



Luc Armant



# l'aile d'eau



réflexion pour un voilier sans masse

Je tiens à remercier les trois types d' «aideurs»:

- Ceux qui écoutent vraiment, proposent ou commentent.
- Les aides-opérateurs d'expérimentations.
- Les correcteurs d'orthographe et d'expression.

Ce sont dans le désordre : Les membres du jury (M.Kobus de l'école centrale de Nantes, M. Moisan de l'école d'architecture de Nantes, M. Herskovitz de l'école d'architecture de Nantes et M. Durand), Hersko & thôm, toutes l'équipe pédagogique du CEA Architecture Navale (nouvellement DPEA), les étudiants des promotions CEAA 1997/1998 et 1998/1999, Catherine, Pierre, mes parents, Roberto, Nadia, Manu, Laurent, Anne, M. Marichal et M. Sanson de l'école centrale de Nantes, M. Gressier d'Envergure-Cerf-Volants à Tours, la Renault 11, le vélo, la Singer familiale et celle des Doux, le correcteur de Microsoft Word.

Le soleil pour le vent, mon enfance et le vent de mon enfance,  
La pétrole (malgré tout).



à

in in  
in in



## Avant-propos pour une utopie

*"En m'éveillant, cette partie explicative m'échappa tout à fait, mais la conclusion m'est restée; et depuis ce temps il m'est impossible de ne pas être persuadé que tôt ou tard un génie plus éclairé fera cette découverte et, à tous hasards, je prends date."*

B. Savarin (cité par G. Bachelard),  
*physiologie du goût*, 1867 P.215

On a toujours rêvé de voler, et quand cela s'est vraiment avéré possible, les espoirs d'émancipation et de libération de l'humanité se lisaient dans la folie des pionniers et l'engouement du public. Mais nous savons actuellement que le progrès technique déçoit souvent nos espérances. La fin du siècle est l'occasion des bilans. Pour ce qui est de l'aviation, ce dernier est plutôt à l'échec. Son évolution fut, après une brève période de bricolages rêveurs, prise en charge par des institutions guerrières. Aujourd'hui, elle atteint des sommets de technologies inaccessibles, vouées à la guerre et au profit. En 1943, l'aviation s'est considérablement éloignée de ses utopies originelles et Bachelard les réfugie dans la nuit *"Notre cœur, alourdi par les peines du jour, est guéri durant la nuit par la douceur et la facilité du vol onirique. Quand un rythme léger vient s'ajouter à ce vol, c'est le rythme même de notre cœur apaisé."* Il ne peut se douter que de nouveaux bricoleurs, les libéristes, travaillent à nouveau pour le rêve en plein jour. Grâce à eux, tout un chacun peut se procurer un véritable avion, dont la finesse avoisine 10, qui ne pèse pas plus de quatre kilos et qui tient dans la poche!

De même, sur les océans, des pionniers ont montré qu'en détournant l'antique outils de travail qu'était le voilier, on pouvait en faire un instrument formidable de libération et de voyages. Depuis que Joshua Slocum a laissé tomber le commandement de clippers pour partir seul dans une entreprise qui semblait alors absurde, des milliers d'hommes ont laissé leurs soucis pour se laisser porter par le bonheur des ondes. Et si certain l'aime berçante,

d'autre la préfère vibrante, et leur voilier trace la mer dans une grandissante obsession de vitesse. Les plus mouillés se sont orientés vers un plaisir lié à un mélange de vitesse et de fluidité, la glisse.

Tous ont travaillé à l'invention d'un engin émancipateur, prolongement du corps de l'homme offrant de nouvelles possibilités à son esprit.

Beaucoup de progrès semble encore permis dans les domaines du voyage et de la vitesse par énergie douce sur l'eau et (ou) l'air mais les efforts mis en œuvre restent du domaine de l'amateurisme éclairé. La certaine lenteur d'évolution qui en découle est peut-être le prix d'un respect de l'esprit de douceur, de subtilité et de joie.

"La joie n'est que l'aspect affectif de l'acte créateur" (M. Tournier, le miroir des idées); J'imagine qu'au-delà du plaisir basé sur la consommation, il y a une riche source de joies dans la recherche expérimentale. Que beaucoup de dimanches gagneraient à y être consacrés. Que si beaucoup de rêveurs n'était pas bloqués par des mythes en tous genres, on pourrait voir, par le levier d'un effort désintéressé et démultiplié, l'épanouissement des outils d'un certain type de plaisir, celui basé sur le transport du corps par consommation sans modération d'énergies douces. Ce serait alors une contribution à la disparition de la morosité guerrière et brutale qui a marqué le siècle.



*Mon opinion: Le vrai futur du XX<sup>e</sup> siècle est dans son début*

# Sommaire

avant-propos

Introduction

## **I pourquoi l'aile d'eau?** ou la fausse histoire d'un voilier de vitesse à travers les élucubrations de Léonard

### **A- Définition élémentaire du voilier**

**p 3**

- Qu'est-ce que le voilier?
- Précisions
- Autre mode de déviation ?
- Autre mode que la déviation?
- Constitution élémentaire.

### **B- Argumentation et définition de l'aile d'eau.**

**p 17**

- Problématique du différentiel de hauteur
- La solution de la coque.
- Apologie de la coque:
- Pourquoi la coque est-elle un transporteur intéressant?
- La coque a inventé le voilier.
- Prix à payer pour la coque par le voilier de vitesse.
- Effets limitatifs du système de stabilisation pesant.
- Bilan du prix à payer pour le système pesant.
- Constatation de fait: médiocrité.
- Voilier de vitesse = préoccupation exclusive de vitesse
- Alternative sans masse par le biais
- Définitions
- Voiliers "sans masse"
- Remarque comparative du voilier pesant face au voilier sans masse ordinaire
- Remarque comparative du voilier sans masse ordinaire face à l'aile d'eau
- Bilan de l'aile d'eau face au voilier pesant

## **II équilibre du déflecteur suspendu**

### **A- Le déflecteur suspendu**

**p 37**

### **B- Equilibre en tangage du déflecteur suspendu**

**p 41**

### **C- Equilibre en lacet**

**p 49**

### **D- Equilibre en roulis**

**p 53**

### **III Quelques déflecteurs suspendus** un inventaire de solutions pratiques pour la régulation de l'angle de grand roulis

- A- Déflecteurs suspendus aériens** p 57
  - cerfs-volants statiques
  - cerfs-volants à capteur d'horizontalité du sol
  - Cerfs-volants à capteur d'altitude
  - Le cerf-volant à pilotage humain
- B- Déflecteur suspendu sous marin** p 65
  - Cerfs-plongeants à pilotage humain
  - Cerfs-plongeants à couple hydrostatique
  - Cerfs-plongeants à capteur d'altitude
- C- Les faux déflecteurs suspendus** p 69
  - Voilier sans masse à déflecteurs encastrés sur l'interface
  - Voiliers sans masses et sans appui sur l'interface dont un des déflecteurs est encastré sur l'autre
- D- Conclusion** p 71

### **IV équilibre de l'aile d'eau** ou comment stabiliser en position et en vitesse deux déflecteurs intersuspendus?

- A- Dans le plan vertical du fil** p 74
  - Cas d'une aile d'eau de finesse totale proche de  $180^\circ$
  - Cas d'une aile d'eau de finesse totale inférieure à  $35^\circ$
- B- Dans le plan vertical normal au fil** p 76
- C- Dans le plan horizontal** p 76
  - la stabilité de l'allure apparente
  - la stabilité de l'allure réelle
- D- Facteurs de vitesse** p 79
- E- Vitesses sur 500 mètres** p 80

### **V contraintes pratiques** ou quelles réalités pour l'aile d'eau?

- A- Les facteurs d'échelles** p 85
- B- la nacelle** p 88
  - Mais où est l'homme?
  - Sustentation en totale immersion
  - Sustentation archimédienne par l'air
  - Sustentation dynamique par l'air
- C- Changement d'amure** p 95
- D- Décollage, démarrage** p 97
- E- Atterrissage** p 99
- F- Crash sur l'interface** p 99
- G- Temps extrêmes** p 100

## VI quel choix pour quel programme? ou esquisses de projets

- A- **Le sprint** ou "run" **p 101**
- B- **La glisse** ou le plaisir égoïste **p 102**
- C- **L'affrontement** ou la régata **p 103**
- D- **L'endurance** ou la course océanique **p 103**
- E- **le voilier troposphérique** ou l'autre programme ouvert par la configuration de déviateurs en aile d'eau **p 106**

## VII introclusion ou généralité sur le fil de l'idée **p 109**

## VIII annexes quelques précisions sur mon travail. **p 115**





## Introduction

*"Les zones toujours imprévues de la recherche se situent à mi-distance entre ésotérisme et trivialité.*

*Il me paraît bon en l'absence de faits établis, d'utiliser les méthodes intuitives"*

Robert Le Ricolais, ingénieur structure

En marge des secteurs cadrés dans une jauge arbitraire, réglementés, médiatisés et sponsorisés dans le sens unique de la performance sportive, en marge de tous ces secteurs de conception de voiliers produisant peu de progrès pour beaucoup de dépense, la recherche fondamentale de vitesse à la voile est assez misérablement pourvu. Elle engendre pourtant des engins dont la diversité est supérieure à tout autre domaine équivalent où l'on recherche la vitesse.

Exemple frappant, l'actuel détenteur du record de vitesse à la voile sur 500m n'est ni architecte naval, ni ingénieur spécialisé, mais pragmatiques, son engin est unique.

Tout le monde a le droit d'avoir son idée sur la question (et beaucoup ne s'en privent pas!) car la seule preuve convainquante de vérité est, à l'heure actuelle, la performance.

***Comment se déplacer rapidement sur l'eau avec l'énergie éolienne?***

La question semble être une gageure. On pense: *avec un voilier bien sûr...mais...* et c'est déjà mal parti. On est dans le subjectif flou qui se croit net, on prend parti avant même de commencer à réfléchir. Car le voilier pour les dictionnaires et le sens commun, c'est une coque avec une voile. "Navire à voiles", "un navire qui marche à la voile", (il a des jambes?), "bateaux de sport ou de plaisance qui avance à la voile", "bateaux à voile", etc. bref autant dire coque à voile! Et puis, la voile n'est rien d'autre qu'un morceau de tissu pour "prendre le vent", si bien que le voilier, c'est avant tout une coque, un flotteur qui ballote sur l'eau.

*Avec un voilier, bien sûr...mais, au fait, un voilier, c'est lent!*

*Normal, explique-t-on pompeusement, la coque freine terriblement dans l'eau.*

Les solutions ne manquent apparemment pas. Pour certain, il n'y qu'à mettre plus de longueur, plus de voilure, plus de raideur, plus de largeur, plus de carbone, plus d'argent tout simplement. Des subtils proposent un meilleur dosage de tous ces plus. *Il faut la soulever*, disent les malins avec une sorte de jubilation perverse.

Il y a quelque part un manque de bon sens. Tout cela est peut-être une immense fausse piste due au pouvoir séducteur de la coque. La carène, de carina (coquille de noix), désignant à la fois les pétales inférieures des fleurs de *papilionacés* et la fine fleur de la conception navale, accapare peut-être un peu trop les attentions. Depuis des siècles on écrit sur elle des livres entiers, sans d'ailleurs réussir à totalement cerner le sujet, ce qui contribue pour une part à son pouvoir de séduction. La coque, c'est toute la fierté et toute l'énergie de l'architecte naval. Un architecte naval qui produit des bateaux rapides est un architecte naval qui dessine de bonnes carènes. Le fabricant de la coque y trouve aussi son compte de fierté et de mérite. Le maître voilier, beaucoup moins. Et le *maître dérivier*? Il n'existe pas!

Le doute me traverse à nouveau plus nettement. Peut-être que dans le domaine de la vitesse à la voile, en est-on encore à l'ère où le perfectionnement occulte le progrès comme la bougie avant l'électricité. La coque n'est peut-être qu'un vieux reste agrippé à la dérive depuis trop longtemps, la marque d'une ère pas si lointaine, dont la nature n'arrive pas à se débarrasser.

Pourtant il y a, depuis peu, sur l'eau, autre chose que des coques. La planches à voile, par exemple, "première machine à vent à dépasser les 40 nœuds" ignore les coûteuses cogitations du Class

America qui n'ont quasiment pour seul intérêt que la démonstration de l'argent.

Un indice pour se mettre sur ma piste:

Il semble que si l'on arrive à Transformer la question du *comment se déplacer vite sur l'eau* en *pourquoi utiliser l'eau pour se déplacer vite*, on ait déjà fait un net progrès.

Ma proposition pour un voilier à grande vitesse est la suivante: **l'ablation définitive et totale de cet organe, vestige hypertrophié: la coque.** *Coque* étant entendue comme le lieu de rééquilibrage des forces aéro et hydrodynamique par appui sur l'interface. Ne restent alors que les deux éléments fondamentaux du voilier, la dérive et la voile.

Face à cette brutale proposition, les interrogations fusent. Elles questionnent tout d'abord l'intérêt d'une telle opération, puis elles s'inquiètent du nécessaire remplacement des nombreuses fonctions que remplissaient avec bonheur la disparue.

### I- Pourquoi?

- 1- Qu'est que le voilier?
- 2- Pourquoi une alternative sans masse au voilier pesant?

### II- Comment?

- 3- Equilibre du déflecteur suspendu?
- 4- Comment équilibrer et diriger l'ensemble?
- 5- Quelles vitesses, quelles allures?
- 6- Comment résoudre les problèmes pratiques de dimension, d'habitat, de démarrage, de changement d'amure, de sécurité, de temps extrêmes?
- 7- Quels choix pour quels programmes?
- 8- Comment l'idée m'est elle venue?
- 9- Où en sont mes expériences en la matière?

Ce sont des éléments de réponse à ces questions, dans cet ordre, que je me propose de développer au cours du présent exposé.

N.B. Les réponses aux sept premières questions sont dans un ordre logique. Elles ne peuvent que difficilement être lues séparément dans un autre ordre.



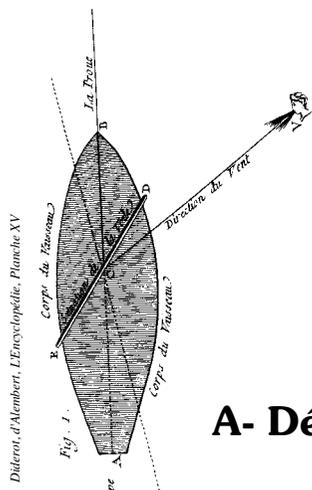
*Ablation définitive de la coque?*

# I- Pourquoi l'aile d'eau?

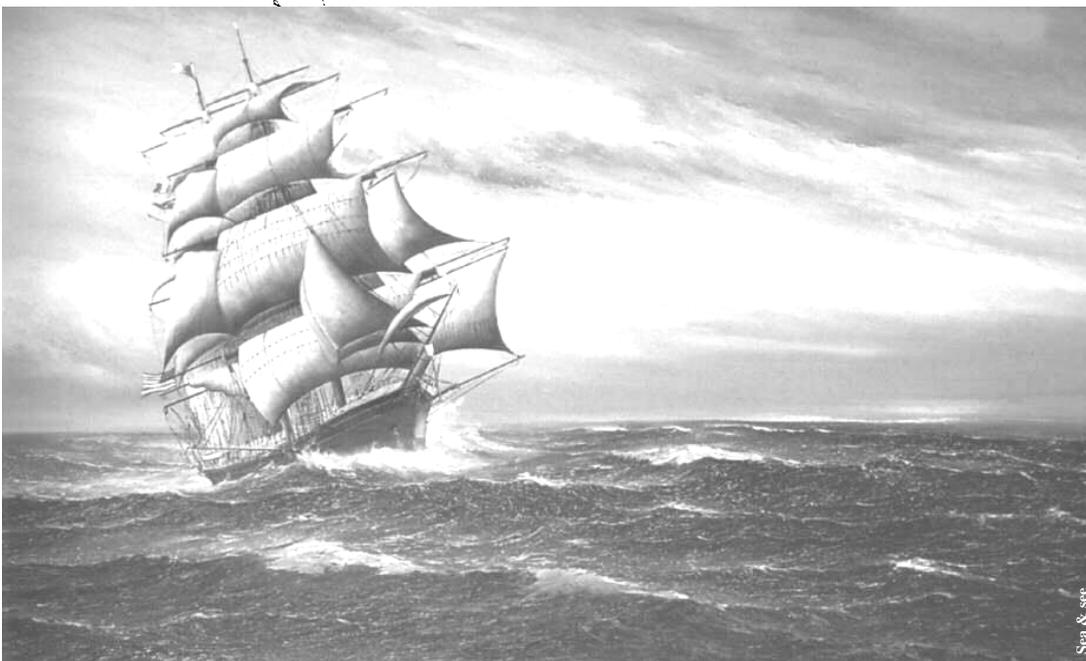
Où il est question de la fausse histoire d'un voilier de vitesse nommé *aile d'eau* à travers les élucubrations de Léonard.

L'architecte "*préfèrera, au respect paresseux des traditions, le respect des forces de la nature; à la petitesse des conceptions médiocres, la majesté des solutions découlant d'un problème bien posé.*"

Le Corbusier, *vers une architecture*



## A- Définition élémentaire du voilier



### Qu'est que le voilier? (*Sinon l'éternelle résurgence du rêve*).

Dans l'évolution de ma réflexion, j'ai parfois été amené à redéfinir l'idée que je me faisais du voilier. Et les nouvelles définitions m'ont permis en retour une analyse plus efficace. Si bien qu'après quelques allers et retours entre définition et réflexion, j'en suis arrivé à une définition stable me convenant parfaitement. Je ne me suis intéressé que par la suite aux définitions que d'autres pouvaient donner.

**Définitions habituelles.** Parmi les ouvrages auxquels j'ai pu accéder et traitant de la question du voilier, certains de très loin, d'autres exclusivement, la lyrique définition de Bertrand Chéret est celle qui m'a le mieux convenu: "*C'est le glissement de l'un sur l'autre de ces deux fluides de densités différentes - gazeux au-dessus, liquide au-dessous - qui lui donne vie. (...) Ailes aériennes et nageoires sous-marines se dressent en opposition, plus ou moins verticalement, de part et d'autre de sa flottaison, pour y capter les humeurs du temps.*" Cependant, la suite de la définition, par son didactisme anecdotique s'éloigne quelque peu des phénomènes qui m'intéressent. Les autres définitions sont soit trop triviales et ne disent rien, soit noient le poisson dans des explications trop particulières. C'est bien le propre du voilier, d'arborer au premier venu une apparente simplicité, et de montrer aux techniciens une telle complexité qu'ils en deviennent incapables d'être clairs. D'un côté "bateau à voile" (petit Larousse illustré), de l'autre "le véhicule dont le comportement est le plus complexe" (Pierre Gutelle). Ailleurs, C.A. Marchaj ne va pas plus loin que l'affirmation: "un voilier n'est pas qu'un bateau, mais plutôt un hybride entre un avion et un bateau".

Le danger est grand de ne pas être compris dans l'utilisation fréquente du mot voilier au cours de l'ouvrage. Bien que ce dernier soit destiné à des lecteurs avertis, je vais donc me risquer à une définition et explication élémentaire personnelle, celle qu'il faudra entendre par la suite.

**Le milieu.** Pour définir correctement le voilier, il est utile d'avoir un regard neuf et désintéressé sur son milieu ambiant, de se mettre à la place d'un homme ordinaire, nommé Léonard (pour me faciliter la rédaction), pour qui l'existence d'un milieu favorable au voilier

est toute nouvelle. Sa planète jusque là dans l'obscurité est soudainement mise en orbite autour d'un soleil. La glace fond, la planète se met à mouvoir ses fluides dans des convections nécessaires à l'équilibre thermique. Les fleuves coulent lourdement, l'atmosphère tourbillonne. On voit alors le globe se couvrir majoritairement et de façon bien démarquée des terres, d'un lieu étrange, tout bleu vu de l'espace, l'*interface*, face externe de la grande masse liquide qu'on appelle la mer. Lieu de rencontres, d'échanges et de mélanges, cible des tropismes, il est pourtant censé marquer la frontière entre un liquide (l'eau salée, le plus souvent) et un gaz (l'air, toujours). L'attraction gravitationnelle et l'incompressibilité du liquide créent la forme plane horizontale. La surface interfacielle n'est alors qu'un plan de symétrie presque parfait entre deux corps ayant des caractéristiques identiques regroupées sous le nom de *fluide*.

L'interface va s'avérer, comme la majorité des frontières, d'une grande richesse. Richesse de vie tout d'abord, tellement que si l'homme y est abandonné, il ne pourra mourir de faim qu'avec un manque de volonté. Richesse d'imaginaire aussi car immense et perpétuellement différent. Mais surtout pour mon sujet, richesse énergétique. En effet, **sur la totalité de l'étendue interfacielle, les deux fluides qui s'y rejoignent s'affrontent en mouvements parallèles et horizontaux opposés.**

Pour obtenir une parfaite symétrie dans cette confrontation il n'y a que cinq hypothèses à négliger et qui reviennent à considérer les mécaniques des deux fluides comme qualitativement identiques.

- 1- La densité n'est un facteur de différenciation qu'en termes quantitatifs.
- 2- La compression de l'air: erreurs inférieures à 0.5% pour une vitesse inférieure à 150 km/h.
- 3- Le rapport des viscosités cinématiques de l'air et de l'eau est de l'ordre de 10 (vair>veau). Pour le calcul du nombre de Reynolds, ces différences sont compensées par des corps sous-marins plus petits, si bien que l'effet différentiel de la viscosité cinématique sur les modèles d'écoulement est grossièrement négligeable.
- 4- La pression de l'eau inférieure à la pression de vapeur et les phénomènes de cavitation qui en découlent peuvent être évités pour des vitesses inférieures à 80 km/h.

- 5- Enfin, la perturbation ondulatoire de l'interface est l'hypothèse la plus difficile à négliger. L'origine et les conséquences du phénomène s'appliquent principalement au liquide. La mécanique du fluide eau peut en être sérieusement affectée.

**Perception dissymétrique trompeuse.** Malgré des ressemblances physiques très fortes, le mouvement liquide est perçu subjectivement de façon très différente du mouvement gazeux. C'est, je pense, la raison principale d'une très fréquente dissymétrie dans l'imaginaire du voilier, dans son analyse intuitive puis dans sa prétendue définition.

Le mouvement propre du fluide liquide s'appelle le plus communément le *courant*. A l'inverse de son homologue gazeux, l'eau se manifeste directement aux sens de l'homme. Son mouvement est un phénomène marginal caché par la richesse de sa matière.

La perception statique qu'on a de l'eau et particulièrement de celle de la mer peut-être également expliquée par les référents terrestres de l'homme. Pour cela, il faut distinguer deux types de mouvement d'eau. Celui qui se manifeste dans la casserole d'eau chauffée et celui de la casserole qu'on vide. Le premier fait appel au différentiel de densité, le second directement à l'attraction gravitationnelle. En effet, c'est dans l'essence même du fluide liquide de ne pas s'arrêter de descendre: à vitesse nulle, le frottement des particules du fluide est nul, il se met inmanquablement en mouvement par la principale force qui le guide, le poids. "*Toujours plus bas, telle semble être sa devise*" (F. Ponge). L'homme est particulièrement sensible à cette obstination de descente et il voue à ce mouvement toute une infrastructure: les moulins à eaux, les barrages, les digues, les canaux, les fontaines, les châteaux d'eau.

Si l'on arrive à trouver un récipient dont les parois sont assez solidaires pour empêcher le passage des molécules d'eau, le fluide se résigne et occupe le volume en manifestant une sage et rassurante surface supérieure horizontale. Le mouvement en regard des parois est inexistant. Ainsi, l'océan est la manifestation d'un récipient étanche. Les mouvements sont référencés par l'homme aux parois, lieu de son existence; l'eau de l'océan est perçue de façon aussi statique que son principal référentiel, la terre.

Curieusement le gaz est souvent désigné par son mouvement. Si on parle du vent pour désigner l'air, c'est qu'il n'est qu'un être théorique impalpable. Le vent est alors le principal phénomène de l'air. "L'imaginaire de l'air, dit Bachelard, c'est le mouvement". A l'inverse, "l'imaginaire de l'eau, c'est la matière", donc la fixité.

Lorsque l'on pense à se déplacer sur l'eau, on pense naturellement au seul mouvement sensible, le vent. Celui-ci incarne vraiment l'énergie du déplacement. C'est exactement ce que dit la légende arabe: "Quand dieu se décida à créer le cheval, il appela le vent du midi et lui dit: "je veux tirer de ton sein un nouvel être, condense-

*toi en te dépouillant de ta fluidité." Et il fut obéi.*" \*

\* Je pense par ailleurs qu'on peut voir ici une filiation qui unit le transport terrestre au transport maritime, Le cheval, c'est le transport éolien qui a perdu sa fluidité pour s'adapter à la raideur des chemins. Il est d'ailleurs quelque peu revenu à ces origines fluides sous la forme de vapeur, le cheval-vapeur et la transformation de la discontinuité (piston) en continuité (roue, hélice). Cependant, l'énergie du vent était alors laissée de côté. (Tout comme le fil de mon exposé!).

En face du fleuve ou du bras de mer à traverser ou à longer, on se laisse donc porter vers un véhicule dont le nom est voué exclusivement au vent: Voilier, de voile, vélum, rideau, obstacle au vent. On construit initialement un véhicule poussé par le vent, un véhicule pour vent. Il faut alors faire intervenir la lente évolution des machines humaines (ressemblant à celle, encore plus lente, des espèces vivantes), pour arriver à un véritable véhicule

d'interface, comme peut l'être le voilier contemporain, non plus seulement de vent, mais de vent et de courant, non plus seulement basé sur la traînée, mais sur la portance permettant par une accentuation interne du mouvement relatif des fluides, une vitesse supérieure au vent réel, une évolutivité infinie. Ainsi, le voilier traditionnel n'a pas besoin d'inventions, il suit le chemin de sa vérité sur la pente douce de la myope expérience.

En contrepartie, les hommes qui utilisent la machine au seuil de sa maturité en sont aliénés, ils la perçoivent comme un objet externe, un phénomène naturel, une sorte de miracle sacré; ils ont du mal à s'en défaire pour rebondir dans une ligné différente. "Nous sommes tous de jeunes barbares que nos jouets émerveillent encore." (A. de St Exupéry, terre des hommes.)

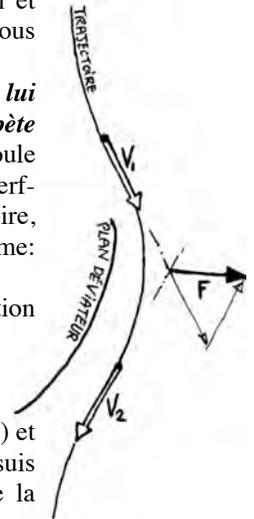
**Perception neuve.** Léonard regardant l'interface toute nouvellement apparue à son regard sera peut-être plus objectif du fait de la curiosité appelant plus exclusivement à la raison; Il va peut-être pouvoir inventer **du premier coup** le voilier que nous connaissons. Pour lui faciliter cette prouesse, donnons-lui un autre

avantage: disons que sa même curiosité lui a auparavant permis le loisir de se faire une explication d'un point fondamental de la mécanique des fluides\* auquel on doit toutes les formes de création d'énergie par les fluides, indispensable à sa future invention et qu'il explique simplement au prix d'une légère approximation sous l'optique newtonienne de la déviation:

**Un plan qui agit au sein d'un fluide en mouvement relatif en lui appliquant une déviation, reçoit une force de réaction centripète à la courbure inscrite.** Le plan en question peut revêtir une foule de noms selon sa fonction. Aile, aérofoil, plan porteur, voile, cerf-volant, pale, déflecteur etc. dans l'air. Dérive, déflecteur, nageoire, foil, safran, etc. dans l'eau. Ils agissent selon le même mécanisme: la déviation d'un fluide

Schéma de la construction vectorielle de la force de réaction centripète dessiné sur un fond photo de ligne de trajectoires.

\* Mécanique des fluides, bel oxymore, en apparence !

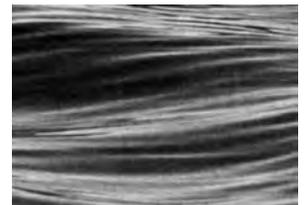


**Définition.** Ne sachant donc que ça (par observation de la nature) et portant un regard objectif sur le phénomène interface, je suis maintenant persuadé que notre homme est capable de pondre la définition suivante que je retiendrai pour la suite de l'exposé.

**Le voilier est une structure autonome stabilisée en altitude autour de l'interface horizontale entre un liquide et un gaz et se propulsant par l'exploitation de l'énergie contenue dans le différentiel verticalement éloigné des vitesses horizontales (appelé courvent) des deux fluides respectifs. Un possible mode simple d'exploitation est la déviation horizontale réciproque et opposée de chacun des fluides dans une direction générale induisant un déplacement opposé de la structure au prix d'une tension interne transverse.**

### précisions

C'est la définition sur laquelle je me suis fixé pour ses qualités englobantes. Cependant, elle nécessite quelques explications dont la plupart, plutôt triviales, sont toujours bonnes à se rappeler...





"**Le voilier est une structure autonome**" La structure est la seule chose qui soit stable dans un monde relativement changeant, elle est constituée d'ensemble que l'on peut identifier et dont on connaît les constituants et la façon dont sont assemblés ses éléments. Elle est autonome, c'est à dire qu'elle n'est pas reliée à d'autres structures, que son déplacement ne dépend pas d'une transformation (chimique ou physique) de son intégrité, ni de celle d'une autre structure. Ceci exclut d'emblée toutes formes de propulsion utilisant la combustion d'un carburant embarqué.

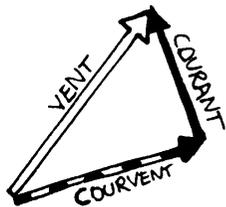


"**Structure stabilisée en altitude autour de l'interface**" Utilisant en permanence l'énergie de cette dernière, le déplacement, pour être permanent doit être maintenu à l'altitude d'exploitation optimale; Sa trajectoire doit donc être contenue dans un plan parallèle à l'interface physique. Malheureusement, la surface de l'interface physique est rarement parfaitement plane; de là vient une essentielle complication dans la stabilisation altimétrique. En fait de stabilisation, on ferait mieux de parler de stabilisation moyenne.

"**Se propulsant par l'exploitation du courvent**" *Courvent* est un néologisme composé des mots vent et courant que j'ai créé pour remplacer avec un sens plus large le mot vent réel. Les océans s'étirent, l'atmosphère tourbillonne; le *courvent* est un phénomène basé sur la convection donc sur la radiation solaire. Le voilier exploitant l'énergie du courvent est indirectement un véhicule à énergie solaire.

Le mot vent réel n'a pas un sens assez large pour exprimer seul l'énergie exploitée par le voilier. Il nécessite l'emploi fréquent d'un mot incommode, le *vent courant* qui n'est en fait que l'inverse du courant. Le *courvent* rend compte de manière plus universelle du phénomène d'interface. Il est constitué d'une valeur absolue, d'une direction, et d'un sens (si l'on considère dissymétriquement air et eau). C'est donc un vecteur. Mon choix sur le sens est: **vecteur courvent = vecteur vent - vecteur courant.**

Les vecteurs vent et courant peuvent être réels (référentiel externe au voilier) ou apparents (référentiel interne). Mais le courvent reste inchangé.

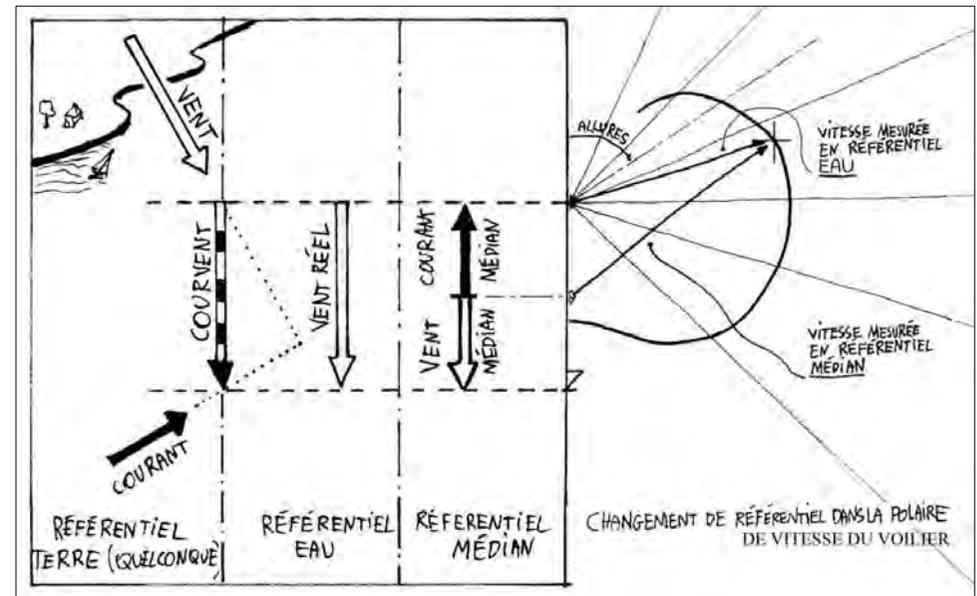


La valeur du *courvent* est indépendante du choix de l'origine du repère (référentiel de mouvement). Il y a plusieurs référentiels usités: implicitement, on utilise le référentiel qui place l'eau

immobile (je l'appelle le *référentiel eau*), mais, plus on s'approche des côtes plus on utilise le référentiel terre. Le problème du référentiel terre est qu'il est quelconque (selon le milieu) et on est facilement embrouillé par les directions différentes des deux flux. Je trouve parfois plus pratique de considérer un troisième référentiel externe, que je qualifie de *médian*. Il place son origine de telle sorte que les vitesses de l'air et de l'eau soient égales et opposées.

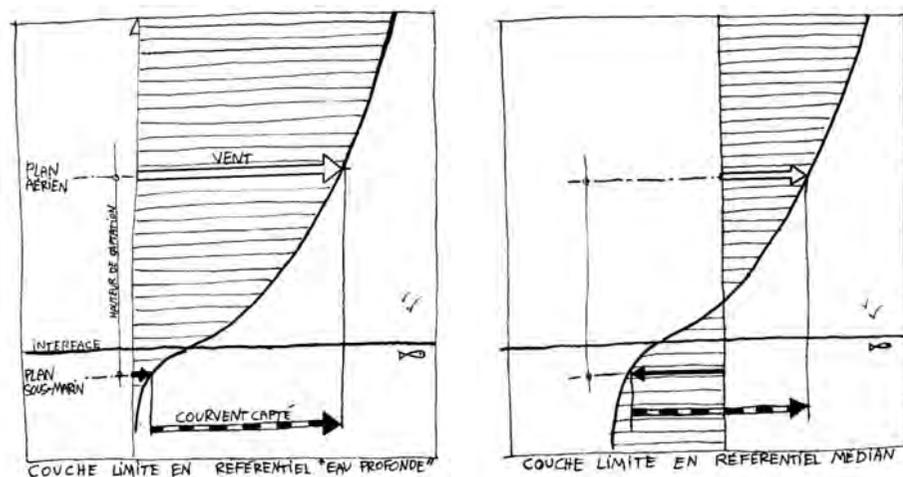
Enfin, pour bien rendre compte des phénomènes sur le voilier on utilise le référentiel interne qui qualifie les flux comme étant "apparents".

A partir de n'importe quel référentiel, même interne, on peut facilement retrouver le référentiel médian, il suffit de faire l'opération de soustraction des deux vecteurs air et eau et de placer l'origine "au milieu" du vecteur *courvent* obtenu. Quand on a une polaire de vitesses en référentiel eau, le passage en référentiel médian s'opère par une translation (de l'origine) d'un vecteur égal et opposé à la moitié du *courvent*. Point important: en référentiel médian, je détermine toujours les allures par l'angle entre le "courant apparent" et le courvent.



Le référentiel terre, en interface près des côtes ou des fonds, a pour lui l'avantage de qualifier la turbulence provoquée par le mouvement d'un ou des deux fluides sur le fond ou le continent. Ainsi, un courvent provenant d'un courant de marée dans la pétrole n'aura pas les mêmes propriétés (en termes de stabilité, de turbulence et de couche limite) que le même vecteur courvent provenant d'un vent de terre sur une eau stagnante. Au large, la terre n'a plus autant d'influences et un *courvent* provenant d'un mouvement des grands courants océaniques dans un air calme ou celui quantitativement semblable provenant du mouvement de l'air se ressemblent qualitativement.

"*Différentiel verticalement éloigné des vitesses horizontales*". Pour une condition donnée de mouvement des fluides, l'intensité du *courvent* dépend de la différence d'altitude entre les deux mesures de vitesse des fluides respectifs. Sur le profil vertical des vitesses en référentiel eau profonde, on met en évidence une sorte de couche limite d'interface à cheval entre air et eau avec une hauteur beaucoup plus considérable dans l'air. Le profil présente toujours un point d'inflexion au niveau de l'interface physique et en référentiel médian, l'altitude du point de vitesse nulle se situe dans l'air.



Lorsque l'interface est ondulée, la couche limite de l'eau est très fortement perturbée par les vitesses orbitales des particules mais cette perturbation est périodique autour d'une valeur nulle. Le profil

que j'en donne n'est qu'une moyenne caricaturale. N'ayant pas trouvé de références ni pu faire des mesures précises sur la forme et la hauteur de la couche limite dans l'eau, j'en reste pour l'instant à la négliger comme veut l'habitude; référentiel eau ou référentiel eau profonde seront donc les mêmes.

La couche limite dans l'air est plus connue, cependant, sa forme et sa stabilité dépendent beaucoup des conditions locales de pression, de température, d'humidité, d'agitation de l'interface, de précipitations. Pour les approches numériques, j'utiliserai une équation donnée par Marchaj et valable pour des conditions météorologiques moyennes.

**Vent absolu** (en référentiel eau.) =  $0.558 \times \text{Hauteur}^{1/6} \times \text{vent référent}$ . Avec vent référent mesuré à 30.05m (100 pieds) de l'interface physique.

L'éloignement vertical est le principal facteur de production d'énergie. Habituellement, cette énergie se dissipe en chaleur, dans toute la hauteur de la couche limite, par frottements tangentiels. Le voilier, en captant le mouvement des fluides à des hauteurs différentes mais en ramenant les forces sur une seule et même structure, rapproche artificiellement deux mouvements très différenciés. On peut dire qu'il récupère alors une énergie intacte (non dissipée par frottement tangentiel rapproché) qui est directement liée à ce qu'on appelle vent réel ou que j'appelle *courvent*. Sur terre, les moulins et éoliennes font la même chose en développant une structure verticale qui relie la fixité du sol à un point élevé dans la couche limite de l'air en mouvement relatif.

"*Un possible mode simple d'exploitation* (du courvent) *est la déviation horizontale...*" C'est un fait tellement établi que nous n'y pensons plus trop. Traditionnellement, pour l'expliquer, on évoque le fonctionnement d'une aile d'oiseau. Il est vrai que le planeur, préexistant au voilier, en est proche par plus d'un point de vue \*. C'est la seule autre structure autonome utilisant la déviation d'un fluide pour créer une composante de déplacement horizontale; l'autonomie n'étant vraie que si l'on oublie qu'il a fallu stocker de l'énergie potentielle de pesanteur en lui donnant une altitude initiale. Car si le planeur se sert de son poids pour avancer c'est, qu'en fait, il chute. Le vol du planeur n'est rien d'autre qu'une chute, mais une chute déviée afin de parcourir certaines distances

\* exemple: le mot voilier désigne également les grands oiseaux de mer

horizontales. En référentiel air, par le fait de l'inévitable traînée, la trajectoire ne peut être strictement horizontale mais aujourd'hui, les planeurs de plaines arrivent à se déplacer sans énergie rapportée (autre que potentielle de pesanteur) et sans perdre d'altitude grâce à une savante et temporaire utilisation des mouvements ascendants du vent, autre utilisation des mouvements de convection, cette fois dans leur composante verticale.

Les véhicules que l'on appelle de glisse sont peut-être également préexistants au voilier et sont des formes de planeur. Le ski, le surf\*, etc. sont des moyens de transformation de l'énergie potentielle de pesanteur en déplacement partiellement horizontal par le travail de déviation d'un plan sur un corps plus ou moins fluide. Le mot même de glisse, ou le mot anglais pour planeur exprime seul cette idée; le fluide *glisse* sur le plan et en est dévié; le plan *dérage* sur le fluide et en tire une réaction.

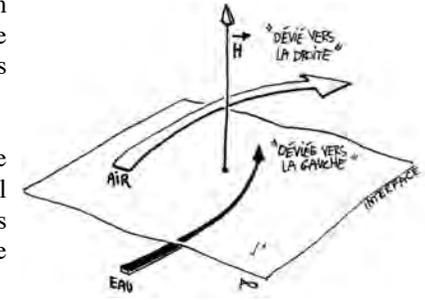
\* Le surf est un cas particulier de planeur puisqu'il doit son énergie potentielle de pesanteur à une énergie éolienne stockée dans la vagues. C'est quasiment un voilier!

L'avantage, en terme d'autonomie, que le voilier a sur le planeur, c'est qu'il n'a pas besoin de chuter pour rencontrer du fluide en mouvement, son déplacement strictement horizontal peut être aussi infini que l'océan. En effet, si la structure du voilier, à cheval sur les deux fluides, réussit à prendre appui sur un des deux fluides, elle rencontrera l'autre avec une vitesse égale au différentiel. Et si elle s'amuse à dévier horizontalement ce flux, elle en recevra une réaction propre à la mettre en mouvement.

Mais le terme d'appui n'est en fait que la conséquence d'un mode de pensée terrien ( la terre permettant le frottement à vitesse nulle). En comprenant le caractère symétrique du phénomène *courvent*, on se dit que ce qui est vrai pour le planeur aérien pourrait l'être pour un planeur aquatique, que le poisson volant gagnerait à travailler simultanément et non plus alternativement les deux fluides. *Pourquoi ne pas se servir de la déviation d'un des fluides comme appui pour dévier l'autre et vice versa?* C'est peut-être dans ce genre de pensée que le voilier contemporain, s'il n'existait pas, aurait été inventé, après avoir été pressenti comme une sorte de double planeur procédant par un double glissement, un double dérapage ou **double déviation**.

**Précision sur le sens de déviation** (L'habituelle convention). Dans le cas de l'aéronautique, sans ambiguïté possible, l'axe de courbure est horizontal, la déviation peut-être référencée à la gravité terrestre (pour un mouvement de l'avion rectiligne permanent). Autrement

dit, l'air est toujours plus ou moins dévié vers le bas. Pour le cas du voilier, la déviation qui cause son déplacement a un axe de courbure vertical; elle a lieu sur un plan horizontal. Il n'y a donc pas de référence de gravitation terrestre évidente et il y a deux sens de déviation possibles indifférents.



Je prends, comme c'est l'habitude, une référence latéralisée, intuitive, de rotation. L'axe vertical étant orienté vers le haut, une rotation de sens trigonométrique correspond à une déviation dite "vers la gauche". Et inversement.

**Quatre combinaisons de déviation possibles.** Etant donné les deux sens possibles de déviation horizontale d'un fluide, on peut déjà affirmer qu'il y a, pour le voilier, quatre modes potentiels de déplacement liés aux quatre combinaisons possibles de sens de déviation des deux fluides. En fait, comme je le vérifierai plus loin, seuls les deux modes en déviations opposées sont réellement intéressants pour la propulsion du voilier.

#### Deux déviations opposées.

"(...) la déviation horizontale réciproque et opposée de chacun des fluides dans une direction générale induisant un déplacement opposé de la structure au prix d'une tension interne transverse."

Sur le schéma en vue horizontale (page suivante), j'ai représenté le liquide dévié vers la gauche et le gaz vers la droite. Les éléments déviateurs sont représentés par leur profil. Leur finesse représentée faible pour plus de lisibilité est considérée indépendante de la vitesse du flux (comme abordé dans le prochain chapitre, cela suppose une absence de phénomène de perturbation de l'interface physique et une plage de  $Re$  permettant un modèle d'écoulement constant).

On suppose un rapport d'intensité de déviation donné. J'entends par intensité de déviation, la grandeur tenant compte de la surface, densité, et courbure et qui détermine avec la vitesse, l'intensité de la résultante aéro ou hydrodynamique\*.

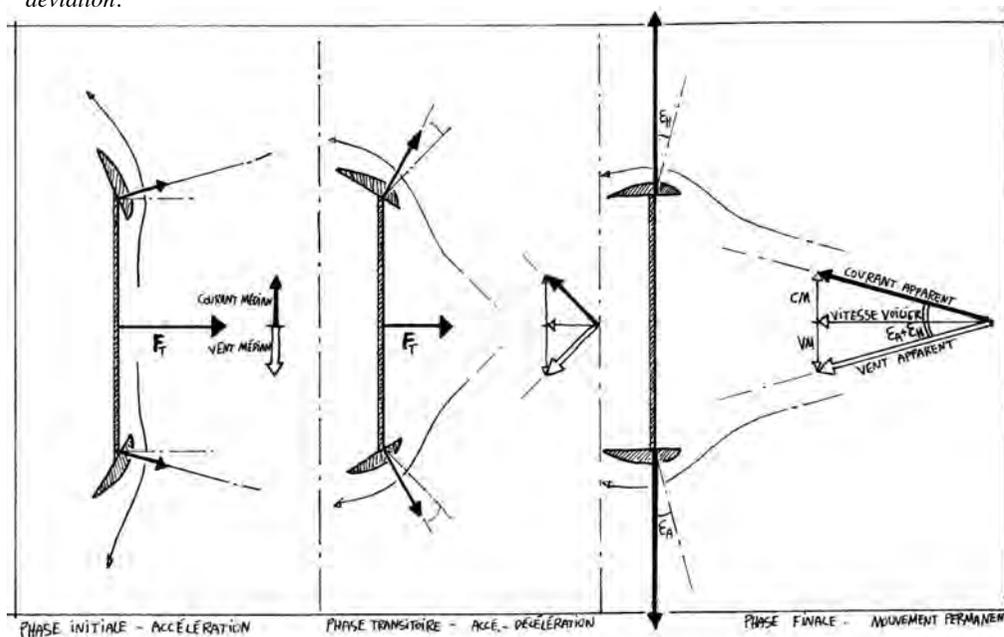
La structure de liaison est représentée par un simple trait, elle n'a pas de comportement hydro ou aérodynamique, ceux-ci sont en fait compris dans la finesse globale des plans déviateurs. Les vitesses

\*résultante de pression dynamique = "intensité de déviation"  $\times V^2$

sont en référentiel médian au courvent. Enfin, dans ce même référentiel, le voilier est supposé être initialement sans vitesse, ce que j'appelle aussi voilier en *départ médian*.

La dernière hypothèse soulève une petite remarque. Nous avons l'habitude de considérer le voilier comme étant initialement sans vitesse en référentiel eau mais ceci n'est qu'une convention. Il est vrai que, en l'absence d'incidence de ses plans déviateurs, un voilier conventionnel, à cause de sa majeure part de résistance dans l'eau aura un déplacement proche de celle-ci; un voilier initialement immobile en référentiel eau est alors une bonne approximation. Cependant si on suppose un voilier dont la majeure partie de sa résistance est dans l'air (comme on en verra dans la suite de l'exposé), la position initiale immobile en référentiel air est alors une bonne approximation. Quoi qu'il en soit, l'état initial du voilier n'est pas déterminant dans la valeur de ses vitesses stabilisées.

*Décomposition de la mise en vitesse. Cas d' "intensités" identiques de déviation.*

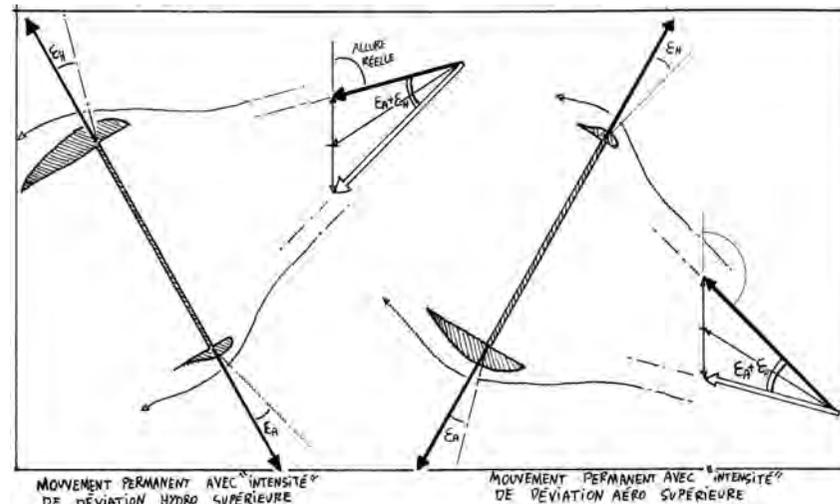


Les déviations opposées des deux fluides eux-mêmes opposés tendent à créer deux flux parallèles, le gaz et le liquide se confondant alors dans une sorte de flux global projeté par la structure. Ceci ayant pour conséquence, à la manière d'une

propulsion à réaction, une composante d'accélération de même direction mais de sens opposé au flux global. Selon les intensités respectives de la déviation des fluides, la composante d'accélération, est dirigée plus ou moins transversalement au courvent.

La mise en déplacement du voilier provoque par l'addition de flux induits, de nouveaux flux apparents d'air et d'eau formant un angle de plus en plus fermé à mesure que la vitesse du voilier augmente. Ce changement a pour conséquence une réduction progressive de la composante d'accélération jusqu'à atteindre une vitesse constante, lorsque, limités par leur finesse, les plans déviateurs ne peuvent plus créer de composante d'accélération. Plus les finesesses des plans déviateurs sont grandes, plus le voilier pourra accepter une fermeture de l'angle entre les flux d'air et d'eau, plus la vitesse pourra être élevée.

En fait, quelle que soit la direction prise par le voilier, la vitesse constante est atteinte quand l'angle de fermeture entre les flux d'air et d'eau devient égal à la somme des finesesses globales (que j'appelle *finesse totale*) des deux plans déviateurs. Autrement dit, la vitesse se stabilise toujours pour le même angle de fermeture des flux. Ou encore, comme ce fut évoqué en 1907, "(...)l'angle minimum d'un voilier (courant apparent) dans le vent (vent apparent) est la somme de ses dérapages aérien et aquatique." (F.W. Lanchester, cité par Marchaj, *aéro-hydro of sailing*, p12).



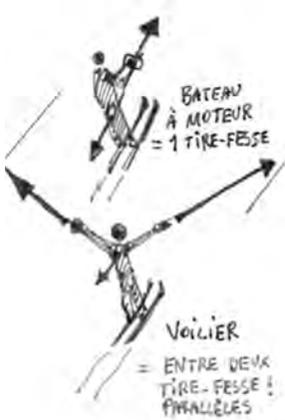
"(...)mode simple(...)" en plus de sa simplicité élémentaire, ce mode permet un excellent rendement par le fait qu'aucune sorte de transmission par déplacement de corps ou d'électrons n'est nécessaire à l'intérieur de la structure.

"(...)déviation réciproque (...)" La déviation de l'un des fluides peut être considérée comme le moyen de dévier l'autre.

**Finesse globale ou finesse totale.** Une finesse peut s'écrire sous deux formes de grandeur: en aéronautique, elle s'exprime le plus souvent par le rapport (adimensionnel) de la portance sur la traînée, tandis que pour les voiliers une grandeur angulaire (angle en degré entre la résultante globale et la portance) est préférée. Ceci peut s'expliquer simplement par le fait que, pour obtenir ce que j'appelle la *finesse totale* d'un voilier il faut additionner les valeurs angulaires de deux finesesses (finesse totale =  $\epsilon_A + \epsilon_H$ ) alors que pour obtenir ce que j'appelle la *finesse globale* d'une aile simple, il faut avoir recours à une division d'intégrales du type:  $(L_1+L_2)/(D_1+D_2)$ . Les angles intéressent la navigation du voilier tandis que l'avion s'intéresse à distance parcourue par rapport à la perte d'altitude.

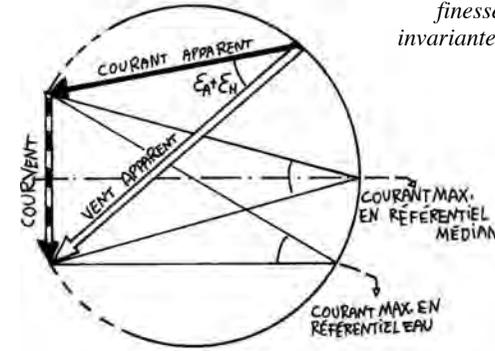
"(...)tension interne(...)" A vitesse stabilisée, la structure doit supporter une certaine tension égale à la force développée par l'un des plans déviateurs. C'est ce que j'appelle la "**tension (ou traction) interne**" (qui peut aussi bien être, selon la disposition des plans, une compression composée ou non d'efforts complexes). Cet effort est la cause de structures encombrantes mais il est nécessaire: Les plans déviateurs atteignent leur finesse maximale pour une certaine intensité de déviation; cette déviation optimale qui produit un coefficient de force non négligeable, est la cause inévitable d'efforts internes. Autrement dit, la tension interne est un mal nécessaire à la finesse totale. Plus on cherche à aller vite, plus on est confronté au problème de la tension interne. Pour fixer un ordre d'idée on peut dire que pour aller à la même vitesse qu'un bateau à moteur, un voilier en allure de finesse est confronté à une tension interne 10 fois plus importante.

