter 7 - Upwind Strategy (Bill Gladestone) :
<http://www.sfsailing.com/tactics/tacticschapter7a.html>

Racing basics (Mark Johnson) : http://www.uiowa.edu/~sail/skills/racing_basics/index1.shtml

Teams Racing Tactics : http://www.boating.co.nz/sailing/teams_racing_tactics.shtml

Getting a Handle on Wind (Dan Dickison) :
<http://www.sailnet.com/collections/Racing/index.cfm?articleID=ddcksn0362>

Seeing the wind (Bob Merrick) :
<http://www.sailnet.com/collections/Racing/index.cfm?articleID=merric0018>

Good Lanes and Bad Lanes (Jobson-Whidden) :
<http://www.sailnet.com/collections/articles/index.cfm?articleid=readbr002>

Are Your Skills up to scratch? (Rob White) : <http://www.hurricane59.com/assets/hips3.htm>

Ed Adams' Current Strategies (Shevy Gunter) :
<http://www.roostergraphics.com/drlaser/plfAdam2.html>

Speed & Smarts (David Dellenbaugh) : <http://sailingsource.com/speedsmarts/default.htm>

Windward Mark (Pattison) : <http://www.sailing.org/96olympics/night/tac/chap11.htm>

First beat (Pattison) : <http://www.sailing.org/96olympics/night/tac/chap12.htm>

The Lee-Bow Effect (Dan Dickison) :
<http://www.sailnet.com/collections/learningtosail/index.cfm?articleID=ddcksn0336>

Stentec Software : http://www.stentec.com/software/frame_i.html

SAIL 2000 (Vivid Simulations) : <http://www.vividsimulations.com/s2000.htm>

Shareware & freeware PC Bateaux & Voile : <http://www.anshare.com/annuaire/pc/21.htm>

Sailing Simulator Software (Posey Yacht Design) : <http://www.poseysail.com/>

Interactive Sailing (CD Access.com) : <http://www.cdromaccess.com/html/pc/sailing.htm>

Associations, sites officiels, forums, portails

ISAF : <http://www.sailing.org/>

FFV - Fédération Française de Voile :
<http://www.ffvoile.org/FFVPratique/catamaran.asp?pratique=M>

International Hobie Class Association : <http://www.hobieclass.com/>

ITA (Tornado) : <http://tornado.tc/>

Tornado Sport : <http://www.tornadosport.com/>

AFCCA (Association Française des Catamarans de Class A) : <http://afcca.free.fr/>

Catamaran Racing Association of Michigan (Tornado US) :
<http://www.websitemagic.com/cram/>

18footer - Homepage : <http://www.18footer.org/>

AFIDART (Dart) : <http://asso.ffv.fr/afidart/>

470 Olympic class association : <http://www.470.org/>

Taipans : <http://www.taipan.asn.au/>

Victorian Paper Tiger Catamaran Association : <http://home.vicnet.net.au/~ptiger/>

Sailing Source : <http://sailingsource.com/index.html>

madforsailing.com Home Page : <http://www.madforsailing.com/>

Sailnet : <http://www.sailnet.com/collections/learningtosail/theory/index.cfm>

Boating Links : <http://www.richmondyc.org/links.html>

cat-alist.com portal for beach catamaran sailing : <http://www.cat-alist.com/>

Forum Francophone du catamaran de sport : <http://www.egroups.fr/group/cata>

Catamaran Sailor Site Index, Catamaran & Multihull Sailors -- Racing, Cruising, Sailing :
<http://www.catsailor.com/>

CatSailing@Onelist.com - Mailing list sur les catamarans sportifs :
<http://www.angelfire.com/pq/catsailing/>

Sailing Index : <http://www.smartguide.com/search/>

About Sailing : <http://sailing.about.com/recreation/sailing/>

Multihulls Magazine On Line : <http://www.hypermax.com/multihullsmag/>

Sail Online : <http://www.sail-online.fr/xhtml.cfm?ActiveDoc=course/index.cfm>

Swiss Catamaran Center - Main Page : http://www.cata-center.ch/main_en.html

Swiss Multihull Online : <http://myweb.vector.ch/catamaran/>

The Sailing Information Centre - tips and advice on sailing, yachting and boating :
<http://www.boating.co.nz/sailing/index.html>

Le Portail multicoques multihull-search.com . catamaran, sport, voile, moteur, trimaran... :
<http://www.multihull-search.com/francais/index.htm>

Sailing Breezes Internet Magazine : <http://www.sailingbreezes.com/>

Le monde du Catamaran de sport : http://nico.job.free.fr/vf/index_f.htm

Livres, vidéos

On peut commander sur Internet un certain nombre d'ouvrages de référence, parmi lesquels :

Stuart Walker's Sailing Books : <http://www.paw.com/sail/swalker/default.htm>

#378Catamaran Sailing A Step by Step Guide : <http://www.seatape.com/378out.htm>

Improve Your Sailing Skills : <http://www.seatape.com/385out.htm>

Sail and Rig Tuning (Dedekam Design) : <http://sailing.netfirms.com/sailtrim.html>

Catamaran Sailing (Berman) : <http://www.satisfied-mind.com/books/catamarans.htm>

How to Trim Sails (Schweer) : <http://www.texassailor.com/book008.htm>

Dinghy, Sportboat and Catamaran Books :
http://paw.com/sail/fernhurst/sail_to_win_series.html

Fernhurst Online Books - Sail to Win : <http://www.fernhurstbooks.co.uk/section2.html>

Illustrated Sail & Rig tuning - Dedekam Design :
<http://www.nautisk.com/eng/yacht/nor/dedekam/sail-tune-eng.htm>

Interactive Sailing - from CD-ROM Access :
<http://www.cdromaccess.com/html/pc/sailing.htm>

Yacht Boating World : <http://www.ybw.co.uk/pbo/books/20400506.htm>

Catamaran Racing for the 90's - Rick White : http://catsailor.com/ram_cat_book.html

Sail Better & Faster (Isler) : <http://www.seatape.com/300out.htm>

Techniques to Maximize Sail Power (Marchaj) : http://www.onlinemarine.com/cgi-bin/SoftCart.exe/online_superstore/book_locker/sail_performance.htm?E+scstore

Sailboat racing books (Red Sky At Night) : <http://www.redskyatnight.com/sailb.html>

Sailing - A new book on sail trim & rig tuning - Dedekam Design :
<http://www.dedekam.com/sailing.html>

sailing--technique (Freshwater Seas Books) :
<http://www.freshwaterseas.com/Bookstore/sailing--technique.htm>

The Catamaran Book (Phipps) : <http://www.nautisk.com/eng/yacht/misc/catamaran-sail.htm>

The Trailer Sailor - Books Performance Sailing :
http://www.trailersailor.com/links/Books/Performance_Sailing/