En fait, la recherche exclusive de vitesse d'un voilier n'est rien d'autre que la double préoccupation: **meilleure finesse totale et (ou) meilleure capacité à résister à la tension interne.**



Polaire de vitesse relative d'un voilier hypothétique dont la finesse totale est invariante et égale à  $30^\circ$ .

La polaire d'un voilier à finesse invariante est le lieu de l'angle constant ( la finesse totale) interceptant un segment (le courvent), c'est à dire le cercle dont le centre est situé sur la médiatrice du segment courvent de façon à former avec les deux extrémités de ce segment, un angle égal au double de la finesse totale et de rayon =  $(\text{courvent})/(2\text{Sin}(\epsilon_A+\epsilon_H))$ .

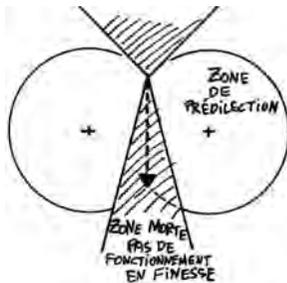


Une tel voilier hypothétique présente l'avantage analytique de pouvoir être étudié en terme de performance relative et sa polaire peut se présenter sous la forme d'une seule courbe. Le référentiel médian nous y montre le caractère essentiellement symétrique du fonctionnement du voilier. Dans ce référentiel, c'est l'allure transverse qui est la plus rapide, ce qui ne fait que vérifier l'intuition. Dans la pratique, et surtout pour un voilier conventionnel, des contraintes supplémentaires à nos hypothèses font que les polaires ne sont pas strictement circulaires ni invariantes avec le courvent. J'aborderai plus loin les facteurs de déformation du cercle de base pour différents types de voiliers. En référentiel eau (vent réel = courvent), les allures portantes sont favorisées et l'allure la plus rapide correspond cette fois à un angle =  $90 + \text{finesse totale}$ .

Quand la finesse totale est supérieure à  $90^\circ$ , le voilier est dit en *fonctionnement de finesse*. C'est dans cette configuration qu'il peut réaliser la prouesse de gagner du terrain sur le vent, c'est à dire d'avoir une allure inférieure à  $90^\circ$ . En fonctionnement de finesse, le voilier est le lieu d'une accentuation des mouvements relatifs des deux fluides, avec pour heureuse conséquence l'exaltante possibilité d'atteindre des vitesses de déplacement supérieures au courvent.

Au début de l'étude, j'ai décidé d'une déviation du liquide vers la gauche et du gaz vers la droite. Avec l'addition du postulat inverse, on dispose d'une polaire image de la première par symétrie axiale (l'axe étant la direction du courvent).

Polaire d'un  
voilier  
bidromique de  
finesse totale  
invariante  
égale à 40°



Si un voilier d'une finesse globale supérieure à 90° est capable d'opérer selon les deux modes de déviations opposées, il dispose alors d'une possibilité illimitée d'évolution; en référentiel médian comme en référentiel eau, il peut rejoindre n'importe quel point du repère. Mais, pour rejoindre les points situés dans la zone morte de sa polaire en double lobe symétrique, il est obligé d'alterner au moins une fois son mode de déviation.

**Alternance des deux modes de double déviation opposée.** Pour être capable d'alterner les deux sens de déviation horizontale du fluide (gauche ou droite), un plan déviateur doit comporter au moins un plan de symétrie. Je nomme les trois types de symétrie utilisables: symétrie bilatérale, symétrie bifaciale et symétrie avant-arrière ou amphidromique.

Pour distinguer les deux modes de déviation opposée, la convention est la suivante: *tribord amure* qualifie un voilier qui dévie le liquide vers la droite et le gaz vers la gauche. *Bâbord amure* qualifie un voilier qui fait l'inverse. Je qualifie de *bidromique* ou d'*amphidromique* selon le plan de symétrie du plan déviateur d'eau, un voilier capable des deux amures (*bidromique* quand le plan de symétrie est parallèle à l'écoulement et *amphidromique* quand il est perpendiculaire). Lorsqu'un voilier n'est pas capable des deux amures, on peut le qualifier de *monodromique*. Un voilier *monodromique* ne rentre pas strictement dans ma définition du voilier à cause de son manque d'autonomie; il ne peut parcourir qu'un faible portion de l'étendu interfacielle. Pire, sa capacité d'évolution diminue au fur et à mesure qu'il se déplace. De même, un voilier d'une finesse globale est inférieure à 90° n'est pas strictement autonome en référentiel eau pour cause de son incapacité à "remonter" le vent. On peut le qualifier de boulet!

## Autres modes de déviation?

Cette partie n'est qu'une vérification de routine sur l'exclusivité du mode en déviation opposée pour constituer un véhicule autonome d'interface à plans déviateurs.

**Deux sens identiques de déviation.** \* Ce mode de fonctionnement est autrement appelé fausse-panne, et ce n'est pas un euphémisme! Les hypothèses précédentes concernant les finesesses et les surfaces des plans sont maintenues.

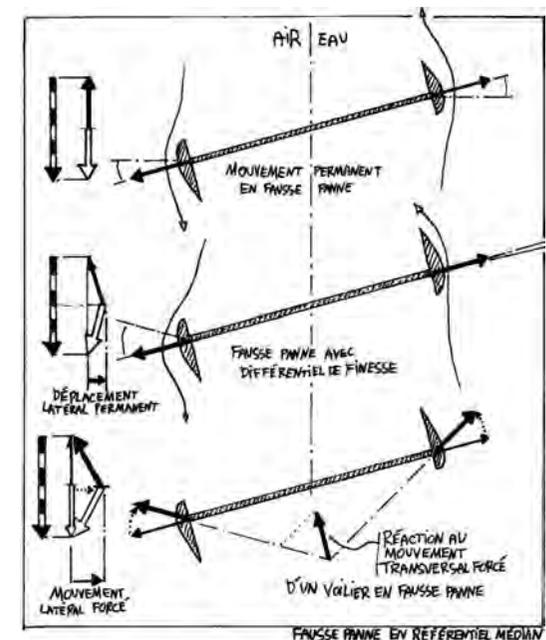
Une déviation identique de flux opposés ne conduit pas, comme précédemment à deux flux déviés globalement dans une seule et même direction. Il n'y a plus les mêmes possibilités d'accélération transverse qui en découle.

Pour deux plans de finesse égale, le déplacement, en référentiel eau, ne peut qu'être dans la direction et le sens du vent.

Si les finesesses des plans sont différentes, le déplacement du voilier est légèrement désaxé du vent.

Une propriété étonnante de la fausse panne: tout déplacement forcé dans une direction quelconque entraîne une composante d'accélération perpendiculaire à cette direction. Peut-on faire le rapprochement avec le phénomène très similaire de stabilité gyroscopique? Peut-on y voir un potentiel de stabilité de route? A voir...

Enfin, la convention veut que l'on qualifie de tribord amure un voilier déviant les deux fluides vers la droite et de bâbord amure un voilier faisant l'inverse (les règles de courses internationales considèrent que c'est la grande voile qui est déterminante, et qualifie l'amure d'après elle, alors que d'autres voiles peuvent agir de façon inverse).



Pour conclure sur le mode d'exploitation du courvent par déviation identique des deux fluides: Il ne présente quasiment aucun intérêt, si ce n'est peut-être une certaine stabilité de route. Il n'est intéressant ni en terme de vitesse et ni en terme d'évolutivité. Un véhicule fonctionnant exclusivement selon ce mode ne peut être qualifié de voilier car non complètement autonome...

**Autre forme de déviateurs.** Je n'ai parlé jusqu'à présent que de plan déviateur ou *porteur* (nom usuel en aéronautique) car c'est l'organe le plus répandu.

Il existe en fait d'autres organes de déviation. Ce sont des inventions exclusivement humaines qui sont basées sur une rotation propre d'au moins une partie d'eux mêmes.

Il y a deux types d'organe rotatif, le type hélicoïdal, à axe de rotation dans le plan de la déviation, et le type rotor, à axe de rotation perpendiculaire au plan de déviation. C'est à dire, dans le cas du voilier, rotation d'axe horizontal pour le premier type et d'axe vertical pour le deuxième.

le type hélicoïdal à été mis en pratique pour la première fois avec succès par La Cierva en 1923 sous le nom d'autogiro ou autogyre et fonctionne à la manière d'un rotor d'hélicoptère, c'est à dire que chacune des pales est laissée libre en battement et cavalement et que les efforts sont régulés par effet gyroscopique et centrifuge. Le deuxième type mis en pratique par Flettener en 1925 sur son rotor ship est simplement constitué d'un organe à symétrie de révolution que l'on met en rotation transversalement à un flux. Son fonctionnement porte le nom d'effet magnus et de nombreuses variantes sont maintenant imaginées. L'un et l'autre peuvent être autonomes, c'est à dire que leur rotation est entretenue par le flux lui-même; mais dans ce cas, la finesse est assez pauvre étant donnée l'énergie dissipée dans l'entretien de la rotation de l'organe.

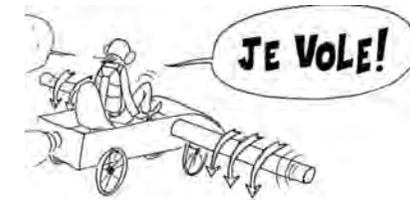
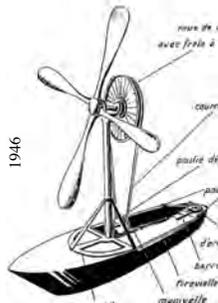
Leurs applications sont alors limitées à des cas marginaux utilisant notamment leur capacité de haut coefficient de portance (donc de compacité) ou encore de très bonne tolérance à la turbulence amont (les variations d'incidences sont atténuées sur la pale par le vent vitesse de la rotation).

Ils ne deviennent vraiment intéressants que dans le cas d'un apport interne d'énergie pour l'entretien de leur rotation. En effet, ils sont alors capables à la fois de finesse respectables et de très fort coefficient de portance. Malheureusement, n'étant plus autonomes, elle sortent quelque peu de la stricte définition du voilier.

Les déviateurs à éléments rotatifs ne peuvent pas être déduits d'une simple observation de la nature car l'invention, avec la roue, de la rotation dénote d'une certaine capacité d'abstraction mathématique dont la nature, opérant son évolution par à-coups pragmatiques, est incapable. Notre homme nouvellement baigné dans les fluides ne peut les imaginer par son intuitive et approximative approche du phénomène. Pour en arriver aux organes rotatifs de déviation, il a fallu peaufiner les théories, passer de l'idée de déviation à l'idée de *circulation*, et finir aujourd'hui par s'exclamer dans toutes les langues et de la façon la plus ésotérique-mal-de-crâne à la plus didactique-rigolote selon les ouvrages de la foisonnante littérature du sujet:

Surpression dépression point d'arrêt pic de pression de succion plateau incidence viscosité couche limite décrochement nombre de Reynolds plan de vergure profil épaisseur relative corde courbure queuelette arc traînée traînée visqueuse traînée des ailes traînée induite traînée de profil forcé tangentielle force de frottement décollement laminaire point de transition de séparation pression statique pression dynamique tourbillons marginaux ligne de courants trajectoire alignée d'émission allée de Kármán tourbillon alterné Joukowski Kutta vortex des ailes chute d'attaque tolérance de circulation modèled'écoulement intrados extrados finesse rendement turbulence écoulement tourbillonnaire laminaire rugosité bande rugueuse générateur de vortex Prandtl plan elliptique pente de portance Schoenherr sous-couche laminaire Anselme Lanturlu.

Quoi qu'il en soit, s'il avait fallu inventer le voilier (à la place de la lente maturation du grossier véhicule originel), le génial voilier à simples plans déviateurs aurait rendu superflue la connaissance de théories plus fines que celles de la déviation.



J.P. Petit, Anselme Lanturlu

## Autres modes que la déviation?

Comme cela est suggéré dans la définition, il y a d'autres modes possibles d'exploitation du courvent pour déplacer un véhicule. J'ai déjà parlé de ceux utilisant la déviation des deux fluides de l'interface, faisant ainsi référence à la basique théorie newtonienne. De la même façon, il faut maintenant parler de ceux utilisant un ralentissement ou une accélération général(e) du flux. Je ne parle de ces modes que dans le but de compléter le tour de la question, cependant, leur application dans le domaine du voilier est soit limitée soit peu connue et ne peut ou n'a pas lieu d'être étudiés davantage dans cet exposé



Voiles et voilier

**Double décélération.** Le mode de déplacement basé sur la décélération des deux flux est le plus primitif, les organes de décélération pouvant être d'une très grande simplicité. En fait tout corps présentant une traînée dans un flux, du parachute à l'ogive, peut être considéré comme ralentisseur. Les possibilités formelles comme les performances absolues sont immenses. Pour preuve, l'actuel détenteur de vitesse absolue sur l'eau est un sac plastique tractant une allumette à plus de 100 nœuds dans une bourrasque du cyclone Hugo. Les chronométreurs officiels du WSSRC (World Sailing Speed Record Committee) ne s'étaient malheureusement pas déplacés!

L'exploitation du courvent est en fait très médiocre car, selon le référentiel en vigueur, le mouvement de l'un des fluides n'est qu'une gêne à l'avancement si bien que l'organe qui y baigne doit être le moins ralentisseur possible. Les performances relatives au courvent sont donc limitées à l'intensité de ce dernier. De plus, l'évolutivité se limite à une droite! Ce mode est donc uniquement intéressant pour un voilier comme complément pour étendre sa polaire dans une zone présentant autrement un point mort.

**Double accélération.** Le mode de propulsion se limite en fait à l'accélération d'un seul des fluides (l'autre étant superflu!). Il caractérise le motonautisme.

Il s'agit alors d'un mode (peu subtil) d'accélération d'un des fluides comme moyen de transformation d'une énergie stockable embarquée en énergie motrice. L'inévitable décélération de l'autre fluide n'est qu'une nuisance. L'organe d'accélération de fluides le

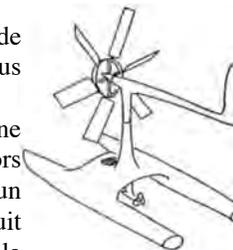
plus universel est l'hélice. Les engins se propulsant par accélération de l'eau sont les plus répandus car l'hélice est beaucoup moins encombrante pour la même poussée et l'eau étant plus près du référent immobile, il y a moins de problèmes d'évolutivité. Un tel véhicule n'est aucunement autonome, et encore moins voilier. Le plus souvent, il a recours à la combustion de substances fossiles hautement énergétiques, mais sa liberté s'arrête à la contenance de son réservoir ou même à sa conscience écologique qui refuse symboliquement l'action généralisée de libération du carbone!



Bateaux n°390

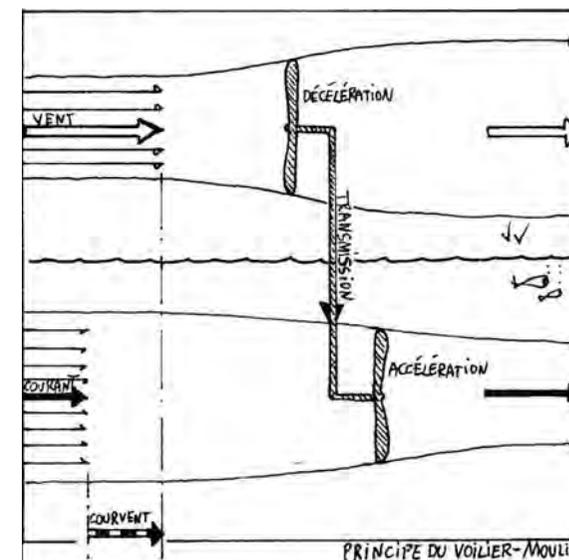
**Accélération - décélération.** Cette dernière possibilité de combinaison d'accélérateur et (ou) de ralentisseur de flux nous réserve une surprenante capacité à remplir la définition du voilier.

Le principe: un organe ralentit un des fluides et, à la manière d'une éolienne, en tire une énergie. L'énergie captée est alors communiquée (par déplacement interne de corps ou d'électron) à un organe accélérateur (une hélice) dans l'autre fluide. Le tout induit un déplacement et une tension interne à laquelle doit résister la structure de liaison des deux hélices. Pour que cela fonctionne sans



Barkla

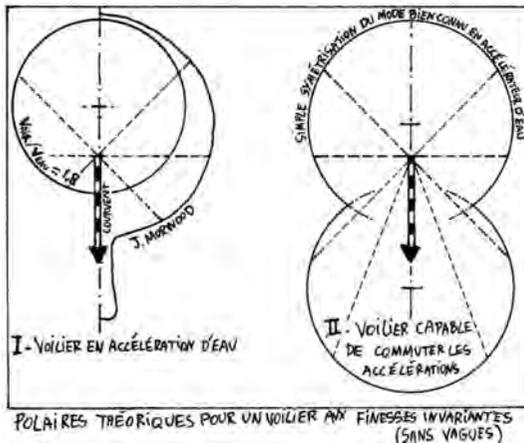
avoir à inventer le mouvement perpétuel, il faut évidemment que la vitesse du fluide à accélérer soit inférieure d'une certaine proportion à celle du fluide générateur d'énergie. Sans connaître les subtilités du fonctionnement d'une éolienne, d'une turbine ou d'une hélice mais avec un minimum de bon sens, l'observation des performances de modèles navigants et les théories de certains auteurs, on peut approcher la problématique de ce drôle de voilier, le *voilier-moulin*.



PRINCIPE DU VOILIER-MOULIN

- Accélération de l'eau, décélération de l'air:

Pour une carène très fine, un rapport de surface des disques d'hélice de 800 (rapport des densités) et un rendement de transmission de 0.85, la valeur 1.8 pour  $V_{air}/V_{eau}$  (amont) minimum ne semble pas irréaliste.



\* J. Morwood,  
21<sup>st</sup> Century  
Multihulls,  
tome I, AYRS,  
1996

d'après ses théories \* , on voit que cette dernière est plus optimiste en ce qui concerne le portant. Peut-être doit-on attribuer ce fait à la prise en compte d'une perte énergétique de l'éolienne qui devient propulsive au portant. Mais que penser de l'oubli complet dans ses calculs des actions complémentaires de déviation nécessaires au fonctionnement de ce voilier aux autres allures que vent debout ou vent arrière? La détermination rigoureuse de la forme de la polaire nécessite des études qui, à ma connaissance, n'ont pas encore été réalisées.

Morwood limite le fonctionnement en accélérateur d'air (semble-t-il , encore jamais expérimenté) à une faible plage autour du vent arrière. Il n'y a en fait aucune raison pour que la symétrie de la mécanique du voilier ne s'applique pas entre les polaires d'un voilier à accélérateur d'air et un voilier à accélérateur d'eau. Une interrogation reste cependant en suspend: peut-on envisager un passage continu d'un mode à l'autre?

Polaire hypothétique complète du voilier pouvant passer du mode en accélérateur d'eau à celui en accélérateur d'air comparée à la polaire d'un voilier à plans déviateur.

Si on envisage un voilier dont les capacités en accélération d'air sont symétriques à celles en accélération d'eau, on obtient une polaire en double lobe symétrique ressemblant étrangement mais dans l'autre sens à la polaire du voilier à plan déviateur. L'intérêt du *voilier-moulin* est évident sur la polaire: en référentiel eau, capacité à remonter directement face au vent et en référentiel air, capacité à remonter directement face au courant.

On pense alors à une utilisation bien pratique en milieu fluvial, lieu de manifestation d'un courvent axial avec possibilités très limitées d'évolution transversale. En effet, un tel voilier peut être capable de remonter **directement** dans l'axe du courant et dans un vent réel inexistant (en référentiel berge).

**Le voilier comme autocourant.** La problématique fluviale: (comment remonter un courant dans un vent inexistant en référentiel berges) permet de s'assurer que la notion d'appui sur l'eau qu'on évoque souvent en définissant le voilier est toute relative. En fait, tout voilier capable d'une composante de vitesse dans le sens du vent (VMG de portant) supérieure au courvent (voilier très performant) est capable de remonter le courant, d'être ce qu'on appelle un *autocourant*. Il suffit pour s'en persuader de changer le référentiel berge en référentiel eau.

En réfléchissant en terme d'appui, on dira alors que le voilier se propulse en prenant l'énergie du courant et en s'appuyant sur l'air. Selon le référentiel utilisé, un même voilier peut donc être considéré comme s'appuyant sur l'eau ou sur l'air; la notion d'appui n'est que relative.

**Voilier choisi: le déviateur.** Les organes respectifs d'un *voilier-moulin* et d'un voilier déviateur ont des formes si différentes qu'on peut difficilement concevoir pour un même véhicule une polyvalence dans les deux modes de propulsion. Puisqu'il faut choisir et en raison de considérations évidentes de simplicité et de fiabilité, mon exposé s'oriente vers le mode que je connais le mieux et le plus répandu: "**la déviation horizontale réciproque et opposée de chacun des fluides dans une direction générale opposée au déplacement induit de la structure.**"

### constitution élémentaire

On peut d'ores et déjà affirmer que tout voilier sera constitué au minimum de trois éléments: **le plan aérodynamique, le plan hydrodynamique et la structure de liaison entre ces deux plans.**

Sans rentrer dans la science relativement rigoureuse, bien établie, et bien pourvue en littérature de la forme à donner des plans déviateurs, il faut parler des différenciations formelles fondamentales entre le plan aérien et sous-marin.

Une remarque générale, tout d'abord, concernant leur surface: On entend souvent dire que pour aller vite il suffit de réussir à mettre plus de voilure. Cette vision simpliste est la marque d'une méconnaissance de la problématique du voilier. En réalité, pour assurer au voilier dans une allure de finesse donnée une bonne finesse totale, (donc une bonne vitesse), il n'y qu'un rapport de surface optimale \*. Par contre, il est vrai que pour un frein donné à déplacer, les plans déviateurs ont tous deux intérêts à adopter une grande taille de manière à minimiser relativement la traînée donnée.

**Le plan aérien** ou plan aérodynamique. Couramment nommé voile à cause de son aspect fréquemment souple c'est à lui que le voilier doit son nom.

La dominance de la forme souple mono-peaux tendues sur espars rigides chez quasiment tous les types de voilier peut s'expliquer par cinq faits principaux:

- La densité de l'air étant près de 800 fois plus faible que l'eau; la charge alaire de la voile est donc relativement faible, et ses dimensions relativement grandes.
- Le poids de la voile est beaucoup plus pénalisant pour diverses raisons variant selon le type de voilier.
- La voile travaille fréquemment à des nombres de Reynolds très faibles (inférieure à  $10^6$ ). En termes purement aérodynamiques les profils minces cambrés sont alors très compétitifs.
- La structure souple permet facilement une inversion de la cambrure.

- La voile étant le plan déviateur le plus accessible, il se prête davantage aux réglages et manœuvres, la forme souple est alors particulièrement adaptée.

**Le plan sous-marin** ou plan hydrodynamique. Couramment nommé dérive pour des raisons inexacts et subjectives (pourquoi ne pas nommer la voile: incidence?), il peut aussi s'appeler quille (origine structurelle), plan anti-dérive ou appendice.

C'est peut-être parce qu'il est le plan caché qu'on oublie souvent de s'en soucier. Avoir une simple tôle en guise de dérive dérange beaucoup moins que d'avoir une voile mal réglée.

D'ailleurs le plan déviateur sous-marin est injustement exclu du mot voilier. La nomenclature qui s'y rapporte est largement plus étroite que pour la voile.

Pour des facteurs contraires à ceux induisant la souplesse (forte charge alaire, poids moins pénalisant, manœuvre inaccessible), la dérive est presque toujours de forme rigide épaisse.

Pour le voilier, le point principal de différenciations, de controverses et de débats infinis est la forme de la structure de liaison entre les deux plans.

Le choix d'une structure de liaison sera le sujet du prochain chapitre. J'y montre que, pour des objectifs exclusifs de vitesse, la façon dont s'agencent habituellement les trois éléments constitutifs ( plan aérien + plan sous-marin + structure) est potentiellement moins intéressante que celle que je préconise sous le nom: *ailé d'eau*.

\* voir en chapitre IV-C pour plus d'explication

## Problématique du différentiel de hauteur.

Un problème apparaît déjà dont il n'avait pris garde au départ et qui le fait sérieusement douter de la faisabilité du voilier. En fait, il s'apercevra bien plus tard avec satisfaction que, inhabituellement, ce premier problème rencontré était aussi le plus sérieux. Pour exploiter l'énergie du courvent, il faut obligatoirement disposer les deux plans à des altitudes bien différenciées, en d'autres termes, la voile devra se trouver au-dessus de la dérive; c'est dans une interprétation littérale de cette dernière expression que se pose le fâcheux problème. **Comment maintenir verticalement une structure soumise à deux forces nécessairement horizontales ou presque et dont les droites d'action sont nécessairement éloignées verticalement ?** En d'autres termes, comment empêcher un couple de faire pivoter une structure ?

## La solution de la coque.

Nous nous moquons des sueurs froides de l'inventeur car nous connaissons tous la solution. Je pense qu'elle est suffisamment évidente pour que Léonard la découvre très vite: Comment empêcher un couple de faire pivoter une structure ? - en appliquant un second couple de même intensité de sens opposé. Et quel couple peut-on trouver en liberté sur toutes les surfaces du globe? - le couple poids-réaction formé en interface liquide-gaz par l'union d'Archimède et de Newton\*. Pour faire intervenir ce couple, il n'y a pas d'autre issue que de rajouter un élément à la belle simplicité initiale. On le nommera coque ou flotteur, il aura une masse non négligeable afin de créer lorsqu'on lui applique un moment inclinant, et par le fait même de l'inclinaison en découlant, une migration du centre géométrique de la surface immergée, point d'application de la résultante d'Archimède. ...Une masse non négligeable afin que cette migration puisse créer, dans le meilleur des cas (lorsque le centre de gravité est dessous le métacentre de carène), un couple de redressement que je qualifie de pesant.

*\* Désignant bien sûr le poids, Newton est le cadet d'Archimède et ce dernier désigne la poussée d'Archimède, mais l'âge ne fait rien à l'affaire et Archimède obéit en fait à Newton: sans champ de pesanteur, pas de surface horizontale, pas de différentiel de pression selon la profondeur, pas de poussée d'Archimède*

*Géodis, vainqueur de la course autour du monde en solitaire (1997) et record de la traversée de l'Atlantique (1998)*

Voiles et voiliers N° 309

*Mais est-ce vraiment la meilleure solution?*

## B- Argumentation et définition de l'aile d'eau.

*Ou pourquoi une alternative sans masse au voilier à stabilisation pesante?*

L'homme cherchant à inventer le voilier, Léonard, après en avoir dégagé la problématique et les éléments, va naturellement et dans une démarche toute cartésienne, se demander de quelle façon les assembler.

Léonard est séduit car en plus de permettre la stabilisation verticale, la coque peut répondre avec succès à beaucoup d'autres préoccupations.

### Apologie de la coque:

- Capacité à résister automatiquement au dynamisme de tout couple appliqué dans un plan vertical (inférieur à une énergie critique), par l'appui pesant sur l'interface dont il a été question. Pas besoin de se faire de soucis pour les deux plans déviateurs qui n'auront qu'à être solidement encastrés sur la coque.
- La stabilisation en altitude est évidente et la coque pour assurer cette fonction n'a besoin que de trois propriétés essentielles: volume de flotteur supérieur au déplacement total afin de supporter les surcharges et les accélérations verticales, homogénéité du flotteur empêchant l'entrée des particules d'eau, et résistance de peau et de poutre aux efforts locaux et globaux induits par le poids et sa réaction sous forme de pression hydrostatique. Ainsi, même si l'interface est déformée, le voilier adaptera automatiquement un niveau d'altitude propre à l'exploitation du courant.
- Grâce à la masse, le voilier a une réserve d'énergie cinétique qui l'aide à surmonter des périodes de vaches maigres: choc avec les vagues, changement d'amures, vent turbulent ou rafaleux, etc.
- Confort de la structure pesante. A condition que l'interface ne soit pas trop agitée, Archimède est le moyen de sustentation le plus confortable qu'on puisse faire. Entendez par confortable, ce qu'on demande à un fauteuil: répartition optimale de la sustentation. Rien n'est plus confortable que de faire la planche sur l'eau (chaude et salée!). A condition de ne pas dépasser certaine vitesse (ce que ne fait jamais la coque d'un voilier), la proximité du milieu liquide dans une sustentation du type archimédienne, prévient des chocs qui pourraient être fatals à la structure du voilier mais aussi et surtout à son équipage.
- La coque participe à l'ossature générale du gréement (structure portant le plan déviateur). Elle assure en effet le rôle de poutre inférieure à la façon d'un arc, le mât étant la flèche et la voile s'appuyant à la fois sur la flèche et la corde.

- D'un point de vue rendement des plans, la coque peut produire un effet de plaque permettant un allongement apparent deux fois plus important que réel.

- La coque sert de frontière physique bien marquée entre les deux fluides. Protection de la dérive contre les arrivées d'air (ventilation), et protection de la voile contre les arrivées d'eau (moins gênantes).

- La coque sert d'encastrement relatif des deux incidences de profil. Ainsi, l'information entre les deux plans est directe. Pour gérer et stabiliser les incidences, un seul régulateur (safran) pourra suffire, on le mettra en général dans l'eau pour des raisons pratiques de faible encombrement et de fiabilité.

- Pour une configuration monocoque, la coque contribue (en allure de finesse) à la stabilisation de l'allure grâce à une gîte correctrice réagissant aux changements d'incidence des plans par rapport aux flux.

- La coque, évoluant sur la déroutante interface, est le siège de phénomènes complexes imbriqués, que les mathématiques ont du mal à déterminer, stimulants pour l'esprit et qui vont permettre à beaucoup de "croûter" par une recherche ou un savoir-faire particulier.

- Enfin et **surtout**, la coque peut servir à contenir, à sustenter et à transporter de la masse embarquée. Elle le fait même très bien:

### Pourquoi la coque est-elle un transporteur intéressant?

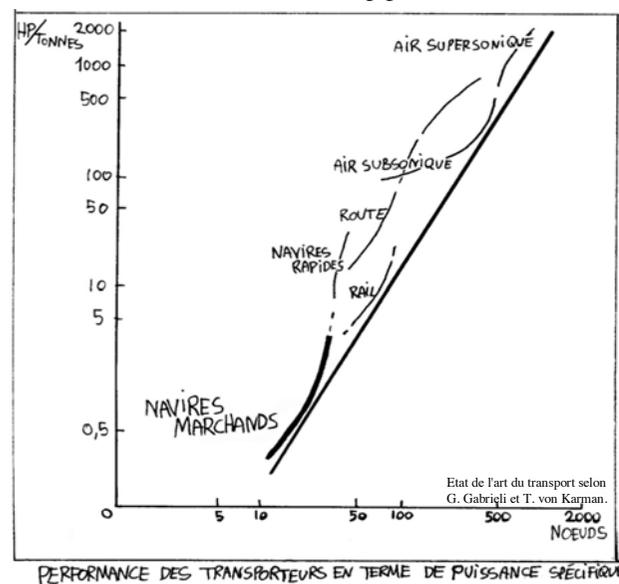
Pour le déplacement des masses, l'homme s'intéresse à la puissance spécifique, c'est à dire le rapport de la puissance motrice sur la masse transportée, pour une vitesse donnée. Ce chiffre est directement lié à ce que l'on peut appeler le rendement de sustentation. Rendement de sustentation = **(poids) / (frottements horizontaux)**. Grâce à la propriété essentielle du fluide de ne présenter aucun frottement à vitesse 0, il y a un potentiel de rendement de sustentation (par Archimède) sur l'eau excellent pour des vitesses faibles. Une coque, aussi pesante, volumineuse et grossière qu'elle soit, possède à vitesse *zéro* un rendement de sustentation infiniment grand. Pour comparaison, un véhicule terrestre possède toujours un rendement nul à vitesse *zéro*. Un nageur peut déplacer sur l'eau un super pétrolier contenant 200 000 tonnes mais une troupe de 1000 marcheurs n'arrivera pas à ébranler

un convoi ferroviaire aussi chargé. En fait, seul un très encombrant et incommode zeppelin est capable d'un rendement de sustentation proche de celui d'une coque

A cet avantage s'ajoute celui de la taille: la sustentation archimédienne permet structurellement des tailles de coque quasiment infinies, cela grâce à la propriété de "confort de la structure pesante" déjà évoquée plus haut. Les grandes tailles, favorisent un rendement encore meilleur par l'intermédiaire de deux lois: la loi de Froude (décrite un peu plus loin) et celle, valable pour tout type de véhicule de transport, de la croissance moins rapide de l'enveloppe (puissance 2) par rapport à la contenance (puissance 3).

Autres avantages en terme de transport d'une coque archimédienne, exclusivement liés au fonctionnement en interface air-eau:

- Pour un volume de flotteur donné, le coût en terme de traînée s'adapte à la masse variable (dans une certaine limite) embarquée.
- Pour un poids donné de la coque et de son chargement, l'intégrale de surface mouillée du volume immergé est gracieusement épargnée du plan de prolongement virtuel de l'interface au travers de la coque. Par opposition, un sous-marin, pour transporter la même masse sera affublé de beaucoup plus de surface.



Pour peu qu'on ne soit pas pressé par le temps (c'est à dire que la préoccupation de vitesse n'exige pas  $n > 2$  dans l'expression  $E = 1/2mV^n$ ), le transport sur l'eau, bien qu'archaïque, est le plus intéressant qu'on sache faire.

*Performances des types de transporteurs en terme de puissance spécifique*

### La coque a inventé le voilier.

Le fait que la coque soit un très bon transporteur primitif est crucial du point de vue de l'histoire du voilier (la vraie, pas celle de Léonard). C'est certainement l'essence même du voilier originel. La propriété de la coque qui a ensuite intéressé l'humanité fut qu'avec l'association d'une simple toile maintenue en l'air, la coque pouvait se déplacer et de la charge être transportée sans que l'homme n'ait à se fatiguer ni à mettre un bœuf à la place des rameurs.

L'homme n'a pas, comme l'inventeur, imaginé la coque pour assouvir une idée, au contraire, c'est la coque, unité de transport préexistante qui a rendu possible l'idée du voilier. Le voilier n'a pas été, à proprement parlé, inventé par l'homme, mais par la coque. Au départ, la coque a des vertus, pour les faibles vitesses, de transporteur à très bon rendement de sustentation. Le fait qu'ensuite, la coque ait eu d'autres vertus propres à faciliter la faisabilité d'un voilier fut à mon avis le coup de chance qui a tout déclenché.

L'éolienne tire du courvent un déplacement rotatoire qui, associé à un frottement, est intéressant pour stocker de l'énergie. Comme le voilier, sa pale est le lieu de déviation et d'accentuation du mouvement relatif. Vu sous cet angle, le voilier est une forme d'éolienne à translation induite qui, associée à une charge, va pouvoir créer de l'énergie cinétique stockée dans le fait du transport. Et cela sans pratiquement aucune création de chaleur ni dégagement de poussières et autre gaz carbonique. A une époque où la main d'œuvre n'est pas comptée, le voilier est le meilleur de tous les transporteurs.

Le transport de masses considérables est la préoccupation principale des voiliers utilitaires, quelle que soit l'utilité: transport maritime, transport fluvial, guerre, exploitation biologique du milieu aquatique, plaisance. L'énergie cinétique de faible vitesse mais de forte masse est la raison d'être des coques de voiliers utilitaires.

Les autres utilités de la coque ne sont là que pour conforter secondairement son existence. Car, quand il s'agit d'aller vraiment vite, elle a beaucoup à se faire pardonner.

### Prix à payer pour la coque par le voilier de vitesse.

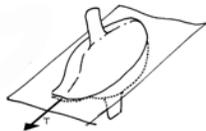
("On n'a jamais rien sans rien" est ici un euphémisme.)

On entend parfois l'expression "*le poids c'est du frein*". Pour les déplacements strictement horizontaux c'est évidemment faux; la masse joue un rôle dans les phénomènes dynamiques d'accélération mais n'a aucun rôle direct dans les déplacements permanents. Cependant, dans le cas d'une coque en appui sur l'interface, plus que pour tout autre véhicule, l'expression est assez représentative de la réalité. La suivante revue de tous les effets de la coque va permettre de le vérifier assez largement.

Quoi qu'il en soit, le prix à payer pour une coque est toujours, de façon plus ou moins indirecte, un surplus de traînée (ou une perte de portance) et peut se diviser en trois familles:

**1- facteurs limitatifs du système de stabilisation pesante.** Je les aborderai après le développement des deux autres familles.

**2- résistance visqueuse.** C'est en fait l'intégrale de toutes les traînées excluant le phénomène de déformation de l'interface. Bien qu'assez complexe dans sa décomposition, la résistance visqueuse a un comportement "ordinaire", majoritairement de type tangentiel et proportionné à  $S$  et  $V^2$ . Elle peut donc se rapporter directement aux caractéristiques dynamiques des plans porteurs de propulsion du voilier. La partie immergée affaiblit d'une proportion donnée la finesse du déflecteur hydrodynamique; celle émergée, la finesse du plan aérodynamique.



Double coque en fluide homogène. (Méthode de Tsuda et Tagaki).

**3- conséquences du passage de la coque dans l'interface,** milieu sensible et cupide s'il en est. Elles sont multiples, interpénétrés et difficilement modélisables. C'est grâce à elles

que la science du voilier est un domaine encore très empirique.

Leur énumération va me demander un peu plus d'encre. Afin de clarifier un peu le propos, je dégage deux groupes de coûts: ceux dus à l'excitation de l'interface par le système pesant (3-1) et ceux dus à l'excitation du système par celle de l'interface en amont (3-2).

#### 3-1- excitation de l'interface par le système pesant.

La coque pesante n'y peut rien, le déplacement de son volume (autrement dit le déplacement de son "déplacement") entre air et

eau ne passe pas inaperçu par l'interface qui était au repos. Cette dernière taxe le passage responsable de son réveil au prix fort décomposé classiquement en une résistance de création de vague et une autre de cassure. Manifestation visuelle du prix: création d'ondulations. Ce qui est vrai pour une sustentation archimédienne de coque pesante ordinaire (voir paragraphe 3-1-1) l'est également pour des configurations cherchant à y échapper mais ne le pouvant complètement à cause de l'obligation d'assurer le couple de redressant par un appui sur l'interface (paragraphe 3-1-2).

**3-1-1 coque ordinaire en sustentation archimédienne.** Une grande quantité d'énergie peut être perdue dans l'excitation de la surface de l'eau. Quel effroi devant la vision de ces vagues qui partent dans le sillage et dont on n'ose regarder le futur, un abîme de lointains océaniques. Le gaspillage qui en résulte parfois nommé *résistance de vague* est bien plus que proportionnel à  $V^2$ ! En réalité, il peut, lorsque la vitesse s'approche d'un régime critique présenter une telle intensité qu'il se ramène à des puissances de  $V$  supérieures à 6. Son étude ne peut donc pas s'associer à celles des plans porteurs. Pour l'étudier, il faut faire intervenir le rendement de sustentation, c'est à dire ici, le rapport entre la résistance due à la formation des vagues et le poids du navire (représentatif du volume d'eau à déplacer pendant le mouvement): Le rapport (**résistance / poids**) qui dépend du *nombre de Reech-Froude*:  $V / (g \times Lwl)^{1/2}$ . Le nombre de froude est l'expression d'un modèle de perturbation adimensionnel, du rapport entre longueur d'onde de vague et longueur mouillée de la coque.

Dès que la longueur de la vague est supérieure à la longueur de flottaison du bateau ( soit à partir d'un nombre de froude = 0.4 ), le bateau, pour aller plus vite, se voit dans l'obligation physique de "grimper" sur la première crête. Il en résulte une brutale montée de la résistance de vague. La finesse totale du voilier chute alors de façon catastrophique. Dès que le nombre de Froude dépasse 0.4, la belle perfection du fluide, permettant auparavant des rendements sustentateurs inégalés, se transforme en une infernale agitation de l'interface avec des rendements sustentateurs records pour leur nullité.

Remarque dimensionnelle: Froude est un sauvage, sans cœur, il récompense les plus gros qui n'atteindront qu'à des vitesses plus élevées la bosse de résistance.



**3-1-2- coques alternatives moins résistantes.** Il existe trois voies bien connues pour essayer d'atteindre des nombres de Froude plus élevés que ceux dont était capable la bonne vieille coque de noix d'Archimède. La stabilisation pesante reste cependant la même, basée sur le décalage horizontal entre le poids et sa sustentation.

- **La voie de la finesse.** Il faut que l'amplitude de la vague soit suffisamment faible pour que la coque ait moins de mal à la "grimper". Or, étant donné le lien direct entre maître couple de la vague et maître couple du bateau, à poids égal, pour réduire l'amplitude de la vague, il faut réduire le maître couple (ce qui s'accompagne nécessairement d'une augmentation de la longueur mouillée). En d'autres termes, une solution pour adoucir et repousser la bosse de résistance de vague est d'augmenter la *finesse* de la coque. Il faut faire attention à garder en tête le fait qu'à poids identique, avec une coque plus fine, la surface mouillée, plus grande, augmente les frottements tangentiels. Le compromis est différent pour chaque vitesse ambitionnée.

- **Le planning.** Il s'agit de transférer une partie de la sustentation (initialement entièrement assurée par Archimède) dans une sustentation par surpression dynamique sur les parties horizontales de la coque. Le volume immergé diminuant, la résistance à l'avancement (toutes décompositions comprises) fait de même. Mais pour que le phénomène fonctionne, il faut qu'avant d'arriver au nombre de Froude critique, une majorité de la sustentation soit assurée par la surpression dynamique. Dans tous les cas, la forme de la coque n'étant pas appropriée aux faibles vitesses, il faudra franchir une bosse de résistance pour arriver au planning salvateur. Si la coque est large et courte, son planning aura un bon rendement mais la bosse à franchir sera grande. Pour le voilier, un compromis est difficile à trouver.

La régulation de l'altitude et du tangage est plus problématique qu'avec Archimède seul et l'apparition d'oscillations est parfois difficile à éviter en eaux agitées.

- **Plans porteurs.** Cette voie n'est pas si nouvelle (elle a tout juste cent ans) et son développement est resté limité à cause des problèmes de régulation de l'altitude en eaux agitées. Autrefois, dans ce but, les plans sustentateurs (désignés par le mot Hydrofoil au sens pourtant plus large) étaient du type perceur d'interface. Depuis le début des centrales informatiques de pilotage

automatique, il y a des possibilités (entièrement mécaniques pour certaines) bien qu'encore complexes à fiabiliser pour le voilier, d'utiliser des plans sustentateurs complètement immergés. Seuls ces derniers présentent une résistance proportionnelle à  $V^2$  car ils sont éloignés des phénomènes d'interfaces. Cependant, à partir des vitesses cavitantes, la sustentation par hydrofoils perd tout avantage sur celle en planning.

La voie de la sustentation du voilier par plans aérodynamiques, bien qu'encore inexplorée, présente le potentiel alléchant d'un régime de vitesse quasiment illimité (pas de cavitation) et d'une finesse et d'une compacité très grandes en cas d'effet de sol (avec une traînée réduite, on peut espérer 75% de portance supplémentaire!).

**Bilan des voies alternatives.** Il n'est pas très positif. Finalement, il ne semble pas qu'il y ait de solutions miracles pour le voilier pesant qui ne peut avoir recours comme son voisin à moteur, à la surmotorisation. En effet, il a un sérieux problème de stabilité que l'on pourrait qualifier par analogie à une *stabilité de châssis*. Le moteur du voilier pesant nécessite un châssis très stable donc lourd qui pose avec beaucoup d'acuité la question du rendement sustentateur à haute vitesse. On peut faire faire des prouesses à une armoire équipée d'un hors-bord de 200 chevaux, mais on n'en obtiendra rien à la voile, même avec 200 m<sup>2</sup> de voilure (et quelques tonnes de plomb)! La conception de la coque d'un voilier demande, dans tous les sens du terme, de la finesse.

Quelques chiffres:

Le rendement d'une coque élancée finit inexorablement par chuter à haut nombre de Froude. Mais, si l'on peut se permettre des dimensions monstrueuses (de l'ordre de 50 mètres), on peut envisager avec une finesse de coque\* 0.001 (finesse d'un trimaran 60 pieds) des rendements sustentateurs proches de 20 aux vitesses de cavitations (45-50 nœuds).

Le rendement sustentateur d'une coque planante atteint difficilement 5.

Enfin le rendement d'une sustentation par plans perceurs peut atteindre 11 aux vitesses moyennes (50 km/h) mais baisse très tôt à cause des problèmes de ventilation et de déformation de l'interface.

$$* = V/L^3$$

### 3-2- méfaits dus à l'excitation du système pesant par celle de l'interface en amont.

**3-2-1 sur la traînée du dit système.** Les effets de l'excitation amont de l'interface se ressentent tout d'abord au niveau de la résistance à l'avancement. Détail pour chacun des trois modes de sustentation à haute vitesse:

Le planning est très sensible aux accidents de la surface car il est dans l'obligation d'en suivre de très près les variations. Sa faible marge de stabilisation d'altitude, fait qu'une faible déformation de l'interface introduit facilement chocs et déséquilibres verticaux que l'on appelle slamming. Il va sans dire que la perte d'énergie est considérable. Une vedette à moteur, face aux vagues, à partir d'un état de mer limite, reste littéralement collée. De même, un hydravion sera très tôt dans l'incapacité de décoller. Finalement, cela fait pour le voilier une coque très peu polyvalente: se traînant dans le petit et le gros temps.



Yellow Pages  
Voiles et voiliers

*Le planning autorise les petites tailles mais a besoin d'un clapot à son échelle.*

La sustentation par plans porteurs n'est pas beaucoup plus épargnée par les accidents de la surface.

Les structures sur hydrofoils perceurs, grâce à l'inertie de masse de l'ensemble qui agit contre leur réserve de stabilité passive verticale, peuvent lisser quelque peu les irrégularités de la surface, mais ce, au prix d'efforts verticaux colossaux à chaque rencontre de vagues.

Ces efforts sont gérables sur de petits engins, mais l'effet d'échelle sur les efforts de flexion, rend les grandes tailles très problématiques dans une mer à leur dimension. Cependant, stabilité passive signifie immanquablement obéissance au milieu référent (dans ce cas l'interface), donc si le



Modèle au 1/2 de l'hydroptère  
Voiles et voiliers

*Sans régulation fine de l'incidence, le foil perceur fait un massacre!*

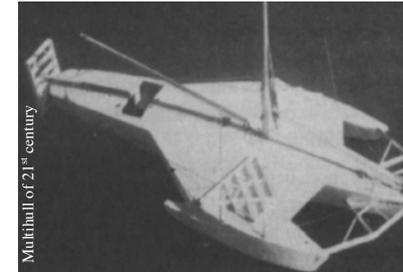
milieu se comporte mal, le mobile à stabilité passive ne pourra de toutes manières se comporter correctement. Le plan porteur ayant un rendement intéressant sur une fourchette très étroite d'incidences, il dépense, dans des eaux agitées et avec une configuration de régulation approximative d'incidence, une grande quantité d'énergie.

Si l'hydrofoil suit la houle, au moment de monter sur la vague qu'il poursuit, la trajectoire orbitale des particules d'eau à cet endroit induit une baisse très notable de l'incidence du flux apparent, il en découle une très fâcheuse tendance à se "planter" dans chaque crête rattrapée. La correction de cette tendance ne s'obtient que par une augmentation de la réserve de stabilité passive (la surface des foils émergés) qui n'est pas pour augmenter les performances.



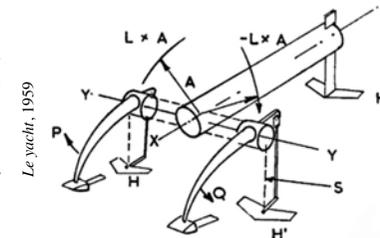
Le yacht, 1955

*Le monitor atteignait 30 nœuds en 1955. Il était paraît-il doté de régulation fine d'incidence.*



Multihull of 21st century

*Williwaws malgré ses airs de grosse langouste est depuis 1970 le seul véritable hydroptère océanique. La voie adoptée du multiplan est particulièrement efficace pour permettre une grosse réserve de portance.*



Le yacht, 1959

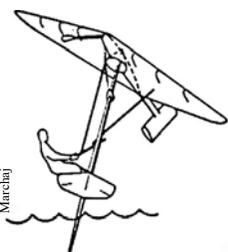
*C. Hook est l'inventeur du foil entièrement immergé et le précurseur de l'hydrofoil deuxième génération.*

La voie des plans porteurs horizontaux complètement immergés et sans aucune stabilité passive, permet d'envisager un très bon lissage des vagues. Cependant, ne pouvant pas se permettre de sorties, l'immersion doit être assez profonde et la régulation de l'incidence étant assurée en temps réel pour chaque perturbation, la structure est soumise à des accélérations verticales colossales, en eaux agitées.

La voie de la sustentation par plan aérien utilisant l'effet de sol interdit toutes mers autres que parfaitement plates, en effet le phénomène est assez fragile et demande pour être intéressant de

très faibles altitudes (de l'ordre du dixième de la corde du profil sustentateur).

La voie de la sustentation par plans aériens sans effet de sol (éloignés de la surface) n'est pas viable pour des configurations à stabilisation pesante tout simplement parce que l'appui sur l'interface est indispensable à cette stabilisation. La sustentation aérienne en altitude est cependant très alléchante pour ses qualités entièrement indépendantes des phénomènes d'interface; pour sa finesse invariante aux grandes vitesses. J'aurai plusieurs occasions d'en reparler dans le cadre bien particulier de la configuration que je préconise...



*La tentation impossible d'aéro-sustenter une stabilisation pesante...*

Finalement, pour le voilier pesant océanique, on ne connaît rien de mieux que la coque archimédienne élancée. N'étant pas soumise à des effets d'échelle structurellement très contraignants, cette coque peut se permettre de grandes dimensions qui se comporteront honorablement dans la houle. Cependant le confort est loin d'être au rendez-vous, les mouvements sont violents et intenses.



Voiles et voiliers N° 335

**3-2-2- méfaits de l'excitation du système pesant sur les performances des plans déviateurs.** L'inconfort procuré par les mouvements de la coque dans la mer, si les compétiteurs parviennent à s'en accommoder, réussit beaucoup moins aux plans déviateurs verticaux responsables de la propulsion du voilier. Les mouvements désordonnés et intenses de la coque sont directement transmis aux plans déviateurs qui y sont encastrés. Le tangage et le roulis associés créent de gros désordres dans l'écoulement: des changements d'incidence et de vitesse mettent constamment en péril le rendement des plans.

Ne pouvant se permettre un plan hydrodynamique décroché, le voilier est obligé de le surdimensionner afin qu'il puisse continuer à développer une portance moyenne suffisante lorsque la mer est agitée. Résultat: la plupart du temps, la dérive surdimensionnée est obligée de travailler à des incidences trop petites pour permettre un bon rendement. Généralement, le voilier dérive à 3° alors que le double serait plus satisfaisant pour la finesse de la dérive. Pire, le tangage s'effectuant avec un axe quelque part sur la coque, les variations d'intensité de l'écoulement sur les plans sont inversées. La force aéro augmente lors d'un piqué vers l'avant et la dérive ne peut que difficilement suivre puisque son écoulement a ralenti. Si l'on essaie de réduire la surface de la dérive (pour la dimensionner exactement à la force produisant le moment inclinant optimal), on a un voilier plus fin sur mer plate mais rendu dangereux en mer agitée par des décrochements intempestifs.

Sur des gréements et voiles souples, certains malins arrivent à tirer parti d'une certaine gamme de mouvement pour créer un effet de pumping ou de Katzmayer mais c'est une exception.

D'autres malins essaient de désolidariser quelque peu les plans de la coque \*. Le gréement à balestron à incidence autorégulée est une tentative dans cette direction qu'il faut payer par une complication du gréement. De toutes façons, pas de miracles possibles, pour qu'il y ait stabilisation, il faut une solidarité verticale entre plans et système pesant.

Plus les plans sont allongés et éloignés de la coque, plus ils sont mis en mouvement par ses rotations. De plus la finesse dynamique étant presque toujours antithétique à la tolérance, ces plans sont, à écoulements égaux, davantage soumis aux décrochements.

\* voir dans la partie *introclusion* pour le détail d'une tentative de désolidarisation entre système pesant et coque

L'effet néfaste du mouvement de la coque sur les plans est donc double:

Tout d'abord, l'écoulement désordonné qui en découle interdit l'utilisation de profils fins (allongés, minces, bords d'attaque étroits, etc.) mais peu tolérants et incite à des dimensionnements en terme de surface, inadaptés à une finesse maximale.

Et l'écoulement désordonné produit sur ces profils des finesses encore moins bonnes que les faibles potentiels!



### Effets limitatifs du système de stabilisation pesant.

Après les effets néfastes sur les performances du voilier, causés par la situation d'une coque (ou de la sustentation la remplaçant) dans le milieu sensible de l'interface, effets dont le nombre et l'intensité sont, comme on l'a vu, loin d'être négligeables et quasiment toujours inévitables, il faut maintenant parler des effets limitatifs sur les performances du voilier causés par le système à stabilisation pesante.

- Effet sur la dimension générale de la coque. En appliquant un raisonnement d'échelle à la stabilité pesante, on s'aperçoit rapidement de la supériorité des grandes dimensions. Si on multiplie les dimensions d'un voilier par  $n$ ,  $GM$  est multiplié par  $n$  et le poids par  $n^3$ , le moment de redressement est donc multiplié par  $n^4$ . Pour ce qui est du moment d'inclinaison, il est fonction d'une surface multipliée par une distance, avec un voilier multiplié par  $n$ , le moment d'inclinaison est donc multiplié par  $n^3$ . Au total, la stabilité est augmentée par  $(n^4 - n^3)$ .

Le système pesant trouve ici encore le moyen de favoriser les grandes dimensions, ou plutôt, selon mon opinion, de limiter l'existence des petites. On commet par exemple une erreur lorsqu'on dit, en parlant des grands et larges multicoques, que ce sont des voiliers qui fonctionnent sans aucun lest. Ce n'est que le résultat d'un effet d'échelle qui fait que le poids propre de la structure, à partir d'une certaine taille, devient suffisant pour assurer à lui seul le travail de stabilisation. Il est important de noter que cette taille est limitée dans les deux cas extrêmes. Trop petit, un multicoque aura besoin d'embarquer du lest, trop grand, sa structure sera plus lourde que nécessaire, il devra diminuer sa largeur.

Pour des matériaux et des mises en œuvre contemporaines et une résistance à la haute mer, la taille idéale en terme d'absence de lest

embarqué semble se situer entre 20 et 30 mètres. De la même façon, on voit le tirant d'eau relatif des monocoques diminuer avec l'augmentation des autres dimensions. La taille à partir de laquelle le monocoque peut se passer de lest est cependant tellement considérable qu'impraticable (peut être supérieure à 100 mètres). Pour ces derniers, le malaise du lest est frappant: des dépenses énormes pour construire le plus léger en haut et le plus lourd en bas (carbone en haut, uranium en bas!).

- Heureusement pour les petits, le système à stabilisation pesante a un effet d'échelle limitant sur la solidité structurelle. En effet, tout reposant sur la transmission de couples, la structure du voilier newtonien est dimensionnée pour des moments fléchissants dont la croissance avec les dimensions impose des structures relativement plus imposantes, notamment à cause des efforts d'inertie de masse.

- Effets pénalisant liés à l'indispensable décalage du centre de gravité et centre de sustentation. Pour que le décalage se produise, il faut, pour la plupart des voiliers, une gîte. La gîte entraîne avec elle les plans déviateurs encastrés qui ne travaillent plus de façon optimale, ils perdent de l'énergie dans une composante de compression interne totalement inutile. Ce problème ne manque cependant pas de solutions: certains cherchent à incliner la voile et (ou) la dérive par rapport à la coque (course open, etc.), d'autres à déplacer le centre de gravité (ballast, équipement...). Le déplacement du centre de gravité ne pouvant que difficilement être rendu automatique, il réclame une certaine agilité, attention et action de l'équipage qui ne pourra de toutes façons jamais s'adapter à tout instants aux variations multiples du moment inclinant. Le respect de la limite du moment inclinant reposant sur l'équipage, l'erreur finit inmanquablement par arriver. Pour la prévenir, il n'y a qu'à appliquer des marges de sécurité forcément handicapante. De toutes manières, si l'existence d'une limite avec l'intérêt de s'en rapprocher, est un facteur stimulant pour le sportif, c'est aussi un facteur conservateur à cause du faux espoir de progression dont la marge s'amenuise en réalité inexorablement.

- Effets limitatifs liés au problème de moment inclinant. Qu'il soit en gîte ou en enfournement, il limite l'éloignement vertical et l'allongement des plans avec pour conséquences, la captation d'un

courvent de basse altitude donc de faible intensité et de mauvaise qualité (en terme de turbulence) par un plan de faible finesse.

- Effets limitatifs liés aux considérations de moment de redressement. C'est encore une fois l'allongement de la voilure qui est limité par la remontée intempestive du centre de gravité.

Si on fait le bilan des facteurs limitatifs à l'allongement de la voilure (perturbations induites par rotation, tolérance, couple inclinant, couple redressant), on comprend pourquoi ces plans sont si ramassés! On demande à une voilure deux qualités principales: compacité (faible taille et (ou) forts coefficients de force) et légèreté. Les deux contraintes vont en fait dans le même sens.

Le multiplan disposé transversalement à l'écoulement fut pendant un temps une voie pour une compacité sans diminuer l'allongement, mais en pratique, la finesse n'est semble-t-il guère meilleure.

### Bilan du prix à payer pour le système pesant.

Sans même rentrer dans des considérations quantitatives, devant la masse de celles qualitatives, on voit bien que le prix à payer pour la "coque" ou le système de stabilisation pesant est exorbitant. Sans le transport d'une masse embarquée permettant la "rentabilisation" par une énergie cinétique utile, la coque s'excuse difficilement d'exister! On a pourtant vu que pour minimiser son coût, paradoxalement, il faut se diriger vers de grandes dimensions (moins grand nombre de froude, moins d'excitation par les vagues, plus de stabilité). Le malaise existentiel de la coque n'en est alors que plus grand. Sans parler des absurdes mégolithes creux comme *Vendredi 13* ou *Club Méditerranée*, il n'est qu'à voir les bateaux de la course open en solitaire qui ne sont rien d'autres que d'immenses coquilles vides (si on excepte la discrète présence de la bannette et de la table de navigation dans un recoin). Si d'ailleurs, la classe open essaie d'endiguer le malaise de la taille par une limite exclusive donc dangereuse de la longueur de la coque, d'autres compétitions proposent une liberté totale. Le défi de *the race* ressemble un peu trop, à voir les projets pour l'instant en lices, à un défi du porte-monnaie où la moindre velléité de subtilité est balayée par l'envie de grandeur. Ces monstres me font penser aux camions vides, anciens transporteurs mal recyclés, participant à un rallye dans le

désert et qui tout en dépensant une quantité d'énergie exorbitante se font doubler par une petite moto, voir un char à voile!

### Constatation de fait: médiocrité.

Pour réussir des vitesses absolues honorables, la seule solution est de trouver des plans d'eau artificiellement abrités, de construire des structures extrêmement fragiles, monodromiques pour les moins courageux, et de jouer sur l'habileté des pilotes, pour que, quand les rares occasions météorologiques idéales se présentent, des mesureurs officiels puissent dire après dix tentatives infructueuses et un bon coup: record! Et les journalistes de dire que les voiliers, ceux de leurs lecteurs, sont capables de presque 100 km/h.

Mais le cas des solides voiliers pesants océaniques est bien différent. Leur peu de finesse procure de faibles performances relatives (par rapport au courvent) et pour accéder à de meilleures performances, ils sont obligés d'aller chercher des gros courvents. Les gros courvents s'accompagnent toujours d'une interface et de couches limites plus agitées que la coque transforme en une finesse encore plus nulle. Si bien que finalement, le gain de performance n'est pas très grand en regard des risques encourus. C'est ce cercle vicieux, celui qui fait qu'on a toujours intérêt à chercher un peu plus de vent, même pour peu de gain, qui motive les navigateurs à la fréquentation de dépressions et autres coups de vent dangereux.

Quelques chiffres pour le record de vitesse sur 24 heures. Pour tous types (pesants) confondus, on n'arrive pas à 25 nœuds de moyenne, même avec des conditions aussi idéales que rares. Si on ne regarde que la performance moyenne, et malgré les enthousiasmes présents, le voilier pesant connaît depuis 150 ans une forte stagnation. En 1856, *Champion Of The Seas*, clipper anglais à thé de 72 m construit un an auparavant enregistre 465 miles en 24 heures, soit 19.5 nœuds de moyenne. Ce n'est que depuis ces six dernières années que le domaine de la course à la voile connaît enfin des vitesses supérieures grâce aux multicoques océaniques. Le record actuel (1999), détenu par le tout neuf catamaran géant *Playstation*, est 580 miles en 24 heures, soit 24 nœuds de moyenne. Image en élévation comparant un clipper à un 60'.

Dans le même registre, Le record de l'atlantique détenu en 1905 par *Atlantic* de Charlie Barr n'a été battu que 83 ans plus tard par



Phocéa de.... Bernard Tapie avec l'aide précieuse d'un routage météo par satellite. Et le record actuel (vieux de presque 10ans) de Jet Service V skippé par Serge Madec en 6 jours est bien loin des 3 jours de certains bateaux à moteur (vitesse moyenne supérieure à 35 nœuds).



*Ce vilain petit canard répondant au doux nom d'Iron Duck a atteint la vitesse moyenne de 215 km/h par un vent de 55 km/h, soit une finesse totale de 16 degrés.*

Si on considère comme première limite objective de vitesse à la voile, le moment de la mise en cavitation (j'aborderai plus tard la question du dépassement de cette limite), on peut compter sur des vitesses de 50 nœuds (on ne parle pas de ventilation...). Il n'y a, en effet, aucune raison sérieuse (en termes de dynamique des fluides) d'une limite de vitesse inférieure à celle de la cavitation; le premier véritable changement dans l'état des choses, qui induit, dans le meilleur des cas, avec un profil spécialement adapté, une considérable perte de finesse. Si les voiliers océaniques aujourd'hui en lice ne perdaient pas si tôt leur finesse totale initialement respectable ( = 25° par exemple), ils atteindraient les vitesses cavitantes dès 20 nœuds de vent. Ils pourraient donc sans difficulté, plusieurs jours de suite, si ce n'est durant le temps de la traversée, trouver des conditions météo qui leur permettent une moyenne de 35 nœuds sur 24 heures.

La vitesse à la voile dans des conditions normales (non abritées) est pour l'instant le monopole des voiliers pesants dont la marge de progression considérable avant d'atteindre le premier palier (la cavitation) montre bien leur médiocrité.

## Voilier de vitesse = préoccupation exclusive de **Vitesse**

Aujourd'hui, dans les pays dominants, le voilier n'est plus utilitaire et il n'existe qu'à travers deux symboles, deux gestes gratuits: la **vitesse** et la **liberté**, voyage, évasion, sport.

Le souci de mon exposé est le geste de la vitesse, éminemment contemporain, dans le droit fil du gigantesque chantier de réduction des dimensions de la planète. Le souci de vitesse de plus en plus absolu a produit ce qu'on peut appeler un *voilier de vitesse*, c'est à dire un véhicule tellement conditionné par le temps, que la masse n'est plus considérée. Autrefois, si on faisait référence à une

performance en terme de vitesse, c'était toujours avec l'idée de la masse correspondante (18 nœuds, 400 tonnes...fier d'y être matelot!). Un pêcheur qui arrivait avant tout le monde, mais dont le bateau ne permettait que très peu de charge, n'avait pas réalisé de performance. Même dans le milieu de la régate, la notion de masse utile a longtemps résisté; l'ambition de la majorité des premières jauges était de faire respecter le mérite du confort, de l'aménagement, de la charge utile pour la plaisance. Mais le phénomène était inéluctable, le moteur à vapeur puis à explosion a retiré petit à petit au voilier le rôle de transporteur si bien que dès la fin du 19° siècle, on commence à déconsidérer le facteur masse, "the forgotten factor" dirait Marchaj, dans la performance du voilier.

En France, c'est la réflexion pour le choix de la jauge qui permettrait le développement croissant du sport nautique qui fut le déclenchement. En constatant, à travers des régates de plus en plus nombreuses, la supériorité absolue incontestable des bateaux légers, un spécialiste exprimait le schisme inévitable entre les deux dernières valeurs du voilier occidental: la vitesse et la plaisance : "au point de vue de la logique, le bateau à déplacement, autrement dit, le cruiser, pris comme instrument de régates, n'est pas plus défendable (...) il est illogique de prendre la rapidité comme terme de comparaison pour apprécier la valeur de deux cruisers (...) Le facteur déplacement paraît donc devoir être éliminé de la jauge de course." Hanin, Le yacht n°1051, avril 1898. De toutes façons, la mesure précise du déplacement était trop complexe pour subsister artificiellement. Un architecte naval américain exprime clairement le malaise de la jauge à la fin du XIX°: "S'il y avait un moyen pour que le racer le plus rapide fut en même temps le meilleur cruiser, le yachting et les régates prendraient un immense développement" M.G.H. Duggan, yachtman et architecte naval, *Le Yacht*, août 1898. En fait, ce moyen n'existe que dans certains discours hypocrites et vendeurs qui font par exemple croire qu'un certain bateau ventru et bien habitable de croisière utilise les vertus des formes larges des monocoques de courses...

Aujourd'hui, la préoccupation de masse et avec elle la notion de commerce ou d'utilité par transport, ont totalement (sauf jauges spéciales) **disparu**. Le premier qui arrive est le gagnant même s'il n'a rien à vendre dans ses soutes, même s'il est inhabitable.

La vitesse comme motivation exclusive, la *speed fever*, peut alors se rencontrer sous quatre formes d'événements:

- **le sprint** ou record absolu pour distance ou temps donnés,
- **l'affrontement** ou course à plusieurs sur petit parcours (avec interférence physique entre les concurrents),
- **l'endurance**: course ou record sur grands parcours (sans interférence physique des concurrents),
- **La glisse** ou simple plaisir du pilote.

En perdant sa mission de transport, la coque du voilier de vitesse a perdu sa principale raison d'être, mais de façon suffisamment progressive pour passer quelque peu inaperçu.

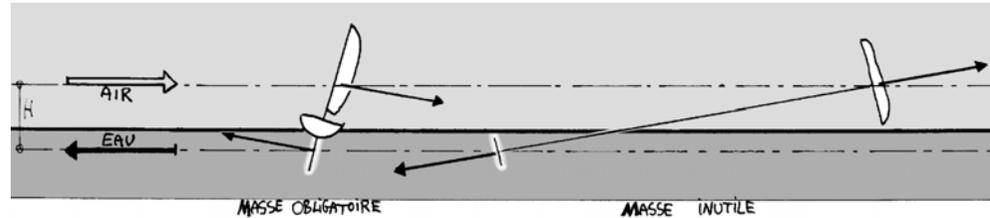
En fait, la seule véritable excuse que j'accorde à l'actuelle existence de la coque (ou du système pesant) pour voiliers de vitesse, est un phénomène d'inertie imitative typique des machines humaines.

La stimulante complexité de la coque dans l'interface est, à mon avis, un facteur majeur de cette inertie. Un très joli savoir s'est développé, laissant la part belle à l'imagination et au rêve, et des règles tacites se sont mises en place pour l'utilisation de ce savoir. La conception d'un voilier, pour paraphraser J.M.Finot, est un peu comme une partie d'échec mais dont on ne connaît les coups de l'adversaire qu'à la fin. Il y a des règles du jeu ancestrales que l'on respecte, sachant qu'elles sont propices au développement de stratégies, à de belles empoignées intellectuelles. Il y a aussi un club de joueurs, qu'on ne peut rejoindre qu'en travaillant inlassablement le jeu, que lorsque certains adhérents, devenus trop vieux, cèdent leur place, ou quand les locaux s'agrandissent un peu.



Léonard, en inventeur désintéressé, cherche à inventer le voilier de vitesse et non le voilier utilitaire. Il ne peut donc pas prendre en compte, pour la décharge de la coque (et de toutes stabilisations à appui pesant sur l'interface) l'argument du transport comme le fait encore inconsciemment l'homme contemporain chargé de tradition et pour qui le voilier est un être aussi préexistant à l'homme que peut l'être l'oiseau ou la méduse Siphonophore ("véritable voilier du monde animal"). L'idée d'une coque l'avait rassuré sur la faisabilité du voilier, il va maintenant chercher à s'en passer.

## Alternative sans masse par le biais



Léonard, ne s'étant engagé dans aucune partie, est capable de remettre en question la première solution qu'il avait imaginé dans son empressement pour viabiliser son idée de voilier. Car il sait bien qu'une qualité essentielle d'un concepteur est de n'arrêter une idée que le plus tard possible, d'essayer de repousser au plus loin l'autosatisfaction. Il revient à son questionnement initial et encore tout proche (c'est bien là l'avantage des méthodes d'analyse rapide que de pouvoir maintenir un certain fil au raisonnement global, notamment de pouvoir revenir sur ses pas et c'est aussi le danger de la trop forte volonté de perfectionnement que de négliger des branches parallèles) : "Pour exploiter l'énergie du courvent, il faut obligatoirement disposer les deux plans à des altitudes bien différenciées, en d'autres termes, la voile devra se trouver au-dessus de la dérive." C'est précisément dans la deuxième partie de cette analyse que le raisonnement est allé un peu trop vite. Qu'il faille "obligatoirement disposer les deux plans à des altitudes bien différenciées" est un fait indiscutable, mais l'idée que "la voile devra se trouver "au-dessus" de la dérive", l'est beaucoup moins. Dans la question qui a suivi, le premier adverbe *verticalement* est de trop.

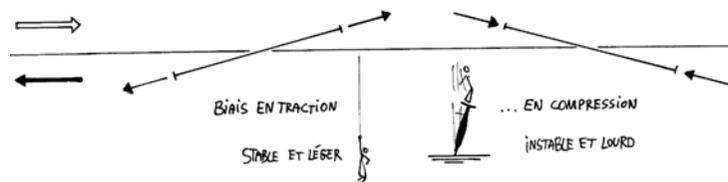
"Comment maintenir verticalement une structure soumise à deux forces nécessairement proches de l'horizontalité et dont les droites d'action sont nécessairement éloignées verticalement ?"

Ceci montre, s'il en était besoin, toute l'importance et l'attention qu'on doit accorder aux raisonnements préliminaires. Averti des problèmes causés par la masse et sa nécessaire sustentation, Léonard entrevoit une alternative non pesante à sa première idée.

**Par un éloignement horizontal et une mise en biais des deux plans déviateurs, on peut obtenir un alignement total des deux droites d'action au prix d'une baisse de finesse totale proportionnelle au cosinus du biais.** Or, chacun sait que pour les petits angles, le cosinus ne décroît que très lentement. Le prix en terme de finesse sera donc minime pour de faibles inclinaisons des plans. Si les plans travaillent avec un faible biais, donc

considérablement éloignés horizontalement, la perte de finesse est faible.

Autrement dit, plutôt que d'essayer de rapprocher des droites d'action parfaitement horizontales (et d'inventer un système pesant pour contrer un couple de toute façon inévitable), éloignons les plans déviateurs et inclinons les jusqu'à ce que les premières s'alignent. On sacrifie ainsi une part de l'énergie de déviation dans une composante de *tension verticale interne* dont l'intensité s'adapte automatiquement aux variations d'intensité des forces dynamiques. Il n'y a alors pas de moment inclinant ni de moment de redressement qui essaient d'en contrer à tout moment les variations. Il s'agit donc d'un système dont la seule limite de raideur est le décrochement d'un plan déviateur, la cavitation du plan hydrodynamique ou encore la rupture de la structure de liaison. Pour aligner les droites d'action par le biais, on dispose de deux possibilités structurelles: traction ou compression. La compression ne possède aucun avantage et deux gros inconvénients: le flambage qui impose un surdimensionnement de la structure (entraînant une masse et une traînée non négligeables) et l'instabilité rotatoire de l'ensemble qui impose d'énormes moyens de stabilisation forcée.



La tension ne possède que des avantages.

- C'est la meilleure configuration structurelle en terme de dimensionnement: toute la matière est utilisée utilement et conjointement dans le même effort. La fil est la base de l'idéal de l'ingénieur Freyssinet "remplacer la matière qui est pesante par des forces qui, elles, ne pèsent rien." Il n'y a pas d'exigence de raideur, et le principal critère de sélection du matériau est le rapport  $Re/densité$  qui doit être le plus grand possible ( $Re = limite$

élastique); les antiques et pesants métaux peuvent alors disparaître de la structure du voilier.

- C'est la configuration qui garantie le meilleur potentiel de stabilité. Pour s'en persuader, il suffit de comparer la stabilité de route d'un monocoque au près (composante de structure horizontale principalement en tension) à celle d'un catamaran (composante de structure horizontale principalement en compression).

### Définitions

Avec les configurations de voiliers dont la structure principale est en traction simple, abordées comme solutions plus prometteuses que celles des voiliers pesants, nous venons de rejoindre l'objet principal de mon exposé. La clarté de l'exposé suivant nécessite une série de définitions afin de pouvoir reconnaître ou nommer les nouvelles notions fondamentales.

J'appelle aile d'eau un voilier dont les plans déviateurs sont équilibrés de façon autonome dans leurs mouvements et sont reliés entre eux par à une structure souple en traction simple, présentant un *biais* par rapport à l'horizontal et résistant à la tension interne en utilisant le minimum de volume et de masse afin de minimiser les trois ennemis de la vitesse: perforation de l'interface, surface mouillée et poids.

En plus de la simplification du problème de couples en opposition, l'aile d'eau supprime l'élément parasite inutile, guérit le voilier de son appendicite par une pure et simple ablation. Désormais, on ne laisse traîner dans l'aveugle interface que le strict minimum, un fil.

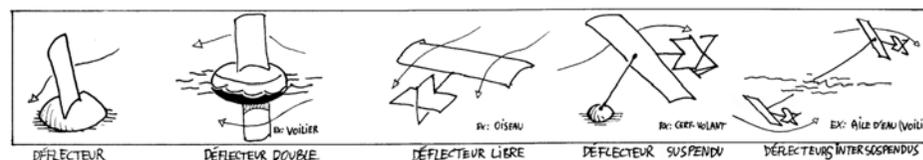
Cependant, la suppression de l'élément polyvalent qu'est la structure pesante en appui sur l'interface implique l'intervention de fonctions de remplacement. En particulier, les fonctions de stabilisations sont nécessairement assurées par les plans déviateurs eux-mêmes, avec l'aide de différents artifices. La règle du jeu étant alors d'éviter au maximum que ces artifices fonctionnent par contact avec l'interface, afin d'éviter de recréer une coque.

J'appelle déflecteur, l'ensemble indéformable constitué au moins d'un plan déviateur et des artifices de stabilisation indispensables au maintien des qualités de déviation.

L'oiseau ou l'avion sont des déflecteurs libres. Les déflecteurs d'un voilier à stabilité pesante sont encastrés l'un dans l'autre si bien qu'ils ne forment qu'un seul déflecteur double.

Je qualifie de suspendu, un déflecteur relié à son appui par une structure souple de telle sorte que seul son pilonnement propre\* soit contraint.

Déflecteur suspendu aérien est l'autre nom pour cerf-volant. Quel autre nom pour déflecteur suspendu sous-marin? A suivre...



De façon abrégée, j'appelle alors aile d'eau, un voilier constitué de deux déflecteurs *inter suspendus* et évitant au maximum le contact avec l'interface.

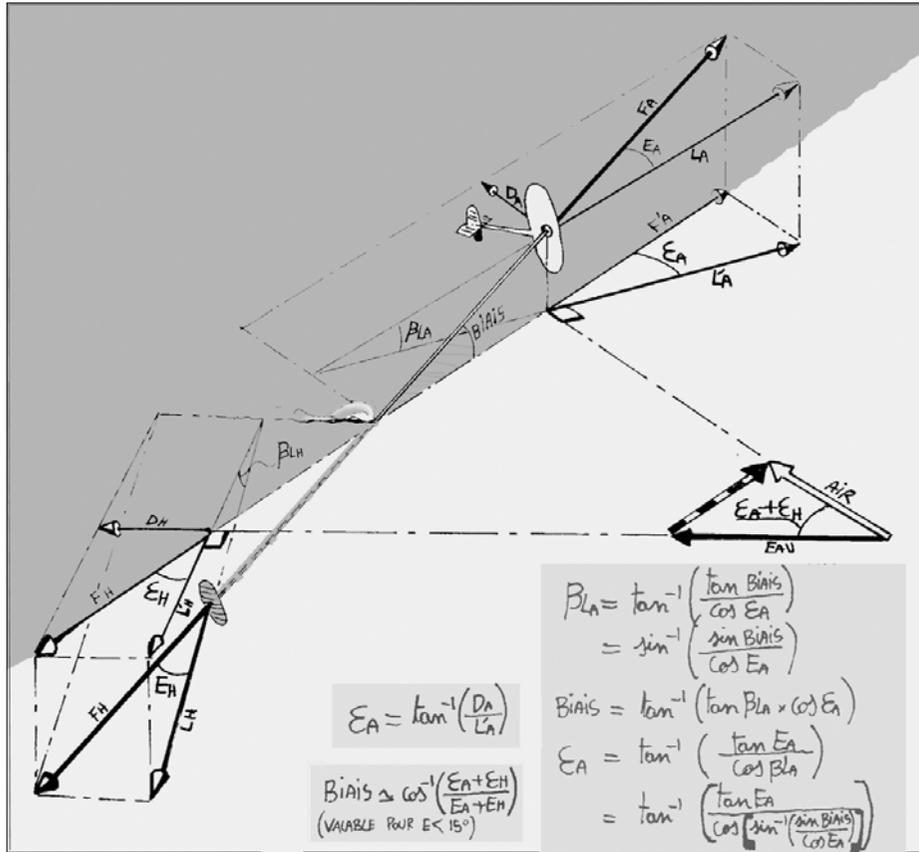
En retirant la coque, l'aile d'eau, s'approche du minimum élémentaire: Deux déflecteurs et un fil pour deux plans déviateur et une structure de liaison. "*La perfection de l'invention confine à l'absence d'invention*" (Antoine de Saint Exupéry).

J'ai opté pour le nom *aile d'eau* car il permet d'évoquer à la fois l'idée du vol et de la navigation. La voilure reliée par une structure souple est, comme son homologue sous-marin, l'équivalent d'un cerf-volant, d'un vol captif, mais un vol captif en mouvement (drôle de paradoxe). L'aile d'eau est un peu au cerf-volant ce que le vol libre est au vol captif. En effet, comme pour le vol libre, l'élément de réaction à la force aéro ou hydrodynamique se déplace en même temps que le plan. Le nom d'aile d'eau tient dans le fait que c'est une sorte de *vol libre d'eau*. Dans l'appellation *aile d'eau*, je privilégie l'élément air car le plus marquant, le mot eau est là pour rappeler une fonction de navigation. *Aile d'eau* a une construction qui rappelle le fonctionnement largement symétrique du voilier (aile d'eau = air-eau). Attention toutefois, je n'ai pas pensé le nom *aile d'eau* pour désigner le déflecteur suspendu sous-marin.

Par une approche tout aussi restrictive mais exclusivement structurelle, on peut également définir l'aile d'eau comme, un voilier dont la structure de liaison des deux plans déviateurs aéro et hydrodynamique est souple et en traction simple. La

propriété structurelle conditionne toutes les autres caractéristiques de l'aile d'eau: la masse faible, le *biais* et la faible perforation de l'interface.

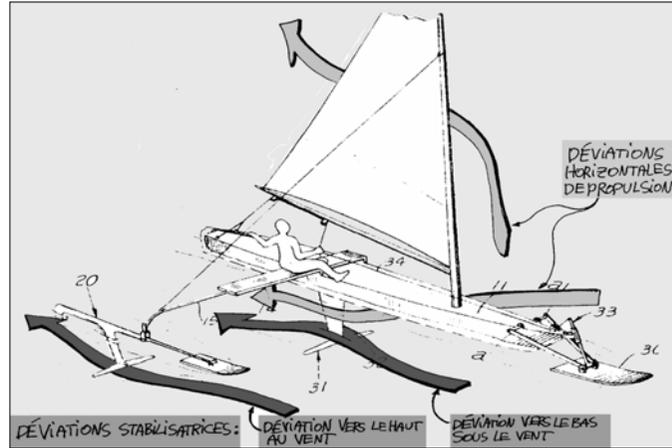
J'appelle Biais, l'angle que fait la structure de liaison des plans déviateurs avec le plan horizontal de l'interface.



Les cinq principaux type de voiliers "sans masse"

### Voiliers "sans masse"

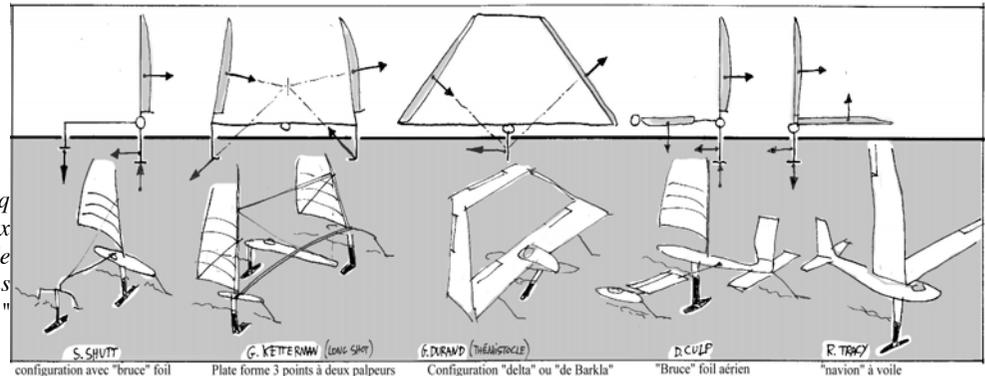
L'aile d'eau appartient à la famille des voiliers sans masse. J'appelle voiliers "sans masse" tout voilier qui n'utilise directement son poids dans aucune des stabilisations indispensables à savoir: *altitude, biais* et *allure*.



Je donne ce simple exemple pour illustrer un propos valable pour tous les voiliers "sans masse".

Pour ce qu'il appelle son High Speed Sailboat, on devine que S. Shutt s'est inspiré en 1973 des recherches déjà avancées de Hook pour les foils non perceurs. Cependant, Shutt prend une direction originale qui préfigure Long Shot.

Le souci des voiliers "ordinaires" *sans masse* est de ramener les centres d'effort de chacun des deux fluides à la même altitude. Pour cela, comme pour l'aile d'eau, la seule alternative est de produire des déviations biaises, c'est à dire non plus seulement horizontales mais aussi verticales des fluides. Les déviations verticales peuvent s'opérer au choix sur un seul fluide ou sur les deux, l'important est qu'il y ait à la fois et au moins une déviation vers le bas pour le côté sous le vent de la structure et une déviation verticale vers le haut pour le côté au vent.

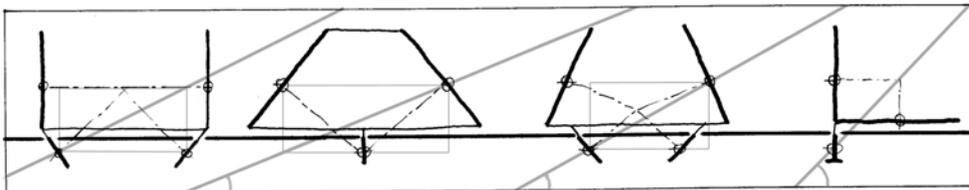


S. SHUTT configuration avec "bruce" foil G. KETTERMAN (LONG SHOT) Plate forme 3 points à deux palpeurs F. DURAND (MÉNÉSTRICLE) Configuration "delta" ou "de Barkla" D. CULF "Bruce" foil aérien R. TRACY "navion" à voile

Pour le voilier "ordinaire" *sans masse*, il n'y a pas, comme pour l'aile d'eau, de manifestations physiques de ce biais. L'introduction d'une valeur calculée s'avère utile, notamment pour l'optimisation d'une largeur entre plans à déviation verticale.

La détermination exacte (mais compliquée!) du biais par le calcul prend en compte les mesures de cinq finesses. Un simple calcul approché (valable pour des finesses de plans supérieures à 3) permet de n'utiliser que deux valeurs, finesse totale effective et finesse totale potentielle: **Biais = ACOS (finesse effective totale / finesse totale potentielle)** (sans biais)).

Une méthode graphique également approchée (pour des finesses de plans supérieures à 3) permet de déterminer le biais sans aucune mesure de finesse.



Cas où un seul des fluides est dévié verticalement: on prend la largeur entre les deux déviateurs intéressés.

Cas où les deux fluides sont déviés verticalement: on prend la largeur de la demi-unité.

Cas évident se rapprochant de l'aile d'eau.

Le représentant le plus célèbre des voiliers *sans masse* est *Long Shot* de Greg Ketterman. Ce voilier est à mon avis le plus méritant des derniers détenteurs de record absolu à la voile sur 500 mètres. En effet, c'est lui qui a introduit le concept d'une plate forme sur trois appuis, simple efficace mais surtout *bidromique* (qualité rare en ce domaine).

Sur cette image, *Long Shot* est un voilier à stabilité pesante puisque son foil au vent est hors de l'eau. Il ne s'agit à mon avis que d'une situation temporaire accidentelle.



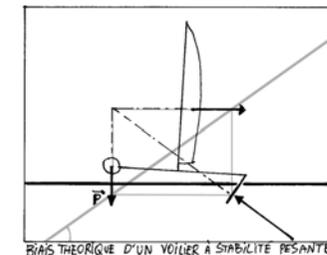
## comparatif du voilier pesant face au voilier sans masse ordinaire

Le multicoque ou l'hydroptère face à Long Shot.

L'hydroptère, bien connu en France, est souvent présenté comme essentiellement original. En réalité, ce n'est qu'un voilier pesant car son foil au vent n'est pas capable de créer une déportance, c'est à dire de composante plongeante remplaçant le poids. Tout au plus, l'hydroptère pourrait-il (s'il était plus large et que les centres d'efforts hydro et aéro étaient à la même altitude) créer un couple redressant sans gîtes par la seule différence (due à la dérive) de sustentation entre les deux foils. Cependant, aux largeurs considérées, la gîte du multicoque est bien faible pour être pénalisante.

La comparaison multicoque ordinaire face au voilier sans masse ordinaire peut donc s'étendre à l'hydroptère face à Long Shot. Et les différences dans les modes de sustentation sont négligées.

En négligeant le phénomène de gîte, on peut déterminer au multicoque un biais théorique dans le calcul duquel le poids est supposé être l'équivalent de l'action d'un foil plongeant idéal de finesse infini (comme chacun sait, le poids est ce qu'on fait de plus strictement vertical).



Voilier pesant en position idéale instable

La composante plongeante du couple redressant du multicoque (ou de l'hydroptère) connaît une valeur maximale: le poids total. Si bien que la régulation n'est possible sans gîte, à la manière d'un voilier sans masse, qu'entre un couple inclinant zéro (tout le poids au vent est directement en appui sur l'interface) et un couple inclinant maximum (plus aucun appui sur l'interface au vent). Si on imagine un poids du multicoque minimal de façon à être exactement adapté au couple inclinant, on est en présence de l'équivalent d'un voilier sans masse dont la déportance verticale au vent à un rendement infini. D'où la possibilité d'une meilleure finesse totale.



J'ai mis ici en évidence l'avantage que peut avoir un voilier pesant (multicoque à déplacement ou à foils perceurs, par exemple) par rapport au voilier sans masse de même biais théorique. Cependant la supériorité du système pesant n'est assurée que si le poids est minimal, c'est à dire exactement adapté au couple inclinant; supposition idéale mais non réaliste.

En réalité, même pour un *courvent* invariant (déjà irréaliste), le couple inclinant varie très rapidement par le simple changement de vitesse du voilier. Le voilier pesant, ne pouvant instantanément changer de masse, se doit de garder une marge de sécurité dans son couple redressant; il est en pratique obligé d'avoir un poids surabondant, donc une perte d'énergie par portance surabondante qui inverse l'avantage précédemment évoqué de *déportance gratuite*.

La marge de progression d'un voilier pesant tient souvent dans sa capacité à travailler avec peu de marge de sécurité, grâce à une agilité quelconque mécanique ou humaine (variation du volume de ballast liquide, déplacement rapide de l'équipage, action constante sur la puissance des plans déviateurs).



L'équipage de Slingshot cherche anxieusement la limite.



Le succès de la planche à voile réside pour une grande part dans son délestage automatique de la charge aérodynamique.

Le voilier sans masse a l'avantage très intéressant d'une *composante verticale de tension interne* optimale, exactement dimensionnée aux besoins du moment. Il n'a pas de besoin de marge de sécurité, il n'a donc pas de surabondance de sustentation.

Enfin, on peut dire que le voilier sans masse s'inscrit dans une évolution générale de l'histoire du voilier, qui a vu sa masse relative s'amenuiser à partir d'une date charnière: 1851, victoire d'America sur ses concurrents anglais symbolisant la victoire des Américains nouvellement préoccupés par la vitesse sur des Britanniques encore empêtrés dans des considérations absurdes de déplacement.

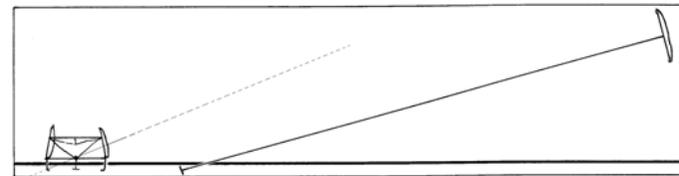
### comparatif du voilier ordinaire sans masse face à l'aile d'eau

Problème de structure

Tout comme pour le voilier pesant, la structure rigide de l'ordinaire voilier sans masse (tel que Long Shot) a pour mission, dans le plan transversal, de transmettre des couples, d'où un coût plus important en masse. Son effet d'échelle transversale (du à la présence d'efforts de flexions) pénalise les grandes tailles nécessaires à la fréquentation des eaux océaniques.

Avec l'aile d'eau, il y a possibilité de remplacer la notion d'appui sur l'interface par celle de *perforation minimale*. La structure traversant l'interface est en traction simple, elle représente donc la plus faible perforation qu'on puisse idéalement faire avec une tension interne donnée.

Contrairement au voilier sans masse ordinaire, l'aile d'eau qui peut se permettre des biais très faibles tout en adoptant de grandes hauteurs de captation de courvent et de faibles perforations de l'interface est particulièrement adapté à la fréquentation de mers et de vents agités. L'aile d'eau est le 4x4 des voiliers sans masse.



Long Shot face à une aile d'eau. Biais: -30%, Poids: -50%, perforation: 3x moins, hauteur de captation: 5x plus, traînée de la structure: identique!

Enfin, l'aile d'eau propose une compatibilité élémentaire à l'idée de sustentation aérodynamique car le déflecteur aérien suspendu passe en effet aisément de la qualité de propulseur à celle de sustentateur.

## Bilan de l'aile d'eau face au voilier pesant

Par le fait d'une perforation négligeable de l'interface, l'aile d'eau telle que théoriquement présentée, est quasiment indifférente aux phénomènes d'interface qui handicapent tant les voiliers pesants. Grâce à cette indifférence, sa finesse totale reste quasiment constante jusqu'à son premier palier, la cavitation. La première véritable limite dans la vitesse absolue de l'aile d'eau sera donc la vitesse de cavitation, dont la valeur se situe autour de 85 km/h. L'introduction de profils supercavitants bien que moins fins, permet d'envisager une existence au-delà de ce palier, idéalement jusqu'au second palier (qui ne pourra être atteint faute de courvents suffisamment forts): la vitesse du son! Ainsi, la voile sur l'eau pourra cesser d'être autant ridiculisée par la voile sur roue (aujourd'hui de 215 km/h par Iron Duck).

Il n'y a aucun doute, même avec une analyse presque exclusivement qualitative sur le fait qu'un voilier à structure tendue (aile d'eau) est plus rapide qu'un voilier à stabilisation pesante et plus polyvalent qu'un "ordinaire" voilier sans masse. Léonard ne connaissant pas l'histoire du voilier n'aura aucun scrupule à en rester là et à passer son chemin vers d'autres inventions.

Pour ma part, je ne lâcherai pas l'affaire. Je sais que le voilier pesant a existé, existe et domine encore dans le domaine de la vitesse. Je ne peux donc que rester prudent et pousser un peu plus le questionnement. Il n'y a aucun doute possible sur la supériorité de l'aile d'eau telle que je l'ai idéalement définie. Qu'en est-il de l'aile d'eau réelle? Quelles en sont les limites pratiques?

Ayant déjà fait remarquer que, dans le domaine du voilier, on ne peut véritablement prétendre avoir raison qu'avec la preuve par les faits, mais n'ayant ni les moyens ni le temps, dans le cadre de ce travail de fin d'études, de développer un engin compétitif, je me contente pour l'instant d'une ébauche d'expérimentation et d'un questionnement systématique du réel.

G.L. Watson, un architecte anglais disait à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle: *"J'espère que nous n'aurons plus à nous soucier de naviguer sur un élément aussi lent (sluggish) que l'eau. Je crois fermement qu'un jour, les airs seront aussi facilement traversés que les continents et les terres"*. Marchaj, qui le cite (aéro-hydro of sailing p 127) pense

bien sûr à l'aviation. Pour ma part je me plais à y voir une vision prospective de l'aile d'eau.

Aujourd'hui, le scepticisme a davantage de vigueur. Pour le cas de l'aile d'eau, il s'applique systématiquement et naturellement aux fonctions de remplacement de la coque, aux systèmes de stabilisations ne prenant pas appui sur l'interface. Comment croire que des éléments aussi capricieux qu'une voile ou une dérive, qui ne cherchaient auparavant qu'à coucher le voilier, puissent tout à coup devenir suffisamment matures pour se débrouiller seuls?

Je consacre les prochains chapitres à un questionnement de cette éventuelle maturité. Dans un premier temps, les questions qui ont principalement trait à l'autostabilisation en **altitude**, **biais** et **allure**. Dans un deuxième, celles ayant trait aux différents aspects pratiques de la navigation: démarrage, arrêt, changement d'amure, sécurité en cas de chute, en cas de fort courvent, habitat, facteurs d'échelle.

Je vais tâcher de montrer qu'on a tort de dire ou penser un peu trop vite des choses du genre: "Avec une voile, il n'y a pas d'autocontrôle possible et on peut assister à des choses bizarres, du style décollage total du bateau - ce qui serait vraiment désagréable!". Heureusement pour l'auteur de ce passage, un honorable souci rhétorique de ne rien exclure lui fait ajouter: "on peut utiliser la voile pour soulager la coque mais jusqu'où aller?" (F. Lefaudeux, ingénieur de l'armement, propos recueillis par voiles et voiliers N°316).



### Post-scriptum.

En rangeant mes vieux papiers je suis tombé sur un voilier "sans masse" qui avait marqué ma curiosité d'adolescent, un drôle d'engin qui est toujours restée pour moi comme la marque de l'étrangeté anglaise. Il s'agit du voilier du milliardaire britannique Peter de Savary dessiné par Derek Clark pour concourir dans la course de l'America "no limit" de 1988.

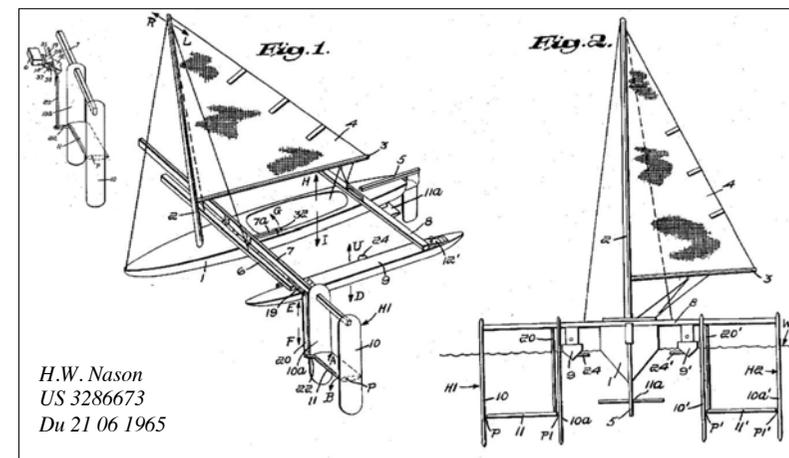
L'architecte ambitionnait des vitesses faramineuses (40 à 50 nœuds), mais replacé dans le contexte du voilier sans masse, *Blue Arrow* n'a rien d'extraordinaire et ses performances ont déçu. De toutes façons, il n'a pas été autorisé à concourir...

Pour ma part je regrette la création de la jauge des class america car la coupe de l'America aurait vraiment pu permettre d'investir largement dans des solutions innovantes. Et ce n'est, à mon avis, pas la classe C qui la remplacera...



Voiles et voiliers N°287

Je commence cependant à croire que rien n'est véritablement nouveau. Voici le grand-père de Blue Arrow, vieux de près de quarante ans et qui dort dans les grands cimetières à idées que sont les bibliothèques de brevets.





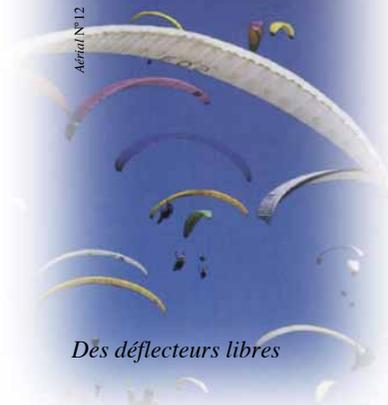
## II- équilibre du déflecteur suspendu



Point d'ancrage d'un déflecteur suspendu

Où il est question des mouvements que le plan déviateur doté de moyens hydro ou aérodynamiques peut stabiliser lorsqu'il est suspendu.

*"Ce jouet d'enfant, méprisé des savants, peut donner lieu aux réflexions les plus profondes"*  
Euler, mathématicien, 1756



Dès déflecteurs libres



Un déflecteur suspendu

Les déflecteurs de l'aile d'eau sont inter-suspendus à une structure souple donc n'en reçoivent aucun couple et quasiment aucune torsion. Leur seul mouvement contraint est la translation dans le sens du fil (le pilonnement propre). Pour maintenir sa position face à un écoulement, le déflecteur de l'aile d'eau ne doit compter que sur lui-même. Il reçoit toujours des informations de l'autre déflecteur (changement d'intensité de traction et de position relative) mais ces informations sont incapables, ne comportant ni couple ni moment de torsion, de jouer une part importante dans la stabilisation propre. Pour étudier l'équilibre général de l'aile d'eau, il est pratique de décomposer le problème en étudiant l'équilibre d'un seul déflecteur suspendu c'est à dire un déflecteur suspendu à un point de fixation sans propriétés hydro ou aérodynamique.

## A- Le déflecteur suspendu

**Introduction géométrique au déflecteur suspendu.** La littérature concernant l'équilibre du déflecteur suspendu ne semble pas avoir progressé depuis les Encyclopédistes. Je n'ai malheureusement trouvé rien d'autres que des considérations triviales. D'autres me témoignant par la suite de cette même pauvreté, j'en conclus à un désintéressement généralisé du fonctionnement de l'objet. Ça peut marcher, on le voit bien, on le construit bien et le peu d'explications dont les esprits ont besoin peut bien être très largement construit par irreflexion instinctive. La marque d'une telle pauvreté est la lenteur d'évolution qui caractérise un type bien répandu de déflecteur suspendu: le *cerf-volant*.

Je me suis donc trouvé dans l'obligation, pour me construire des explications, d'avoir recours à des expérimentations personnelles basiques d'une rigueur et d'une précision bien pauvres étant donné mes moyens. Cette introduction, par la voie de l'expérimentation, à un domaine qui m'était inconnu, a malgré tout les avantages pédagogiques bien connus et largement utilisés en formation d'architecture navale; Si l'on adhère à une théorie, de la connaissance ou autre, mieux vaut que ce soit en toute conscience! Mon propos sera construit, le plus souvent et d'après analyse déductive de l'observation du réel, d'un mélange de théories personnelles provisoires, approximatives mais fort pratiques en attendant d'éventuels auteurs pleins de rigueurs et de moyens. J'apprends qu'un docteur en aérodynamique, Justin Stevenson, a commencé en ce début d'année 2000, en Nouvelle Zélande, une recherche fondamentale avec la collaboration d'un illustre concepteur de cerf-volant, Peter Lynn. En espérant de très utiles résultats de cette étude et la découverte d'autres que je ne connais pas, j'en reste pour l'instant aux observations que je vous livre.

Le problème de l'écoulement sur le déflecteur suspendu peut s'aborder de deux manières extrêmes.

- Soit par un fluide en mouvement par rapport au sol (ou l'interface), le déflecteur étant suspendu à un point de fixation immobile  $F$  sur le sol (ou l'interface).
- Soit par un point de fixation  $T$  en mouvement par rapport au fluide, le fluide étant immobile par rapport au sol (ou à l'interface).

Les deux cas sont très ressemblants mais pas strictement identiques. En effet, dans le cas du fluide en déplacement sur le sol, l'écoulement n'est pas d'une perfection laminaire, il y a manifestation des phénomènes de frottement sur le sol liés à la viscosité du fluide (turbulence et couche limite). Pour une aile d'eau en déplacement permanent, l'écoulement au niveau des déflecteurs est un mélange des deux cas. Plus la finesse totale de l'aile d'eau est importante, plus sa vitesse relative l'est aussi et plus le cas se rapproche d'un écoulement laminaire.

J'ai mené des expériences avec les deux types d'écoulement et le plus riche en enseignements, car le plus exigeant en terme de stabilité est l'écoulement par déplacement du fluide sur le sol.

**Géométrie du déflecteur.** Le déflecteur a déjà été défini comme étant l'entité indéformable dont la fonction est de dévier un écoulement de fluide.

Le déflecteur suspendu n'a pas de masse. Plus exactement, il n'a pas, à l'inverse de son homologue isolé, besoin de masse pour dévier le fluide. Ce qui remplace le poids dans la réaction à la force aéro ou hydrodynamique, c'est la traction du fil.

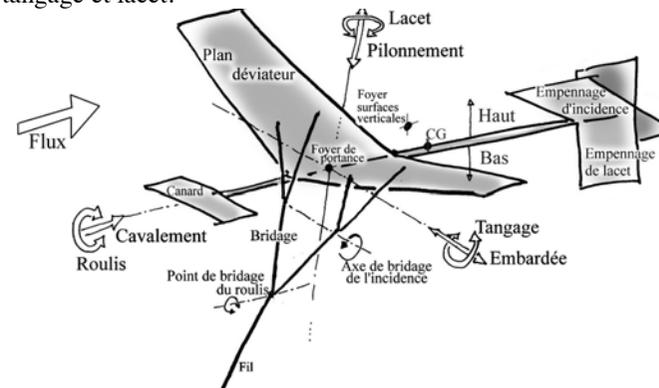
On appelle facteur de charge le rapport de la force développée par le plan déviateur sur le poids du déflecteur.

Quand facteur de charge = 1 (le cas d'un vol libre permanent), la déviation ne peut qu'être vers le bas. Pour un déflecteur suspendu, le facteur de charge est d'autant plus grand que la vitesse du fluide augmente, jusqu'à un point où le poids devient négligeable et où le sens de déviation du fluide peut être quelconque y compris purement horizontal.

Il existe cependant une ressemblance entre le pilotage d'un déflecteur libre (un aéronef quelconque) et celui d'un déflecteur suspendu. L'aéronef utilise temporairement des déviations à composante horizontale afin de réagir aux forces centrifuges dues aux accélérations centripètes des trajectoires courbes. Ce faisant, il augmente son facteur de charge de la même façon que pour le déflecteur suspendu. L'apport de charge sur le déflecteur libre est toujours appliqué sur le même point: le centre de gravité. La géométrie du déflecteur suspendu ne se différencie alors de son homologue isolé que par la présence d'un autre point remarquable où s'appliquent l'apport de charge, le point d'accroche du fil ou point de bridage, centre des éventuelles rotations propres du

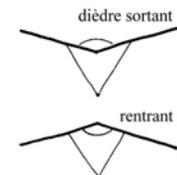
défecteur suspendu. Si le point de *bridage* n'est pas confondu avec le centre de gravité, le point d'application de la charge totale varie en fonction du facteur de charge.

Les 5 mouvements, trois rotations, deux translations (le pilonnement est contraint), sont référencés à la perpendiculaire au plan déviateur, abusivement qualifiée verticale (attention aux confusions lorsque le plan déviateur est réellement proche de la verticale !). En fait, pour le déflecteur suspendu, les deux translations libres sont des rotations de centre: le point de fixation du fil au sol. Plus la longueur du fil est petite, plus on peut résumer les mouvements du déflecteur captif à 5 rotations: roulis, tangage, lacet, grand roulis, grand tangage, jusqu'au point où grande rotation = rotation propre et où il ne reste donc que trois rotations: roulis, tangage et lacet.



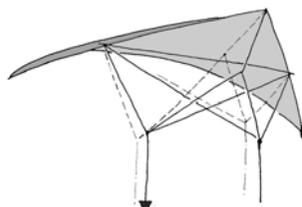
Géométrie élémentaire du déflecteur

Précision sur le dièdre: j'appelle dièdre sortant, l'angle de fermeture vers l'extrados du plan déviateur, et dièdre rentrant l'inverse. Le dièdre est un moyen simple et efficace d'intégrer au plan porteur une composante de surface verticale. Il joue un rôle primordial dans la stabilité du déflecteur.



Précision sur le bridage: Le bridage est une structure **indéformable sous la traction du fil** en condition de vol suspendu normal, dont la fonction est d'éloigner du plan déviateur, le point d'accroche de la structure souple. La structure du bridage peut alors être soit complètement rigide, soit souple mais triangulée de façon à ce que la traction du fil soit incapable de la déformer. Le bridage en structure "souple" triangulée permet (en plus de l'économie de

masses) de distinguer deux points de bridage selon la rotation considérée.



Bridage "actif"  
du Speed wing

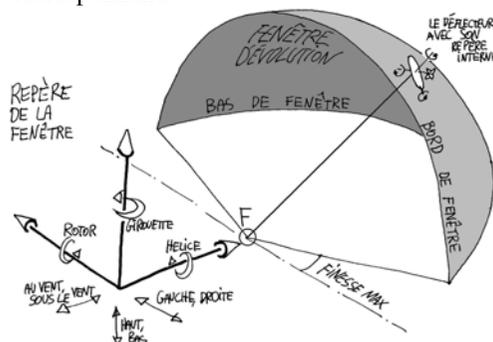
Une déformation active du bridage peut être prévue dans le but de piloter le déflecteur. Pour les cerfs-volants de sport, par exemple, dont le pilotage s'effectue par plusieurs fils reliés au pilote qui fait varier leur longueur, le bridage s'étend par définition jusqu'au pilote. Des sous systèmes de bridage peuvent alors être mise en place au niveau du cerf-volant avec possibilité de déformations répercutées d'un système à l'autre.

**Sphère d'évolution.** Je considère ici un déflecteur suspendu capable de se défaire d'un contact avec l'interface ou le sol, et n'ayant donc pas besoin de s'y appuyer pour se stabiliser.

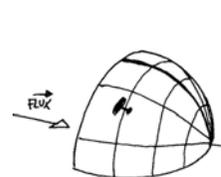
La finesse d'un déflecteur suspendu stabilisé se déduit directement de l'angle que fait le fil de retenu avec la trajectoire de l'écoulement. C'est ce que j'appelle la *finesse propre*. Pour une finesse propre maximale donnée dont est capable un déflecteur, on peut définir le lieu des positions possibles d'évolution du déflecteur. Il s'agit bien évidemment d'une portion de sphère ( couramment appelée **fenêtre**) délimitée par deux lignes remarquables, le cercle de finesse maximale (ou **bord de la fenêtre**) et le cercle du bas (qui est en fait en haut dans le cas d'un déflecteur sous-marin).

Afin de pouvoir référencer les mouvements et les positions du déflecteur suspendu dans la portion de sphère, il faut dans un premier temps orienter l'espace. La direction remarquable est celle horizontale de l'écoulement (celle du champ gravitationnel est moins importante étant donné le poids potentiellement négligeable du déflecteur). On définit ainsi trois axes (l'axe de l'écoulement (vent ou courant) l'axe vertical et l'axe horizontal) et les 6 mouvements correspondants.

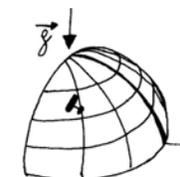
La rotation d'hélice est la seule des trois qui ne peut être directement régulée par les caractéristique de l'écoulement (invariant selon cet axe). Comme nous le verrons, cela va faire de la régulation du grand roulis, le problème le plus ardu du déflecteur suspendu.



Il faut ensuite cartographier la sphère par des lignes de deux types, parallèles ou méridiennes. L'ensemble des lignes parallèles et méridiennes forme un réseau d'axe donné (Pour la planète terre l'axe choisi est son axe d'autorotation). Pour la sphère d'évolution du déflecteur, il y a deux types de réseau utile: réseau d'axe vent ou courant, et réseau d'axe vertical.



Axe flux:  
méridien = lignes d'iso pente de portance, ligne d'iso pente de l'envergure.  
parallèle = lignes d'iso-finesse.



Axe pesanteur:  
Méridien = lignes de montée de fenêtre, lignes d'iso-finesse horizontale.  
Parallèle = lignes d'iso-altitude, lignes d'iso-biais.

La sphère peut se découper en deux types de déviation. Déviation a composante horizontale gauche ou droite. Les deux types de déviation sont séparés par une ligne remarquable, la **ligne centrale** de la fenêtre.

La ligne centrale n'a aucune raison d'être une ligne de restriction de la sphère d'évolution. Il vient donc une propriété essentielle du déflecteur suspendu: il est capable d'un changement de sens de déviation horizontale du fluide, en symétrie bilatérale et par le simple passage de la ligne centrale.

**Remarques sémantiques sur la question de l'équilibre du déflecteur suspendu.** Mon étude de l'équilibre se résume à une étude de la stabilité d'une position et (ou) d'une vitesse donnée d'un mobile.

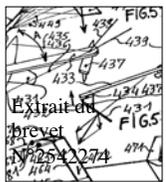
Le mobile a trouvé une position ou une vitesse stable lorsque, soumis de part ou d'autre à de faibles perturbations, il tend à retrouver les valeurs originelles. S'il le fait sans déformation propre, la stabilité est qualifiée de passive. Si une déformation volontaire est nécessaire, la stabilité est qualifiée d'active. Un mobile pourra avoir une stabilité mixte avec des proportions variables de passivité et d'activité. Par exemple, un voilier monocoque au près avec l'appoint intermittent d'un barreur distrait. Qualifier de maniable ou réactif un mobile revient à dire que la

stabilité active sera grande en regard de la passive. Pour une stabilité totale donnée, la stabilité active ou la maniabilité est d'autant plus grande que la stabilité passive est petite.

J'appelle autorégulation la stabilisation (passive ou active) d'un mobile sans intervention active d'une intelligence. Le voilier à stabilisation pesante utilise très largement l'autorégulation. Pour un voilier comme l'aile d'eau le mode de stabilisation en autorégulation doit être tout aussi primordial. Il permet l'économie de la masse et de l'erreur humaine ou de la masse et de la complexité de l'intelligence artificielle.

En stabilisation passive, la position d'équilibre du mobile varie en même temps que les éventuelles perturbations du milieu extérieur lui servant de référence. Si le milieu est très perturbé, la stabilité passive devient problématique du point de vue du confort, mais surtout du point de vue des pertes énergétiques. La stabilité active, alliée à une forme d'intelligence permettant l'anticipation, autorise une certaine abstraction des variations du milieu extérieur autour d'un état moyen ciblé.

Chez moi, les nombreux croquis d'étude de l'équilibre d'un mobile se couvrent rapidement d'une foule de flèche aux significations diverses. Afin que les schémas présentés dans l'exposé ne ressemblent pas trop à un paquet de spaghetti indigestes, je fais appel à des codes formels de flèche pour les différents vecteurs symbolisés.



**Important:** Afin de simplifier la nomenclature j'assimile sous le même nom le mouvement et la position correspondante. Pour le roulis par exemple, je parle du mouvement de roulis **et** d'une position de roulis (au lieu de gîte). Mon propos étant essentiellement statique (recherche d'une position stable), cette simplification n'est pas préjudiciable.

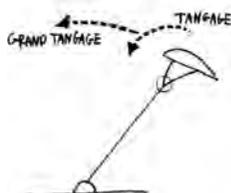
Remarque sur une méthode d'analyse des positions et orientations du mobile: pour ne pas avoir à étudier toutes les positions d'un mobile, lorsque je connais l'évolution continue de la position, j'ai

recours à une étude limitée aux deux extrémités de cette évolution, les positions intermédiaires étant déduites de la loi d'évolution.

J'ai déjà montré que le déflecteur suspendu pouvait se passer de poids; que le poids pouvait être considéré comme négligeable lorsque la vitesse était grande. Pour simplifier l'étude, il est donc légitime, dans un premier temps de considérer une aile sans masse. L'introduction de la masse faisant l'objet, après coup, des rectificatifs de comportements correspondants.

Enfin, dans un souci de raccourcissement, je ne parle que du déflecteur suspendu aérien, en sous-entendant l'exacte symétrie des comportements du déflecteur sous-marin. Il faut toutefois préciser qu'il y a sous l'eau une possibilité particulière de création d'un couple constant jouant dans l'équilibre, le couple hydrostatique. Ce couple peut être avantageusement utile comme appoint aux problèmes traités pour l'air. Il peut être occasionnellement présent dans l'air avec les systèmes de sustentation par gaz léger.

## B- Equilibre en tangage du déflecteur suspendu



Sans régulation du tangage, donc de l'incidence, pas de possibilité de déviation contrôlée du fluide, pas d'avion, pas de voilier, pas d'aile d'eau.

La problématique de régulation du tangage du déflecteur suspendu englobe deux types de mouvement.

- La rotation autour du point de bridage, le **tangage**
- La rotation autour du point de fixation du fil, le **grand tangage** c'est à dire, si le fil est long, le cavalemt du déflecteur.

La régulation du tangage par rapport au vent apparent sur l'aile est immédiate (en faisant abstraction des phénomènes de poids et d'inertie), tandis que celle du grand tangage, dépendant indirectement de la première est plus lente car elle met en jeu des phénomènes d'équilibre de vitesse en *phases transitoires*. La question de l'équilibre de vitesse en *phases transitoires* de grand roulis est pour l'instant laissé de côté par la supposition d'un fil de retenu de longueur nulle.

Le problème se résume alors à l'étude de la régulation de l'incidence du déflecteur suspendu relié au point de fixation directement par son point de bridage.

Schéma de la simplification du problème.

Heureusement, les moyens d'y arriver ne manquent pas. J'en dégage quatre types:

- stabilisation par dièdre longitudinal sortant
- stabilisation par écoulement en trois dimensions
- stabilisation par bulbe de décrochement
- stabilisation par abaissement du point de bridage

Une telle prolifération des moyens possibles de stabilisation de l'incidence, explique, à mon avis le grand âge du déflecteur suspendu aérien: le cerf-volant

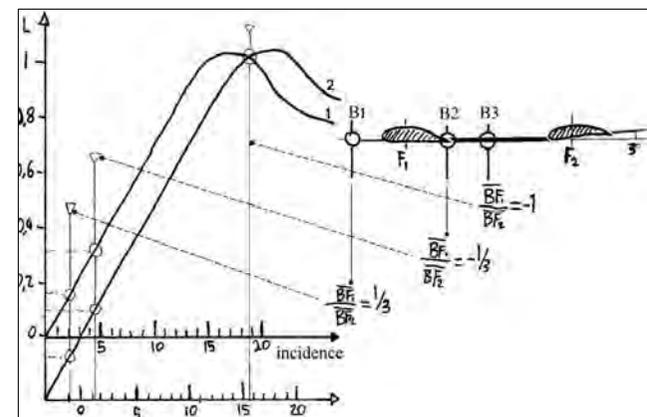
## Stabilisation de l'incidence par dièdre sortant longitudinal

Je le décompose en trois sous - modes:

- Stabilisation par plans simples distincts avec différentiel d'incidence
- Stabilisation par profil simple à ligne moyenne en S dit *profil autostable*
- Stabilisation par plan en flèche arrière vrillée.

**Stabilisation par plans simples distincts avec différentiel d'incidence.** En aéronautique, c'est le plus répandu des modes, mais c'est loin d'être le cas pour les déflecteurs aériens suspendus.

Le fonctionnement peut être expliqué par l'étude d'un exemple schématique. Soit un déflecteur constitué d'un plan 1 à l'avant et d'un plan 2 à l'arrière dont le différentiel d'incidence est 3 degrés. Soit D la distance entre les deux plans. Soit F1 et F2 les points d'application de la résultante de portance et soit B le point de bridage.



Exemple illustrant la stabilité par différentiel d'incidence: La configuration tandem qui permet une grosse tolérance de centrage du bridage (point B). Ici, le différentiel d'incidence est de 3°

Si le bridage est disposé entre les plans sur le quart avant, l'équilibre est atteint quand  $P_2/P_1 = 1/3$ . Un seul angle d'incidence du déflecteur permet ce rapport. Si on lui applique une perturbation en cabrage,  $P_2$  devient proportionnellement plus importante que  $P_1$ , ce qui provoque un moment piqueur redressant. L'inverse se produisant dans le cas d'une perturbation en piqué, l'équilibre en incidence peut être qualifié de stable.

Si le point de bridage est disposé entre les deux plans: ( $BF_1/BF_2 = -1$ ), l'équilibre ne s'obtient alors qu'avec le décrochement du profil avant.

Si le point de bridage est placé en avant du déflecteur, ( $BF_1/BF_2 = 1/3$  par exemple), il faut que l'aile arrière travaille en incidence négative, ce qui diminue sérieusement la capacité totale de portance.

Ce déflecteur (configuration tandem) possède une excellente stabilité, il est capable de tolérer une grande variation dans le positionnement du point de bridage.



Remarque concernant le différentiel d'incidence: Si le plan arrière se trouve dans le flux dévié par le plan avant (ce qui risque fort), pour un même différentiel d'incidence, le dièdre doit être diminué.

Schéma

Quoi qu'il arrive, les deux plans travaillant à des incidences différentes, une seule d'entre elles peut connaître l'incidence de finesse maximale. Pour espérer une finesse globale acceptable, il faut privilégier en surface le plan qui travaille avec l'incidence optimale. Le plan le plus petit pourra alors être qualifié de *plan de stabilisation*, mais dans tous les cas, sa participation à la portance totale (négative ou positive) ne doit pas être négligée. Si le plan de stabilisation est à l'avant, il est appelé *canard*. Il travaille à une incidence supérieure à celle de la finesse maximale, cependant, il a l'avantage de participer activement à la portance totale. De plus il permet une certaine anticipation des perturbations car il capte l'information du flux en amont de l'aile. Par contre, il perturbe l'écoulement sur l'aile principale.

L'*empennage* (plan de stabilisation à l'arrière) a pour lui l'avantage de ne pas perturber l'aile principale. Il n'est pas plus fin que le canard car il travaille avec trop peu d'incidence mais ne participant pas à l'effort global de portance, le rapport de charge est moins avantageux. Dans un cas comme dans l'autre, à cause de la portance absolue du stabilisateur, limitée par la faible surface, on a perdu en stabilité et en tolérance.

Il y a donc une limite à ne pas dépasser et un choix à faire entre stabilité passive et finesse. Les occasions sont multiples où le compromis est à faire entre ces deux qualités qui ne veulent pas se marier.

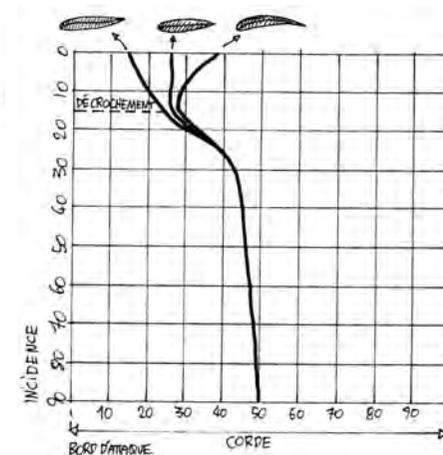
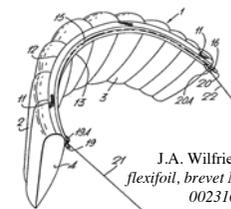
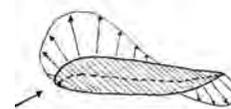


Le Cody (création 1900) doit à sa configuration presque tandem, une très grande stabilité et une faible finesse, ce qui est relativement l'inverse pour le Lozange (création perso).

Pour se permettre des surfaces de stabilisation encore plus petites que petites, il faut augmenter l'éloignement du plan principal. Ce faisant, d'autres problèmes apparaissent simultanément: poids du déflecteur, raideur, solidité et encombrement.

Pour des raisons inverses des problèmes dernièrement évoqués, il peut être intéressant dans certains cas, de réduire la distance entre le plan de stabilisation et le plan principal. Dans cette direction, la limite est atteinte lorsque les deux plans sont en contact et ne forment qu'un seul et même plan de forme particulière. On entre alors dans ce que j'appelle:

**Stabilisation par profil simple à ligne moyenne en S ou profil autostable.** L'étude rigoureuse du fonctionnement de ce profil doit s'aborder par une étude globale du modèle d'écoulement sur le profil. Pour simplifier l'explication, j'en reste à une analogie avec le système à plan multiple. Le bord de fuite présentant une courbure sortante est l'équivalent d'un plan stabilisateur accolé avec un dièdre sortant. Si l'incidence est trop faible, la courbure intrados de fuite crée une déportance de cabrage. Si l'incidence est trop forte le bord de fuite ne produit plus de portance et c'est le déséquilibre entre portance et point de bridage qui redresse le plan.



Type de variation du point d'application de la résultante en fonction de l'incidence, pour trois types de profil:

- 1- profil en "S"
- 2- profil épais symétrique
- 3- profil épais asymétrique

Une telle formule sacrifie beaucoup à la finesse car le bord de fuite fonctionnant en déportance doit être d'une surface relativement grande car peu éloignée du centre d'effort. Cependant les avantages en terme de compacité et de légèreté peuvent être prédominants. Pour améliorer quelque peu l'efficacité du bord de fuite courbé, donc en diminuer quelque peu la surface tout en gagnant en finesse, on peut penser à mettre en place une fente en avant du bord de fuite. Ainsi, aux fortes incidences, le bord de fuite arrière pourra se fabriquer sa propre portance redressante. Cependant on commence à se retrouver sur le mode de stabilisation précédent.

*Le Sled, cerf-volant statique des années 60 qui doit sa stabilité au simple trou sur l'arrière de son plan.*

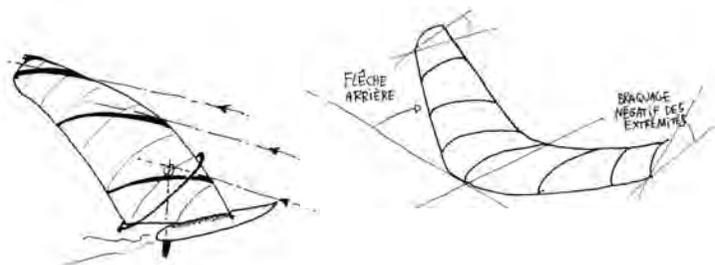


**Stabilisation par plan en flèche arrière vrillée.** Le plan déviateur en flèche arrière avec un plus faible calage des profils d'extrémités est un moyen de disposer d'un plan de stabilisation non distinct du plan principal sans sacrifier la forme du profil. La *flèche arrière* permet l'éloignement des profils stabilisateurs en arrière du centre d'effort. Elle permet aussi une stabilité structurelle: sous la surcharge, la souplesse de la structure provoque naturellement un plus grand vrillage conduisant à un délestage allié à une plus grande stabilité.

A l'inverse, l'utilisation d'un plan en *flèche avant* vrillé avec de plus grosses incidences aux extrémités (l'équivalent d'une configuration canard) a l'énorme inconvénient de l'instabilité structurelle: si on augmente la charge, la souplesse de la structure induit une charge encore plus forte. Seules des structures très rigides comme celle des avions de chasse peuvent se permettre cette configuration.

De plus il s'ajoute à cette configuration dite delta, un phénomène stabilisant d'écoulement en trois dimensions. Pour en parler, il faut changer de partie.

*L'auto stabilité de la voile de planche doit beaucoup à son vrillage et à sa flèche arrière.*



## Stabilisation par écoulement en trois dimensions

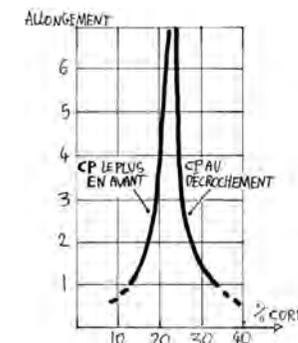
Est qualifié d'écoulement en trois dimensions, tout écoulement comprenant une composante transverse d'écoulement. En fait, pour que ce phénomène procure un effet stabilisant, il faut que cette composante soit très largement représentée. Je recense deux types d'effet stabilisant.

- Effet stabilisant du plan de faible allongement.
- Effet stabilisant du plan en flèche arrière.

**Effet stabilisant du plan de faible allongement.** Le plan de faible allongement ( $< 2$ ) est le siège de très importants écoulements transversaux vers les tourbillons marginaux. On parle souvent de ses conséquences fâcheuses pour la finesse, mais l'écoulement en trois dimensions a également des avantages:

- Décrochement plus tardif et capacité de développer une portance plus importante
- le coefficient de force diminue avec l'augmentation de la vitesse du fluide.
- Enfin et surtout pour notre sujet, il a un effet stabilisant.

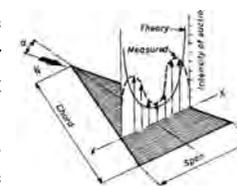
L'effet stabilisant provient des variations que l'incidence provoque sur le modèle d'écoulement en trois dimensions ayant pour conséquence une très importante migration du centre de poussée.



*Positions du Centre de Poussée en fonction de l'allongement du plan. (d'après doc de Lucas sur les safrans)*

**Effet stabilisant du plan en flèche arrière.** La flèche arrière favorise (même en grand allongement) l'apparition d'un écoulement transversal divergent. Cela a pour effet, lors d'un cabrage progressif, une augmentation de la charge des profils d'extrémité plus rapide que celle du profil médian. Ainsi, lorsque le déflecteur se cabre, les extrémités de l'aile portent proportionnellement davantage qu'auparavant, produisant un moment redressant.

Cependant cet effet est assez modeste pour des grands allongements et il est plus rentable d'ajouter à l'aile delta un vrillage et (ou) un profil autostable.

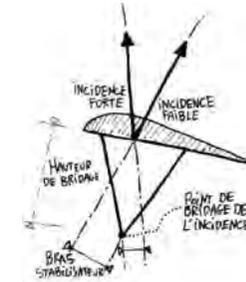
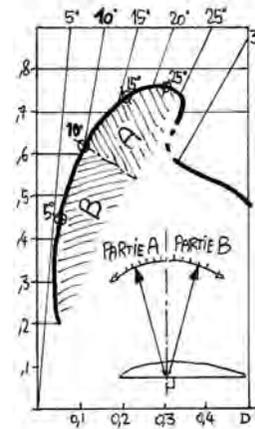


C.A. Marchaj, *Sail Performance*.

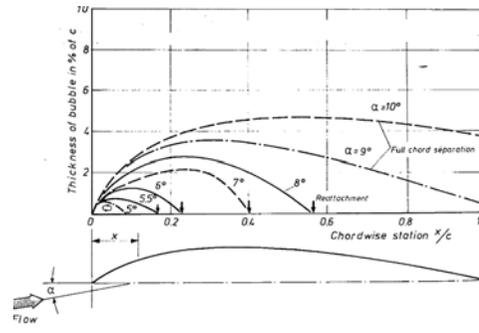
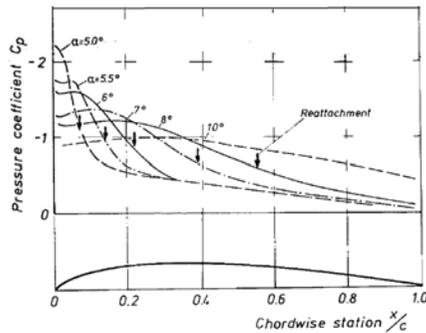
## Stabilisation par bulbe de décrochement

Ce type de stabilisation est souvent utilisé par les cerfs-volants à profil mince.

Ne pouvant se permettre un écoulement d'attaque doux, le plan à profil mince travaille avec un bulbe de décrochement attaché à son bord d'attaque. Plus l'incidence augmente et plus la taille du bulbe augmente, jusqu'à ce qu'il s'étende sur toute la corde du profil. L'augmentation de la taille du bulbe provoque un recul du centre de poussée conduisant à un effet redresseur stabilisant.



*Le comportement directionnel de la poussée, pour la plupart des profils, un effet stabilisant.*



C.A Marchaj, hydro-aéro of sailing.

observe à l'inverse presque toujours une certaine orientation vers l'avant de la poussée. Certains profils favorisent particulièrement les variations de la direction de la poussée. Les plus évidents sont ceux dont le creux est majoritairement vers l'avant, avec un rond d'attaque prononcé. Ces profils cumulent de plus l'avantage non négligeable pour un déflecteur captif de la tolérance (en terme de variation de portance) à l'instabilité de l'écoulement.

Plus le point de bridage est bas, plus la stabilité sera grande pour un profil donné. Pour une hauteur donnée du point de bridage.

## Stabilisation par abaissement du point de bridage

Ce type de stabilisation est très utilisé dans le domaine du vol libre et du cerf-volant. L'abaissement du point de bridage (équivalent pour le vol libre à l'abaissement du centre de gravité) permet d'utiliser pour la stabilisation non plus seulement le déplacement du centre d'effort, mais aussi la variation dans la direction de la poussée.

Tout profil a une tendance naturelle à la variation de la direction de sa poussée en fonction de l'incidence. Cette tendance peut se lire sur une polaire de profil dotée d'une graduation d'angle.

A plus faible incidence que celle de finesse maximale, la direction de la poussée tend vers l'arrière jusqu'à qu'à l'être entièrement à incidence neutre. Au-delà de l'incidence de finesse maximale, on

## Stabilisation composite du tangage

Tous les modes de stabilisation décrits peuvent être combinés à loisir selon les besoins particuliers: maniabilité, grande stabilité aux turbulences, compacité, légèreté, finesse, etc.

Toutes les stabilisations que j'ai décrites sont du type passif, il n'y a pas de déformation active de la structure. Cependant, chaque type de stabilisation passive tolère une marge plus ou moins grande de réglages de la position d'équilibre, réglages qui peuvent se transformer en pilotage d'appoint. Mais il est difficile d'envisager une stabilisation entièrement active durable de l'incidence par pilotage humain ou mécanique. En effet, il faudrait pour cela que le pilote soit capable de sentir les plus petites variations de l'écoulement, et même s'il en était capable, il faudrait qu'il réagisse avec suffisamment de rapidité et sans jamais commettre d'erreurs. Un "trou" dans la stabilisation de l'incidence a des conséquences trop graves (en terme de perte de finesse ou en terme de

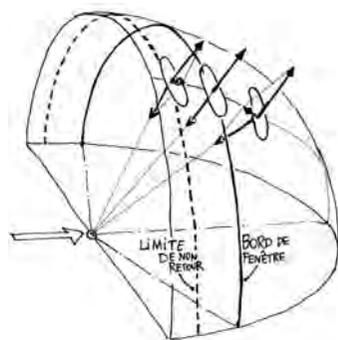
déstabilisation définitive) pour que l'on confie entièrement cette tâche à un pilotage actif (sauf système électronique très sophistiqué ou pilote humain momentanément frais et performant).

### Equilibre du grand tangage

Soit un déflecteur suspendu stabilisé en tangage. Soit un roulis et un lacet stables. Soit un fil de retenu de longueur non nulle. Le déflecteur suspendu n'est en équilibre de grand tangage que lorsque la direction du fil est la même que celle de la poussée. Si le déflecteur s'en va plus au vent, la différence de direction entre la poussée et le fil conduit à une composante qui le ramène vers la position d'équilibre. De même, si le déflecteur s'aventure trop sous le vent. La position en grand tangage est donc stable. Tout

déflecteur suspendu stabilisé en tangage le sera en grand tangage pour un angle égal à la finesse de l'incidence stabilisée.

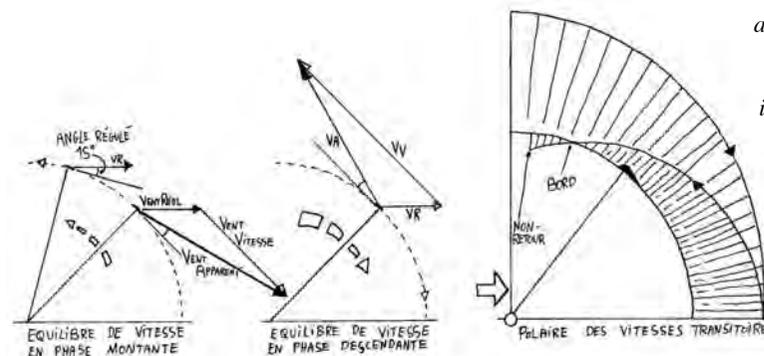
A chaque angle de grand roulis, il existe un point de stabilisation de grand tangage. La ligne de l'ensemble de ces points est le bord de la fenêtre dont le point culminant (pour un grand roulis de  $90^\circ$ ) est appelé le *zénith*.



*Pour un déflecteur à masse négligeable, le travail de régulation du grand tangage est le même pour tous les grands roulis.*

Lorsqu'on lance un cerf-volant à partir du sol, il se dirige plus ou moins rapidement vers sa position zénithale. Pour un déflecteur à masse négligeable, la vitesse tangentielle de grand tangage montant s'obtient par simple construction vectorielle de façon à ce que la poussée du profil stabilisé en incidence par rapport au vent apparent, soit dans l'axe du fil. Si la vitesse tangentielle était plus faible, la différence de direction entre la poussée et le fil induit une composante d'accélération. Si la vitesse tangentielle est plus forte, cela induit une composante de décélération. Moralité: la vitesse tangentielle est stabilisée pour une valeur donnée du grand tangage. Une polaire des vitesses tangentielles en phase transitoire peut être

déterminée: on y vérifie l'existence d'un point zénithale stabilisé. On y remarque également que le dépassement du zénith (dû à l'inertie ou à des turbulences verticales) connaît une limite de non-retour.



Le même raisonnement peut être mené en imaginant qu'à la suite d'une déficience de la stabilité de lacet, un déflecteur en bord de fenêtre a été conduit à faire un demi-tour (syndrome de l'autorotation). Il se retrouve dans une phase de descente de la fenêtre. La polaire de vitesse tangentielle de descente montre l'absence totale de stabilité et l'inéluctabilité du crash final à grande vitesse. Ceci met en évidence toute l'importance qu'on doit accorder, pour un déflecteur suspendu non piloté, à l'empêchement du demi-tour en bord de fenêtre. Ce problème primordial mais loin d'être simple, sera abordé avec l'étude de la stabilisation du roulis et du lacet.

Enfin, alors que la régulation de l'incidence du déflecteur suspendu est indispensable à un zénith stabilisé, la phase transitoire de montée de la fenêtre tolère des déflecteurs très peu régulés en incidence et avec un point de bridage très en avant. Cependant, une fois la montée réalisée, le déflecteur s'affaisse.

*Les vitesses considérables atteintes en phase de descente ont des répercussions importantes sur la traction du fil et sur l'éventuel crash en bas...*

## poids et régulation du tangage

L'influence de la masse, quand elle existe, est toujours liée au facteur de charge, donc à la vitesse du vent apparent. Je limite son étude à la position zénithale du déflecteur suspendu, position où le poids a le plus d'importance (direction proche de celle de la poussée et vitesse faible du vent apparent). Par ailleurs, sur les parties basses du bord de la fenêtre, le poids n'a d'influence que sur le lacet (influence abordée en II-C).

Si le centre de gravité est placé sur le point de bridage, la stabilisation du tangage est inchangée. En phase d'absence soudaine de vent, le déflecteur pourra subsister grâce à un vol plané.

Le centre de gravité placé en avant du point de bridage conduit un effet indésirable d'instabilité du facteur de charge. En effet, le vent diminuant conduit à un avancement de la charge totale donc à une baisse de l'incidence. Si le centre de gravité est vraiment trop en avant, il arrive un moment où le vent devient suffisamment faible pour que le déflecteur se déstabilise totalement en piqué (définitif si le bridage est du type triangulation souple).

Le centre de gravité placé en arrière du point de bridage conduit à une intéressante régulation du facteur de charge. En effet, lorsque le vent diminue, le point d'application de la charge totale (poids compris) reculant, cela conduit à une augmentation de l'incidence. Si le centre de gravité est placé trop en arrière, il arrive un moment où le vent est suffisamment faible pour que le déflecteur amorce un désastreux pompage dû à une suite de décrochements et de remontées de la fenêtre.

Enfin, plus le centre de gravité est haut placé, moins la stabilité d'incidence est bonne.

## Poids et grand tangage

La masse influe par le poids, sur l'angle d'équilibre au zénith. Plus le facteur de charge approche de 1, plus le zénith descend.

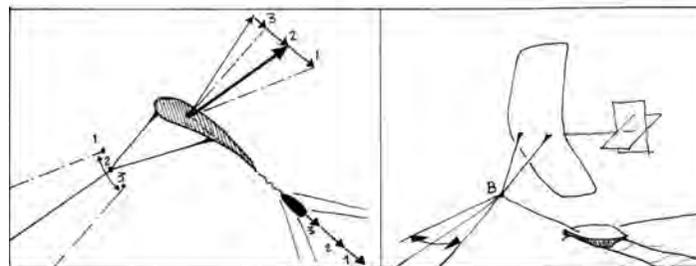
La masse a également une influence sur les vitesses en positions transitoires de grand roulis par deux effets:

- Le poids rend les vitesses de montée de la fenêtre plus faibles et celles de descente plus importantes.
- La masse induit des phénomènes d'inertie avec mise en vitesse plus lente. L'inertie du déflecteur suspendu provoque une tendance au dépassement du zénith en fin de montée.

## Rajout d'éléments dont la traînée n'est pas proportionnelle à $V^2$

Il peut être tentant pour des raisons diverses de fixer au déflecteur suspendu un corps en appui sur l'interface. Si cette liaison se place au-dessus du point de bridage, l'équilibre d'incidence doit être ajusté à chaque vitesse. En effet, la traînée du corps en appui sur l'interface n'étant pas proportionnée à  $V^2$ , la direction et l'application de la résultante sont différentes pour chaque vitesse. Cependant, même à vitesse constante, la traînée du corps en appui sur l'interface n'est pas constante (à cause des vagues) et l'équilibre d'incidence demande alors une stabilisation active très difficile.

Si des ajouts de corps en appui sur l'interface doivent se faire, le plus raisonnable est donc de les prévoir sur ou sous le point de bridage d'incidence.



S'il doit être ajouté un corps traîné sur l'interface, il faut le disposer à l'extérieur du bridage d'incidence afin que les variations non proportionnées de la portance et de la traînée n'obligent pas un continu changement du réglage du bridage.

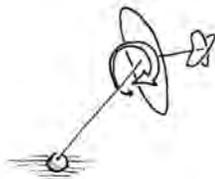
## **Conclusion sur l'équilibre en tangage du déflecteur suspendu**

Une main bienveillante semble veiller à rendre le vol possible grâce à une stabilisation en tangage simple à réaliser. Comble de chance, la stabilisation naturelle passive s'opère aux alentours de l'incidence de finesse maximale. Cependant, elle connaît une faille, c'est le dépassement trop important de la position zénithale dû aux turbulences de l'écoulement. Un déflecteur suspendu pour voilier doit travailler dans les deux coins inférieurs du bord de la fenêtre. L'instabilité directionnelle de l'écoulement étant plus importante horizontalement, le déflecteur du voilier sera davantage sollicité en incidence qu'un déflecteur au zénith.

La nécessaire augmentation de la stabilité de tangage passe toujours par des moyens qui diminuent la finesse d'ensemble. Finalement, l'écoulement turbulent est l'ennemi principal de la finesse du déflecteur suspendu. Par comparaison, il l'est beaucoup moins pour le déflecteur libre dont le poids constant a un effet régulateur permanent.

Reste maintenant à voir comment s'en sortent les stabilisations complémentaires (que j'avais supposées fixes): lacet et roulis.

## C- Equilibre en lacet du déflecteur suspendu



### La stabilité de lacet

Un éventuel plan déviateur à symétrie de révolution n'a pas besoin de stabiliser une position particulière de lacet pour assurer son rôle. Par contre, tout plan déviateur non circulaire possède, pour dévier un fluide, une seule position optimale de lacet qu'il est donc primordial de pouvoir stabiliser. Le problème de cette stabilisation est celui de la girouette.

Deux types de moyens passifs s'offrent au déflecteur pour stabiliser son lacet.

- Par un point d'application de la traînée en aval du point d'application de la portance.
- Par un foyer des surfaces verticales en aval du foyer des surfaces horizontales.

**Point d'application de la traînée en aval du point d'application de la portance.** La plupart des profils déviateurs possèdent naturellement un certain décalage aval du point d'application de la traînée qui est d'autant plus important que l'allongement est faible. Il est très important pour un profil autostable et pour un système de stabilisation de l'incidence par empennage. Par contre, le système canard tend à une instabilité de lacet. A l'exception de ce dernier, tous les déflecteurs stabilisés en incidence sont donc potentiellement stables en lacet. Cependant le décalage naturel du point d'application de la traînée est en général trop faible pour être suffisant. Pour l'augmenter, il faut avoir artificiellement recours à l'ajout en arrière du plan déviateur de corps présentant une traînée non négligeable.

Cette pratique est largement répandue dans le domaine du cerf-volant. Ainsi, le cerf-volant d'enfant à voilure plate est capable de voler grâce à sa *queue*, qui joue en plus du rôle décoratif, le rôle indispensable de stabilisation en lacet. L'inconvénient d'un tel système est évidemment une grosse perte de finesse. Son seul

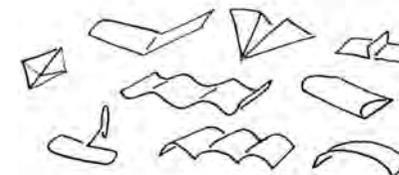


avantage: grandes possibilités formelles décoratives ou publicitaires.

**Centre des surfaces verticales en aval du centre des surfaces horizontales.** Ce type de stabilisation est préféré au premier par tous les déflecteurs qui ont un besoin de finesse.

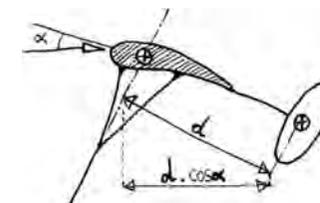
Cette stabilisation nécessite la présence d'une composante de surface verticale, c'est à dire perpendiculaire à celle du plan déviateur. Cette composante peut revêtir différents aspects formels:

- Dièdre du plan déviateur.
- Epaisseur du plan déviateur.
- Ondulation du plan déviateur.
- Rajout de plans verticaux.



Le lacet peut se résumer à une rotation dont l'axe est la poussée du plan déviateur ou, ce qui revient strictement au même, le fil de retenu. On comprend instinctivement que l'effet stabilisateur d'une surface verticale fonctionne si elle exerce ses portances en arrière de l'axe et que plus le foyer de la surface verticale est situé en aval, plus l'effet stabilisateur sera important. La stabilité du lacet est en fait proportionnée à:

$$\frac{S_{verticale}}{S_{horizontale}} * d * \cos(\alpha) \text{ avec } \alpha: \text{ incidence.}$$



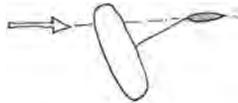
## Interférences entre les mouvements de lacet et de grand roulis

On suppose pour cette étude roulis stable. Le fil de retenu du déflecteur captif est supposé suffisamment long pour que les mouvements de rotation en grand roulis soient assimilables à des mouvements de translation en embardée.

**Interférences passives.** Tout mouvement d'embardée provoque un changement du vent apparent qui provoque un mouvement de lacet. L'inverse n'est pas aussi évident. Toute perturbation momentanée du lacet ne va pas forcément induire une embardée. Il n'y a que quand le déflecteur possède une forte inertie de rotation de lacet que la poussée correctrice des surfaces verticales se transforme en grande partie en embardée. Une forte inertie rotatoire peut ainsi favoriser un certain *pompage* dans la régulation lacet. Mais il s'agit là d'une action involontaire du lacet sur l'embardée.

**Interférence active.** Pour obtenir une action volontaire du lacet sur l'embardée, il faut une variation active de la géométrie des surfaces verticales.

Un déflecteur avec pour seule surface verticale, un empennage disposé loin en aval n'aura quasiment pas d'action sur l'embardée. Une angulation de l'empennage vertical ne conduira qu'à la mise en crabe du plan déviateur et à la baisse de finesse consécutive.



Si on ajoute une surface verticale au niveau du plan déviateur, par exemple sous la forme de dièdre, on obtient une possible action du lacet sur l'embardée. En effet, la surface verticale du plan déviateur et son empennage angulé connaissent le même genre de stabilité d'incidence que les surfaces horizontales. Ainsi, l'angulation de l'empennage vertical provoque une force transverse constamment entretenue et responsable de l'embardée. Plus la surface verticale "porteuse" est proche du centre de rotation du lacet, plus l'action sur l'embardée peut être forte.

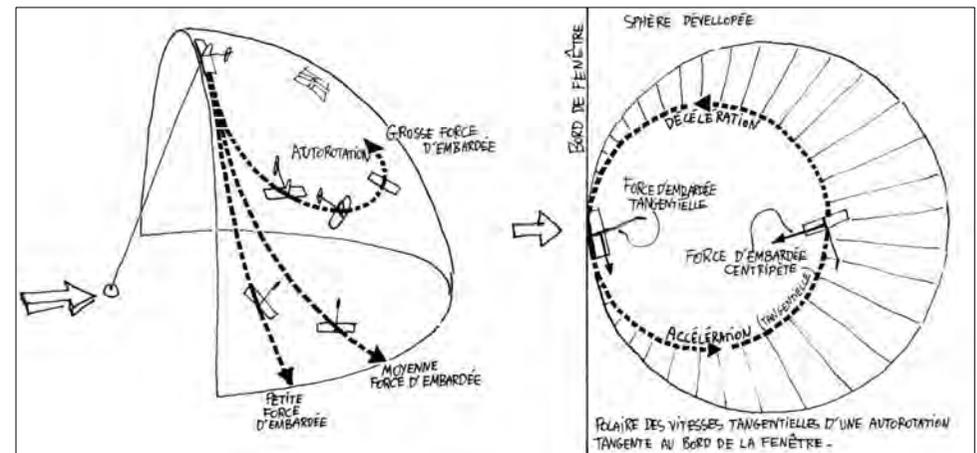
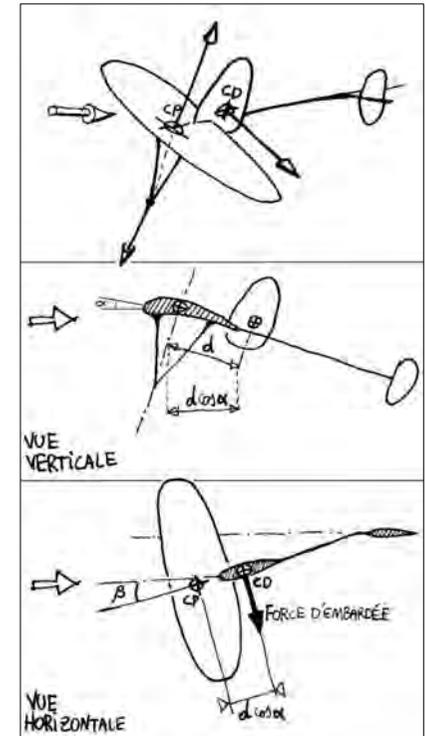
La proportion d'embardée induite par une action du lacet peut être déterminée à travers une valeur que j'appelle *puissance du lacet* (sur l'embardée). La puissance de lacet est alors proportionnée à

$1 / (d \times \cos(\alpha))$ . Si on se rappelle que la qualité de la stabilité passive est proportionnée à  $(S_{\text{verticale}}/S_{\text{horiz}}) \times d \times \cos(\alpha)$ , on a une nouvelle confirmation de la loi selon laquelle stabilité et réactivité sont contradictoires.

L'embardée induit elle-même du lacet (par le fait du changement dans le vent apparent) et ainsi de suite si bien que le mobile prend une trajectoire courbe.

Quelle que soit la vitesse apparente du fluide, une propriété de la puissance du lacet est que si son action est constante, la courbure de la trajectoire du déflecteur sur le globe d'évolution l'est aussi. En fait, les surfaces verticales servent à contrer les forces d'inertie centrifuges due à la trajectoire courbe. Plus elles sont capables de développer une force transversale importante, plus le rayon de courbure pourra être faible. La puissance de lacet est donc directement liée à la valeur du rayon de courbure.

Autre propriété remarquable: pour une action donnée du lacet, la trajectoire en référentiel air présente, elle aussi, une courbure circulaire.



La mise en autorotation est la première cause de mortalité chez les déflecteurs suspendus (à cause du crash final).

Un pilotage du seul axe de lacet peut ainsi permettre, si la puissance du lacet est suffisamment importante une évolutivité sur toute la surface du globe. Cela s'appelle un pilotage un-axe. Un grand intérêt de ce pilotage est que la puissance de commande peut-être très largement démultipliée par l'empennage éloigné. Par ce biais, un pilote humain agissant directement sur le volet d'empennage vertical peut piloter des déflecteurs captifs de tailles considérables, peut-être supérieure à 100 m<sup>2</sup>.

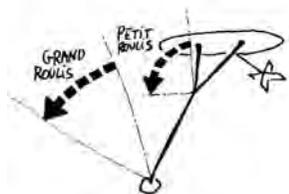
Un cerf-volant de sport est capable de couvrir à loisir toute la fenêtre, mais les fortes courbures potentielles de trajectoire réclament une attention continue du pilote.

A l'inverse, les seules zones qui intéressent les déflecteurs équipant un voilier, sont les deux bords inférieurs de la fenêtre. Ces déflecteurs vont donc pouvoir se permettre de faibles puissances de lacet sur le grand roulis (ou l'embarquée) et autoriser un pilotage automatique à réactivité médiocre.

**Conclusion.** La stabilisation passive du lacet est d'une simplicité encore plus grande que pour celle du tangage. Son contrôle actif partiel autorise de plus un pilotage dans le globe d'évolution.

Il ne reste maintenant qu'à aborder les deux derniers mouvements à stabiliser: le roulis et le grand roulis. Nous verrons notamment que le réglage actif du roulis est capable de la même prouesse de pilotage que le lacet mais que la question du grand roulis est beaucoup plus problématique.

## D- Equilibre en roulis du déflecteur suspendu



Un déflecteur suspendu stabilisé en incidence et en lacet n'a pas strictement besoin de stabiliser le roulis pour assurer son rôle de déviation. Cependant, le roulis ayant des implications sur le lacet par l'intermédiaire du grand roulis, une absence de stabilisation donne un déflecteur fou et incontrôlable.

### Stabilisation passive du roulis

L'angle du roulis est formé par le plan de symétrie bilatérale du déflecteur et le fil de retenu en projection sur le plan vertical de l'envergure.

Pour étudier la stabilité du roulis j'aborde la réaction à trois types de perturbations.

- Perturbation directe par angulation du fil de retenu.
- Perturbation par variation du centre d'effort
- Perturbation par variation de la direction de la poussée.

#### perturbation directe par angulation $\alpha$ du fil de retenu

Cette perturbation peut être provoquée par un opérateur qui déplace transversalement le point d'ancrage au niveau de l'interface. on aperçoit graphiquement que le couple redressant créé par l'embarquée est d'autant plus fort que:

- La masse et les surfaces verticales sont hautes,
- le point de bridage est bas.

#### Perturbation par variation du centre d'effort

Cette perturbation peut être dû à une déformation en vrillage du plan porteur ou à des différences dans l'écoulement à l'échelle de l'envergure. On voit que l'angulation  $\theta$  de rattrapage de cette perturbation est d'autant plus faible que:

- La masse et les surfaces verticales sont hautes,
- Le point de bridage est bas.

#### Perturbation par variation de la direction de la poussée.

Ce type de perturbation est dû à une action (volontaire ou non) sur la neutralité du lacet.

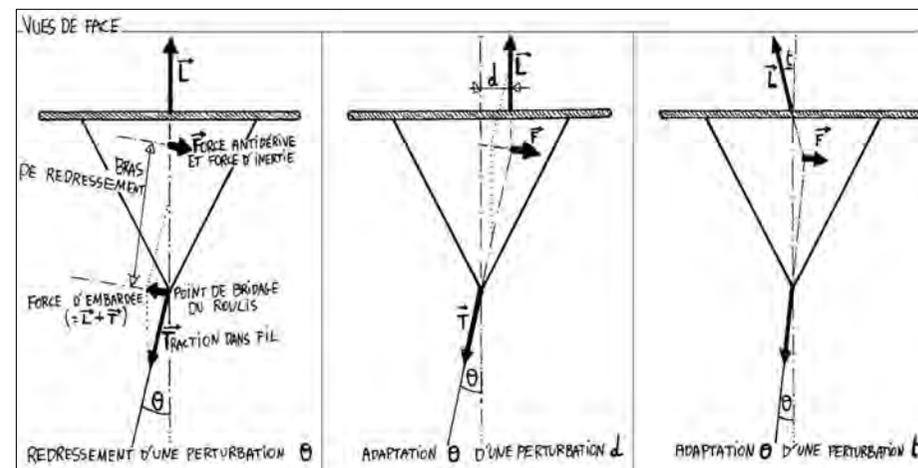
Ici encore, l'angulation de rattrapage est d'autant plus faible que:

- la masse et les surfaces verticales sont hautes,
- Le point de bridage est bas.

Ce dernier point permet d'ouvrir une remarque à posteriori sur la puissance du lacet.

La vitesse de l'embarquée est proportionnée à l'angulation  $\theta$  de rattrapage. La *puissance du lacet*, précédemment abordée dépend donc également de la stabilité en roulis. Moins la hauteur de bridage est grande, moins le roulis est stable et plus la *puissance du lacet* est importante. On peut donc maintenant préciser la formule qualitative de la puissance du lacet:

(Sverticale/Shoriz) / ( $d \times \cos(\alpha) \times H$ ). H étant la hauteur du bridage.



## Pilotage actif du roulis

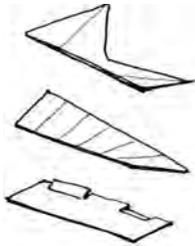
Je distingue deux modes de pilotage du roulis:

- Par déformation du bridage.
- Par vrillage du plan déviateur.

**Pilotage actif par déformation du bridage de roulis** C'est le mode de pilotage le plus répandu dans le domaine des cerfs-volants. En effet, si le pilote est situé sur le point de bridage (même très éloigné), il peut directement jouer sur la longueur de ses deux fils. Le fonctionnement est simple (contrairement à ce que beaucoup tente de faire croire): une angulation du roulis provoque une embardée qui, par l'intermédiaire d'un changement du vent apparent, conduit à un mouvement de lacet. Le pilotage par le roulis comme pour le pilotage par le lacet, conduit à une courbure de la trajectoire proportionnée à l'action.



**Pilotage actif par vrillage du plan déviateur.** C'est le mode de pilotage des parapentes. Il est en fait très similaire du premier mode. S'il est en pilotage exclusivement actif (stabilité de lacet quasiment), il permet d'envisager des rayons de courbure infiniment petits. En effet, la rotation se faisant autour du centre de gravité, il n'y a plus de force d'inertie centrifuge et les surfaces verticales ne deviennent qu'un obstacle à la rotation.



## Le grand roulis

La stabilisation du grand roulis ou de l'embarquée est le plus gros problème posé à un déviateur suspendu. En effet, ce mouvement a la propriété remarquable d'être en **équilibre indifférent**, c'est à dire que les données relatives à l'écoulement restent quasiment inchangées pour chaque angle particulier de grand roulis.

En réalité, les seules différences que l'on peut trouver dans l'écoulement sont liées à la couche limite turbulente.

- Différences de vitesse entre les positions hautes et basses du bord de la fenêtre.
- Différences dû au comportement turbulent qui privilégie des fluctuations directionnelles horizontales.

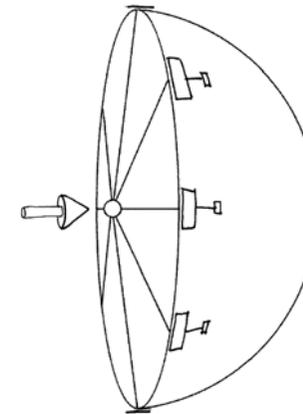
Schéma perspectif explicatif et complémentaire du dernier point.

Le problème de ces différences, c'est que par définition elles sont de natures instables. Je ne connais pas, et je n'ai pas réussi à imaginer de système efficace les utilisant pour stabiliser un grand roulis.

Fait regrettable: un équilibre indifférent théorique placé dans un référent instable équivaut en réalité à un équilibre instable. Et on ne peut espérer du déflecteur qu'il reste à l'endroit où on l'a laissé. Seuls les déflecteurs *statiques* (autres que ceux relatifs à l'écoulement) sont actuellement capables de stabiliser efficacement un angle prédéterminé de grand roulis.

On en compte trois types:

- Référents altimétriques,
- Référents liés à la verticale du champ gravitationnel,
- Référents liés à l'horizontale de l'interface.



Un déflecteur à masse négligeable dans un écoulement sans couche limite connaît un grand roulis parfaitement indifférent

## E- Conclusions sur l'équilibre du déflecteur suspendu

Pour stabiliser entièrement le déflecteur suspendu sur un point particulier de la sphère d'évolution, on peut se permettre une stabilisation passive aéro ou hydrodynamique du tangage, du cavalement, du lacet et du roulis. Le pilonnement étant contraint par le fil, il ne reste que l'embarquée, c'est à dire le grand roulis.

La stabilisation totale du déflecteur suspendu va donc nécessiter le pilotage (direct ou non) du grand roulis par un référent *statique*.

J'ai déjà évoqué les deux possibilités de pilotage à un axe (par le lacet ou par le roulis). Etant donné le peu d'expériences que j'ai du pilotage *multi-axial* de déflecteurs suspendus mon étude ne s'y aventure pas. Quoi qu'il en soit, le peu de maniabilité du pilotage un-axe a les avantages de ses inconvénients et peut apporter complète satisfaction pour la fonction particulière suivante: **permettre simplement et facilement à un référent statique de réguler le grand roulis dans une position propre au bon fonctionnement du voilier.**

Pour cela, pas besoin de savoir faire des cabrioles, l'important est de pouvoir tenir longtemps dans une position fixe sur la *fenêtre*.

Le chapitre suivant, qui détaille des formes existantes ou en projet de déflecteurs suspendus sera l'occasion de décrire quelques utilisations pratiques possibles des référents *statiques*.

### III- Quelques défecteurs suspendus

Inventaire de solutions pratiques pour la régulation de l'angle de grand roulis.

"**Lucane** [lykan]. n.m. (1789; lat. *lucanus* "cerf-volant")"  
*Petit Robert*, 1990

Si l'aile d'eau est encore assez pauvrement fournie en applications réelles, ce n'est heureusement pas le cas du défecteur suspendu. A travers une galerie de portraits des principaux modes de stabilisation de l'angle de grand roulis, ce chapitre est surtout l'occasion de se mettre du concret sous la dent.

#### A- Défecteurs suspendus aériens

Son nom vulgaire est le cerf-volant. La poétique surréaliste d'un tel nom l'a longtemps rangé dans la classe des jouets pour enfants de bas âges. L'étymologie du cerf-volant est à elle seule un conte infantile. A l'origine, il y a le cerf, grand mammifère vivant des forêts. En intermède, il y a le lucane, gros insecte vivant dans les arbres et dont les énormes mandibules rappellent les cornes du cerf... En fin, il y a un antique défecteur suspendu dont le bruit de fasyement du bord de fuite rappelle celui du vol de l'insecte!

Pourtant, l'histoire du cerf-volant montre qu'il peut être bien plus qu'un jouet. Il est avant tout la première manifestation humaine du vol. Grâce à lui, l'homme savait voler avant Jésus Christ, avant le ballon et l'aéroplane.

Tantôt le père de l'aéroplane, tantôt le fils du vol libre, le cerf volant est inclassable. Instrument de guerre, d'observation, de religion, de recherche scientifique, de spectacle et récemment de sport, le cerf-volant a fait tous les métiers. Pourtant, il n'a jamais été véritablement sur le devant de la scène du vent, il est resté timide et

modeste. Pour conclure ce rapide portrait, il faut insister sur son comportement presque animal qui le rend si attachant, et qui fait qu'on ne parle souvent de lui qu'en termes anthropomorphiques.

#### cerfs-volants statiques

Par extension de ceux à vol vertical, j'appelle cerf-volant *statique*, tout défecteur suspendu qui utilise un référent gravitationnel pour stabiliser le grand roulis.

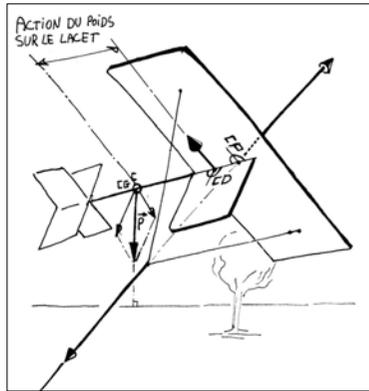
**Le cerf-volant statique monoplan à dièdre.** C'est un monofil non pilotable, généralement utilisé par les pères de familles pour clouer l'attention et l'énergie de l'enfant afin qu'il reste calme pendant toute la durée de la sieste.

Le cerf-volant *statique* fut toujours un encouragement dans ma recherche d'un cerf-volant stabilisé en grand roulis. En effet, par une magie d'abord incompréhensible, le cerf-volant statique est comme aimanté par le zénith. S'il est de bonne conception, il y reste presque sans broncher. Par quoi peut-il donc être informé aussi précisément de son angle de grand roulis? Par le champ gravitationnel bien sûr, mais comment?

La réponse est en fait assez évidente une fois qu'on la connaît. Pour que ça fonctionne, il faut que le centre de gravité soit en arrière du point d'application de la poussée. Au zénith, le poids n'a d'influence que sur la régulation de l'incidence, c'est une influence régulatrice du facteur de charge que j'ai déjà décrite. Cependant, dès que l'angle de vol passe d'un côté ou de l'autre de la position zénithale, le poids acquiert une composante de lacet =  $P \times \cos$  (**Grand Roulis**). Cette composante de lacet n'est contrée par les surfaces verticales qu'après une angulation de lacet suffisante. Si le centre de gravité est en arrière du foyer des surfaces verticales il en découle une composante d'embarquée stabilisatrice; l'ensemble remonte, le grand roulis revient vers le zénith. Plus le cerf-volant descend bas



*Le Brogden: Un ancêtre de 1903 qui a valu à son propriétaire une prime de 200000 francs par l'armée pour avoir atteint 4000 d'altitude. Aujourd'hui on donne des cerfs-volants!*



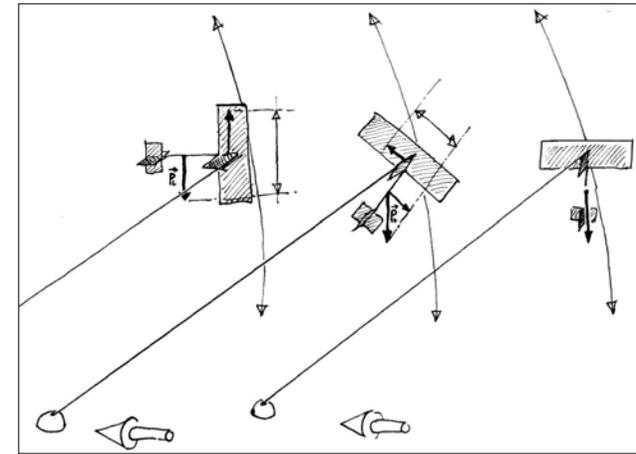
dans la fenêtre, plus la composante redressante est importante. En fait, elle est proportionnée à  $P \times \cos$  (**Grand Roulis**).

D'après cette relation, on voit que l'angle de roulis le plus sensible aux variations est précisément l'angle vertical et que la régulation du grand roulis sur ce mode sera d'autant moins précise et efficace que l'angle de grand roulis à réguler sera faible.

Si le centre de gravité est placé sur le foyer des surfaces verticales, et à condition que le vent soit suffisant, le grand roulis devient indifférent. S'il est placé en avant, le cerf-volant fonce droit sur le sol.

Si le centre de gravité est trop en arrière ou que les surfaces verticales sont trop faibles en regard du poids, le poids aura une trop forte action de lacet induisant un décrochement des surfaces verticales surchargées avec une brutale remontée du roulis. Le cerf-volant pompe alors autour du zénith. Ce caractère volage est parfois recherché par les pères pour réussir à maintenir l'attention de l'enfant.

Cependant même avec un tel réglage, due à de fortes actions momentanées en lacet, le cerf-volant statique à la propriété essentielle et très intéressante de ne jamais partir en autorotation. Cette propriété impressionne d'autant plus que si on confie le pilotage du lacet non plus à une composante projetée du poids mais à un pilote humain (qui agit sur un aileron d'empennage), celui-ci n'arrive que très difficilement à égaler le pilotage automatique du poids et si on lui donne les mêmes puissances d'action que le poids, les autorotations puis les crashes sont inévitables. Cette dextérité du pilotage pesant s'explique par une propriété importante de l'action du poids : elle est **auto contrôlée**. En effet, en examinant le cas d'un cerf-volant descendu trop bas dans la fenêtre, on s'aperçoit que la composante de lacet redressant produite par le poids est



*Action auto-contrôlée du poids sur le lacet permettant d'empêcher toutes autorotations.*

d'autant moins forte que le lacet augmente au cours du redressement.

A l'extrême, quand le cerf-volant se retrouve envergure perpendiculaire au bord de la fenêtre (donc dans une rapide remontée) la composante du poids sur le lacet s'est tellement auto contrôlée qu'elle est nulle. Et si le cerf-volant connaît le désir de continuer sa trajectoire vers l'arrière, histoire de commencer une autorotation, elle s'inverse alors et remet l'ensemble sur le droit chemin.

Je ne connais aucun système à action non auto-contrôlée qui soit capable de réguler le grand roulis d'un cerf-volant dans un écoulement turbulent.

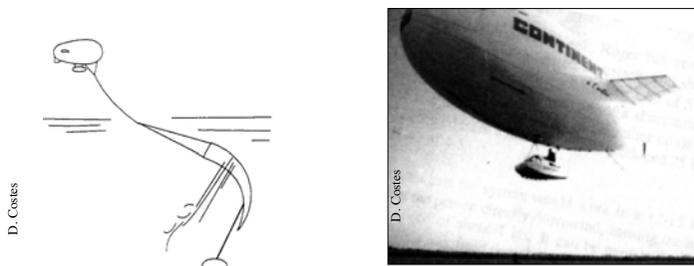
Le dessin reconnu comme étant le plus efficace en matière de cerf volant statique de zénith est le Cody, dont la configuration, tant en surfaces verticales qu'horizontales, se rapproche du tandem.



La perspective de cerf volant archimédien à gaz léger, permet d'envisager, par l'action d'un couple aérostatique constant, un contrôle encore plus efficace du grand roulis.

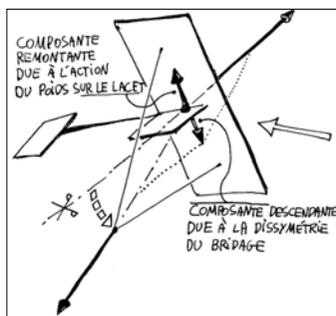
La seule expérience de cerf-volant propulsif statique sustenté par gaz léger fut réalisée en 1992 dans le but de traverser l'atlantique en dirigeable dans le sens est-ouest, reprenant une idée déjà lancée en 1939 par C.P. Burgess. Le dirigeable, nommé Zeppy II, de forme

conventionnelle et de petites dimensions, agit en fait comme un déflecteur de très faible finesse mais de très grande stabilité. Des ailes à allongement plus important et à meilleure finesse peuvent être facilement imaginables par simple extrapolation.



**Le cerf volant statique simple dissymétrisé.** Si on décale le centre de bridage latéralement, le cerf-volant va naturellement se stabiliser à un grand roulis plus bas dans la fenêtre, l'ensemble ne s'équilibrant que quand la composante formée du désaxage entre poussée et réaction du fil est contré par la composante redressante des surfaces verticales. Cet état d'équilibre n'est valable que pour une force de vent donnée, et plus le vent est fort, plus le couple inclinant le sera, plus le cerf-volant descendra le long de la fenêtre pour trouver une composante redressante (par effet sur le lacet du poids de l'empennage) suffisante. Lorsque ce dernier n'a plus de ressources le cerf-volant est déjà au sol.

*La composante descendante varie avec la force du vent alors que celle montante est constante pour un grand roulis donné. L'angle de grand roulis régulé dépend donc de la vitesse du vent.*

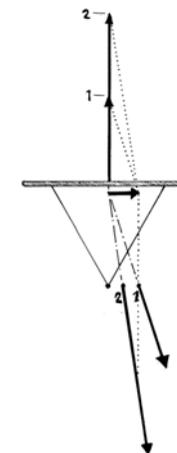


J'ai beaucoup travaillé la dissymétrie de bridage sur un cerf-volant de ma conception, qui est une alternative plus légère et plus fine au Cody. Cependant, cette technique peut se généraliser sur tous types de cerf-volant dont la vocation première était le vol statique au zénith.



**Le cerf-volant statique à bridage déformable.** J'ai réalisé avec succès ce cerf-volant pour un vol stabilisé à près de 30° de grand roulis pour une gamme relativement importante de vent. L'idée avait déjà été essayée (nous le verrons) sur le cerf-plongeant de Herskovitz et Thomé

Le principe : Un élastique sur la bride inférieure d'un bridage de roulis deux-lignes est dimensionné de telle sorte que le point de bridage, au départ décalé, tend à rejoindre une position axiale neutre lorsque la force dans le bridage augmente. Ainsi, lorsque le vent augmente, les forces sont plus importantes mais le décalage diminue, si l'élastique est bien dosé (c'est là toute la difficulté), la composante d'inclinaison reste constante; La composante de redressement l'égalera pour une valeur de grand roulis constante quelle que soit la force du vent.



*Pour que la composante d'embarquée soit constante, il faut que la dissymétrie du bridage soit variable en fonction de la traction.*

Cependant, plus la force du vent est importante, plus la composante de lacet du poids perd en autorité et moins la régulation du grand roulis est efficace. Jusqu'à un point où le poids devient négligeable et le grand roulis redevient indifférent.

D'autre part, comme j'en ai déjà parlé, la régulation sur le mode de l'action direct du poids sur le lacet diminue nettement pour les faibles angles de roulis recherchés. Elle devient infaisable pour des angles inférieurs à 20°.

Pour plus d'information concernant ce type de cerf-volant, voir dans le chapitre annexe qui est un compte rendu de mes expérimentations.

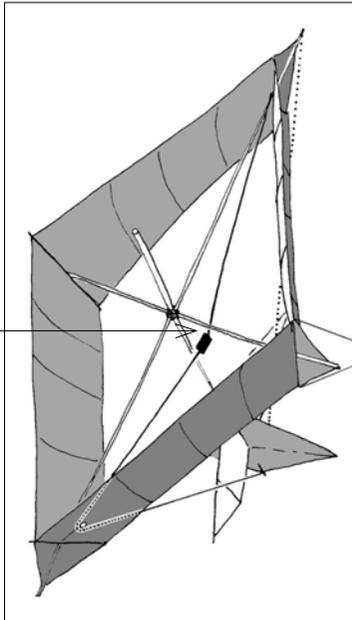
**Le cerf-volant à funiculaire pesant démultiplié.** J'ai réalisé ce cerf-volant dans le but d'obtenir une qualité de contrôle du grand roulis indépendante de la force du vent. D'autre part, il présente la qualité inverse du système précédent: son efficacité est maximale pour une régulation de grand roulis proche de l'horizontal.

Le principe : la gravité est captée par un peson\* dont l'action sur le lacet est démultipliée par l'intermédiaire du volet de l'empennage vertical. En réalité, le peson n'a qu'un rôle de capteur transmettant l'information à un moteur (l'empennage) arrière dont la puissance

*\* peson est entendu dans un sens large d'organe utilisant une masse relativement faible pour capter la verticalité, le champs de pesanteur.*

est exactement proportionnée aux autres forces aérodynamiques du cerf-volant.

C'est la traverse "verticale" qui bloque le peson vers l'avant et permet l'auto-contrôle de l'action en piqué. Par contre, le peson est libre de balancer vers l'arrière, ce qui permet également l'auto-contrôle en remontée de fenêtre.



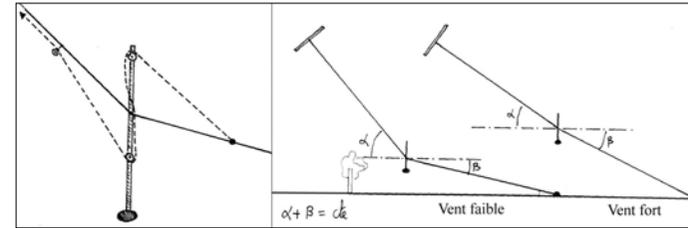
Voir en annexe pour plus de renseignements.

**Le cerf-volant à peson externe.** Un problème du précédent cerf-volant provient du fait que le poids du peson s'applique à l'intérieur du bridage de roulis. A la moindre accalmie, le cerf-volant descend

J'ai essayé plusieurs formes de pesons et celle qui apporte le plus de satisfactions est un funiculaire chargé en son milieu dont une des extrémités est reliée au volet via une poulie, l'action sur le volet étant contrée par un élastique. Le funiculaire doit être placé dans le sens de l'envergure et c'est son extrémité « basse » qui est reliée au volet. Ainsi, si l'on empêche le balancement du funiculaire vers l'arrière du cerf-volant, on obtient une précieuse action **auto-contrôlée**.

L'auto-contrôle obtenu est même supérieur à celui de la simple action du poids du cerf-volant sur le lacet. En effet, si le cerf volant remonte trop fortement, le peson est soumis à une accélération induisant une action redressante que n'avait pas le simple poids du cerf-volant.

Le peson possède cependant l'inconvénient d'être sensible au phénomène d'accélération, le résultat étant que par vent turbulent, le cerf-volant a un comportement très haché autour du roulis d'équilibre.



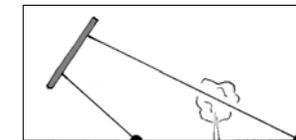
facilement vers le sol. On peut remédier quelque peu à ce problème par un peson externe qui prend en compte deux angles de grand roulis: celui sans poids ajouté du peson et celui avec.

Schéma du système à peson externe.

Le gros problème est qu'il est difficile d'envisager un auto-contrôle de l'action du peson et que les commandes, assez lointaines, perdent en spontanéité (problème de souplesse des câbles, de pertes dans les nombreuses poulies).

### cerfs-volants à capteur d'horizontalité du sol

Pour un tel cerf-volant une très simple solution consiste à disposer deux fils de retenue avec des ancrages espacés transversalement au vent. On



obtient de cette manière, un roulis littéralement encastré au sol. Le système est diablement efficace mais il a quelques désavantages dans une application pour une aile d'eau. Le plus colossal est l'obligation de disposer de deux déflecteurs sous-marins, avec une grosse perte de finesse, d'immenses complications dans les manœuvres, d'immenses possibilités de nœuds inextricables dans la double structure souple.

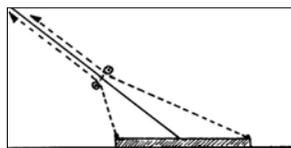


*La variation de la longueur du fil pointillé est reliée à la commande d'un volet d'empennage de lacet. Le pendule externe peut aussi être conçu de façon périphérique.*

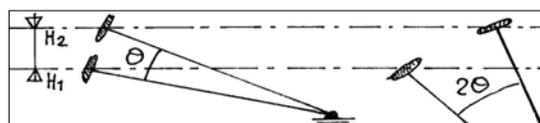
*Avec un multi-ancrage on peut même se passer d'auto-stabilité en lacet. Du coup la liberté formelle explose et on peut même faire voler un simple tapis...*

Il y a une autre possibilité que je n'ai pas expérimentée ni rencontrée mais qui ne me séduit guère: il s'agit de disposer sur le fil, à l'endroit où il transperce l'interface, un corps large en appui sur l'interface qui communique au cerf-volant une information relative à l'angle entre le fil et l'horizontalité de la surface. Deux défauts majeurs font que le cerf-volant sera très rapidement à l'eau:

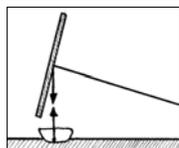
- L'horizontalité mesurée sur une étendue relativement faible de l'interface est très variable.
- L'action n'est pas auto contrôlée.



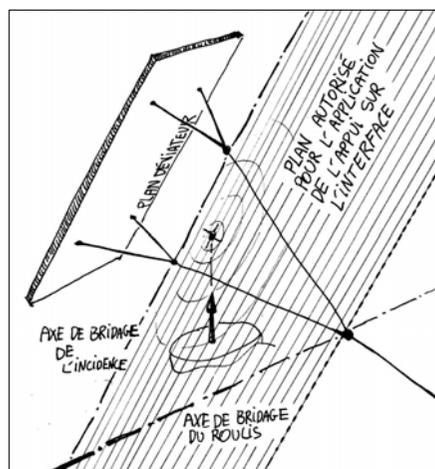
### Cerfs-volants à capteur d'altitude



Le captage de l'altitude n'est réellement efficace que pour réguler des roulis entre 0 et 45°, au-delà la précision diminue nettement.



**Cerf-volant à appui pesant sur l'interface.** C'est le cerf-volant qui s'approche le plus de la voilure d'un voilier. Mais c'est aussi celui qui s'éloigne le plus de la configuration aile d'eau sous-entendant le minimum d'appui sur l'interface.



Le principe: le cerf-volant est laissé en équilibre indifférent de grand roulis, une coque vient réguler le roulis par une l'application directe de son poids apparent. Le point l'application du poids apparent de la coque doit cependant obéir à quelques règles:

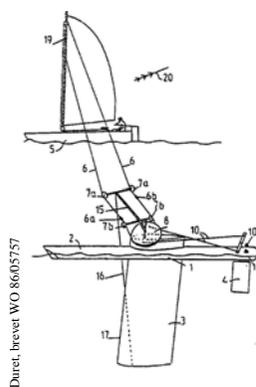
- Il doit se trouver à l'extérieur du bridage de l'incidence. Ceci pour des raisons de stabilité en incidence déjà discutées précédemment en fin de II-B.
- Il doit se trouver à l'intérieur du bridage du roulis (sans quoi il n'y a pas d'action directe possible).

Défauts majeurs d'un tel cerf-volant :

- L'efficacité du système en terme de régulation du grand roulis est proportionnée au poids total du corps pesant.
- Une bonne partie du cortège de défauts du voilier pesant est retrouvé: forte traînée de la coque, perturbation des mouvements de la voilure par les mouvements de la coque. Mais surtout:
- Problème (aussi ardu que pour le voilier) de stabilisation en enfoncement du système.

Par comparaison au voilier pesant, on n'économise en fait au total que les problèmes de la stabilité transversale.

Le voilier à *paravane* de M. Duret nous fournit un exemplaire de grande taille d'un tel système. Dans son cas, la coque s'applique juste sur l'axe de bridage de l'incidence. Duret profite de la présence de la coque pour installer l'empennage de stabilisation de l'incidence sous l'eau, sous forme d'un safran. L'intérêt d'une telle opération étant une économie d'encombrement et de poids. Autre spécificité de l'engin: une partie de l'anti-dérive est assumée par le flotteur, les actions anti-dérive du flotteur et du *paravane* sont alors synchronisées par un capteur de gîte de la voilure.



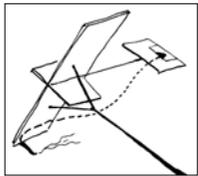
Duret, brevet WO 8605757



Bateaux magazine



Le flotteur peut être remplacé par des systèmes à foils perçants permettant la même régulation passive. Les problèmes n'en restent pas moins les mêmes. Je n'ai pas d'exemples existants à vous proposer mais on peut facilement extrapoler à partir du faux exemple de Objectif 100 de J.M. Finot (qui n'est pas strictement un déviateur suspendu).

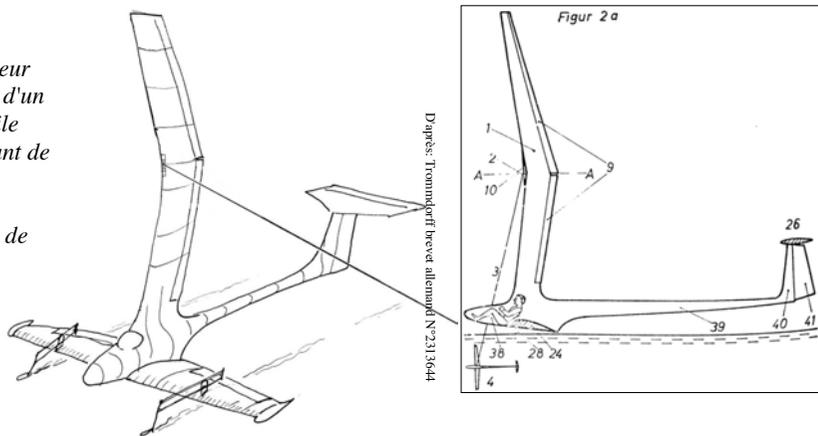


**Cerf-volant utilisant un capteur physique démultiplié de surface.** Je n'ai pas expérimenté un tel cerf-volant, et je n'en connais pas de réalisés. Il présente quelques avantages de la configuration précédente sans les inconvénients découlant d'un appui pesant sur l'interface.

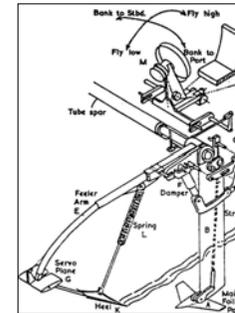
Le principe : Un capteur de faible puissance apporte l'information d'altitude à l'empennage de lacet du cerf-volant pour que l'action y soit démultipliée.

Les formes du capteur peuvent être variées. Je donne ici pour exemple un projet allemand bien abouti datant de 1973 qui ne semble pas avoir été réalisé. Ce projet a la particularité de disposer les surfaces *verticales* ( ou horizontales dans le repère voilier) du déflecteur suspendu le plus près possible de l'interface afin d'exploiter l'effet de sol.

Ce déflecteur fait partie d'un projet d'aile d'eau datant de 1973 dont j'aurais l'occasion de reparler.



La fonction de captage physique de l'interface a déjà été largement développée dans des applications diverses, elle peut être dotée d'un certain nombre de raffinement dont celui d'un certain lissage des perturbations altimétriques.

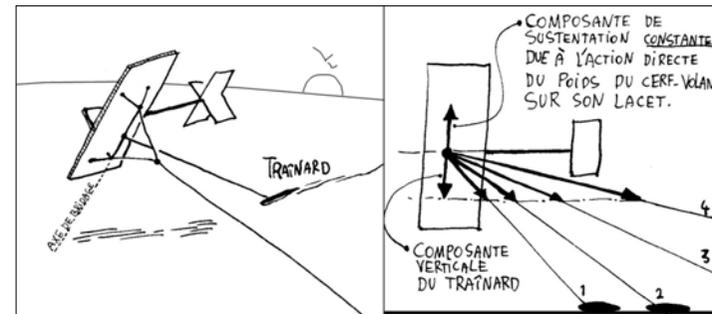


Systeme Hook

**Cerf-volant à traînard simple.** Principe: un corps de poids relatif non négligeable (par exemple la nacelle) est traîné par le cerf-volant par l'intermédiaire d'un fil. Le cerf-volant est réglé pour une très légère portance positive. La variation d'altitude du cerf-volant induit des variations dans le poids apparent du traînard, propres à stabiliser le grand roulis. Tout comme pour l'appui direct sur l'interface, il faut respecter la règle: point d'application du fil à l'intérieur du bridage de roulis mais à l'extérieur du bridage d'incidence.

L'altitude régulée diminue avec l'augmentation de la vitesse, il faut donc prévoir une certaine marge...

L'information étant captée en aval, l'aile est aveugle aux vagues qui lui arrive dessus. C'est une raison supplémentaire pour utiliser une certaine marge de sécurité d'altitude.



Plus la vitesse par rapport à l'eau est importante, plus le traînard traîne et plus le cerf-volant descend (à longueur de remorquage constante). Le traînard doit être piloté, afin de choisir l'angle désiré ou changer l'amure.

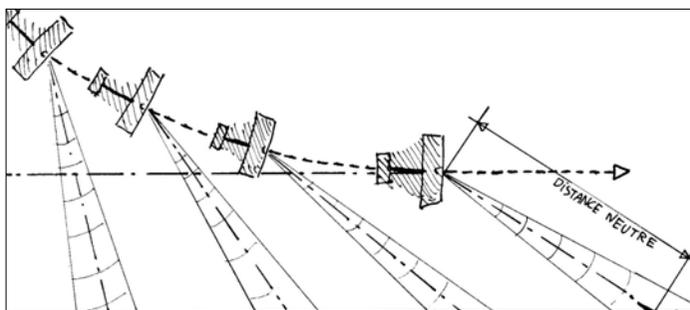
**Cerf-volant à traînard démultiplié.** Principe: un corps d'un faible poids relatif est traîné par le cerf-volant par un fil accroché au niveau de son point de bridage d'incidence. Le fil étant suffisamment long, on peut réguler l'altitude par un captage de l'angle de descente du fil relié à une démultiplication aérodynamique via l'empennage de lacet.

Avantages: Le traînard peut avoir un poids très modeste.

**Cerf-volant utilisant un capteur à distance de surface.** Principe: Le capteur à distance (que ce soit un système sonar ou laser) est directement relié au pilotage par l'empennage du lacet. L'information étant du type électrique, son transport peut-être très fiable et léger. De plus on peut travailler loin de l'interface sans qu'elle n'ait à subir aucune sorte d'appui. L'information peut être capté largement en amont, ceci permettant une action auto contrôlée et anticipée.

Je n'ai pas trouvé d'exemples connus mais je gage sur une réalisation relativement facile.

Le captage amont (même passif) permet un certain auto-contrôle de l'action. Lorsque le déflecteur revient d'une perturbation, il tangente la ligne de vol d'équilibre, si bien que le pompage est inexistant.



## Le cerf-volant à pilotage humain

Il s'agit d'une petite parenthèse pour situer mon propos dans le domaine bien connu des cerfs-volants pilotables.

Tout l'intérêt de la présence d'un pilote humain (doué d'intelligence, donc d'adaptation et d'anticipation) est que l'on peut se permettre des configurations de déflecteurs relativement instables, et en particuliers sans empennages. L'instabilité est nécessaire pour la qualité primordiale:

- Compacité et solidité aux crashes.

Avec la configuration d'aile sans empennage, on ne sait actuellement maintenir en l'air que des ailes dont le L/D est inférieure à 6 ou 7. Pour cette limite, l'attention doit être soutenue en permanence et l'épuisement du pilote est relativement précoce. D'autant plus, lorsque le vent est insuffisant et que le pilote cherche à augmenter la traction du cerf-volant par la réalisation d'autorotation inversées consécutives, ce qu'on appelle "faire des 8" (pour augmenter la traction).

La pratique sportive liée à la propulsion par cerfs-volants de véhicules divers a contribué au développement d'un type de déflecteur instable nommé *cerf-volant de traction* ou *voile de traction* (le mot cerf-volant tend à disparaître des milieux "fun"). Un cerf-volant de traction a une finesse très rarement supérieure à 5.

La finesse est encore moins bonne pour des cerfs-volants de tractions destinés aux sportifs débutants et (ou) aux écoulements très turbulents, du fait du faible allongement nécessaire à l'augmentation de la stabilité passive. Le pilotage de tels cerfs-volants tend alors à se rapprocher d'un pilotage exclusif de grand roulis, sans possibilité de mise en autorotation. Et une passerelle devient possible entre cerfs-volants pilotables et cerfs-volants auto-régulés (en grand roulis).

Les cerfs-volants de traction ont généralement la particularité d'être téléguidés par l'intermédiaire du bridage qui descend jusqu'au sol. Ainsi le pilote se trouve-t-il en toute sécurité au niveau du sol. Et si l'ensemble pilote-cerf-volant quitte le sol, il est immédiatement neutralisé dans un mode de vol libre. Pour une aile d'eau de tailles

Le Wipika est apprécié pour sa grande stabilité passive; son allongement effectif est inférieur à 1!

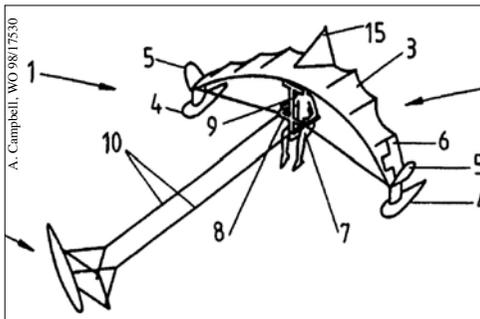
plus respectables, il n'y a pas forcément de tels échappatoires et les conséquences peuvent être beaucoup plus importantes pour le pilote, même s'il est placé le plus près possible de l'interface. Les déflecteurs aériens, même s'ils continuent à être pilotés devront alors être à forte proportion de stabilité passive.

*Peter Lynn dans l'embaras. Et pourtant son cerf-volant est modeste...*



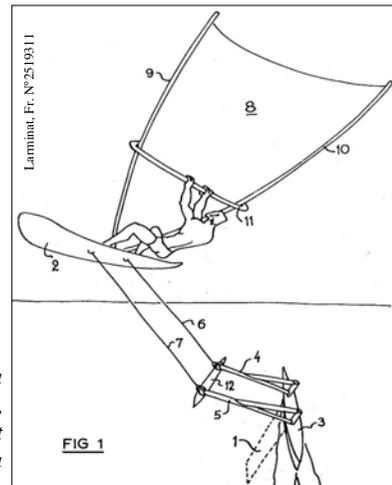
De toutes façons, le pilotage humain de cerfs-volants réactifs devient problématique à partir d'une certaine taille (20m<sup>2</sup>). Au-delà, une certaine démultiplication est nécessaire, mais elle induit une perte fatale en maniabilité qui s'ajoute à celle due à la plus forte inertie rotatoire. Plus les cerfs-volants pilotables sont grands, plus la stabilité passive est nécessaire pour ne pas exiger de fortes réactivités.

Cependant, certains n'ont pas froid aux yeux, leur désir d'en finir avec les problèmes de stabilisation les pousse à se projeter à l'intérieur même du déflecteur captif, et ainsi se permettre un accès plus direct donc plus efficace aux commandes.



*A. Campbell (Australie), deltaplane ancré, 1998. Beaucoup plus sage, mais en même temps plus gourmand (90 pays protégés), à suivre...*

*Larminat (France): La planche à voile volante, 1882. On ne peut qu'être frappé par la ressemblance d'allure avec les kite surfeurs actuels.*



**Cerfs-volants à interface de pilotage électronique** (Parenthèse projective). Principe: Le pilotage de tous les axes du cerf-volant est assuré par un programme informatique reliant une série de capteur à une série d'acteurs. Ce programme permet l'utilisation de cerfs-volants très instables donc fins, compacts, résistants. On peut même envisager la possibilité de figures cycliques de trajectoires (telle que le 8) permettant l'augmentation du coefficient de portance, et repoussant le seuil du vent trop faible.

Les capteurs possibles utilisables pour un cerf-volant à interface électronique de pilotage

- Capteurs gyroscopiques
- Capteurs d'accélération
- Capteurs d'altitude
- Capteurs de vitesse

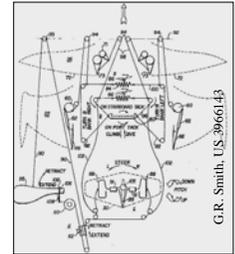
Le captage de la pression statique aérienne n'est pas intéressant pour rendre compte de l'altitude: le différentiel est trop faible et irrégulier pour faire référence.

Les acteurs utilisables sont principalement du type volets compensés ou déformation continue de la voilure souple. Le type à déplacement du point de bridage est trop coûteux en énergie pour être envisagé.

Les personnes qui ambitionnent de réaliser un tel cerf-volant pour voiliers, se heurtent actuellement à des problèmes de fiabilité et de poids. Ils semblent cependant commencer à obtenir des résultats encourageants. Ce sont principalement des amateurs anglais ou américains membres de l'AYRS (amateur yacht research society), parmi eux, et selon lui, Richard Wallace, architecte naval serait le seul à réussir un vol radio commandé d'un cerf-volant d'une finesse supérieure à 10.

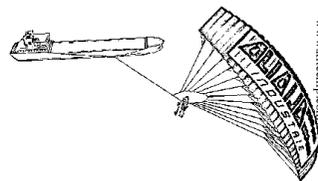
Les nécessités en terme d'intelligences pour stabiliser en bord de fenêtre un cerf-volant sans empennages et de finesse supérieure à 10 dans un écoulement turbulent s'approchent certainement (en quantité) de celles des avions de combats. En effet, le simple pilotage d'un cerf-volant de sport de finesse supérieure à 5 épuise le plus qualifié des pilotes humains en moins d'une heure et demande d'énormes capacités d'adaptation et d'anticipation.

Les programmes informatiques complexes de pilotage automatique d'avions de combats très réactifs développés par l'armée



*Mécanique des organes d'action du voilier de Batman...*

américaine, sont le résultat d'une somme d'expériences et d'investissements considérables. Un investissement similaire semble hors de propos pour l'enjeu purement gratuit d'un voilier de vitesse. C'est, semble-t-il, dans l'espoir de trouver des financements, que l'Américain D. Culp cache sa passion sous l'alibi de transporteurs commerciaux (cargos) propulsés par d'hypothétiques et gigantesques cerfs-volants.



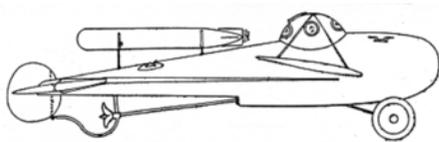
Exocet, petit Larousse.



## B- Déflecteurs suspendus sous-marins

Les déflecteurs qui sont capables d'opérer alternativement dans l'air ou dans l'eau sont rares. Les seuls exemples d'engin capable de cette dualité sont des espèces animales: l'exocet ou poisson volant en est le plus célèbre. Malgré leur précocité, les rêves humains d'engins duaux (aériens-sous-marins) ne se sont jamais réalisés. L'hydravion, déjà d'une grande complexité, n'est qu'un déflecteur aérien capable d'une phase transitoire en appui sur l'interface.

Projet d'un sous-marin plus léger que l'eau et sans ballastage, le Yacht, 1924



Sous-marin automobile inventé par le capitaine H.-P. Sumner

Les déflecteurs sous-marins suspendus que je vais maintenant présenter seront donc formellement assez différents mais de principes similaires à leurs cousins aériens. Que ce soit en anglais ou en français, les appellations usitées sont multiples mais aucune ne fait légion. En fait chaque utilisateur ou inventeur crée son nom. *Paravane* pour les pêcheurs et J. Duret, *chien de mer* ou *Seadog* pour D. Costes et ses disciples, *hapa* pour J. Hagedoorn et ses disciples, *cerf-plongeant* pour Herskovitz et Thomé, *hydrovane* pour C.P. Burgess. Mais aussi: *ancree de mer*, *planeur aquatique*, *dérive suspendue*, *Bruce foil*, *Otterboard*, *Waterkite*, *Seaclaw* etc. La reconnaissance que je dois à Herskovitz et Thomé, le coté complètement décalé, surréaliste mais pourtant explicite du mot sont autant de raisons pour que j'utilise préférentiellement l'appellation *cerf-plongeant*.

La richesse sémantique révèle un perfectionnement pauvre. De fait, le développement des déflecteurs captifs sous-marins concentre et a concentré beaucoup moins d'énergie que les aériens. On peut attribuer différentes raisons à cela mais la principale, à mon sens, est qu'étant largement invisible, l'engin ne peut servir comme sujet d'émerveillement.

L'âge n'est en tout cas pas une excuse valable, l'engin sous-marin étant largement aussi antique que l'aérien. On relate par exemple que c'est grâce à lui que le premier passage d'est en ouest du détroit de Gibraltar a pu être réussi. Ces anciens navigateurs auraient en effet utilisé des déviateurs rigides lestés et immergés à plus de 80 mètres pour capter le courant très salé inverse favorable.

### Cerfs-plongeants à pilotage humain

Ils n'ont pas d'avenir (ni de passé) pour la bonne et simple raison que l'homme n'y voit rien sous l'eau. De plus, étant donné la nécessité (pour le rendement) de maintenir le cerf-plongeant le plus près possible de la surface, les réactions doivent être rapides, automatiques et infaillibles, ce dont un homme est incapable.

## Cerfs-plongeants à couple hydrostatique

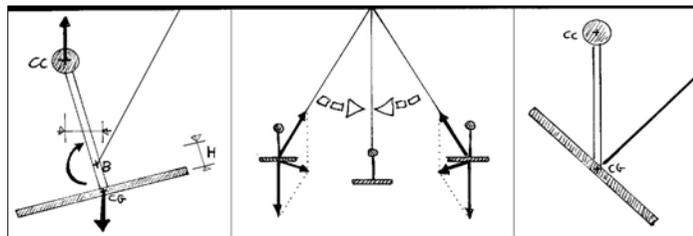
Ils stabilisent leur grand roulis par un captage de la verticalité du champ gravitationnel.

A l'inverse du cerf-volant, le cerf-plongant qui peut se permettre un poids apparent nul, ne perd pas d'énergie dans la sustentation hydrodynamique. Les stabilisations par référent gravitationnel sont de ce fait moins coûteuses dans l'eau que dans l'air.

**Cerf-plongant à hydrostatique agissant directement sur le roulis.** Le principe: la hauteur de bridage est suffisamment courte pour que le couple formé par le décalage vertical entre centre de gravité et centre de volume puisse agir efficacement sur le roulis. Bien entendu, l'inconvénient principal de ce type de cerf-plongant est la décroissance parabolique de l'efficacité du contrôle avec l'accroissement de la vitesse. Il faut augmenter la masse et le volume pour augmenter la puissance de contrôle. A défaut de perte d'énergie par sustentation, l'augmentation de volume et de masse est néanmoins payée en traînée. Plus les dimensions du cerf-plongant sont importantes, moins les dimensions relatives des organes hydrostatiques le sont (en vertu de la loi d'accroissement cubique par rapport à accroissement carré).

Si les deux points hydrostatiques sont situés sur le plan de symétrie, le grand roulis sera stabilisé verticalement. En les décalant transversalement, on obtient un grand roulis stabilisé obliquement.

*A condition que la hauteur de bridage  $H$  ne soit pas trop grande, le couple hydrostatique peut réguler tout seul le petit roulis et indirectement le grand roulis dans un angle dépendant de la disposition de  $CG$  et  $CC$ .*



*Petit roulis et grand roulis régulé verticalement*

*Disposition dissymétrique pour grand roulis non vertical*

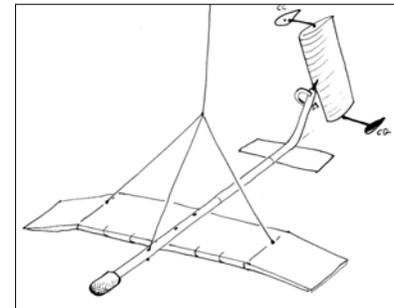
Le cerf-plongant de Thômé et Herskovitz agit en partie selon ce principe. Vitesse de fonctionnement pour un engin de 1mètre d'envergure: entre 0 et (au moins) 6 m/s.

**Cerf-plongant à hydrostatique agissant directement sur le lacet.** Le principe: Avec une puissance de lacet sur l'embarquée suffisante, le décalage longitudinal des centres de l'hydrostatique permet la création de couple de lacet induisant une embarquée redressante. L'action indirecte par l'intermédiaire du lacet permet une certaine démultiplication, le degré de contrôle est beaucoup moins limité par la vitesse. Le fonctionnement est le même que celui du cerf-volant statique plus lourd que l'air; l'action est également auto-contrôlée.

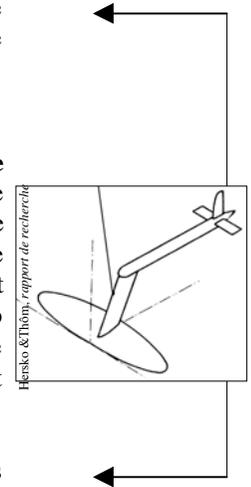
Le cerf-plongant de Thômé et Herskovitz fonctionne pour la plus grande part selon ce principe.

**Cerf-plongant à peson démultiplié.** Le principe: un peson agit sur l'empennage de lacet qui entraîne le roulis. Les avantages sont alors: une faible masse ou volume nécessaire et quasiment pas de limite de vitesse pour la stabilité. Le problème de ce système est que les forces hydrodynamiques sur le peson sont difficilement négligeables dans les dimensions courantes de cerf-plongant. Pour les vitesses importantes, il faut contenir le peson dans le fuselage. Mais le mécanisme est alors difficile à réaliser pour les petites tailles courantes.

J'ai fabriqué et expérimenté avec succès un cerf-plongant avec peson directement solidaire de l'empennage et qui peut permettre une stabilisation de n'importe quelle valeur de grand roulis. Vitesse de fonctionnement pour un engin de 20 cm d'envergure: entre 0.5 et 4 m/s.

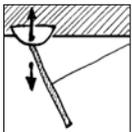


*L'empennage de lacet est monté sur un axe oblique de sorte que l'hydrostatique puisse agir directement. Le problème est qu'une petite part de l'action de l'empennage est reportée sur l'incidence.*

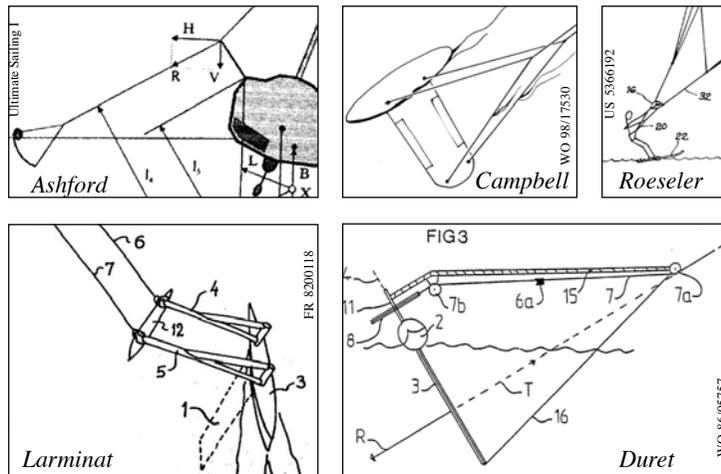


## Cerfs-plongeurs à capteur d'altitude

Ils stabilisent leur grand roulis par un captage de la distance à l'interface, c'est à dire de la profondeur moyenne.

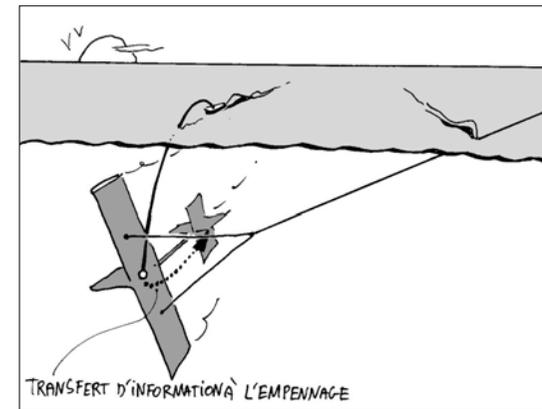


**Cerf-plongeur en appui direct sur l'interface.** C'est le mode le plus primitif de cerf-plongeur. Sa grande simplicité ne lui pardonne que très difficilement sa coûteuse implication avec l'interface. A mesure que la vitesse augmente, le poids de l'appui doit suivre. Ce qu'il fait généralement par un ballastage liquide.

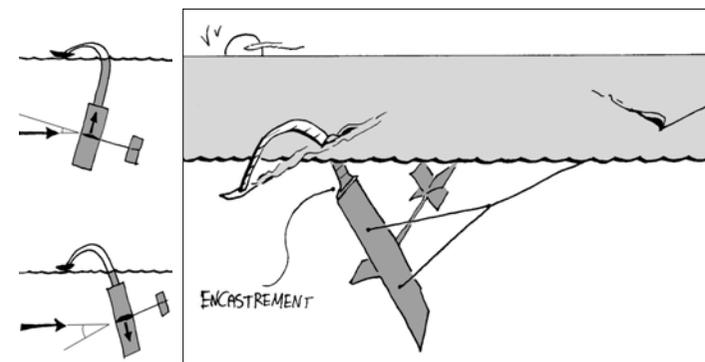


**cerf-plongeur à palpeur de surface démultiplié.** C'est le même principe que pour l'aérien; le palpeur physique, n'a pas besoin d'être imposant donc le cerf-plongeur s'implique relativement peu avec l'interface. Attention cependant, la structure reliant le palpeur au déflecteur freine relativement plus dans l'eau que dans l'air.

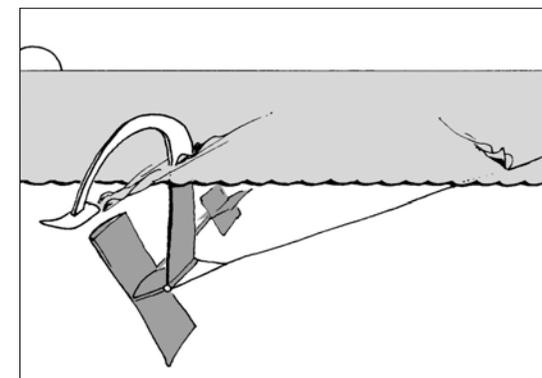
On peut imaginer un exemple simple par un palpeur amont solidarisé avec le mouvement de lacet du déflecteur. Malgré tout, un inconvénient non négligeable est la certaine vulnérabilité de la structure de captage nécessairement mince.



*Simple capteur physique de l'interface*

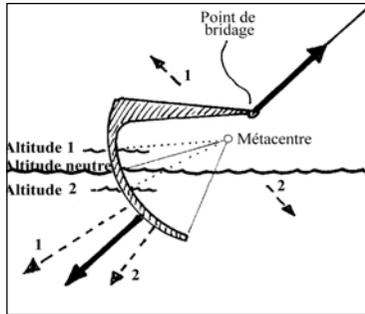


*Appui amont sur l'interface. Le poids peut être moins important que pour l'appui direct. Il faut simplement que l'hydrostatique soit réglée pour un lacet plongeant (contrée par l'appui amont).*

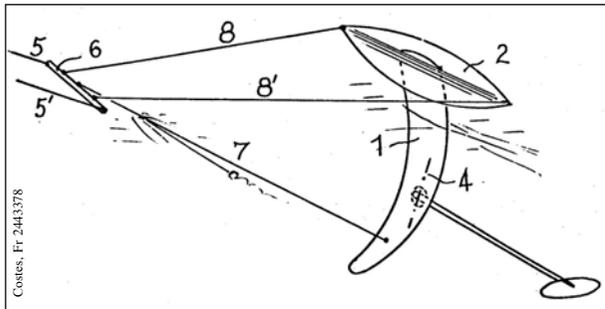


*Avec un bras d'appui articulé sur un seul axe, on peut envisager un transfert de régulation du roulis vers l'incidence pour assurer la seule régulation de la profondeur même pour un biais proche de la verticale.*

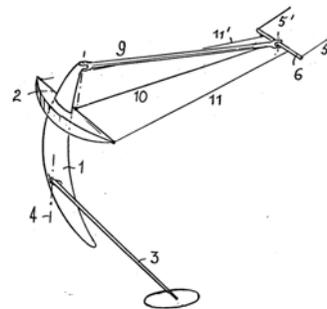
**Cerf-plongeant perceur de surface.** Il fonctionne de manière similaire mais inverse de celle de l'hydrofoil perceur (sustentateur). Le plan présente un dièdre rentrant (sous forme continue ou angulée), et pour que l'ensemble soit stable, il faut que le «métacentre» du dièdre soit à l'intérieur du bridage du roulis. Le perceur de surface présente de plus l'apparent avantage de rendre possible une complète émergence du dispositif de bridage. Attention toutefois, car la stabilité du roulis ne tolère alors pas la moindre souplesse de la structure en flexion.



A condition d'être d'un poids non négligeable, ce cerf-plongeant peut réussir à moyenner le clapot par inertie verticale, de la même façon que des sustentateurs perceurs. Pas d'illusions cependant, il réunit aussi une bonne dose d'inconvénients: résistance de vague, ventilation, et sensibilité à l'état de la mer. Son inventeur, le Français D. Costes (inspiré par l'Américain B. Smith) l'a largement développé et expérimenté. En voici une réalisation récente. Vitesse maximale de stabilité dans le clapot: 10 m/s (environ 20 nœuds).



Version avec bridage souple partiellement immergé.



Version à bridage rigide émergé. Dans tous les cas, l'implication avec l'interface pose le problème ardue du changement d'amure. (Sujet abordé dans deux chapitres).

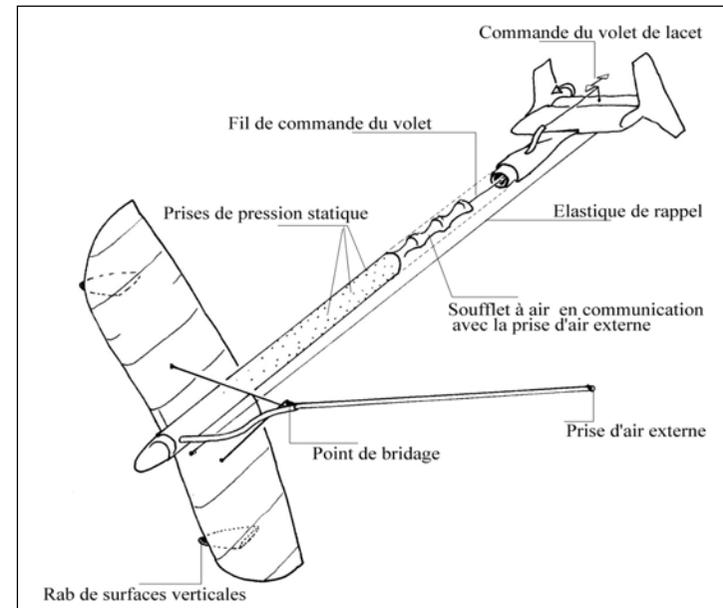
**Cerf-plongeant à capteur de pression statique.** Principe: la pression statique renseigne le cerf-plongeant sur la profondeur moyenne. L'information transmise est démultipliée par l'action de l'empennage de lacet. L'inconvénient principal du système est qu'il n'y pas d'auto contrôle (sauf à disposer un capteur largement en amont du déflecteur).

Cependant, ce système possède beaucoup d'avantages

- Le champ de pression statique n'est rien d'autre qu'un lissage efficace de l'irrégulière surface de l'eau.
- La profondeur est régulée alors que le cerf-plongeant est totalement détaché de l'interface.
- Le système peut être aisément réalisable, la preuve:

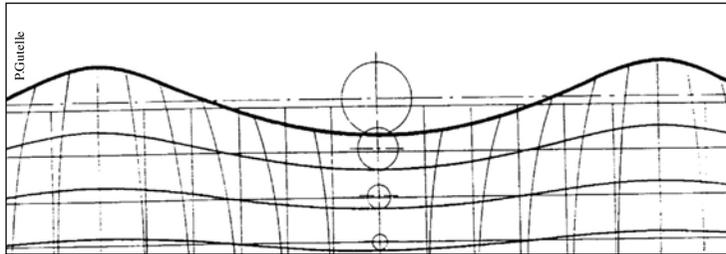
J'ai confectionné un tel cerf-plongeant de petites dimensions (15 cm d'envergure) et rustique (bois et alu de récup, epoxy). Le captage et la transmission de l'information de pression sont entièrement mécanique. Ne disposant pas d'auto-contrôle, l'action régulatrice est nécessairement de faible puissance, aussi, la stabilité est relativement fragile en écoulement turbulent. Cependant, acceptable dès 0.2 m/s, elle augmente avec la vitesse.

Vitesse maximale de stabilité du prototype: inconnue! (supérieure à 5m/s, mais peut-être bien jusqu'à 15m/s).

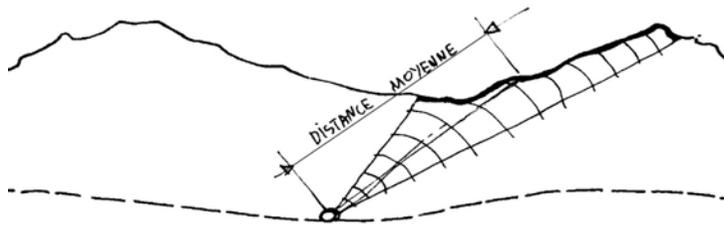


Une description détaillée de l'engin, de ses réglages et de ses comportements est proposée en annexe.

*Champ de pression dans une houle trochoïdale. On y voit clairement les possibilités de lissage d'un engin captant la pression statique.*



**Cerf plongeant à captage immatériel de la surface de l'eau.** Le principe est le même que précédemment excepté le mode de captage de la profondeur. Ce dernier agit à l'aide de sonar, de laser ou de toutes informations immatérielles capables d'un aller-retour entre le déflecteur et la surface de l'eau. Je ne connais pas de modèles réalisés mais je prédis cependant une assez simple et efficace réalisation. En effet, ce système peut se permettre de cumuler aux avantages du précédent (lissage, totale immersion et simplicité) celui de l'auto-contrôle de la régulation par un captage amont de la distance à la surface de l'eau (et sur une zone suffisamment large pour rendre possible une moyenne).



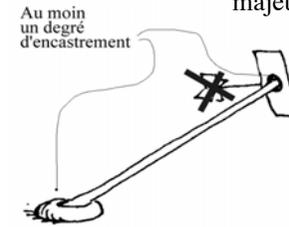
*La largeur du faisceau doit être adaptée à l'échelle du lissage souhaité.*

Voilà donc un cerf-plongeant facile et efficace qui ne devrait pas tarder à apparaître, ne serait-ce que dans mon atelier. Le seul défaut qu'on peut lui reprocher est son imparfaite autonomie: le captage, la transmission et l'action de la régulation nécessitent une dépense d'énergie électrique que seul un moyen traînant dans l'écoulement peut efficacement entretenir.

## C- Les faux déflecteurs suspendus

Afin de régler certains problèmes pratiques dont je parlerai plus loin, on peut être amené à concevoir de faux déflecteurs suspendus.

J'entends par là que bien qu'elle ne transmette pas de couple majeur, la structure qui les fixe n'est pas souple et se trouve capable de transmettre au moins des torsions, au plus des couples suffisants pour prendre en charge la stabilisation du déflecteur.



### Voilier sans masse à déflecteurs encastrés sur l'interface

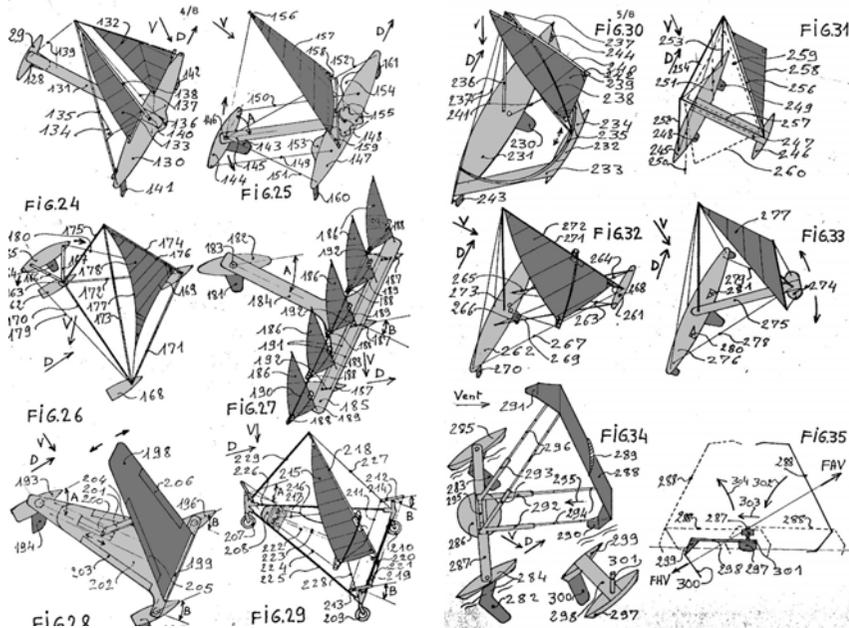
C'est le *voilier sans masse* qui se rapproche le plus de l'aile d'eau en ce qu'il aligne les composantes aéro et hydrodynamiques dans un effort général biais de tension. Cependant, la stabilisation des déflecteurs est assurée par un certain degré d'encastrement sur une structure elle-même en appui sur l'interface. Les déflecteurs, réduits à un simple plan déviateur, sont quelque peu encastrés entre eux et sur l'interface. Il en résulte une plus ou moins encombrante et pesante structure.

Si on replace cet état d'esprit de l'encastrement dans des domaines différents, on s'aperçoit qu'il mène rarement à la simplification escomptée. Et qu'en croyant éliminer des problèmes de stabilisation, on en crée au contraire des supplémentaires liés à une problématique structurelle. L'exemple le plus édifiant est celui de l'évolution du rotor de l'hélicoptère. Au départ plus ou moins totalement encastrées, les pales du rotor étaient confrontées à une multitude de problèmes de stabilité et surtout de résistance, conduisant à une durée de vie souvent inférieure à l'heure. Depuis, on s'est aperçu avec effroi que si on libérait quasiment tous les mouvements de la pale (exceptée l'incidence variable au cours de la rotation), les forces d'inerties (gyroscopique et centrifuges) et les forces aérodynamiques s'équilibraient toutes seules en épargnant très largement la structure.

Pour ce qui est de l'aile d'eau, le principal grief que l'on peut porter sur l'encastrement des déflecteurs est que les difficultés structurelles empêchent une grande largeur, donc un biais et (ou) une hauteur de captage intéressante.

Quoi qu'il en soit, les exemples de tels faux déflecteurs suspendus ne manquent pas, j'en reproduis ici comme un éventuel moyen de régler le problème de la stabilisation du grand roulis (et souvent avec lui les autres mouvements). Ils ont au moins le mérite d'exister, à mon sens, comme une indispensable transition vers une souplesse plus radicale.

Le champion du genre est français, il se nomme J.Y. Salaun. Voici une sélection de ces projets.

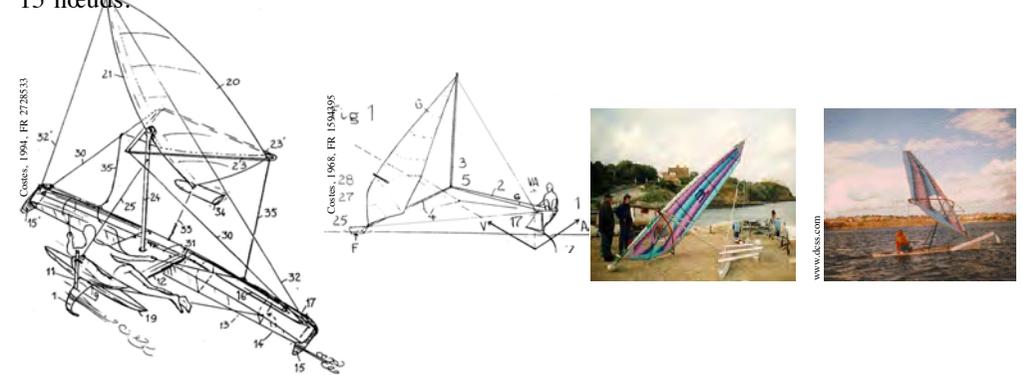


J.Y. Salaun, FR 254227. Dans toutes ses revendications (il en a bien d'autres!), il a deux préoccupations principales: l'alignement des forces aéro et hydro et la manoeuvre de changement d'amure. J'ai quelque peu interprété les dessins par une «colorisation»...

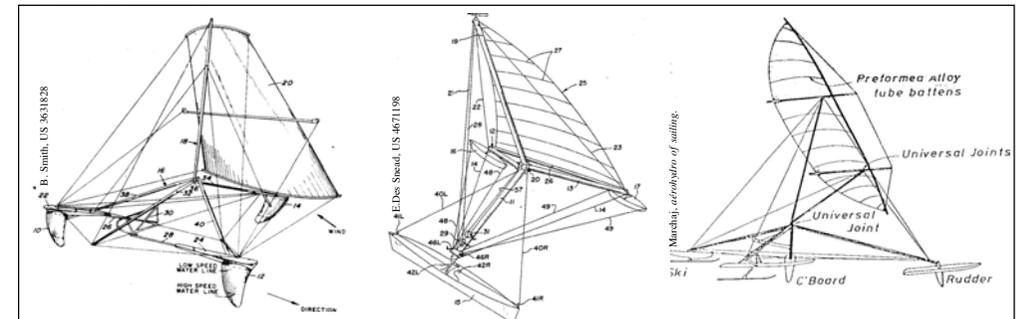


J.Y. Salaun dans les speedweeks anglaises

Didier Costes s'intéresse depuis les années 60 à de semblables engins (il semble d'ailleurs qu'ils se connaissent bien). Il participe aux semaines anglaises de vitesse mais n'a pas été enregistré à plus de 15 nœuds.



Et bien d'autres...



Smith, 1970, l'image même de l'encombrement mais aussi le précurseur de tous les suivants..

Edwin Des Snead. Une certaine élégance....

Aquarius, Wellington, 27 nœuds en 1975

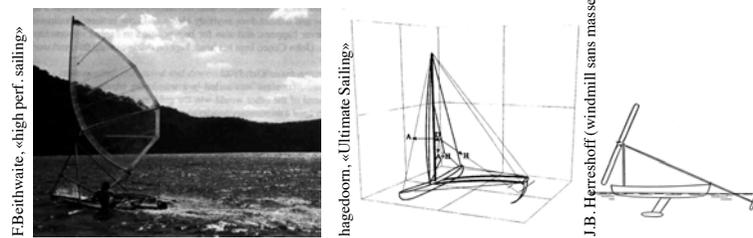


Jean Hurtado, Hurlam, très rêveur.

Gama = simplicité. 25 noeuds en 1984

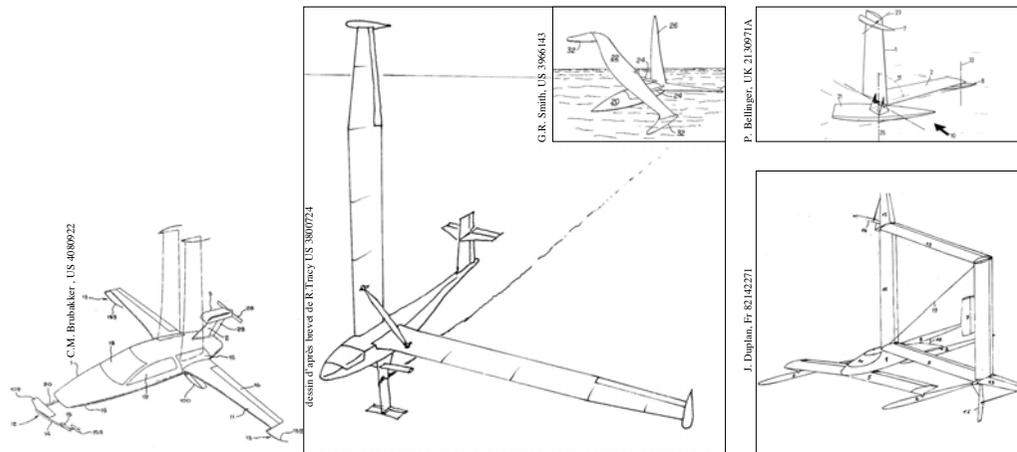
Son cousin dix ans plus tard.

J.M. Finot, Objectif 100 minaliste presque jusqu'à l'aile d'eau mais pas jusqu'au 100 km/h !



et encore bien d'autres !

### Voiliers sans masses et sans appui sur l'interface dont un des déflecteurs est encastré sur l'autre



Le principe: le problème de l'autostabilisation est résolu pour un des déflecteurs, généralement le déflecteur aérien. Par souci de ne pas rajouter de traînée dans l'eau, le plan déviateur sous-marin est alors encastré sur le déflecteur aérien. Les problèmes structurels n'en demeurent pas moins limitatifs.

les dessins de G. Smith, J. Duplan, C.M. Brubaker et P. Bellinger sont moins aboutis que celui de R.Tracy, en particulier par le fait que le déflecteur sous-marin n'est pas pourvu de moyens plongeants, la stabilité en altitude reposant alors sur le poids, il ne s'agit pas véritablement de voilier sans masses.

## D- Conclusion sur les déflecteurs suspendus

J'ai montré qu'un grand nombre de solutions pratiques existaient pour la réalisation de déflecteurs suspendus entièrement autostabilisés.

Rassuré sur les capacités individuelles des éléments de l'aile d'eau, il faut maintenant s'intéresser aux problèmes d'équilibre que suppose la suspension mutuelle de deux déflecteurs.

Une inter suspension stable est-elle envisageable ? Si oui, quels sont les modes de stabilisation de déflecteurs à associer préférentiellement ? Comment stabiliser une allure? A quelles vitesses ?

Le prochain chapitre s'occupe de ces questions.

## IV- Equilibre de l'aile d'eau

Comment stabiliser en position et en vitesse deux déflecteurs inter-suspendus?

«Dans le but de naviguer plus vite, à cause de l'énorme traînée de vague, on peut penser à immerger la coque sous la surface ou à la soulever au-dessus. La première solution, qui est en fait un sous-marin propulsé par voiles, n'a jamais été produite. Mais qui sait, dans notre monde progressiste.»

La parfois naïve rigueur anglaise de C.A. Marchaj, *aéro-hydro of sailing*, p.125

Il ne faut pas sous-estimer les capacités de transmission d'informations d'un simple fil (sans parler des impulsions électriques!).

L'antique cerf-volant de combat japonais le démontre. Ce n'est rien d'autre qu'un cerf volant statique (monofil) à relativement faible stabilité passive mais pourtant, avec beaucoup d'entraînement, on est capable, rien qu'en tirant ou en lâchant le fil, de faire évoluer le cerf-volant dans sa fenêtre de façon quasi volontaire. Le principe est en fait de profiter du peu de puissance de l'action régulatrice du poids de ce cerf volant. Si on tire sur le fil, on l'accélère, donc on diminue d'autant l'action du poids, le cerf-volant se dirigeant alors dans la direction qu'il pointait originellement par le hasard des turbulences.

D'un côté le point de fixation, de l'autre, le déflecteur suspendu. Si jamais le point de fixation est capable de mobilité, les informations transmises par le fil au déflecteur sont d'une très grande importance.

Tirer, lâcher ou bouger transversalement le fil revient à changer le flux apparent donc à faire glisser la sphère d'évolution. La position du déflecteur sur la nouvelle sphère d'évolution se trouve donc momentanément changée (le déflecteur n'ayant pas réagi

instantanément). D'où une phase transitoire de mouvement dans la sphère d'évolution, le temps de retrouver la nouvelle position stabilisée. Le danger vient du fait que le transfert de fenêtre peut provoquer une sortie de la sphère en amont du bord, avec pour résultat l'affaissement et la chute.

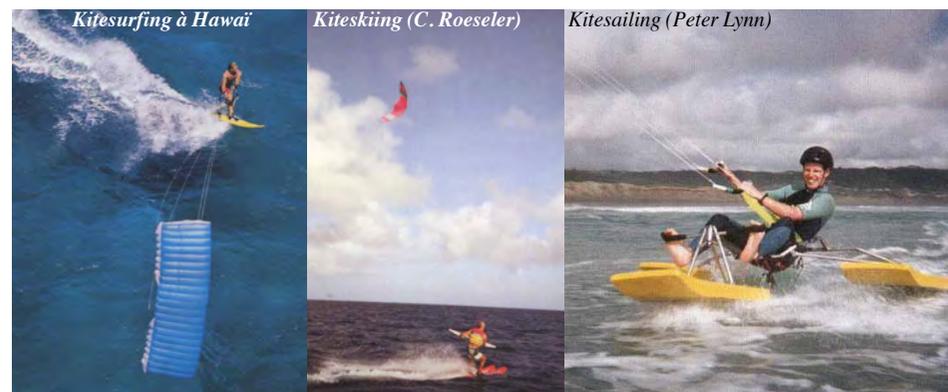
Le pilote de char à cerf-volant utilise très largement la possibilité de faire glisser la fenêtre. Si jamais le cerf-volant tend à dépasser le bord, il lofe. Il abat en cas contraire. Le contrôle par le lof du char ne peut malheureusement pas être transposé à une aile d'eau car il repose sur une réserve d'énergie cinétique qu'elle n'a pas.

Si le mouvement du point de fixation est permanent, le déflecteur finit par se stabiliser dans la nouvelle fenêtre mais le flux apparent n'ayant pas la même vitesse, la traction dans le fil est différente.

D'une part, la mobilité du point de fixation agit sur le cerf-volant par un changement de sa position relative à la fenêtre et d'autre part, le cerf-volant réagit sur le point de fixation par des variations dans la traction. Le fil est donc bien un média dans lequel les informations transitent en feed-back permanent.

En cela, l'aile d'eau qui n'est rien d'autre qu'un double déflecteur suspendu, n'en fait pas moins qu'un quelconque voilier dont les deux plans déviateurs encastrés pratiquent le feed-back de leur flux apparent.

Il est inutile de faire durer le suspens, la possibilité d'une stabilité en inter suspension ne fait à l'heure actuelle aucun doute. Bon nombre de gens la vérifie tous les jours en pratiquant les sports en récent développement que sont le *kitesurf* ou *flysurf* ou le *kitesailing*.

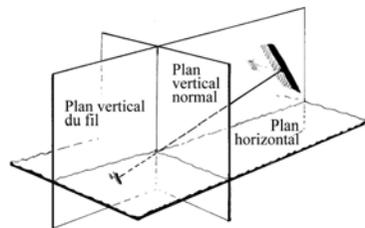




Dans le domaine du vol à voile, un fait étonnant s'est fait remarquer: si on ouvre une aile de secours alors que l'ancienne aile n'est pas neutralisée, un «*effet miroir*» provoque l'accélération stable (et dangereuse) de l'ensemble.

Selon le témoignage de certains, l'inter suspension de deux déflecteurs augmente la stabilité par rapport au déflecteur simplement suspendu. Selon d'autres témoignages, l'inter suspension donne lieu à certain «trous» transitoires mais quasi insurmontables dans la stabilité d'ensemble.

A l'heure où j'écris cet exposé, je n'en suis encore qu'à des expériences de déflecteurs simplement suspendus, mais la réflexion que je vais vous exposer me rend confiant pour mes futures expériences inter suspendues sans pilotage humain et j'espère pouvoir ajouter un post-scriptum affirmatif, dès la réapparition de quelques beaux jours. En attendant, ma réflexion s'appuie sur des déductions logiques, sur ma théorie des plans suspendus et sur le comportement d'ailes d'eau existantes.



L'étude se décompose en plans cartésiens avec le fil et la gravité pour référence.

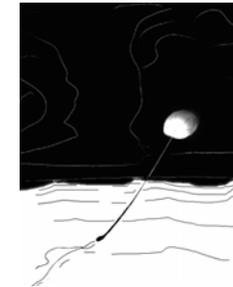
## A- Equilibre dans le plan vertical du fil

### Cas d'une aile d'eau de finesse totale proche de 180°

C'est à dire proche du minimum avec des allures proches du vent arrière. Le plan vertical du fil est donc dans le sens du vent. J'ai déjà montré que les performances de cette allure résidaient dans le différentiel de coefficient de traînée corrigé par les surfaces. A cette allure l'élément eau n'est absolument pas utilisé dans la propulsion et l'engin qui s'en extrait totalement est celui qui va le plus vite. Le

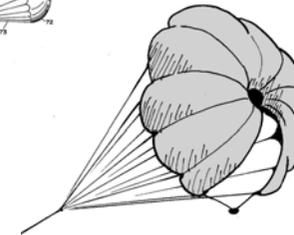
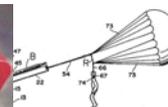
plan déviateur complètement immergé, comme moyen à haut rendement pour développer une portance horizontale n'a pas de raison d'être à cette allure où les seules qualités demandées sont faible traînée et faible finesse. On ne peut donc guère faire mieux qu'une bête coque au planning.

La question de la stabilité d'un système suspendu dans ce plan se réduit à l'étude d'un cerf-volant statique soumis à un vent apparent d'autant plus important que la traînée de la coque est proportionnellement dominante. Je pense sincèrement qu'une simple bouteille vide reliée par un long fil à un cerf-volant statique aussi stable et aussi peu fin que possible forment un engin (que j'ai déjà eu le loisir de faire fonctionner) remarquablement stable et capable de battre tous les records s'il est placé dans un ouragan.



*Un déflecteur suspendu de très faible finesse est relativement facile à stabiliser. Seul le lacet propre peut poser quelques problèmes.*

*Je propose en annexe une analyse de mes expérimentations en matière de cerfs-volants «de traînée». Notamment de ce parachute à fente (stabilisé par une faible masse rajoutée), très stable en écoulement turbulent.*



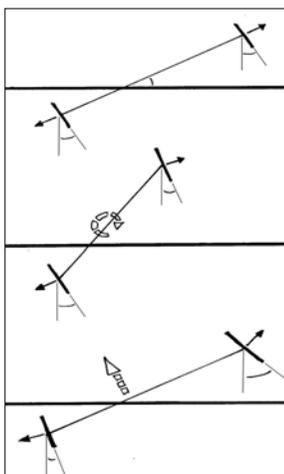
### Cas d'une aile d'eau de finesse totale inférieure à 35°

Pour de telles finesesses (35° est une finesse totale courante pour un voilier au près) l'allure par rapport au vent apparent ne dépassant pas les 35°, les flux d'air et d'eau sont approximativement perpendiculaires au plan vertical du fil. L'équilibre dans ce plan se résume alors à la double étude du grand roulis, nécessairement le même pour les deux déflecteurs et approximativement égal au biais. Chacun des déflecteurs de l'inter suspension peut être considéré comme le point de fixation de l'autre déflecteur. Comme il n'y a plus de points d'ancrages arbitrairement fixés sur le sol ou l'interface, il va falloir se soucier de la stabilisation de l'altitude générale. Finalement, le plan vertical du fil est le plan où va se jouer deux des trois régulations fondamentales de l'aile d'eau, le **biais** et l'**altitude**.

Les effets sur la stabilité du poids ou de la flottaison du fil sont négligeables; il n'y a donc que les déflecteurs qui sont capables d'actions. Pour le plan considéré, cette action est limitée au grand roulis. Dans le chapitre sur les exemples pratiques de régulation du grand roulis, j'ai conclu sur l'existence de deux référents possibles: le référent altimétrique et le référent angulaire du champ gravitationnel.

A partir de ces deux référents, je vais étudier une à une les quatre combinaisons possibles d'aile d'eau.

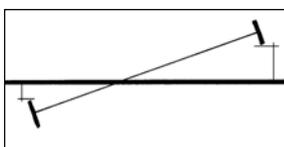
#### Aérien et sous-marin capteur de verticalité gravitationnelle



Supposons l'aérien et le sous-marin stabilisé par référence à la verticalité à un grand roulis de  $30^\circ$ . Si l'ensemble est dévié à un biais supérieur ou inférieur les deux déflecteurs vont simultanément capter la perturbation et engager la correction.

Cependant, si jamais la régulation des roulis n'est pas strictement la même pour les deux, par exemple  $29^\circ$  et  $31^\circ$ , l'ensemble n'arrive à trouver un compromis que dans un déplacement général à composante verticale. L'altitude de l'engin est donc au mieux indifférente; cette combinaison de déflecteurs est inapte à faire fonctionner une aile d'eau

#### Aérien et sous-marin capteur d'altitude



On suppose deux stabilisations en altitudes suffisamment basses pour qu'avec la longueur de fil donné, le biais soit inférieur à  $45^\circ$ . Afin que j'économise un peu de salive et dans un élan participatif, j'incite maintenant le lecteur

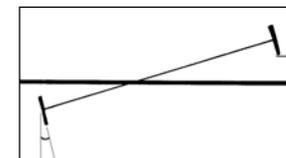
à s'amuser à envisager diverses perturbations en biais et (ou) en altitude et à vérifier que les réactions de grands roulis de chaque déflecteur conduisent à retrouver la position initiale et que la

combinaison de deux déflecteurs capteur d'altitude est apte au fonctionnement d'une aile d'eau dans le plan vertical du fil.

Le problème d'une telle combinaison est que si le fil est relativement court, le biais de l'aile d'eau est fortement excité par les irrégularités de l'interface, ce qui provoque des variations de la finesse totale pouvant être préjudiciables pour l'équilibre du plan horizontal.

#### Aérien capteur d'altitude et sous-marin capteur de verticalité

On suppose que le déviateur sous-marin capteur de verticalité est réglé sur un angle de roulis inférieur à  $45^\circ$ . On vérifie que cette combinaison de déflecteur est également apte au fonctionnement de l'aile d'eau dans le plan vertical du fil.



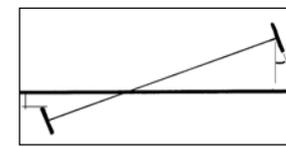
Elle possède cependant un défaut capital dans une interface perturbée: la profondeur d'immersion du déflecteur sous-marin est sujette à de fortes variations. Etant donnée la forte traînée relative du fil (même caréné et en matériaux à haute résistance), les variations de finesse totale peuvent fragiliser l'équilibre dans le plan horizontal (un cerf-plongeant peut doubler son angle hydrodynamique quand sa profondeur est multipliée par cinq).

Autre défaut majeur: plus la longueur du fil est grande, moins la précision de l'immersion le sera et plus il faudra prévoir une importante marge d'immersion amputant la finesse totale.

Dans des cas particuliers de clapot, cette configuration peut cependant être utile pour permettre un lissage efficace.

#### Aérien capteur de verticalité et sous-marin capteur d'altitude

On suppose que le déviateur aérien capteur de verticalité est réglé sur un angle de roulis inférieur à  $45^\circ$ . Cette configuration étant le symétrique de la précédente, elle est également apte.

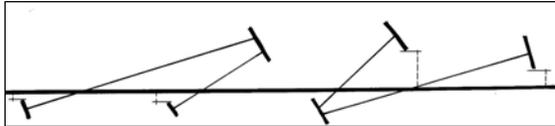


Son comportement dans une interface déformée est exemplaire, le biais et la longueur mouillée du fil étant soumis à des variations modérées, la finesse totale est stable et efficace.

**Conclusion.** Pour stabiliser son biais et son altitude, l'aile d'eau doit être pourvue d'au moins un déflecteur capteur d'altitude et l'autre doit être palpeur d'altitude ou d'angle.

La configuration qui apporte le plus de satisfaction dans une interface agitée (du genre houleux) est celle qui associe un Aérien capteur de verticalité et un sous-marin capteur d'altitude.

**Aile d'eau à trois déflecteurs suspendus.** Ce type particulier d'aile d'eau dont j'ai déjà discuté possède beaucoup d'inconvénients (manœuvres difficiles, faible finesse), cependant, il a l'avantage de permettre à un des déflecteurs une absence de capteurs de verticalité et d'altitude.



## B- Equilibre dans le plan vertical perpendiculaire au fil

Voilà un bien gros titre pour pas grand chose!

En fait, étant donné l'incapacité du fil de l'aile d'eau à conduire des moments de torsion, la stabilité dans ce plan se réduit à la stabilité propre déjà étudiée de chaque déflecteur. Au suivant!

## C- Equilibre dans le plan horizontal

Le plan horizontal présente la particularité fondamentale de contenir les déplacements du voilier. Cette partie sera donc l'occasion d'une double étude:

- étude de la stabilité de l'allure apparente.
- étude de l'équilibre de vitesse et de l'allure réelle. La vitesse d'ensemble se stabilise-t-elle? Quand et à quelle allure réelle? Polaire des possibles. Ce sera l'occasion d'un calcul estimatif de la vitesse d'une aile d'eau théorique de vitesse absolue sur 500 mètres.

### 1-la stabilité de l'allure apparente

Considérons dans un premier temps l'aile d'eau basique, constituée de deux déflecteurs avec moyens de stabilisation indépendants agissant exclusivement dans leur fluide respectif. Le biais et l'altitude sont supposés stabilisés (voir partie précédente). Tout comme pour le plan vertical, on peut considérer que chacun des déflecteurs constitue le point d'ancrage de l'autre. L'étude de l'ensemble consiste alors à une étude imbriquée des stabilisations d'incidences.

Considérons des déflecteurs réglés à une finesse de  $15^\circ$  pour une incidence de  $15^\circ$  (la composante sera perpendiculaire à la corde).

**Critère de réussite de la stabilité:** l'ensemble est en équilibre (quel que soit son mouvement permanent) par rapport aux fluides si la somme des forces et des moments est nulle. L'équilibre est stable si des perturbations dans les flux réels induisent une réaction de l'engin qui réinstalle l'équilibre par un changement approprié des flux apparents.

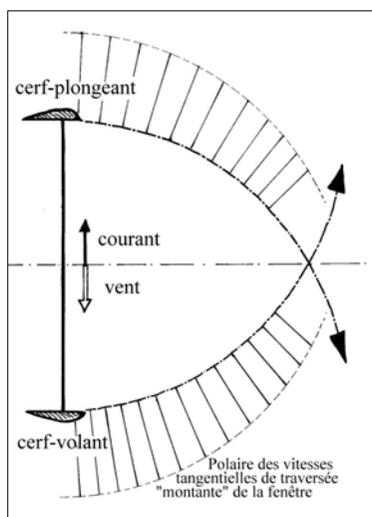
Dans ce problème assez simplifié, il n'y a que deux forces: les deux composantes aéro et hydrodynamiques.

Pour qu'il y ait équilibre, il faut que l'angle que forme les deux flux apparents soit égal à la somme des finesses des deux déflecteurs. En d'autres termes, il faut que l'allure apparente soit égale à la finesse totale horizontale. Régulation de l'allure apparente et régulation de la finesse totale disent en fait la même chose.

Quelle que soit la position de départ qu'on considère, c'est à dire vitesse nulle en référentiel médian, référentiel plutôt eau ou référentiel plutôt air, l'angle entre les flux n'est autre que  $180^\circ$ , il ne remplit donc pas les conditions d'équilibre. Pour ce faire, un heureux et providentiel mouvement de l'engin est indispensable.

Considérons le référentiel médian. J'ai déjà décrit dans le premier chapitre le déroulement de la mise en vitesse, j'y reviens brièvement. Dans cette position arrêtée initiale, chaque déflecteur peut être observé comme étant en position basse d'une traversée «montante» de sa sphère d'évolution. Cependant les traversées étant simultanées, il en résulte un seul et même mouvement d'accélération dans le sens transversal au courvent.

Chaque déflecteur est le point d'ancrage de l'autre qui n'est encore qu'en position «basse» d'une fenêtre qu'il lui reste à traverser. Les deux traversées étant simultanées, le mouvement résultant est translatatoire.



Dans la pratique, les deux déflecteurs seront rarement exactement synchrones mais le résultat sera le même, exception faite d'un éventuel balancement en lacet de l'ensemble. Lors du pompage de lacet, le déflecteur «en retard» est dans une position plus basse de la fenêtre, donc il accélère davantage, et peut être amené, par inertie, à dépasser l'autre... etc.

L'engin, augmentant sa vitesse, referme l'angle entre les flux apparents jusqu'à ce qu'il soit

égal à  $30^\circ$ . Si on envisage (par effet d'inertie par exemple) que l'engin ait atteint une vitesse supérieure de sorte que l'angle soit inférieur à  $30^\circ$ , cela conduit à des déflecteurs se trouvant dans une position trop «haute» dans leur fenêtre, leur stabilisation d'incidence va engager une «redescente» donc une décélération générale jusqu'à ce que l'angle soit de nouveau égal à  $30^\circ$ .

On peut aborder le problème d'une manière moins imagée, mais la conclusion est toujours qu'une aile d'eau initialement à l'arrêt et constituée de deux déflecteurs inter suspendus stabilisés en incidence, est à même de stabiliser son allure apparente à la suite d'une phase transitoire de mise en vitesse.

Pour ceux qui n'ont pas lu ou n'aiment pas l'histoire des montées transitoires de fenêtre dans le chapitre II-B, il leur suffit de raisonner simplement en disposant toujours la force dynamique de chacun des déflecteurs dans son angle régulé par rapport au flux apparent (quelle que soit l'orientation du fil) ....

La régulation de l'allure apparente est la même pour un voilier comme *Elf Aquitaine*, par exemple, dont la voilure et la dérive sont indépendamment stabilisées en incidence. L'équilibre de l'aile d'eau présente cependant une fragilité spécifique: elle provient de la perturbation du milieu qui place un des déflecteurs suffisamment «haut» dans sa fenêtre pour qu'ils s'affaissent (définitivement...).



Voiliers de régates

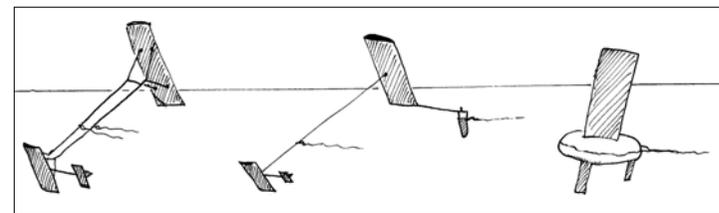
Autre particularité: l'aile d'eau est facilement soumise à certaines oscillations de lacet. Dans la pratique cela pose particulièrement problème à cause des brutales augmentations de la traction dues aux remontées du cerf-volant dans sa fenêtre. Cela rend notamment très problématique la propulsion par cerf-volant de coques pesantes qui finissent par littéralement décoller. Exemple néo-zélandais:

« Sur des bateaux tractés par des cerfs-volants trop grands pour être tenus à la main, le cerf-volant est directement fixé au bateau, si bien qu'en cas de surpuissance momentanée, l'éjection hors de l'eau est loin d'être aussi faible de conséquences que pour le seul pilote. Une ou deux telles expériences, si on y survit, sont une sorte de droit de passage à de bonnes et époustouflantes conversations. En vouloir d'avantage, c'est pousser trop loin les chances de survie.»  
Peter Lynn, *kitesailing, underpower / overpower*, 1999.

Tout le travail de Peter Lynn sur ces cerfs-volants de traction consiste justement à mettre au point des systèmes de régulation de la traction par arisage automatique.

Ceci dit, pour l'aile d'eau, les sauts de tension dans le fil ne sont un problème que pour des vitesses proches des vitesses cavitantes (45 nœuds). En effet, la cavitation est la seule limite du déflecteur sous-marin sans masse. Ce qui n'est pas le cas des déflecteurs suspendus existants, en appui pesant sur l'interface.

Autre configuration possible pour stabiliser l'allure apparente: un seul des plans déviateurs est stabilisé en incidence, l'autre s'encastre sur lui avec un braquage donné. L'enjeu est une économie de moyens de stabilisations. Le déflecteur stabilisé sera alors préférentiellement le sous-marin car ses moyens de stabilisation sont plus légers et moins encombrants.



liaison à plusieurs  
fils

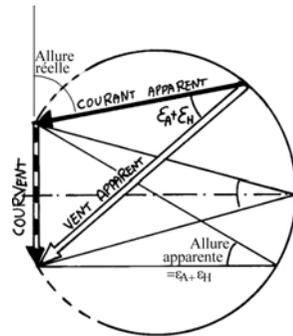
Empennage mixte  
rapporté

Voilier pesant  
ordinaire

trois types  
«d'encastrement»  
relatif de l'aérien  
sur la stabilité du  
sous-marin.

*Parenthèse sur les voiliers pesants:* la plus part des voiliers pesants utilisent ce principe de l'économie d'un stabilisateur, le safran n'étant rien d'autre que le stabilisateur du déflecteur sous-marin. Connaissant une vitesse limite de l'eau à cause de son appui pesant sur l'interface, le voilier pesant ne peut stabiliser l'allure apparente aussi facilement que l'aile d'eau qui joue en toute liberté avec sa vitesse pour former les flux apparents de l'équilibre. Il se doit d'ajouter des moyens complémentaires de stabilisation. Ils sont nombreux:

- Régulation de l'allure par la gîte.
- Régulation de l'incidence aéro par le faible allongement de la voile.
- régulation de l'incidence aéro par une voilure fractionnée (ketch par exemple)
- Régulateur d'allure (qui n'est rien d'autre qu'un empennage aérien dont l'action est reportée sur organe sous-marin).
- Pilote automatique électronique relié à au moins un capteur directionnel de flux.

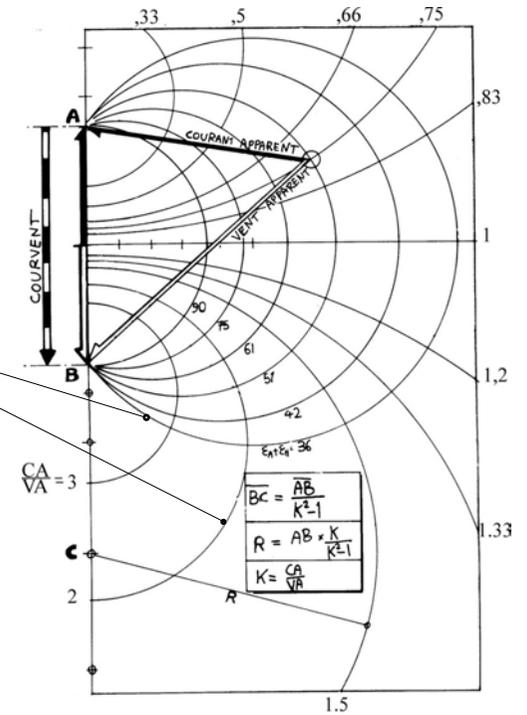


## 2- la stabilité de l'allure réelle

Pour aborder cette partie, on considère acquise la stabilité de l'allure apparente (= 30° sur le schéma). L'étude la stabilité de l'allure réelle se limite alors à l'étude de la position du voilier sur la polaire circulaire *iso-allure-apparente*.

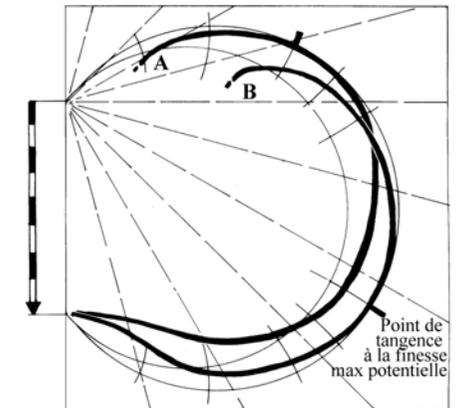
L'équilibre sur cette ligne est atteint lorsque les forces aéro et hydrodynamiques s'égalent en intensité sachant que plus on descend sur la polaire plus la vitesse de l'eau augmente par rapport à celle de l'air. Pour un rapport donné des surfaces corrigées (par le rapport des densités et des coefficients de force), il existe un point de la polaire qui permet l'égalisation des forces dynamiques. Ce point est stable: si le voilier est déplacé le long de la polaire par une perturbation, la somme, non nulle, des forces conduit à une décélération ou une accélération générale correctrice.

**Une aile d'eau dotée d'un rapport d'intensité de déviation donné** (corrigé par densités et surfaces, voir chapitre I-A) **sera capable d'une seule allure réelle et d'une seule vitesse correspondante.** Connaissant ce rapport, on en déduit le rapport de vitesse des flux apparents. L'allure et la vitesse réelles peuvent alors être graphiquement déterminées à l'aide d'un abaque géométrique représenté sur le schéma suivant. Les lignes *d'iso-finesse-horizontale* et *d'iso-rapport-de-vitesse-apparentes* sont des cercles dont les centres et les rayons sont déterminables graphiquement ou par le calcul.



Une aile d'eau capable de faire varier la surface des ses plans déviateurs sur commande et sans modifier leur finesse sera en mesure de décrire une polaire parfaitement circulaire. Dans la pratique, une telle variation de la surface suppose des technologies inaccessibles et les voiliers ont donc simplement recours à un réglage des incidences ou des cambrures. Ce faisant, la finesse des déviateurs varie de sorte que la polaire de l'aile d'eau sera en réalité un ovale tangentant la polaire circulaire théorique.

Le point de tangence entre polaire circulaire et polaire réelle dépend alors du rapport effectif des surfaces de déviateur. Un rapport de surface à l'avantage du déflecteur aérien donnera lieu à un point de tangence situé plutôt vers les allures portantes et inversement.

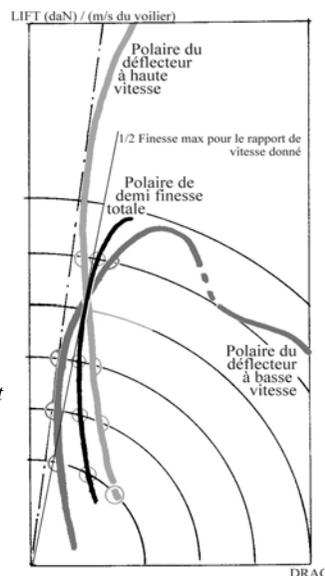


La courbe A est la polaire d'une aile d'eau dont le compromis de rapport de surface favorise la remontée au vent (relativement grande surface sous-marine). La courbe B correspond à un compromis avantagant la vitesse absolue (relativement grande surface aérienne).

Abaque pour la détermination de la polaire de vitesse relative d'une aile d'eau

Graphique de croisement des deux polaires des déflecteurs compensées d'un rapport de vitesse (eau/air) donné.

Ce graphique permet la détermination du couple d'incidence correspondant à la meilleure finesse totale.



Pour un rapport de surface donné et des polaires connues de déflecteurs, le tracé exact de la polaire des vitesses est enfantin. Il nécessite de déterminer la meilleure combinaison d'incidence pour chaque *rapport des vitesses*, à l'aide du croisement des polaires corrigées.

Cette simplicité repose sur une hypothèse capitale: la finesse totale horizontale reste indépendante de la vitesse. Sans cette hypothèse, tout se complique terriblement. Le cas du voilier en appui pesant sur l'interface est exemplaire pour sa complexité.

Les facteurs qui amènent la complexité supplémentaire dans la détermination d'une polaire d'un voilier pesant sont principalement:

- Corps en interface (équation indéchiffrable de la traînée induite fonction de la vitesse).
- Changement de modèle d'écoulement lors d'un changement du nombre de Reynolds
- Appuis des déflecteurs sur l'interface conduisant à la mise en excitation lorsqu'elle est ondulée.

Dans le cas d'une aile d'eau réelle de masse très faible et avec la section du fil pour seule perforation de l'interface, tout porte à croire qu'on peut tout à fait négliger ces trois hypothèses.

**Manœuvres de changement d'allure** (*De l'absence d'une simple problématique du guidon chez le voilier*). Le char à voile n'a qu'un élément déviateur de fluides, contrairement à la dérive, la roue est à même de créer une résistance latérale sans vitesse ou sans dérive et avec une traînée constante dérisoire. La problématique directionnelle en char à voile est alors fort simple, c'est une problématique «du guidon»: il suffit de bloquer les roues pour une direction et la le char augmente sa vitesse dans cette même direction jusqu'à rencontrer la vitesse maximale (à condition de suivre à l'écoute le changement du

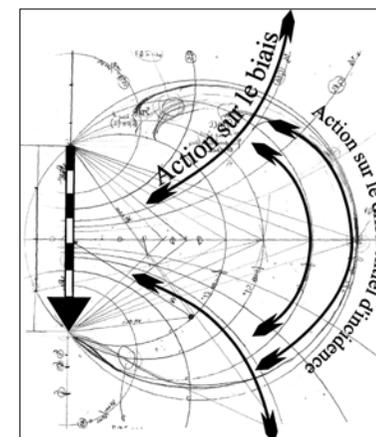
vent apparent). Pour se déplacer sur sa polaire parfaitement circulaire, une simple action momentanée sur le guidon suffit.

Pour le voilier, la problématique du changement d'allure réelle est plus subtile. On ne change pas la direction des roues, on change la finesse totale et (ou) le rapport d'incidence. Cela ne se traduit pas par la seule action momentanée d'un organe créateur de couple (le safran par exemple) mais aussi par le changement permanent d'un réglage (la plupart du temps, dans le cas du voilier il s'agit inconsciemment d'une différence dans l'angulation de barre).

### Conclusion

- Pour abattre ou lofer durablement il faut au minimum agir sur le rapport d'incidence.
- Pour ralentir ou accélérer (le long d'une ligne d'*iso-rapport-de-vitesse*), il faut agir sur la finesse totale.
- Pour ralentir ou accélérer sans changer d'allure réelle il faut jouer à la fois sur la finesse totale et sur le rapport d'incidence.

Dans le cas d'une aile d'eau, un moyen simple de faire varier la finesse totale (sans changer le rapport d'incidence) est de faire varier le biais. La seule augmentation du biais induit à la fois un ralentissement et une abattée.



## D- Facteurs de vitesse

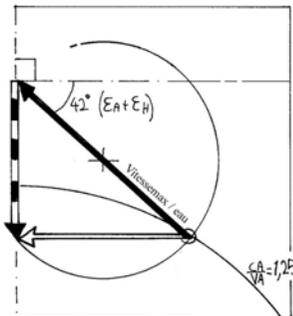
Pour une aile d'eau qui ne connaît par vraiment de limite dans la tension interne, la vitesse peut se ramener à un seul facteur: la **finesse totale horizontale**. La quête de la finesse horizontale maximale passe par un combat d'optimisation à mener sur plusieurs fronts:

- Rechercher la finesse maximale de chacun des deux déflecteurs sans aller trop loin dans l'instabilité et l'intolérance. Par comparaison, les plans déviateur du voilier «à déplacement» ne connaissent pas une telle exigence de finesse car sa polaire de

vitesse effective est de toutes façons limitée par la résistance de vagues de la carène dans un cercle bien plus petit. Si bien qu'il lui est souvent plus profitable d'augmenter la tension interne que la finesse.

- Rechercher un biais optimal. Plus il sera petit, plus la finesse projetée risque d'être grande, mais plus le fil sera mouillé et moins la hauteur de captation du courvent dans la couche limite sera grande. Le compromis sera différent pour chaque forme de la couche limite; le biais étant de plus en plus petit à mesure que le courvent augmente en intensité.
- Rechercher la longueur de fil optimale. Il n'y a quasiment aucune limite à la longueur du fil, si ce n'est très tardivement un problème de traînée puis de poids. Un autre type de limite doit cependant être pris en compte: plus la longueur du fil est grande et plus les problèmes d'accélération momentanée de chaque déflecteur par le balancement en lacet de l'ensemble aile d'eau, seront prononcés. L'accélération momentanée est un problème important lorsqu'on travaille à des vitesses proches de la cavitation. Une mise en cavitation d'un déflecteur dont le profil n'est pas étudié pour ça a des conséquences immédiatement catastrophiques se traduisant par une émergence brutale.
- Rechercher un poids minimal des parties aériennes afin de limiter la perte énergétique par aéro ou hydrosustentation dynamique.
- Rechercher à limiter les traînées parasites du fil, ce qui nécessite essentiellement une étude soutenue de la forme à donner au carénage de la zone de perforation de l'interface. Le seul critère pour le matériau de la partie immergée fil est la résistance mécanique en traction. Pour les parties émergées, il faut en plus prendre en compte la densité.
- Optimiser le rapport de surface des plans déviateurs. Si on

recherche la vitesse absolue en référentiel eau, il suffit de prévoir le rapport de surface donnée indirectement par l'abaque pour l'allure égale à  $90^\circ + \text{finesse totale}$ , afin que la polaire de vitesses tangente le cercle théorique en cet endroit.



On peut utiliser l'abaque de la page 78 pour déterminer le rapport exact de surface à donner aux déflecteurs pour atteindre la vitesse absolue maximale. Dans l'exemple suivant le rapport optimal de vitesse des flux est de 1.25 pour une finesse totale potentielle de  $42^\circ$ . Soit un rapport de surface de 990! (à coefficients de force égaux).

Il faut enfin réussir à résoudre une itération: *la finesse engendre la finesse*. Explication.

Pour une finesse totale horizontale atteinte par une aile d'eau, on obtient une performance relative donnée. Par exemple, un voilier «en  $V^2$ » de finesse totale horizontale égale à  $30^\circ$  sera doté d'une vitesse maximale, en référentiel eau, sur une allure à  $120^\circ$ , égale à  $(1/\sin 30)$ , c'est à dire deux fois la vitesse du *courvent* réel. En référentiel médian la vitesse maximale, sur une allure à  $105^\circ$ , sera égale à  $(1/(2\sin 15))$ , soit 1.93 fois la vitesse du *courvent*.

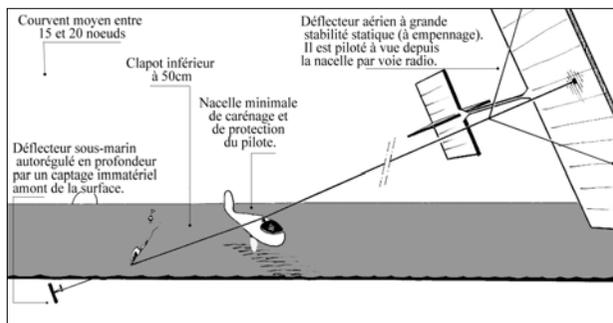
Plus la performance relative est importante, plus la part de flux «fabriqué» est importante dans la constitution du vent apparent donc plus les flux apparents seront «propres». Or j'ai déjà fait remarquer que l'ennemi le plus important de la finesse était la stabilité et la tolérance, autrement dit l'instabilité du flux. Donc, une meilleure finesse en favorisant la vitesse relative autorise encore davantage de finesse.

C'est un fait dont j'avais déjà parlé dans le deuxième chapitre mais qui introduit maintenant le problème de l'optimisation: Un engin stable à une grande vitesse peut ne pas l'être à une vitesse inférieure; comment fait-il pour atteindre sa grande vitesse? La question de l'aérosustentation prise en charge par une proportion variable de l'aérosustentateur pose le même type de résolution circulaire en phase de démarrage.

## E- Vitesses sur 500 mètres

Si j'ajoute à ce qui vient d'être dit la possibilité d'un lanceur, c'est à dire d'un procédé quelconque d'assistance au décollage, une aile d'eau de vitesse sur 500 mètres est désormais facilement réalisable.

**Configuration.** Il s'agit d'une aile d'eau dont les problèmes de stabilisation ont été résolus dans les chapitres précédents et dont l'existence est envisageable sans même régler les autres problèmes pratiques moins essentiels que j'aborde par la suite (Les facteurs d'échelles, habitat, Décollage, démarrage, Changement d'amure, Atterrissage, sécurité, temps extrêmes) et dont la résolution est indispensable pour acquérir l'**autonomie** qui fait de l'aile d'eau un



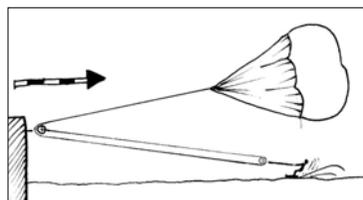
Configuration basique minimale pour le run non autonome.

**Remarque sur la tolérance de la WSSRC face à une absence d'autonomie.** C'est dans un but d'ouverture à des concepts nouveaux que la WSSRC a décidé dès 1972 d'autoriser les embarcations monodromiques. Son argumentation est à quelque chose près la suivante: si quelqu'un a une idée intéressante, la contrainte de bidromie est alors trop forte pour qu'il puisse avoir des résultats précoces. En autorisant la monodromie, on a un semblant de voilier, certes, mais qui pourra toujours être perfectionné si l'idée fait ses preuves.

Sur d'autres points, le comité est paradoxalement beaucoup moins laxiste. Pour l'alimentation électrique des systèmes de pilotes automatiques, par exemple, l'engin doit être doté d'une autonomie énergétique (par la mise en place d'éoliennes) et doit le prouver par une mesure exacte de la contenance de ses batteries avant et après le run.

D'autre part, le comité interdit (règles N°8) tout corps d'aide à la mise en vitesse rejeté par l'engin avant ou pendant son run. Cependant et c'est là notre aubaine, devant les gros problèmes de décollage du cerf-volant que connaissent les désormais habituels kitesurfers et kiteskiers, le comité a gentiment toléré la présence d'une structure d'aile au décollage du cerf-volant.

Ce genre de petits dépassements à la règle est explicitement un moyen de favoriser des idées nouvelles, et sans le bon sens des responsables, il pourrait mener à des abus du genre de celui représenté par le schéma suivant



voilier. Cependant, l'absence d'autonomie étant tolérée (dans une certaine mesure) dans l'acceptation de la qualité de voilier par ceux qui enregistrent la vitesse absolue sur 500 mètres, je suis en droit de présenter les premiers résultats potentiellement acquis par tout ce qui a été dit depuis le premier chapitre.

**Exemple de vitesses calculées pour une aile d'eau basique.** Les polaires d'aile d'eau confondent facilement l'imagination. La raison en est simple, on n'a pas l'habitude de naviguer sur des engins aussi fins. Le fait qu'en abattant du travers au grand large, on puisse augmenter sa vitesse alors que la vitesse du vent apparent diminue est un paradoxe troublant pour qui n'a pas eu la chance de naviguer ne serais ce que sur de grands catamarans de sport ou sur des planches à voile de vitesse. Pour comprendre les performances d'un voilier tel que l'aile d'eau il est illusoire de se placer sur une comparaison avec les voiliers pesants ordinaires. Ne pouvant, moi-même, pour l'instant, pas faire naviguer une aile d'eau compétitive, je dois m'appliquer à faire parler les chiffres, tout en calmant mon excitation devant ce qu'ils représentent. C'est dans un but sédatif que j'ai entrepris un programme de calcul d'une aile d'eau basique dont on peut faire varier la plus part des paramètres aérodynamiques proportionnés à  $V^2$  et des paramètres géométriques, structurels et massiques.

En prenant volontairement un cas très peu fin et en maximisant tous les facteurs de traînée et de poids, on arrive à un engin d'une grande simplicité technologique et d'une taille modeste (surface de voileure de  $70 \text{ m}^2$ ) qui bat le record absolu de vitesse à la voile sur 500 mètres (47 nœuds) dès 17 nœuds de vent réel à 5 mètres d'altitude et dans des conditions de mer pouvant être

#### Données introduites

vitesse max espérée (nds)	50,00
pointe de portance en supercavitation	0,7
coefficient dynamique de sécurité	1,50

#### géométrie du déflecteur sous-marin

type de stabilisation: sondage amont de la distance à l'interface par un capteur immatériel dont l'action est démultipliée sur le grand roulis	
finesse max profil (allongement infini)	15
coef de portance profil de finesse max	0,4
surface plan déviateur ( $\text{m}^2$ )	0,1
allongement effectif (m)	4,0
coef traînée des stab (surface stab = $0,19 \times$ surface foil)	0,04
limite élastique du fil (spectra/dyneema) ( $\text{daN}/\text{mm}^2$ )	70
profondeur de l'aile (% de l'envergure)	150
Coef de traînée carénage câble / surface frontale	0,200

#### géométrie du déflecteur aérien

une aile semi rigide à bridage multiple et empennage léger .	
type de stabilisation: pilotage humain exclusif du grand roulis	
finesse du profil (L/D)	10,00
coef de portance profil de finesse max	0,600
allongement effectif (m)	3,0
surface empennage (% de surface aile)	20
coef traînée des stab	0,10
longueur totale câble (m)	30,0
Ct câble / surface frontale	1,10
altitude de mesure de la vitesse du vent	5,00
lest embarqué (daN)	80,00
poids alaire de l'aile $\text{g}/\text{dm}^2$	20,00
densité du câblage ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1600

#### Données optimisées

diamètre du câble (mm)	6,50
le biais est optimisé pour une vitesse absolue maximale prenant en compte les variations de finesse projetée, de longueur de câble mouillée et de couche limite atmosphérique.	
biais réel du fil / horizontal à l'interface (°)	27,00
altitude de l'aile (m)	12,67
surface aile optimale du plan déviateur aérien (pour le sous-marin fixé) ( $\text{m}^2$ )	
	71,06
hauteur maximale du clapot (m)	0,57
allure réelle du record (°)	117,22

#### résultats

<b>finesse sous-marine</b>	
finesse propre du déviateur sous-marin	8,53
(°)	6,69
finesse déflecteur +fil mouillé (sans biais)	5,4
(°)	10,49
finesse propre déflecteur + biais sans câble	7,56
(°)	7,53
<b>finesse globale max hydro.</b>	<b>4,79</b>
(°)	<b>11,79</b>

<b>finesse aérienne</b>	
finesse propre du déflecteur aérien	5,08
(°)	11,15
finesse propre déflecteur + fils	4,47
(°)	12,62
finesse propre déflecteur + fils + biais	3,95
(°)	14,19
<b>finesse globale max aero (aile+fil+sust.+biais)</b>	<b>3,62</b>
(°)	<b>15,43</b>

<b>finesse totale max hydro-aero</b>	<b>1,94</b>
(°)	<b>27,22</b>

facteur de charge	6,6
<b>vitesse max / au vent réel à 5m d'altitude</b>	<b>2,55</b>
vent réel à l'altitude de mesure (noeuds)	17,4
<b>vitesse apparente eau (noeuds)</b>	<b>50,0</b>

fortement agitées (fort clapot de 60 centimètres). Cependant, la vitesse maximale qu'on peut atteindre avant la cavitation n'est guère plus importante: de l'ordre de 50 nœuds avec un vent réel de l'ordre de 18 nœuds en comptant une marge de sécurité pour l'oscillation générale de lacet.

Il est évident qu'il ne faut pas s'arrêter au pied d'un mur que d'autres voiliers, qu'ils soient sans masses à appui sur l'interface ou pesants et fragiles, finiront péniblement par effleurer de plus en plus avec les progrès des profils anticavitants.

Il faut donc d'ores et déjà songer à la supercavitation. On sait faire depuis des dizaines d'années des profils supercavitants, ce sont par exemple les profils des pales d'hélice rapide. Cependant leur application au domaine du voilier (ou d'hydrofoils) pose un sérieux problème de faible rendement aux vitesses de démarrage mais aussi et surtout un problème de stabilité. Les variations de la naissance et de l'étendue de la poche de cavitation provoque en effet de fortes variations dans le point d'application et l'intensité de la résultante. Il existe cependant des solutions et les résultats sont encourageants. La société suisse Supramar, a développé un procédé de contrôle de la poche de cavitation par un soufflage d'air en provenance du dessus de l'interface. D'autre part, un certain Rowe a inventé un profil spécial à redan très aiguisé localisant exactement le démarrage de la poche d'air. Ce profil agit par une sorte de palier entre la subcavitation et la cavitation, à la manière des paliers de planning d'une coque à redan. Pour cela, on peut le qualifier de profil à palier de cavitation. L'avantage non négligeable pour un voilier autonome, étant de disposer d'une relativement bonne finesse en subcavitation.

Je n'ai pour l'instant malheureusement pas assez d'informations pour estimer les performances relatives en supercavitation, mais il est certain qu'elles dépendront très largement des avancées dans le domaine du profil supercavitant pour voilier ou hydrofoils, domaine encore très ouvert à la recherche et à l'innovation. Quoiqu'il en soit, les finesses de fonctionnement risquant d'être assez faible ( $L/D$  inférieurs à 6 semble-t-il), un voilier supercavitant devra être capable d'évoluer dans une interface de fort courvent et avec une très forte tension interne. Quel autre type de voilier sera alors plus approprié que l'aile d'eau pour faire ces profils supercavitants stables et à palier(s)?...

Avant de prétendre haut et fort des vitesses de 200 km/h comme le fait sans complexes l'Américain inventeur du kiteski, C. Roeseler et certainement avec lui un bon paquet de professeurs cosinus, il faut se lancer dans l'exploration du terrain superbement vierge qu'est le voilier supercavitant et découvrir d'éventuels problèmes (et solutions) insondables d'ici-bas.

Ceci n'étant évidemment pas de mon ressort immédiat, je continue l'exposé avec le nouveau souci de l'expansion de l'aile d'eau dans d'autres programmes que celui un peu trop surfait de la vitesse absolue sur 500 mètres. Pour cela, l'aile d'eau doit acquérir une totale autonomie, ce qui passe par la résolution de problèmes pratiques.

## V- Contraintes pratiques

Quelles réalités pour l'aile d'eau?



Voiles et voiliers

*«Dans certaines mers, le vent vient du fond des eaux, les agitant, les soulevant, dieu seul sait comment cela arrive.»* L. Masudi, voyageur encyclopédiste arabe du 10<sup>e</sup> siècle.

Heureusement, il existe des contraintes à la mise en pratique de l'aile d'eau. Telle une coquille de protection d'un œuf qui attend son heure, il n'y a qu'à espérer qu'elles ne sont que la barrière indispensable à la tentation d'une sortie prématurée.

A cause de l'ablation d'ingrédients majeurs, la théorie de l'aile d'eau semblait devoir transformer la savoureuse antique complexité du voilier en une fade abstraction aussi uniformisante que le transport aérien.

Au lieu de ça, quand on se penche sur le problème, des obstacles apparaissent de toutes parts et semblent non pas empêcher l'aile d'eau mais l'obliger à revêtir une certaine richesse créative dans la recherche de voies multiples. Cette multiplicité serait-elle le fait de l'interface air-eau, éternel médium aléatoire par lequel la simple idée se répand dans l'abondance turbulente de la complexité?

J'ai groupé cinq types de contraintes. Elles sont le fruit d'une réflexion basée majoritairement sur une expérience et un vécu encore embryonnaire mais déjà inspirateur. S'il y a du hasard dans l'accident ou l'échec, je peux dire que j'ai eu la chance, durant mes expérimentations de les accumuler de telle sorte qu'il ne se passe maintenant plus une pensée sur l'aile d'eau sans y voir des éventuels emmerdements. Mais dans ce domaine je ne crois plus au hasard depuis que j'ai eu affaire aux nœuds. Si un fil n'est pas manipulé

selon un rituel ancestral exigeant, il se débrouillera avec une rapidité et une constance surprenante à créer un paquet de nœuds dont la grosseur sera proportionnée à la liberté laissée. Comme dans l'air, un filet de fumée qui s'échappe de la cigarette, commence après une sage ascension d'une dizaine de centimètres, son travail aléatoire mais certain de remplissage de l'espace. Ou comme dans l'eau, le sachet de thé.

Ce chapitre se voulant l'expression de la dimension concrète de l'aile d'eau, il sera agrémenté d'exemples de solutions ayant déjà été projetées sinon expérimentées.

## A- Facteurs d'échelle

Les yachtmen sont des gens très sensibles à l'idée de l'échelle comme à l'idée d'une hiérarchie sur l'eau. Il est un fait tous les jours vérifiable, c'est que le voilier le plus grand gagne, et ce n'est que justice. Mais alors quel trouble dans les esprits quand une petite planche à voile de 2.8 mètres passe sous le vent d'un brave voilier de course-croisière cinq fois plus grand. C'est à se pincer le nez.

En réalité, lorsqu'on peut faire abstraction des résistances de vagues, l'effet d'échelle lié au vieux monsieur Froude disparaît et avec lui toute velléité de grandeur démonstrative. Dans les premiers temps de la recherche de vitesse absolue en sprint court (année 1970), voyant que la supériorité des gros (Crossbow) écrasait les efforts des petits, on s'est dit qu'il fallait créer des classes différentes selon les tailles (Classe A, B, C et D selon la surface de voilure). Mais la confusion sur l'attribution d'un mérite a très vite régné lorsque par un renversement total des données, un voilier (planche à voile) de la classe la plus petite a battu tout le monde.

Si on veut bien jouer le jeu du voilier sans masse et accéder à des vitesses supérieures, les données deviennent très stimulantes. Pour aller plus vite que son voisin il faut alors faire jouer autre chose que son génie dans la spéculation boursière ou dans la recherche de sponsors.

Il ne faut cependant pas croire, à l'inverse, à une totale indifférence dimensionnelle. En fait, il existe chez l'aile d'eau, bien qu'en

beaucoup plus discret que chez la balourde coque, de multiples facteurs d'échelles. Certains sont favorables aux grandes tailles d'autres aux petites.

**Effets d'échelle liés aux modèles d'écoulement.** Ce paragraphe est basé sur le fait bien connu depuis Reynolds qu'un même profil placé avec la même incidence change ses caractéristiques de coefficients dynamiques avec le changement de la forme de son écoulement, qu'on appelle modèle d'écoulement.

Ce facteur d'échelle peut être favorable aux petites tailles lorsqu'on ne regarde que la traînée d'un corps correctement profilé. En effet, le corps de petite dimension pourra espérer se faufiler dans le fluide sans qu'il ait le temps de s'en «apercevoir», c'est à dire en écoulement laminaire. Il passe entre les gouttes en quelques sortes. Pourtant, à partir du moment où l'écoulement est de toutes façons turbulent (à cause d'un défaut de surface par exemple), la courbe de coefficient de friction fonction du nombre de Reynolds est nettement descendante et la traînée devient favorable aux grandes tailles.

Lorsqu'on regarde la portance, les grandes tailles prennent généralement l'avantage. Si le profil mince d'une voile est remarquablement indifférent au nombre de Reynolds, le profil épais connaît une chute dramatique dans les Reynolds entièrement laminaires. De plus, grâce à une mise en turbulence plus précoce de l'écoulement, le grand profil peut se permettre des incidences, donc des portances plus grandes avant décrochement. J'ai par contre lu (de sources incertaines) que les plans porteurs de faible allongement sont favorables aux petits nombres de Reynolds, à vérifier.

Pour ce qui est de la cavitation, je n'ai pas d'élément qui me permette de donner l'avantage aux grandes ou aux petites tailles excepté le fait non négligeable de la profondeur. Plus une aile d'eau sera de grande dimension, plus le déflecteur sous-marin sera profondément immergé et plus la cavitation sera tardive (l'augmentation de la pression statique autorise un différentiel de pression plus important avant la pression de vapeur saturante).

**Effets d'échelle liés aux dimensions des vagues.** L'eau est soumise à des lois dimensionnelles très cadrées. La tension superficielle limite, outre la taille de la goutte d'eau, la précocité de mise en excitation de l'interface. Mais, au-dessus de quelques nœuds, pour chacun courvent donné appliqué sur un temps donné et relâché depuis un temps donné, il y a une taille de vagues bien spécifique avec des proportions propres. Pour ce qui est de la haute mer atlantique, on peut recenser deux échelles de vagues. Le clapot qui ne dépasse pas le mètre et la houle entre 1 à 6 mètres; au-delà c'est déjà une lame exceptionnelle. Pour une aile d'eau limitée aux vitesses subcavitantes, il semble que le seul élément dimensionnant soit le clapot. En effet, s'il fallait suivre sa forme courte et cambrée, il faudrait d'énormes et dépeniées accélérations verticales. Pour éviter ses accélérations, il faut lisser l'information de profondeur, et pour que les variations de traînée correspondantes (liée aux variations d'immersion du fil) ne portent pas trop à conséquences sur le balancement en lacet de l'ensemble de l'aile d'eau, il faut à celle-ci une taille minimale.

Les vagues plus hautes (donc plus rapides) non déferlantes posent a priori moins de problèmes à l'aile d'eau qui fait route dans le même sens qu'elles à une vitesse subcavitante car elle dispose de beaucoup plus de temps pour les contourner et les accélérations verticales sont nettement minimisées.

En somme, l'interface atlantique oblige une taille minimum d'aile d'eau (surface du déflecteur sous-marin de l'ordre du sixième de mètres carré) pour qu'elle soit adaptée aux clapot le plus fort mais n'incite à de réellement grandes dimensions qu'avec des ambitions supercavitantes et (ou) océanique plus sud.

**Effets d'échelles structurels.** Une structure en tension dont les efforts appliqués sont proportionnés à  $d^2$ , possède la propriété remarquable d'être adimensionnelle. Le fil, structure de liaison des déflecteurs de l'aile d'eau, n'est donc pas soumis à des contraintes dimensionnelles. Le déflecteur ne peut en dire autant. Dans le cas où la charge dynamique est reportée par un nombre de brides limité, sa structure s'apparente à une poutre en flexion dont l'effort appliqué augmente selon  $d^2$ . La contrainte interne reste alors adimensionnelle, en revanche, la masse alaire augmente avec la taille. Or, pour un déflecteur aérien, une masse alaire plus grande nécessite une plus

*d=dimension linéaire*

grande dépense énergétique relative de sustentation, c'est à dire une finesse moindre.

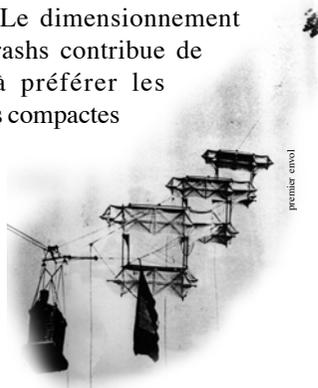
D'autre part, toujours pour une aile au moins partiellement rigide, l'obligation de résistance aux éventuels crashes sur l'interface, est un



facteur très défavorable aux tailles importantes. C'est l'histoire de l'éléphant et de la fourmi en chute libre. Le dimensionnement aux crashes contribue de plus à préférer les formes compactes

mono-plans aux formes à empennges.

Une solution pour repousser les surfaces limites est le multiplan. Dans le domaine du cerf-volant cela se traduit par «un train».



En revanche, l'aile intégralement souple et maintenue en forme à la fois par suppression interne et par un bridage arborescent très développé, présente la caractéristique très intéressante d'être d'un poids alaire quasi adimensionnel. Indestructible aux crashes? pas vraiment (problème d'explosion interne lors du choc sur le bord d'attaque), la seule aile véritablement indestructible est la mono-peau. Mais il y a une autre voie possible pour une certaine raideur légère, résistante aux chocs et décomplexifiant grandement le bridage, c'est la structure gonflée. Si elle ne permet pas de configuration avec empenngage (pas assez raide), elle apporte toute satisfaction pour des déflecteurs monoplans pilotables à stabilité statique moyenne.

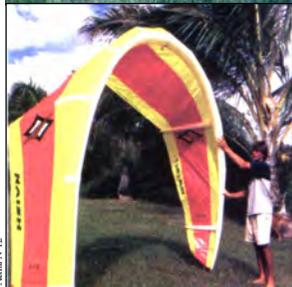
*Les cerfs-volants delta pilotables atteignent leur taille limite avec 6 mètres d'envergure.*

*Train de cerf-volant du type Hargrave pour l'ascension humaine expérimentée par le capitaine Sacconay en 1915 pour l'espionnage des lignes ennemis.*

*Le parapente en 1985.*

*Mise au point de la Nasawing par l'armée américaine. Années 60. Elle fut également en projet pour l'amerrissage de la navette américaine.*

*Don Montague a repris le concept (Wipika) des frères Legaignoux mais avec une meilleure finesse. Ses voiles s'achètent comme des petits pains à Hawaï...*



**Effet d'échelle du passager.** Selon une loi parfois tacite, parfois formelle, le voilier de vitesse est un voilier avec au moins un passager humain adulte. Il n'est même pas question de le remplacer par un jeune enfant et encore moins, par un quelconque animal des frères De Montgolfier. Cette obligation a des répercutions très nettes sur les dimensions minimales de l'aile d'eau, nous pourrions nous en rendre compte dans la partie traitant du problème spécifique de la sustentation de la nacelle. Encore une chance que ce soit l'homme et non pas l'éléphant qui ait eu envie de faire du voilier de vitesse, car alors la seule faisabilité de l'aile d'eau, quelle qu'en soit la taille aurait été sérieusement compromise. De même que marcher sur l'eau, faire de l'aile d'eau ne semble pas donné à toutes les espèces animales!

**Effet d'échelle lié au prix.** Tout l'art de l'expérimentation sur modèles est de trouver la dimension la plus adéquate, trop grand, on dépense trop d'argent pour la construction et pour les dispositifs de mesures ne gagnant de toutes façons pas forcément en précision. A l'inverse, il arrive un point où la miniaturisation devient coûteuse et peu précise.

Pour le domaine de la course, c'est le rapport vitesse-prix qui a le plus d'influence sur les dimensions. En France, par exemple, dans les années 1980, avant l'avènement de technologies de fabrications plus sophistiquées, ce rapport semblait favorable aux grandes tailles de multicoques, c'était alors le règne des monstres entre 85 et 90 pieds. Aujourd'hui le record de traversée de l'atlantique est le règne des très grosses bourses. Le record de traversée en monocoque est aujourd'hui le fait d'un milliardaire américain copieusement entouré par un équipage international sur le plus grand (et bête) géant de carbone désaménagé, Mari-Cha III, en neuf jours.

*Mari-cha III, avec ses 44.7 mètres de coque, est le plus grand voilier tout carbone naviguant actuellement.*

L'aile d'eau joue dans un tout autre registre. D'une part, elle a nécessairement une taille minimale qui la met hors de propos d'un souci de miniaturisation trop coûteuse. D'autres part, L'excès de grandeur est fortement taxé par le prix sans que les performances soit nettement meilleures.



## B- La nacelle

### *Mais où est l'homme?*

Je crois bien que c'est la question qui m'est le plus fréquemment retournée lorsque j'explique l'aile d'eau dans des termes purement théoriques.

Pour ma part, je ne suis absolument pas opposé à l'éventualité d'un engin inhabité. Le voilier le plus beau n'est-il pas celui qui réussit tout seul sa performance au milieu des éléments? La performance est alors le fait d'une certaine harmonie entre le voilier et les éléments. Elle ne peut être acquise de haute lutte avec le milieu extérieur par le fait d'une intelligence rapportée servant une performance.

D'autre part, j'ai l'intime conviction que si les engins inhabités étaient autorisés à concourir pour la vitesse absolue à la voile, non seulement ils seraient les détenteurs du record mais surtout ils encourageraient les avancées techniques par une plus grande mobilisation et implication dans ce sport. En effet, paradoxalement, la présence d'un homme à bord est souvent une contrainte supplémentaire pour des voiliers de vitesse qui se tourne désormais résolument vers l'absence de masses. Sans cette contrainte, il suffirait de vraiment peu de moyens matériels pour réussir quelque chose. Et à terme, ce serait la compétition des moyens immatériels, de la matière grise pure, en dehors de toutes considérations sportives.

C'est la crainte d'un éventuel désintéressement qui a tranché pour une présence obligatoire de l'homme sur le voilier. Force est de constater, aujourd'hui, que la crainte était fondée mais pas le moyen d'y pallier. Si le record de vitesse à la voile sur 500 mètres a connu un fort engouement à ses débuts, ils n'intéressent aujourd'hui qu'un nombre restreint. Les participants des semaines de la vitesse que ce soit à Brest ou à Weymouth ressemblent, sans compter les planchistes, à une poignée d'irréductibles en fin de parcours.

Quoi qu'il en soit, il est inutile de vouloir refaire l'histoire, l'homme (ou la femme) est sur le voilier, et il c'est tant mieux pour lui. Essayons de voir quel type d'homme sera sur l'aile d'eau. On peut déjà dire qu'il sera entre les deux extrêmes: l'homme témoin et l'homme pilote.

**L'homme pilote.** Ce fut véritablement le génie de la planche à voile que de venir rentabiliser la présence obligatoire de l'homme en le faisant participer de tout son corps à l'équilibre. Cependant, sa limite semble avoir été atteinte, à cause notamment de sa faible finesse et de sa stabilité limitée (malgré tous les ingénieux systèmes de délestage automatique de la voilure). L'homme pilote est particulièrement adapté à la performance absolue sur petite distance, tant ses capacités de réaction et d'anticipation instantanée peuvent être considérables sur de petites périodes (avec les vitesses actuelles, le sprint sur 500 mètres ne dure guère plus de 20 secondes!). Mais dès que la distance commence à s'allonger, ces capacités se transforment en redoutables défauts par l'intermédiaire de la fatigue. L'erreur de jugement devient de plus en plus inéluctable et les conséquences sur la vitesse moyenne de plus en plus considérables. Et même dans le cas d'une armada de pilotes se relayant, il reste encore le problème de la prise de sensation malheureusement progressive lors des passations de quarts.

L'homme tire deux avantages à être le pilote. Tout d'abord, dans le cas de sports complets, il reçoit le plaisir intense par mise à contribution maximale des sens et des organes. Ensuite, il reçoit les mérites de la performance. On se souvient de T. Bielak ou de P. Maka mais certainement pas des concepteurs et fabricants des planches et des voiles.



*La nacelle de Yellow Pages, actuel détenteur du record absolue sur 500 mètres. A bord, deux pilotes: pilote de safran et pilote d'écoute.*

**L'homme témoin.** L'archétype de l'homme témoin est pour moi le dix-septième équipier d'un class america, l'invité. Si l'homme témoin est encore sur le voilier, c'est parfois l'ultime et héroïque résistance du riche yachtman propriétaire. Il est là pour le prestige, son rôle est de produire pour les autres un témoignage de la vitesse et des ses sensations. A quoi bon la vitesse si elle n'est pas vécue, s'il n'y a personne pour en témoigner?

Dans la course au large, surtout celle en solitaire, l'homme est la plupart du temps un témoin plutôt qu'un pilote. Ses principales actions sont en fait des décisions sur l'équilibre à mettre en place entre les éléments. Mettre plus de voilure, prendre un nouveau cap,

etc. Une fois à terre, les récits oraux ou écrits assurent l'indispensable témoignage.

Les plaisirs du témoin ne manquent pas. Celui d'être à bord d'un voilier qui marche tout seul (barre amarrée ou sous régulateur d'allure) est pour moi un des plus grands qu'offre la navigation. C'est un privilège assez rare que de pouvoir être le témoin d'une telle confrontation équilibrée d'éléments.

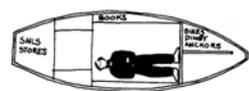
L'homme de l'aile d'eau océanique, comme tout homme océanique, sera principalement un homme témoin. Un homme témoin a davantage d'exigence de confort qu'un homme pilote dont la source de plaisir provient de l'exercice sportif. Pour l'homme témoin, il faut pouvoir passer de longues heures dans la méditation et l'observation.

Rien à voir cependant avec la notion de confort du plaisancier, ici, un certain ascétisme est de rigueur afin de ne pas être en contradiction avec les exigences de vitesse de la machine. Aujourd'hui, on peut sourire de l'analyse de l'Anglais Marchaj, il y a 20 ans: selon lui le premier critère de vitesse d'un voilier, parmi les sept autres qu'il avait relevés, était l'habitabilité, «*parce qu'elle permet à l'équipage un environnement dans lequel ils peuvent se libérer des contraintes mentales et physiques qui pourraient dégrader leur habilité, leur endurance, leur clairvoyance aussi bien que leur bonne humeur, bon humour et calmes confidences*».

Aujourd'hui le trimaran 60' est le voilier océanique dont l'habitat est le plus hostile, ce qui ne l'empêche nullement d'être le plus rapide. L'habitat de l'aile d'eau qui a la possibilité d'être quelque peu insensibilisé aux irrégularités de l'interface, risque fort d'être davantage confortable, même à plus grandes vitesses.

D'autres Anglais moins bons vivants ont développé une tradition d'expérimentation des dimensions minimales pour le confort de l'homme témoin. L'expérience inaugurée par *Jester* lors des premières transats anglaises des années 60, consiste à se lancer dans une traversée atlantique sur voilier stable mais dont la coque est la plus miniaturisée possible.

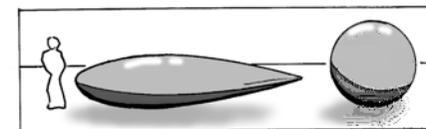
*L'anglais Tom Mc Nally sur un voilier de 1 mètre de coque lors de son départ des Canaries. Il avait déjà réalisé la traversée sur un 1.6 mètres...*



Bris. 4,3m



On peut facilement prédire les dimensions et poids minima de l'habitat de l'homme témoin pour une traversée atlantique (inférieure à six jours pour un voilier rapide). Pour fixer les idées et en étant large, l'habitat minimum pour un homme seul et pour une quinzaine de jours, aura un volume de 4 m<sup>3</sup> et un poids de 250 kg. Soit une sphère de 2 m de diamètre où si on considère une contrainte de traînée minimale dans un fluide homogène, un bulbe de 5.6mètres de long par 1.25m de diamètre.

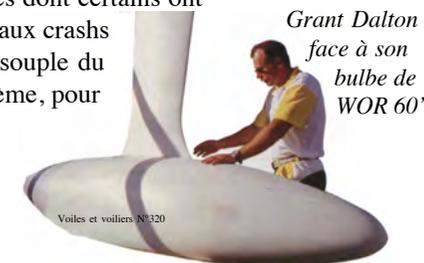


La principale contrainte que pose alors la nacelle à l'aile d'eau est celle de sa sustentation à moindre coût. Quatre différents types de sustentation s'offrent au voilier, sustentation sous-marine, sustentation archimédienne par l'air, sustentation par appui sur l'interface et sustentation dynamique par l'air.

### Sustentation en totale immersion

L'avantage principal de la formule est que le poids peut se laisser aller dans l'abondance puisque les exigences de volume (traduites en poids) sont de toutes façons largement supérieures aux exigences de poids. En contrepartie, Il y a alors deux gros obstacles à une telle option:

- l'obstacle dimensionnel. Le déflecteur se voyant affublé d'une grosse torpille de 5.6m de long, il se doit d'avoir des dimensions relatives imposantes afin que la finesse sous-marine globale ne soit pas trop ridicule. On peut estimer son envergure minimale à 6 m ce qui donne, pour garder des proportions de voiliers rapides, une envergure de voile volante de minimum 135 m !. Une telle dimension de cerf-volant pose une multitude de problèmes pratiques dont certains ont déjà été abordés: problème de dimensionnement aux crashes notamment. En fait seul une aile intégralement souple du type parapente pourrait être praticable. Le problème, pour une telle aile, vient du fait qu'on ne sait pas faire fin et stable (cerf-volant à empennage).



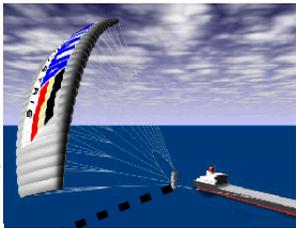
*Grant Dalton face à son bulbe de WOR 60'*

- l'obstacle humain. Quoi qu'on y fasse, l'homme n'est pas fait pour vivre sous l'eau. Et si on peut faire abstraction des phénomènes de stress, les problèmes d'autonomie et de sécurité sont en revanche loin d'être simple. De plus, la complète immersion a le gros désavantage, à mes yeux, d'avoir un arrière goût de Guy Delage et de son expérience en terme de bulbe habité immergé au bout d'un câble!

Quoi qu'il en soit, certain n'hésite pourtant pas à lancer leur imagination dans des sous-marins voiliers transporteurs de marchandises\*... on est alors loin du petit cerf-volant que les U-boat allemands envoyaient pour supporter leur matériel radio mais bel et bien de cerf-volant de plus de 500 mètres d'envergure!

Position de la nacelle: elle ne peut être en intermédiaire sur le fil, car alors, les forces de poids et de flottaison (nécessairement verticales) créent un couple dont l'équilibrage dynamique n'est qu'une inutile perte d'énergie.

Pour ce qui est de cerfs-volants d'envergure supérieure à 100m, je n'ai pour exemple approchant (75m) que le projet approximatif du Kite tugs dont le problème du pilotage est tourné de la façon habituelle et facile: des capteurs, une centrale de calculs très sophistiquée et des moteurs puissants. C'est un projet de l'Américain Dave Culp. Il s'agit d'une sorte de paramoteur géant autonome qui sillonne les océans à la recherche de ces clients: des cargos à qui il propose de louer ses services de propulseur éolien.



www.kiteship.com



### Sustentation archimédienne par l'air

Cette fois si, c'est par son poids que la nacelle impose des grosses dimensions à l'aile d'eau. Un mètre cube d'hélium ou d'hydrogène peut sustenter une masse approximative d'un kilogramme. Pour soulever la nacelle il faut au moins 250 m<sup>3</sup> d'hélium, mais il faut en plus rajouter le poids de l'enveloppe contenant le gaz.

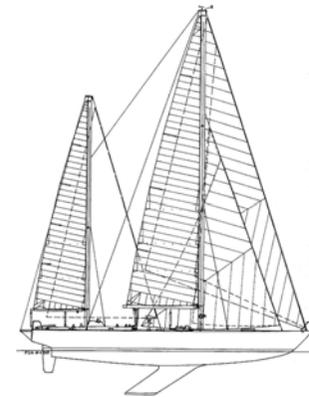
La seule solution pour résoudre les problèmes de gros volume tout en disposant d'une finesse globale aéro convenable est d'utiliser une

aile épaisse et souple dont le volume propre sert à la contenance du gaz. Les dimensions d'aile d'eau correspondante sont alors moins excessives que dans le cas de la nacelle immergée mais restent quand même considérables.



*Cerf-volant à flottabilité positive commercialisé en 1983 par Keith Stewart*

Pour une aile de bonne finesse (allongement 4.5 et épaisseur relative 5.8) et entièrement souple (poids alaire de 3g/dm<sup>2</sup>), la sustentation de la nacelle est acquise pour une voilure de près de 300 m<sup>2</sup> et 35m d'envergure soit des dimensions proches de la voilure de Pen Duick VI ou des 60' open génération 1996.



François Chevaller

*La surface du cerf-volant à volume d'hélium devra dépasser celle de Pen Duick VI pour emporter efficacement 250 kg. (Déplacement de Pen Duick VI: 32 tonnes!)*

Pour apporter de la stabilité passive à un déflecteur fin, on peut envisager un empennage rajouté grâce à une ossature interne à l'aile, mais les crashes sur l'interface devront être interdits sous peine de déchirure du conteneur ou de bris de l'ossature. Enfin, il y a le problème des fuites inévitables et non négligeables du gaz dues aux dimensions minuscules de ses molécules. Des bouteilles doivent être embarquées et un système doit permettre le gonflement en route.

Position de la nacelle. Pour la raison de couples statiques déjà exposés, la nacelle ne peut se situer en position intermédiaire sur le fil, et doit se situer à proximité immédiate voir sur du déflecteur-ballon. On peut également envisager une nacelle pendue sous le ballon.

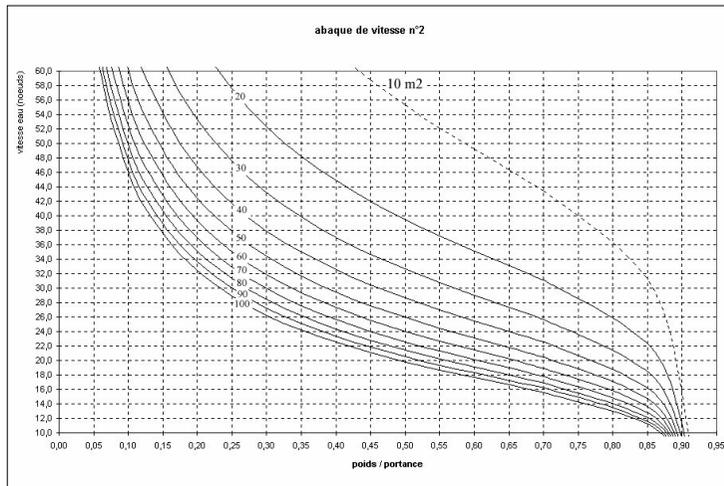
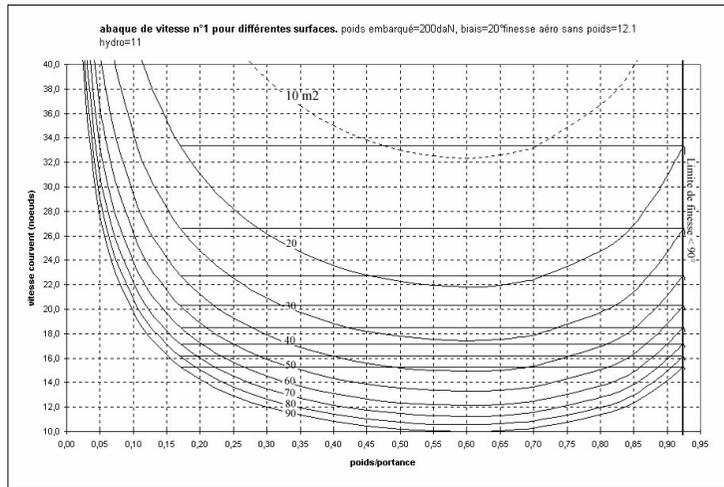
Exemple. Il a déjà été expérimenté une aile d'eau à sustentation archimédienne aérienne. C'est le projet Zeppy II dont il a déjà été question\*. L'ambition de ce projet n'étant pas la vitesse mais une traversée de l'atlantique en dirigeable non motorisé, le problème de la stabilité du déflecteur aérien a pu être réglé par une finesse très faible (L/D supérieur à 1.5). La régulation d'altitude a pu également

\*Chapitre III-A

\*Voir Théo Schmidt dans *Ultimate Sailing III*



**Evaluation des performances.** La détermination de la vitesse maximale atteinte au bout de la spirale de mise en vitesse a nécessité la création d'un programme de calcul dont la constitution est décrite en annexe. A partir de ce programme, j'ai construit un abaque permettant de choisir la surface à donner au déflecteur, chargé d'une nacelle donnée, pour qu'il remplisse des exigences données de vitesse absolue au travers.

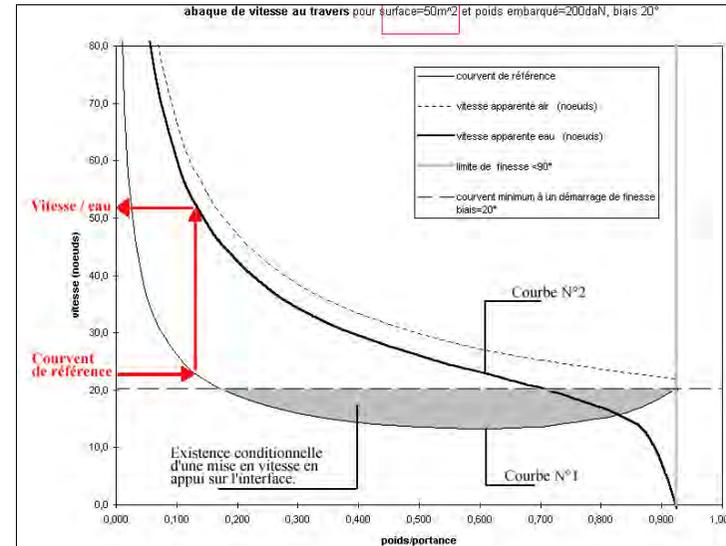


Description de l'abaque:

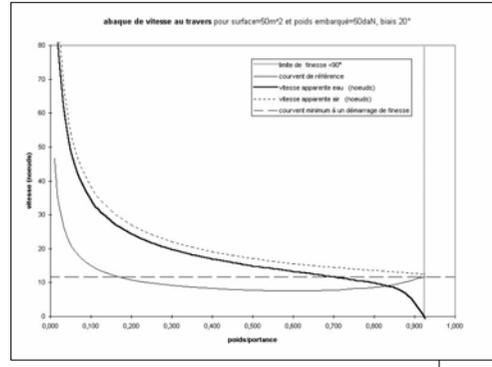
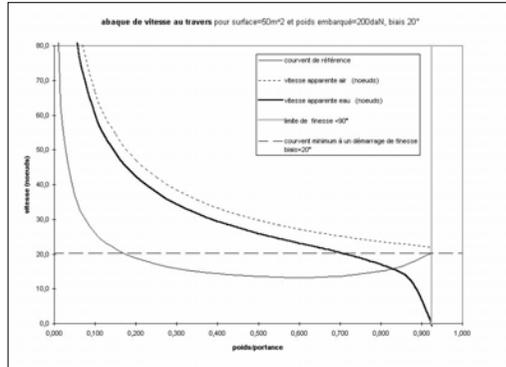
Elle est disposée en deux volets. Le graphique suivant présente la façon dont on s'en sert. Y sont fixées comme constantes les valeurs: finesse propre de chaque déflecteur, biais, poids de la nacelle, surface et poids du déflecteur aérien.

- La courbe du courvent (1) correspond à une ligne particulière du premier volet de l'abaque.
- La courbe de vitesse eau (2) (c'est à dire la vitesse propre) correspond à une ligne particulière du deuxième volet.

La flèche rouge indique le sens de lecture d'un abaque à l'autre pour trouver la valeur de la vitesse au vent de travers à partir de la valeur d'un courvent donné. Le courvent est celui mesuré dans la couche limite théorique à 30.5m d'altitude (100 pieds). Une droite horizontale indique le courvent minimum pour la mise en vitesse. La zone comprise entre cette droite et la courbe (1) ne peut être atteinte qu'avec l'aide d'un « lanceur », c'est à dire d'une sustentation provisoire en appui sur l'interface.



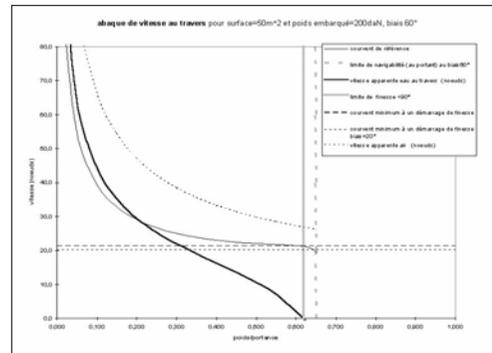
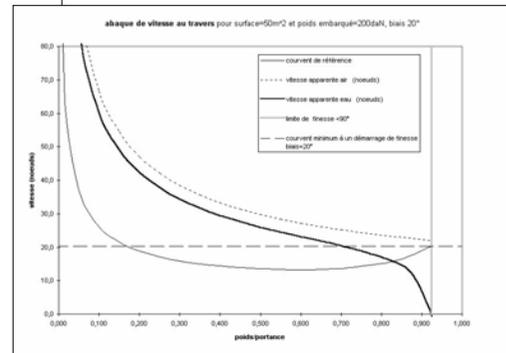
Un fait assez évident se dégage: moins l'aile est chargée, plus la mise en vitesse s'opère tôt et moins la nécessité d'un départ lancé se fait sentir et, une fois au-dessus du courvent minimum, les vitesses grimpent très vite.



poids = 50 daN

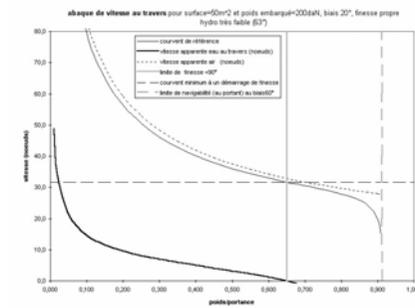
Aile d'eau témoin:  
surface = 50m<sup>2</sup>  
poids = 200 daN  
biais = 20°  
finesse propre totale = 30°

Plus le biais est important, plus la mise en vitesse est progressive. Un contrôle du biais peut donc permettre non seulement d'agir sur la vitesse maximale, mais aussi de rendre plus douce la mise en vitesse. De plus, plus la finesse des déflecteurs est faible moins la nécessité d'un lanceur est importante.



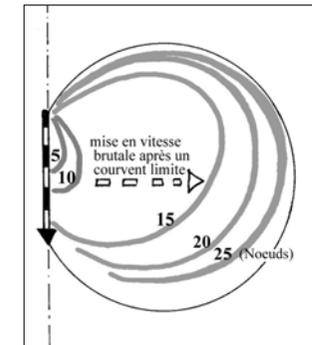
biais = 60°

Le graphique ci-contre montre comment la présence d'un parachute sous-marin provisoire permet d'empêcher tout départ en vitesse involontaire afin de pouvoir opérer un «décollage» en toute tranquillité.



finesse propre hydro. = 63°  
finesse propre totale = 78°

La polaire d'une aile d'eau avec nacelle aérosustentée est dépendante de l'intensité du courvent. Elle se présente donc sous la forme d'un faisceau de courbes, de la même manière que pour un voilier à déplacement. Particularité: à partir d'un certain courvent, les performances relatives de l'aile d'eau chargée se rapprochent brutalement de celles de la même aile d'eau théorique sans masse.



Polaire absolue typique d'une aile d'eau en aérosustentation.

En conclusion: L'aérosustentation n'est vraiment intéressante qu'à partir d'une certaine vitesse du courvent et cela même si cette valeur peut être diminuée de presque 10 nœuds par un «lancement» en sustentation provisoirement par appui sur l'interface. L'aérosustentation est le seul moyen de sustenter la nacelle sans appui sur l'interface et sans nécessiter des dimensions colossales. Pour une nacelle de 200 kg par exemple, il faut une surface de déflecteur aérien gonflé à l'hélium de près de 270 m<sup>2</sup> alors qu'avec 45 m<sup>2</sup> (soit l'équivalent d'un parapente biplace), une aile d'eau peut fonctionner quasiment aussi vite à partir de 22 nœuds de courvent à 30m de haut, soit seulement 17nœuds à 10m....

**Problématique de la compacité.** L'aérosustentation présente le désavantage de la faible compacité par rapport à l'hydrosustentation. Pour soulever la même nacelle, l'aérosustentation a besoin d'un organe plus grand, plus encombrant, plus fragile et surtout plus lourd. Les recherches dans le domaine de la propulsion et sustentation par énergie musculaire humaine rendent bien compte de ce problème. Les engins en sustentation hydrodynamique sur foil propulsé par pédalage humain sont plus compacts donc moins lourds que leurs homologues aériens. Pour une finesse donnée, le poids total est proportionné à la dépense énergétique (car directement lié à la traînée hydro ou aérodynamique). Les pédalos sur foils permettent donc une moindre fatigue du pédaleur dans le maintien de la sustentation. De leur côté, les engins aériens n'arrivent à faire des vols relativement longs (maximum de 10 km) qu'au prix d'un échantillonnage très limité et d'un épuisement total du pédaleur. Pour rendre pleinement réalisable un avion à pédales, il faudrait inventer soit un matériau plus léger, soit un homme moins lourd (mais tout aussi costaud), soit un sustentateur plus compact (on peut d'ailleurs penser à des sustentateurs rotatifs tels que le *Thom rotor*, à hauts coefficients ( $Cl=18!$ ), à hauts rendements ( $L/D=35$ ) et ne nécessitant pas d'empennage d'incidence).

Mowe XV: le meilleur planeur à pédale japonais. Poids = 32 kg.

Décavittator: le meilleur pédalo. Poids = 22 kg (mais il est beaucoup plus costaud).



**Position de la nacelle.** L'aérosustentation présente l'avantage d'une grande liberté dans les positionnements possibles de la nacelle. Elle peut se trouver n'importe où sur le fil entre l'interface et le point de bridage du roulis. On peut alors envisager des systèmes de nacelle

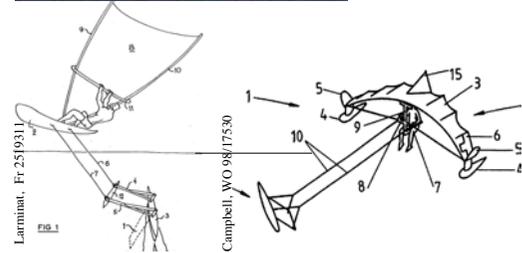
«téléphérique» utile par exemple pour régler l'altitude de l'aile. De façon générale, l'aérosustentation permet de disposer le sustentateur au-dessus de l'objet sustenté de sorte qu'on acquiert une simple et efficace stabilité.

**Exemples.**

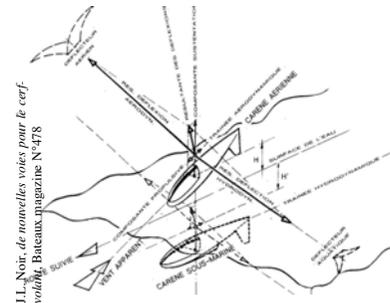
Le kitesurfeur, de façon très momentanée à cause du décollage du déflecteur sous-marin avec la nacelle.



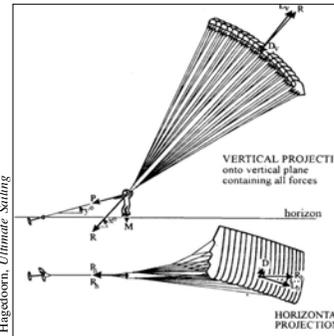
Deux ailes d'eau que j'ai déjà abordées pour signaler leur déflecteur dans le chapitre III.



Deux autres ailes d'eau.



J.L. Noir, croquis pour un article dans bateau magazine en 1998. La forme des déflecteurs n'est pas dévoilée mais l'auteur prétend avoir conçu une aile souple à grand roulis auto-régulé, à suivre...



J.G.. Hagedoorn en 1971, le début du parafoil fait rêver plus d'un... Ici le rêve s'accompagne de considérations militaires; les parachutistes largués au dessus d'une mer envoient un déflecteur sous marin dans l'eau avant d'amerrir et se mettent en navigation à la recherche d'ennemis!

### Sustentation par appui sur l'interface

Elle peut être du type coque fine, coque planante ou coque sur hydrofoils (perceurs ou non), les problèmes d'instabilité et de susceptibilité de l'interface sont toujours là. Mais selon les cas, les intérêts ne manquent pas.

Tout dépend de la position de l'appui parmi les quatre envisageables:  
- **appui directement relié au déflecteur aérien** entre l'axe de bridage de l'incidence et l'axe de bridage du roulis.

Dans ce cas, presque tous les problèmes du voilier pesant s'enchaînent à nouveau, à savoir: courvent de faible altitude (tênu et turbulent) limite de stabilité longitudinale (voir *cerf-volant en appui sur l'interface* dans le chapitre III) donc limite dans l'allongement de la voilure. Mise en mouvement de la voilure...

Pour les vitesses élevées, l'appui relié à la voilure devient alors très problématique. Il peut cependant être utile pour diverses occasions.

- Lorsque le vent est trop faible pour l'aérosustentation et l'aérostabilisation de la voilure.
- En sustentation provisoire avant l'envol de la voilure.

La mise en pratique est assez aisée, et les exemples de réalisations ont déjà été présentés à travers les exemples de déflecteurs suspendus.

- **Appui directement relié au déflecteur sous-marin** entre axe d'incidence et de roulis. On tire de cette position l'avantage de la simplicité de stabilisation du déflecteur.

La différence essentielle avec le cas aérien vient du fait que la limite de stabilité longitudinale se fait beaucoup moins sentir.

Les réalisations d'ailes d'eau sur ce principe sont les plus répandues car les plus aisées: la stabilisation du déflecteur d'eau est réglée par l'organe d'appui qui va loger dans le même temps un pilotage humain du cerf-volant (voir les exemples dans *cerf-plongeant en appuis sur l'interface* dans le chapitre III).

- **Appui en remorque relié au déflecteur sous-marin.** Il présente l'inconvénient majeur d'une inévitable composante dynamique d'écrasement de l'appui et d'une traînée considérable par le fil de remorquage.

- **Appui en remorque relié au déflecteur aérien.** Il dispose de beaucoup plus d'atouts que son cousin du sous-marin.

Il peut assurer la stabilisation directe ou démultipliée du grand roulis (voir *cerf-volant à traînard* dans chapitre III).

Une position intermédiaire sur le fil est difficile à envisager à cause des énormes contraintes qu'elle subirait à la fois en soulèvement et en immersion. En effet, la tension interne est nécessairement très forte relativement aux capacités de flottaison de la nacelle.

Si la nacelle peut résister à un tel traitement, l'équilibre d'incidence des déflecteurs suspendus risque par contre d'être très compromis (passage au-delà du bord de la fenêtre lors d'une forte décélération).

## C- Changement d'amure

C'est une manœuvre très contraignante formellement car elle implique l'existence d'au moins un degré de symétrie. Elle est cependant indispensable à l'autonomie du voilier pour des raisons d'évolutivité. A ce propos, il faut souligner le fait qu'on peut très bien traverser l'atlantique sur un engin monodromique mais les probabilités de ne rencontrer que des courvents favorables à l'amure choisie sont quasiment nulles si bien que le temps de traversée risque d'être sérieusement allongé. De ce point de vue, un engin monodromique ressemble aux premiers vaisseaux des conquistadores dont l'autonomie se résumait à un choix de la latitude de départ.

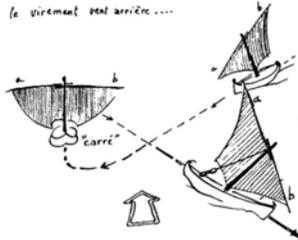
Pour un déflecteur suspendu, il y a trois types de changement d'amures car trois types de symétrie. Pour une aile d'eau, il existe donc neuf types de changement d'amure. Tous cependant ont une trajectoire peu rentable en gain au vent, faute de masse pour permettre une réserve d'énergie cinétique nécessaire à une avancée temporaire face au vent. Ceci n'est réellement un inconvénient que pour des parcours très restreints.

Je laisse au lecteur le loisir de tricoter les possibles à partir des exemples de manœuvres des seuls déflecteurs suspendus.

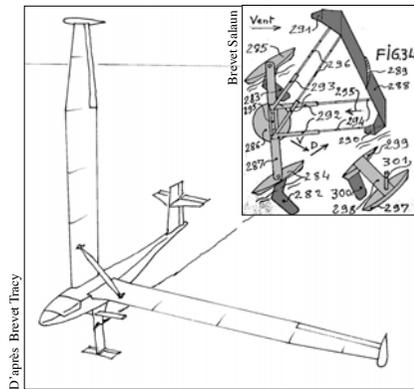
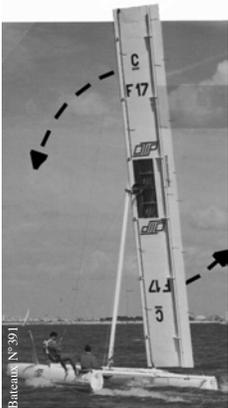
- **changement d'amure par symétrie bilatérale.** Cette manœuvre à l'avantage de pouvoir être réalisée sans appui temporaire sur l'interface, grâce à un parcours du cerf-volant le long du bord de la fenêtre en traversant la ligne centrale.

Une telle manœuvre en appui sur l'interface est possible mais assez contraignante puisqu'il faut véritablement retourner la voilure. Elle se limite alors à des tailles relativement petites. C'est la meilleure symétrie pour les considérations de finesse: le profil peut être rigide et complètement dissymétrique (avant-arrière et intra-extrados). C'est la seule symétrie permettant d'envisager des profils à supercavitation stable.

Vrac d'exemples aériens: (dans l'ordre) L'ancien gréement latin, Otip (classe C français), le cerf-volant, le navion à voile de R. Tracy et le projet (ressemblant à objectif 100) de Salaun.

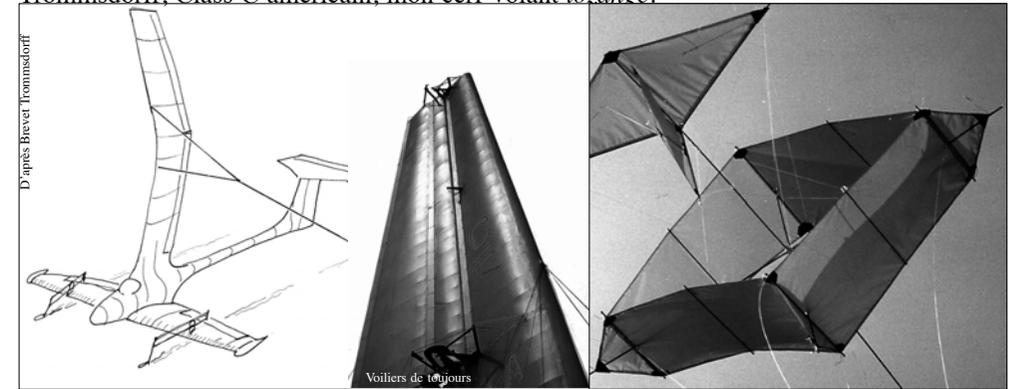


Beaudoin, bateaux des côtes de France

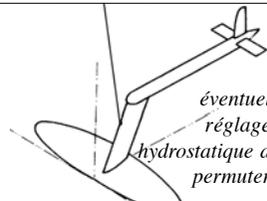


**- changement d'amure par symétrie bifaciale** (dite aussi manœuvre longitudinale). C'est le mode courant des voiliers que ce soit pour la dérive ou la voilure. Pour un déflecteur suspendu, une telle manœuvre est très difficile (mais théoriquement possible) sans appui transitoire sur l'interface. Cette manœuvre permet avantageusement une position intermédiaire neutralisée du plan déviateur. C'est la manœuvre privilégiée des déflecteurs suspendus dotés d'appui permanent sur l'interface, et particulièrement des monopeaux qui peuvent se permettre des profils cambrés mais «retournables». La perte de finesse par obligation de symétrie d'un profil épais n'est pas négligeable car elle interdit toute cambrure (à moins de systèmes articulés complexes).

Vrac d'exemples aériens: (dans l'ordre) Pratiquement toute l'histoire des voiles, déflecteur aérien de l'aile d'eau à effet de sol de Trommsdorff, Class C américain, mon cerf-volant *lozange*.

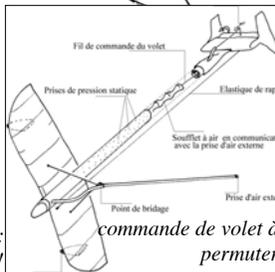
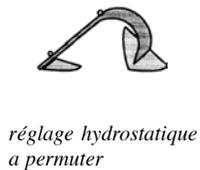
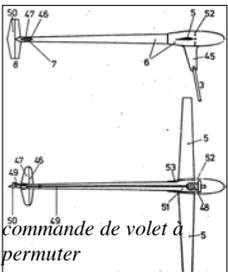


Vrac d'exemples sous marins: (dans l'ordre) Hersko-thômé (angle), Trommsdorff (profondeur), Ashford (angle), Hagedoorn-circulaire (profondeur), Armant (profondeur).



exemples sous-marins: inutiles, il suffit de regarder un port à échouage.

**changement d'amure par symétrie avant-arrière ou amphidromique** (dite manœuvre transversale). Cette manœuvre se démarque des deux autres à plus d'un titre. Sa particularité vient du fait que le plan de symétrie est perpendiculaire à l'écoulement. Sa qualité principale, lorsqu'elle est appliquée au déflecteur sous-marin, est de pouvoir opérer des manœuvres de changement d'amure avec relativement peu de perte de gain au vent. Les manœuvres en appui

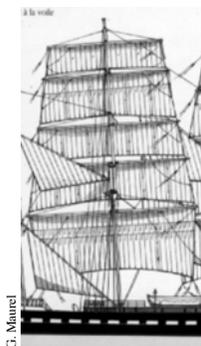


sur l'interface sont relativement aisées mais quasiment impossibles en vol.

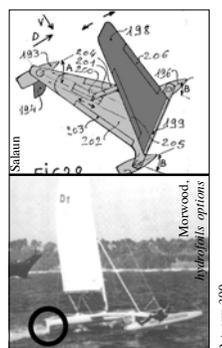
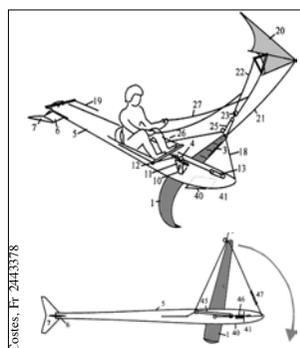
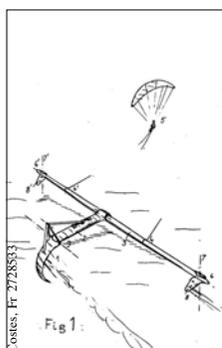
Les défauts d'une telle manœuvre ne manquent pas. Tout d'abord, elle oblige un passage transitoire en incidence maximale instable. De plus elle ne permet que difficilement les appendices stabilisateurs (empennage ou canard). Enfin, le profil en symétrie avant-arrière conduit à un bord d'attaque très fin qui n'est pas inintéressant aux fortes vitesses subcavitantes mais qui manque de tolérance en écoulement turbulent.

Cette symétrie fait souvent figure de vilain canard tant les tentatives pesantes océaniques de mise en pratique se sont souvent soldées par des échecs.

Vrac d'exemples: (dans l'ordre) voiles carrées, *chien de mer* de D. Costes, voile du prao de J.Y. Salaun, foils de l'hydroptère amphidromique de J. Morwood, dérive du prao *Rosière*.



G. Maurel



**Changement d'amure par changement de déflecteur!** Cette solution qui suppose de disposer d'un déflecteur en réserve ne peut vraiment s'appliquer qu'au déflecteur sous-marin car il est relativement peu encombrant. Dans le cas d'une aile d'eau il doit s'accompagner d'un fil de réserve; le changement d'amure s'opérant alors par l'envoi du nouveau déflecteur et la neutralisation du premier.

Cette voie permet des profils vraiment optimisés sans pratiquement aucune contrainte formelle. Cependant, elle a je ne sais quoi d'insatisfaisant pour l'esprit (peut-être: élément inutile à sustenter, dépense inutile ou atteinte au minimalisme élémentaire) .

## D- Décollage, démarrage

La mise en vitesse d'un voilier autonome commence nécessairement à partir d'une position de repos relatif par rapport au courvent. Contrairement à un voilier pesant, tout voilier sans masse, l'aile d'eau d'autant plus, est obligé de passer d'un état de flottaison passif au repos (sustentation archimédienne par air ou par eau) à un état d'équilibre actif basé sur la vitesse. Pour que la transition se déroule correctement, il faut qu'aux vitesses transitoires, la régulation hydrostatique dise à peu près la même chose que la future régulation hydro ou aérodynamique, ce qui n'est pas toujours facile lorsque l'hydrostatique opère dans une interface agitée.

Le problème du démarrage affecte surtout le déflecteur aérien, l'eau étant une matière plutôt plus «poisseuse» que l'air. Sans compter qu'on peut facilement envisager un cerf-plongeant profondément immergé en position de repos alors que l'équivalent symétrique est plus difficile!

Les solutions ne manquent cependant pas. J'en compte quatre types:

- Décollage vertical face au vent.
- Décollage lancé en appui intermédiaire sur l'interface.
- Pas de décollage! (appui définitif sur l'interface).
- Pas d'atterrissage!

**Décollage vertical face au vent.** L'axe du vent est la position naturelle de l'aile d'eau à l'arrêt, cerf-volant sous le vent du cerf-plongeant. A cause des propriétés «poisseuses» de l'eau, il faut un vent apparent de décollage sur l'eau supérieur à celui qu'il faudrait pour décoller le même cerf-volant sur terre. Il faut avoir recours au maximum d'artifices empêchant la prise de l'eau sur le cerf-volant:

- Eviter toutes cavités. Pour cela, les cerfs-volants du type souples en surpression interne posent un sérieux problème d'entrée d'air qui ne doit pas se transformer en entrée d'eau.
- Faire en sorte que le cerf-volant flotte le plus haut possible sur l'eau. Des organes de flottaison sont alors indispensables. Ils peuvent être compris dans la géométrie de l'aile ou rajoutés, l'organe le plus pratique pour sa légèreté étant la membrane souple gonflée.

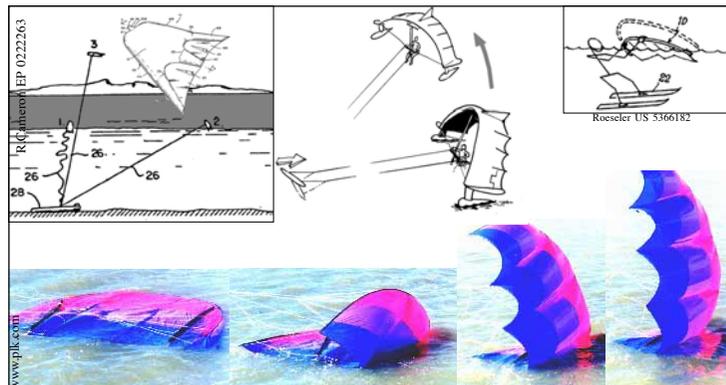
Le vent apparent disponible sur une aile d'eau au repos est généralement assez faible de fait de sa dérive. Pour l'augmenter on peut avoir recours à divers artifices:

- s'équiper d'un parachute sous-marin provisoire. Le mieux qu'on puisse obtenir est alors un vent apparent égal au vent réel.
- S'équiper d'un moyen de réduction brutale de la longueur du fil de liaison. Cela permet de créer provisoirement un vent apparent supérieur au vent réel.
- S'équiper d'un propulseur auxiliaire provisoire. Dans ce cas, on peut espérer obtenir de façon plus durable un vent apparent supérieur au vent réel.
- Envoyer un petit cerf-volant auxiliaire qui va capter le fort courvent d'altitude nécessaire pour aider le décollage de son grand frère.
- Envoyer directement le cerf-volant dans les gros courvent d'altitude à l'aide d'une fusée! Le cerf volant doit alors obligatoirement être d'un type le plus souple possible afin de permettre son rangement dans un compartiment de la fusée.
- Disposer d'organe(s) de flottaison aérien à gaz légers.

Un décollage face au vent se marie particulièrement bien à une symétrie bilatérale. Le changement d'amure a la possibilité de s'effectuer par une position transitoire de repos dans l'axe du vent (on a de plus tout le temps de permuter les éventuels réglages dissymétriques).

Son principal défaut vient de la considérable augmentation de traction lors de la rapide montée de fenêtre. Cette dernière peut cependant être rendue plus progressive par une augmentation continue de la longueur du fil.

*Exemples de décollage en position initiale arrêtée: (dans l'ordre) un cerf-volant gonflable et auto-largable pour le repérage de plongeurs ou d'objets sous-marins, l'aile d'eau des australiens Cambell, le Kiteski de l'américain Roeseler et le décollage très particulier du C-squad de Peter Lynn (statique, en bord de fenêtre).*



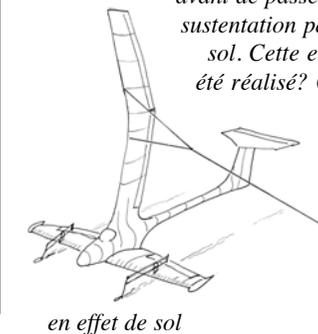
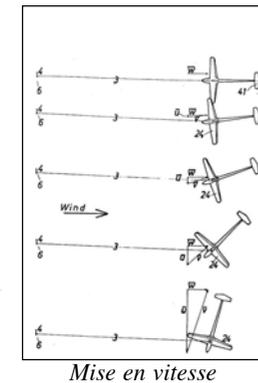
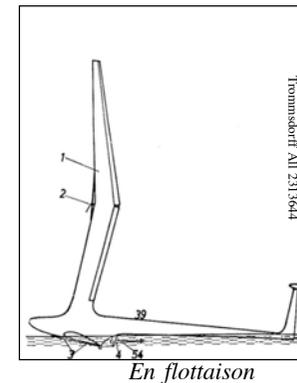
Pour le décollage, la structure entièrement souple, bien que permettant une extrême légèreté, n'est pas la plus maniable, notamment à cause du bridage complexe qui ne demande qu'à s'emmêler.

**Décollage transversal lancé.** Ce décollage peut être utilisé préférentiellement à l'autre pour deux raisons essentielles:

- Il permet un décollage pour des courvents plus faibles par une mise en vitesse préalable en position de voilier en appui sur l'interface. J'ai montré à propos de l'aérosustentation que le gain en courvent minimum pouvait approcher 10 nœuds.
- Il permet un décollage moins brutal et une passation beaucoup plus douce d'un mode régulation hydrostatique à un mode de régulation aérodynamique. La mise en route du déflecteur d'eau (en immersion totale ou en appui sur l'interface) sera également facilitée.

En revanche, il n'est pas dépourvu de défauts:

- Le fonctionnement en appui sur l'interface rend difficile un mode de changement d'amure par symétrie bilatérale.
- Les dispositifs d'appui stable sur l'interface nécessitent un poids considérable inutile une fois en vol.



**Pas de décollage!**

C'est en apparence la solution de facilité pour une aile d'eau. En apparence seulement. Car se pose alors le problème inévitable de la stabilité à l'enfournement de l'appui sur l'eau à haute vitesse. Etant

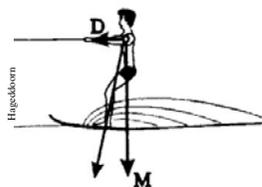


*Nicole Van de Kerchove a traversé l'Atlantique en 1995 par les alizés en n'utilisant que des cerfs-volants statiques souples. Ces principaux problèmes étaient: faible stabilité d'incidence des cerfs-volants (conçus par S. Berthomé) et difficile manoeuvre de récupération et lancement.*

*Le déflecteur de l'aile d'eau de l'Allemand Trommsdorff commence sa mise en vitesse en appui sur l'interface avant de passer en aérosustentation par effet de sol. Cette engin a-t-il été réalisé? C'est bien possible!*

donné la présence d'une telle limite, une aile d'eau sans décollage du déflecteur aérien n'a pas beaucoup de raisons d'aller plus vite qu'un grand multicoque océanique (confronté à la même limite). Si la coque se permet d'être plus légère que celle du multicoque, la traînée sera moins grande mais la baisse de moment inclinant suit la baisse du moment redressant.

Hagedoorn, en 1971, croit avoir trouvé la solution par la mise en place d'une composante d'écrasement de la voilure sur le flotteur. Il oublie le caractère instable d'une telle configuration en compression qu'il compare à un skieur nautique.



La configuration inverse (voilure à composante de sustentation) avec la nacelle remorquée par une structure souple en tension permet par contre une excellente stabilité (voir chapitre III, *cerf-volant à traînard*) mais, il ne s'agit pas d'un véritable appui puisque la voilure est complètement décollée et autosustentée.

Il y a deux façons d'aborder l'appui sur l'interface:



- Appui avec indépendance de rotation de la voilure par rapport à l'organe d'appui. Ce mode permet d'éviter quelque peu la mise en oscillation du plan déviateur. De plus il autorise une symétrie bilatérale. Par contre, l'organe d'appui doit être pourvu d'une stabilité propre en roulis.



- Appui avec encastrement du déflecteur (à l'extérieur de l'axe d'incidence). Ce mode permet un flotteur minimal sans stabilité de roulis. Il permet également d'envisager assez facilement une régulation de l'incidence de la voilure via un empennage sous-marin peu encombrant (le safran). Par contre, il a le désavantage d'entraîner le plan déviateur dans ses oscillations de tangage.

**Pas d'atterrissage!** Etant donné le caractère grandement aléatoire des éléments air et eau autour de l'interface, il faut une stabilité (passive ou active) vraiment surdimensionnée pour espérer l'exploiter de ne jamais atterrir, ne serait-ce que pendant une journée. Le déflecteur sans atterrissage est obligatoirement du type à flottaison archimédienne aérienne (gaz léger) afin de pouvoir voler ne serait-ce que pendant une minute d'accalmie.

## E- Atterrissage

Il peut être utile de pouvoir décider à tout moment d'arrêter la course de l'aile d'eau et de la poser sans dommages. Pour cela, la démarche à suivre est strictement inverse du démarrage et il y a autant de type d'atterrissage que de démarrage.

## F- Crash sur l'interface

Il affecte principalement le déflecteur aérien (grand et léger par nécessité) et l'équipage (fragile par constitution).

Le crash sur l'interface peut avoir deux origines distinctes.

- Il peut d'une part provenir d'un défaut de trajectoire du cerf-volant. Dans ce cas, plus la longueur du fil est importante, plus les vitesses de percussion peuvent être importantes. Le cas le plus grave étant la trajectoire descendante en position centrale de fenêtre. Avec un fil suffisamment long, les vitesses atteintes sur une telle trajectoire peuvent facilement dépasser les 150 km/h. A de telles vitesses, un seul type de grand cerf-volant peut résister: le monopeau. Le cerf-volant du type gonflable risque très fort d'éclater, d'autant plus qu'en descente centrale de fenêtre, les entrées d'air sont les premières à toucher l'eau. La résistance à de tels crashes est la contrainte la plus dimensionnante.

Quelle que soit la nacelle, une percussion de l'interface à 100 km/h a de grande chance d'être fatale à l'équipage. Pour diminuer les vitesses d'impact, il faut rapprocher au maximum la nacelle du déflecteur sous-marin. On peut aussi envisager des dispositifs de parachute de secours, encore faut-il être sûr de son déclenchement au moment approprié. Une autre solution pour éviter ce genre d'impact est de limiter le vol du cerf-volant aux zones basses du bord de la fenêtre et de n'opérer les manœuvres de changements d'amure qu'en appui transitoire sur l'interface.

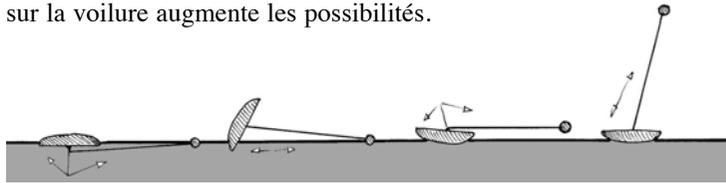
- Le crash peut également provenir d'un défaut dans la trajectoire du déflecteur sous-marin. Si le cerf-plongeant se met dans un vol vers

les profondeurs, il ne se passe rien de grave. Le courvent capté diminuant progressivement, le cerf-volant se pose en douceur sur l'eau. Reste que les différents dispositifs du déflecteur sous-marins et de la nacelle peuvent être endommagés par la forte pression statique régnant dans les profondeurs atteintes. Si la nacelle est placée sur le déflecteur sous-marin ou sur le fil à proximité, elle doit être dimensionnée pour résister aux profondeurs potentiellement atteintes par un défaut de la trajectoire du déflecteur sous-marin.

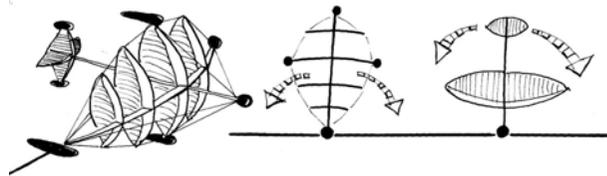
Si le cerf-plongeant connaît un défaut de trajectoire amenant une sortie de l'eau, la chute qui en découle ne présente pas plus de danger qu'une chute libre équivalente.

Après un crash, les deux déflecteurs doivent être capables de retrouver des positions propres à permettre le redécollage. Deux familles de réponses possibles:

- retournement par coque autoredressante. Un organe de flottaison sur la voilure augmente les possibilités.



- pas de retournements, mais plusieurs faces navigables.



*déflecteur à symétrie bilatérale pour une mise en vitesse en appui direct mais provisoire sur l'interface.*

## G- Temps extrêmes

L'autonomie d'un voilier s'arrête aux temps extrêmes. Tout voilier est fait pour naviguer dans des fourchettes de courvent et d'état de la mer données. Lorsqu'on sort de la limite, le voilier n'est plus en stricte autonomie et n'a plus qu'à espérer une faible durée de cette période.

**Le calme.** La capacité à franchir les zones de calme est souvent déterminante dans les trajets océaniques, et tout spécialement pour des tours du monde.

Pour continuer à fonctionner correctement dans le calme, l'aile d'eau n'a qu'une issue, c'est Archimède (dans l'air ou dans l'eau). La coque est la meilleure chose qu'on n'ait jamais inventée pour les faibles vitesses.

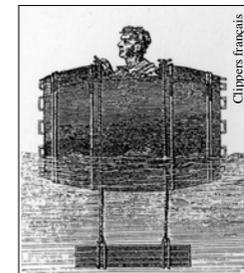
**Le gros vent.** Théoriquement la limite du navigable est directement dépendante de la résistance en traction du fil de liaison, de la résistance de poutre des déflecteurs au moins partiellement rigides ou de la cavitation. Cependant, tous ces paramètres peuvent être largement repoussés par une baisse de la vitesse de l'aile d'eau (par exemple en augmentant le biais ou en rajoutant des organes de traînée).

L'intensité du courvent et les conditions de mer et de turbulence des écoulements sont par contre des paramètres intraitables.

Si on envisage la possibilité de fréquentation de telles mers:

- Pour la préservation du déflecteur aérien, la totale immersion (au-dessous des déferlements) peut être une solution. Une autre solution peut-être le pliage pur et simple (facile pour le déflecteur souple).

- Pour la préservation de l'équipage, il suffit de disposer d'une nacelle bien étanche, solide, pourvue de qualités autoredressantes et éloignée des déflecteurs pouvant l'éventrer. La nacelle en bulbe de traînée minimale, même inférieure à 6 mètres est particulièrement adaptée, à la manière des embarcations rigides de survie.



*Tonneau de survie mis au point par le capitaine Pignon-Blanc avec lequel il s'exposa lui-même et avec succès aux brisants de la plage.*

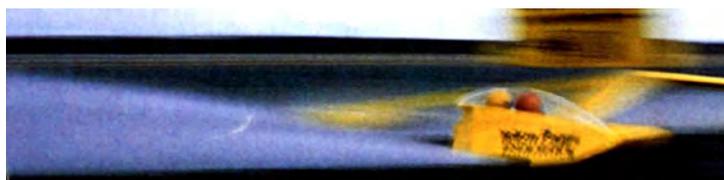
## VI- Quel choix pour quel programme?

J'ai recensé lors du premier chapitre, quatre types de programme pour le voilier de vitesse (Le sprint, L'affrontement, La glisse, L'endurance). Chacun représente un dosage spécifique de chacune des contraintes pratiques décrites au chapitre précédent et favorise donc le développement d'un type particulier d'aile d'eau. Il ne s'agit nullement de privilégier une forme particulière mais plutôt de préciser les options qui semblent les plus judicieuses.

J'épargne le lecteur de ma poubelle bien remplie de combinaisons de formes mais je l'invite à essayer par lui-même le complexe et passionnant tricotage des possibles.

### A- Le sprint ou «run»

L'engin à battre:  
Yellow Pages avec 47  
noeuds de moyenne sur  
500 mètres

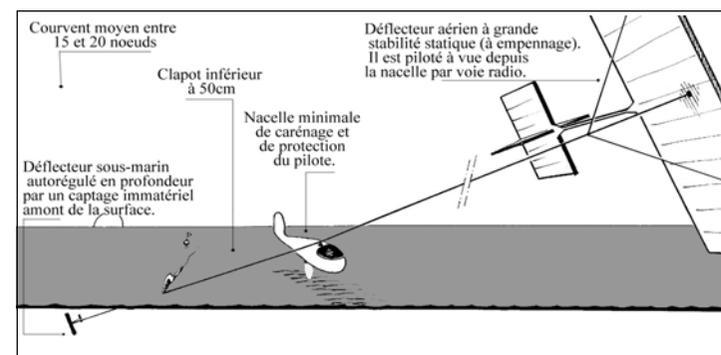


L'officialisation a eu lieu durant la première semaine d'octobre 1972 sous l'impulsion anglaise de la Royal Yachting Association et du fabricant de cigarette John Player. Ce fut l'inauguration d'un type de compétition assez nouveau car étendu au monde entier. A l'image des enregistrements de records mondiaux dans le domaine de l'athlétisme, tout prétendant peut concourir où bon lui semble, quand il veut et avec n'importe quel voilier. Cette discipline s'appelle maintenant officiellement Word Sailing Speed Record. Le parcours pour le calcul de la vitesse moyenne, initialement 500 mètres, s'inscrit aujourd'hui dans une palette variée de possibles. Le plus long mais aussi le plus ancien des records arbitraires est la distance parcourue pendant 24 heures; il marque le passage du sprint à l'endurance.

Par extension, le Word Sailing Speed Record chapotte également le domaine de l'**endurance** à travers l'enregistrement du temps de parcours géographiques océaniques préétablis tels que les très anciens *Atlantique Nord* ou *New York - San Francisco*.

En comptant le fait que différentes classes sont référencées (différenciées par la surface de voile et même récemment par le sexe du pilote), on arrive à un dénombrement de records possibles presque aussi important que celui du *Guinness Book*. Il existe un Word Sailing Speed Record pour chacun d'entre nous!

La spécificité de ce programme étant l'absence de programme (si ce n'est l'obligation de transporter un homme entre les deux marques du run), j'ai déjà pu définir, deux chapitres auparavant, un type d'aile d'eau particulièrement adapté et propre à battre le record en catégorie D (surfaces supérieures à 27.88 m<sup>2</sup>).

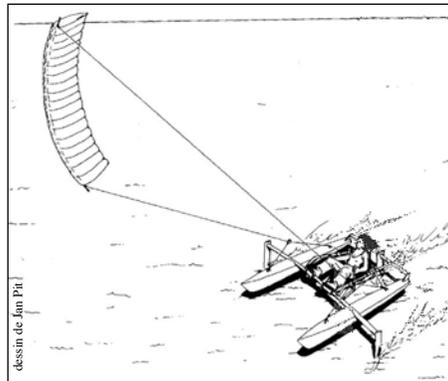


*Les exigences de finesses n'étant pas énormes et à moins que la mise en vitesse ne soit complètement prise en charge par un lanceur externe, le déflecteur ne gagne pas à être intégralement rigide (donc lourd). Un déflecteur semi-rigide, à forte stabilité d'incidence, sera particulièrement bien adapté pour éviter l'oscillation de lacet de l'ensemble. Tout repose en fait sur le déflecteur sous-marin travaillant aux vitesses cavitantes ou presque.*

Notez par ailleurs que l'aile d'eau n'est pas une inconnue dans le domaine du record de vitesse à la voile:

1989, en classe C, 28 nœuds pour un engin français des frères Durand. Il s'agissait d'une plate forme *sans masse*, trois points, avec foils en T à palpeur direct amont, à la manière de Long Shot. Le pilote a les pieds occupés à l'incidence hydro et les mains aux grands roulis d'un cerf-volant souple de grande dimensions.

Auparavant, le même record avait été détenu pendant six ans par l'Anglais Ian Day sur une aile d'eau de principe similaire.



## B- La glisse ou le plaisir égoïste

C'est un programme que nous devons à la fin du XX siècle. Il s'agit d'une activité principalement destinée au simple plaisir d'une individualité. On recherche l'accès à un état d'éveil

intense, de satisfaction absolue, par la mise à contributions des divers sens dans le maintien d'un équilibre plus ou moins instable, propre à une forte vitesse de déplacement dans un milieu aussi fluide que possible.

Appliquée à la problématique du voilier, la glisse s'est développée dans deux directions: instabilité de la coque (le dériveur) et plus récemment instabilité du corps (la planche à voile). L'aile d'eau à certainement son mot à dire notamment par le fait qu'elle présente un nouveau type d'instabilité, donc de pilotage, liée au déflecteur suspendu. En cela elle peut se rapprocher des sensations du vol libre.

Deux orientations sont possibles:

- **développement de sensations par des trajectoires complexes** comprenant notamment l'élévation en altitude du corps. Dans ce domaine, une aile d'eau nommée kitesurf a commencé son développement ces dernières années. Le kitesurf, victorieux du kiteski est à mon avis la meilleure configuration possible.

Configuration: déflecteur sous-marin stabilisé en grand roulis par un appui sur l'interface qui sustente partiellement le glisseur pilotant le déflecteur aérien. Cette aile d'eau présente le mérite de se constituer entièrement par emprunt à des éléments préexistants sous d'autres formes de glisse: le déflecteur sous-marin est emprunté au surf, au windsurf ou au ski nautique, le déflecteur aérien est emprunté au cerf-volant de traction autrement appelé aile (provient du parapente) ou Kite.

Le but n'est pas tant la vitesse, limitée très tôt par le passage de la tension interne à travers le corps humain, mais plutôt le dépassement même de cette limite conduisant à la vaine mais jouissive éjection en altitude et à la brève chute qui s'en suit.

- **développement de sensations par la recherche d'une vitesse maximale.** Ce programme devient en fait très vite la recherche du record de vitesse. On retombe alors dans la première aile d'eau. Cependant quelques inconvénients s'opposent à son application en glisse. La dimension et la complexité relativement importantes rendent l'engin financièrement moins accessible. Les vitesses extrêmes qui seront atteintes augmentent les risques en cas d'accidents et limitent tout apprentissage autodidacte, à moins de prévoir des engins de faible finesse pour les débutants.

post scriptum:

**B'- La glisse de «ballade»** façon vol libre, ou le kite surf intellectualisé.  
Là, un engin radical, avec pilote dans les airs, a son mot à dire.

## C- L'affrontement

ou la régata

J'appelle affrontement toute compétition de vitesse dans laquelle la notion d'interférence des trajectoires est primordiale entre les concurrents simultanés qui doivent éviter la collision. La trajectoire est contrainte par des marques de parcours qui favorisent le plus souvent la remontée au vent, garantie de luttés pimentées. Pour que l'interférence puisse s'exprimer pleinement, il est important de ne pas faire un parcours trop large. Sinon, on entre dans l'endurance.

L'aile d'eau de régata n'existe pas encore à ce jour mais les compétitions de char à cerf-volant donnent une bonne image de ce que pourrait être l'affrontement d'ailes d'eau. Ces régates présentent une nouvelle dimension dans la notion d'interférence car les concurrents peuvent varier leur très grande largeur projetée. L'aile d'eau n'a pas d'intérêt dans des vitesses supérieures à celles des voiliers existants, elles n'apportent rien au piment, mais augmentent la gravité des collisions. Les régates sur glace le montrent: quand les croisements se font à des vitesses différentielles de près de 400 km/h, l'ambiance se refroidit considérablement ! La jauge devra donc sévir.

Quant à l'affrontement avec d'autres voiliers, qui ne se ressemblent pas s'évitent: l'aile d'eau perd du terrain sur les manœuvres mais en gagne sur les bords, et les régates manquent de contacts.

La configuration que développe Peter Lynn en Australie me semble particulièrement adaptée (bien que le pauvre, pour l'instant, ne puisse que régater en famille). Il s'agit d'une coque portant la dérive et le pilote et d'un cerf-volant instable.



## D- L'endurance

ou la course océanique

Ce programme est caractérisé par une trajectoire contrainte entre un départ et une arrivée suffisamment distants pour que la durée de la course comprenne au moins une nuit en navigation. Qu'il y ait plusieurs voiliers à courir simultanément ou un seul, la problématique est quasiment la même: faire un temps de parcours le plus petit possible. Le développement de ce programme est étroitement lié à la présence d'une couverture médiatique prenant en charge ( par le biais du sponsoring ) une partie des inévitables dépenses importantes. Pour attirer l'attention des médias, l'endurance présente quelques atouts majeurs:

- Véritable dimension tactique, à suspens, basée sur l'exploitation optimale des phénomènes météo (toujours peu prévisibles) dans le meilleur compromis possible entre distance parcourue et vitesse moyenne.
- Enjeu technologique de taille, basé sur un engin à haute vitesse et à grande fiabilité.
- Enjeu humain considérable. Une grande part de la performance repose sur l'homme et un véritable star-système se met en place. On peut, à ce propos, faire la remarque funeste de la proportion constante entre risques humains et couverture médiatique.

La forme du voilier océanique est bien sûr dépendante du type de parcours envisagé. Pour limiter mon propos, je m'intéresse particulièrement à la traversée de l'**Atlantique nord** (sens ouest-est).

**Le surf des vagues.** J'en ai déjà abordé les caractéristiques de surface de l'interface, je n'y reviendrai pas, si ce n'est pour préciser un point important favorable à la sustentation par appui sur l'interface, que l'on appelle le surf, c'est à dire l'utilisation de la composante propulsive du poids sur les plans inclinés et d'une trajectoire tangentielle favorable des particules de la vague.

Les trajets atlantiques optimaux sont tous dans le sens des vagues. Même en naviguant à une vitesse supérieure à celle des vagues, le bilan énergétique est toujours favorable. Les multicoques actuels

n'arrivent à des moyennes supérieures à 20 nœuds sur 24 heures que par l'exploitation intensive de cet avantage.

**Le surf des dépressions.** Les phénomènes météo propres à l'Atlantique nord ont un rôle déterminant dans la performance. Ils se manifestent par des fronts dépressionnaires se déplaçant dans le même sens que le voilier à une vitesse moyenne de l'ordre de 18 nœuds et procurant une palette de courvents importants. L'enjeu pour le voilier est alors comparable à celui des vagues; pour faire des traversées records, les voiliers «surfent» véritablement la dépression. Ainsi, ils ont l'avantage de ne pas subir son passage et de pouvoir se placer sur un point particulièrement désirable en terme de courvent et de vagues. Ce n'est certainement pas un hasard si la vitesse moyenne (18.67 nœuds) du record de l'Atlantique nord (*Jet Services V*, Serge Madec) est égale à celle des dépressions.

Une question peut alors être posée aux candidats du record: le mode de fonctionnement en surf sur la vague de la dépression ne limite-t-il pas inévitablement la marge de progression? A cela on peut toujours répondre qu'il existe toujours des conditions plus extrêmes que la moyenne. la dépression qui a ravagé la Bretagne le 12 septembre 1993 avait fait une moyenne océanique de 22 nœuds, avec des pointes à 40 nœuds mesurées sur le premier tiers du parcours. Le 07 août 1949, Adlard Coles relève la même pointe de vitesse à travers le golfe de Gascogne, tandis que la dépression du 15 novembre 1987 a été mesurée avec une pointe record phénoménale de 60 nœuds.

En imaginant un voilier parti avec la dépression de septembre 1993, on calcule que pour un vent de 60 km/h (30 nœuds) lorsque la vague atteint sa limite d'âge (Célérité/vitesse vent réel) de 0.8 (en fin de traversée), elle présente les caractéristiques approchant: longueur: 110m, amplitude d'environ 5m, célérité: 24 nœuds, c'est à dire à peu près la même vitesse que la dépression! D'où naissance de l'espoir d'un surf continu à la fois de la vague et de la dépression avec au bout un record de traversée en moins de six jours.

Le problème d'un tel raisonnement est l'escalade du risque encouru. Il encourage en effet la fréquentation de dépressions rapides mais contenant des courvents parfois proches de l'inhumain.

Le voilier capable de mettre fin à cette escalade de la terreur est un voilier d'une finesse (donc d'une performance relative) suffisante pour traverser de part en part une dépression moyenne mais peut-être aussi

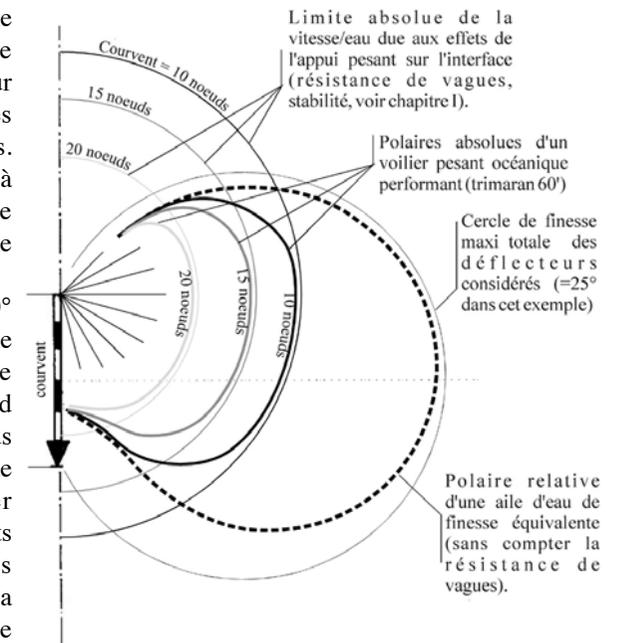
pour rattraper le front suivant. Une telle finesse serait capable de records encore plus magistraux pour une traversée inverse à partir des Canaries par de tranquilles alizés. L'aile d'eau, a donc un gros coup à jouer: se faire connaître par une traversée record et inciter au calme par la finesse.

Une finesse totale de l'ordre de 30° serait largement suffisante car elle permettrait des vitesses de l'ordre de 20 nœuds (supérieures au record actuel) pour les seulement 10 nœuds de vent réel à l'altitude de l'aile que l'on risque de rencontrer exceptionnellement entre les fronts dépressionnaires. Les allures portantes sont alors la clef de la réussite puisque c'est là que l'aile d'eau pourra particulièrement faire parler sa finesse par rapport à un voilier ordinaire tel qu'un multicoque océanique limité par sa stabilité et sa traînée de vagues.

Le tout reste de pouvoir disposer d'une aile d'eau capable d'une grande fiabilité d'autorégulation en eaux agitées et de performances honorables par vents inférieurs à 15 nœuds, où la sustentation dynamique par l'air commence à poser problème.

Je retiens deux configurations qui me semblent particulièrement bien adaptées.

- **Le déflecteur-ballon.** Solution radicale et brutale. Il s'agit d'une aile d'eau de grandes dimensions dont le déflecteur aérien a une voilure minimum de 35 mètres d'envergure et de 300 m<sup>2</sup>, du type à sustentation à gaz léger, avec nacelle incorporée, le tout à haute altitude pour capter des courvents forts et bien laminaires. Le déflecteur sous-marin est entièrement immergé, régulé par captation immatérielle amont de la distance à l'interface. La faisabilité d'une telle aile repose sur la stabilisation du ballon-cerf-volant dont la finesse respectable ne doit



*ne pas gaspiller sa finesse dès que la vitesse augmente permet des performances absolues au portant qui rendent inutile la fréquentation de zones très ventés*

pas empêcher une fiabilité à toute épreuve pour éviter toutes probabilités de contact avec l'interface. Je n'ai malheureusement pas de données suffisantes pour assurer la faisabilité d'une telle stabilisation mais cela ne me semble pas inenvisageable.

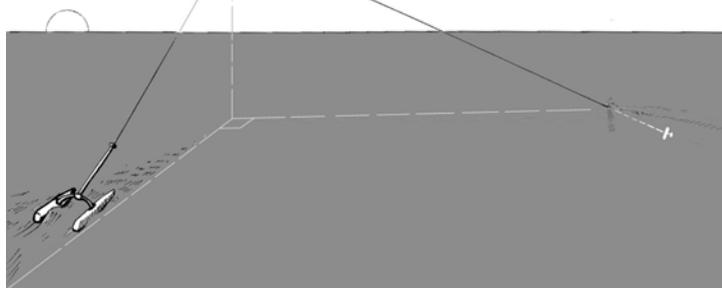
Un tel déflecteur aérien ne devra jamais se poser et devra rester à une altitude suffisamment haute pour que les éventuels émergences du cerf-plongeant ne soit pas dommageables. En cas de vents trop importants, il faut pouvoir neutraliser le cerf-plongeant et le remonter à bord afin d'annuler le vent apparent par une dérive passive.

Paradoxalement, le problème de ce voilier risque de venir du fait de ces grandes performances, et notamment dans les cas de dérive sans rien dans l'eau. Dans un tel cas, il devient difficile de défendre sa qualité de voilier et si on le pouvait, le record du tour du monde ne serait plus de plus de 71 jours mais de 20, et Picard détrônerait Kersauson. Du point de vue du WSSR Commette, il ne s'agit pas véritablement d'un voilier, même avec un déflecteur sous-marin, puisque selon la règle 8, le voilier doit avoir une position de repos en flottaison sur l'interface... Dans tous les cas, l'engin présente un intérêt en soi, comme étant un ballon capable de très grande vitesse en relativement basse altitude, et d'une totale autonomie évolutive.

*Pour assurer une composante constante et stable de sustentation, le déflecteur aérien devra être du type à empennage. Il ne devra pas être trop rigide afin de privilégier la légèreté et la solidité et de pouvoir s'auto-sustenter par courvents relativement faibles. En effet une aile épaisse très fine mais lourde n'a que peu d'intérêt si elle n'est pas capable de voler par moins de 20 noeuds de vent réel car de toutes manières, au delà de 20 noeuds, une finesse totale de 30° est quasiment suffisante pour atteindre les vitesses cavitantes...*

- **La nacelle en traînard.** Solution d'une échelle et d'une technicité beaucoup plus abordables, elle ne pose pour sa part aucun doute sur la qualité de voilier. Il s'agit d'une configuration avec nacelle remorquée par la voilure volante et régulant directement son grand roulis (voir chapitre III, *cerfs-volants à traînard*). Le cerf-plongeant est préférentiellement du type complètement immergé avec captation immatérielle amont de la distance à l'interface.

La dimension de l'engin est considérablement déterminée. La voilure doit être



dans les environs des 50m<sup>2</sup>. Plus grande, elle pose des problèmes de résistance aux éventuels chocs sur l'interface et de manipulation sur l'eau. Plus petite, l'échelle du cerf-plongeant nécessiterait une immersion relative trop pénalisante pour la finesse. De plus, les faibles altitudes conduiraient à la captation de courvents médiocres en intensité et en régularité.

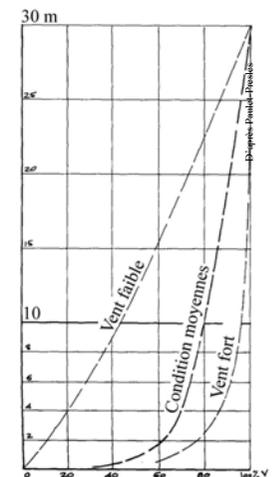
Le principal défaut de cette configuration est un rendement de sustentation de la nacelle relativement médiocre et légèrement dépendant de la vitesse. Toutefois le faible poids relatif et les conditions optimales de remorquage (naturellement stable et avec composante non négligeable de sustentation) minimisent cet inconvénient. Avec une longueur de 6-7 mètres en configuration catamaran et un poids apparent de 400kg, (le reste étant pris en charge par le cerf-volant), il faut compter sur un rendement de sustentation en planning entre 2 et 3 à 45 nœuds dans une mer formée.

Autre petit inconvénient, l'auto sustentation de la voilure est assurée par une surface constante car le roulis propre est bloqué. La configuration n'est alors plus optimale pour les faibles vitesses apparentes (trop fortes incidences du plan de sustentation) et pour les fortes (trop faibles incidences).

Le part des avantages est bien heureusement plus généreuse.

- possibilité d'une navigation en position de voilier ordinaire très léger dans les vents inférieurs à 15 nœuds.
- la voilure peut rester en vol même avec un vent réel baissant jusqu'à 10 nœuds à 10 m du sol.
- possibilité de «lancement» de la voilure en mode préalable d'appui sur l'interface. Le lancement s'opère facilement sans discontinuité, grâce au point d'application de l'appui à l'extérieur du bridage d'incidence.
- Le système de régulation du grand roulis n'a besoin d'aucune sorte de commutation de réglage pour le changement d'amure.
- L'angle du grand roulis est directement régulé par la traînée du traînard. Plus la vitesse augmente, plus le grand roulis diminue, adaptant l'altitude du déflecteur aérien à la nouvelle forme de la couche limite.
- l'équipage est en sécurité

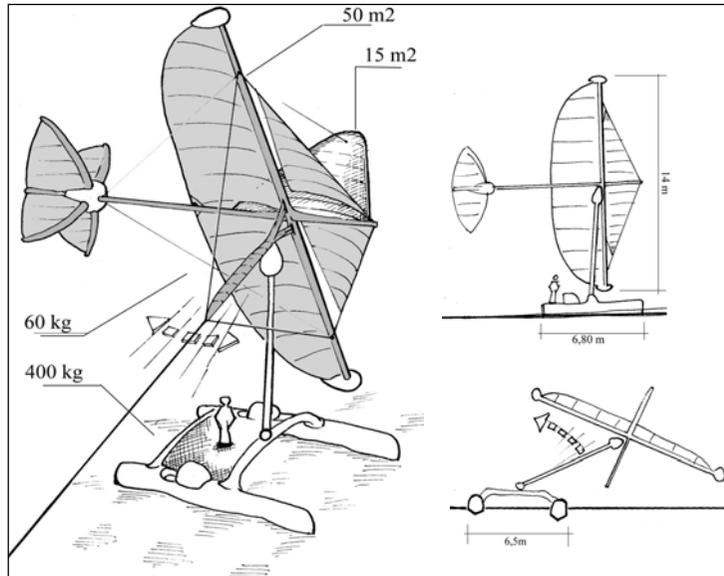
*Plus le vent est fort, moins on a besoin de s'élever, si ce n'est pour échapper à une trop forte turbulence.*



- Enfin et surtout, la finesse à 45 nœuds/eau reste tout à fait respectable: on passe d'une finesse totale de 28° sans la nacelle à une finesse de 33° avec.



Voiles et voiliers N°272



*L'aile d'eau à trainard «lanceur» habité.*

*Légère prétention formelle, juste pour le plaisir de taper vers l'inconnu.*

*Les plus grosses interrogations qui demeurent sont les capacités de la voilure à résister aux crashes et celles de la nacelle à la manipuler correctement par mer formée et permettre son lancement...*

*Heureusement, par conditions de vents soutenus (supérieures à 20 nœuds) l'envol de la voilure n'a pas besoin d'une position intermédiaire de voilier en dérive sur l'interface...*

*Le prototype mini-650, engin optimisé de course océanique est un bon élément de comparaison.*

*-Voilure: 50m2  
-Poids du gréement carbone: 35 à 40 kg (voiles comprises).  
-Poids de la coque pontée et structurée: 170 à 200 kg.  
-poids du lest: 300 kg (+200 litres de ballast).*



voiliers de toujours

A l'heure où j'écris ces lignes, un modèle inhabité de petite taille (1m<sup>2</sup> de voilure) est en projet. Les résultats des expérimentations seront reportés en annexe. Je suis confiant, et je ne prends aucun risque en disant que le record du monde de nombre de froude ne tient plus qu'à un fil de longueur de flottaison = 0.5 mm!

Le secret d'une traversée record océanique est peut-être bien dans la traversée interfacielle...



Voiles et voiliers N°333

*On voit ici l'impressionnant gaspillage de la traversée interfacielle de Primagaz; c'est pourtant l'engin au plus gros palmarès de traversée océanique. Il reste une belle marge de progression pour les voiliers océaniques!...*

## E- le voilier troposphérique

Grâce à la configuration en aile d'eau, le concept du voilier peut s'étendre à des engins exclusivement aériens.

Le courvent entendu au sens large comme le lieu cisaillant d'un différentiel de vitesses parallèles n'existe pas qu'au travers de l'interface air-eau, mais partout dans la troposphère où les masses d'air se superposent à des vitesses différentes. Une structure qui s'étend verticalement sur ces masses d'air peut se propulser à la manière d'un voilier par une double déviation opposée. Une telle structure offre la possibilité d'un nouveau type de navigation: une propulsion active autonome sans motorisation et sans masse.

Pour le voilier troposphérique, la configuration en aile d'eau est la seule structure possible car on ne peut pas rééquilibrer des moments par appui sur une surface qui n'existe pas. Les exigences de légèreté sont plus importantes que pour l'aile d'eau car le déflecteur inférieur n'est plus sustenté par la densité de l'eau. Si l'on veut pouvoir disposer d'une position de repos (en dérive aérienne), le déflecteur supérieur devra être sustenté statiquement par gaz léger.

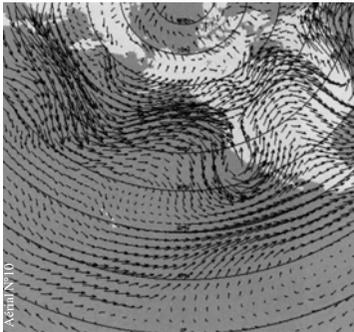
Deux sortes de programme peuvent être imaginés pour le voilier troposphérique:

- **navigation en basse altitude**, dans la couche limite du sol. Avec un tel voilier (pourtant purement aérien) on peut espérer remonter au vent. Mais le déflecteur inférieur étant inévitablement confronté à un air turbulent, les risques de chute sur la surface sont considérables et redoutables.

- **navigation en haute altitude**, par l'utilisation de courants laminaires hautement différenciés, par exemple entre les jets stream et des masses inférieures moins rapides. Une telle navigation permet à un engin

du type plus léger que l'air non motorisé de se déplacer beaucoup plus volontairement, de ne plus être à la merci des directions de vents existants à l'altitude considérée. Contourner le ciel territorial de la Chine, par exemple, ne poserait pas l'énorme problème qu'il pose pour l'instant aux prétendants à un tour du monde en ballon.

*Prévision du 12 mars pour le 15 mars 1999. Niveau 300 hPa, soit approximativement 9000 m d'altitude.*



## (VII) Introclusion particularité sur le fil de mon idée



Il est des fils qui résistent à la sécheresse des années et relient par des détours multiples et apparemment hasardeux le gros sac de nœuds de l'enfance à la mince tresse de l'âge adulte. Mais les journées n'étant plus ce qu'elles étaient (presque cinq fois plus longues), l'adulte doit choisir son métier, les fils ne peuvent être tous cultivés et certains, trop longtemps délaissés, meurent. Le sujet de cet exercice de fin ou plutôt je l'espère de commencement d'étude en est un qui plonge profondément. On pourrait s'amuser à décortiquer les expériences sensibles peut-être initiatrices - petit gonflable de plage, flotter, ruse d'Optimiste, modélisme, concours bateaux, enseignement - mais cela n'aurait pas grand intérêt, surtout ici. Pendant les trois premières années d'études postbac, le fil a continué son chemin en autosubsistance, derrière celui de la fascination du contenant. Puis, par un hasard volontaire, le contenu de l'interface océanique a refait surface, croisant pendant deux ans le chemin du contenant pour l'y inviter. Le fil, à force de faire et défaire apparition, s'est multiplié, propagé, emmêlé et a produit un entrelas suffisamment inextricable pour que je m'y attache.

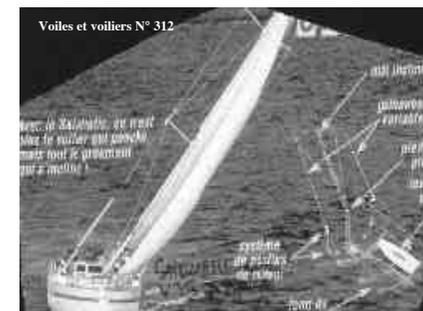
Les réflexions initiales sont plutôt innocentes, assez puériles quand j'y pense et leur narration, pourtant plus récente, ne vaut guère mieux. Mais c'était réellement ma façon de penser et je crois que c'était important que je passe par-là afin qu'aujourd'hui je comprenne que l'ignorance, si elle est nécessaire comme l'enfance pour l'adulte, peut cependant être raccourcie et beaucoup d'énergie peut être épargnée par l'introduction de moyens d'analyse puissants et abstraits. Sans ces moyens, la pensée s'emballer trop facilement et sans scrupules dans des trajectoires aveugles et sans cohérence. Je livre malgré tout aux éventuels curieux la forme originelle du nœud dont vous connaissez le dénouement actuel (15/02/2000).

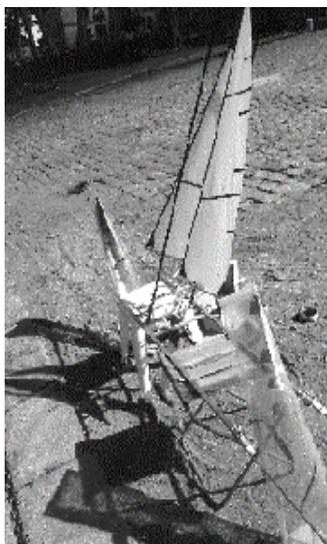
"(La narration est vieille d'un an) *La genèse a été forcée car je ne fonctionne surtout que lorsqu'on me le demande. C'était il y a deux ans, en quatrième année, l'équipe pédagogique de l'option architecture navale nous proposait l'exercice simple et captivant: faire une embarcation qui traverse l'Erdre par elle-même, sans commandes extérieures. Vaste sujet, pourquoi faire simple? Je décidai de faire compliqué: Un voilier monocoque qui ne gête pas. L'idée m'était venue d'un petit article du magazine Voiles et Voiliers n°312 dont voici l'illustration ( je ne garde que les images). J'avais auparavant expérimenté la résistance à l'avancement d'une embarcation à deux flotteurs disposés dans le sens de la longueur et donc on faisait varier la distance entre chaque flotteur et l'assiette de chacun.*

*J'ai tout mélangé pour faire ce que j'ai appelé le voilier à voilure pendulaire autonome. Il s'agissait d'un voilier dont les deux coques disposées dans la longueur ne gênent pas car rendues indépendantes de l'oscillation conjuguée de la voile et du lest. Plus la charge aérodynamique est forte, plus la voilure penche, entraînant le lest au vent jusqu'à ce qu'il équilibre le moment inclinant déclinant.*

*L'engin évolue à des vitesses décevantes. De plus il prend malgré tout une petite gête, provenant de la surélévation du centre de rotation voile-quille par rapport à l'application de la composante anti dérive inévitablement développée par les coques fines et profondes.*

*Avec le système d'oscillation du lest, l'engin ne peut avoir qu'une stabilité « de poids » et se voit obligé d'utiliser un bulbe excessivement lourd. Son cadre, supporté par les deux coques articulées, est tellement bas sur l'eau qu'il est*





inutilisable dans une eau agitée alors qu'il était imaginé pour mieux passer dans les vagues.

L'engin a néanmoins réussi toutes ses tentatives de traversées de l'Erdre grâce à une stabilité de route facilement réglable par la position longitudinale du balestron.

A part ça, il a le mérite d'ébranler des masses sans fond d'interrogations, mât bipode, balestron, tangage de la voilure, stabilité, diminution de la surface efficace anti-dérive, longueur d'onde de sillage, longueur efficace de flottaison.

Mais la remarque qui m'a le plus fait avancer fut : la charge aérodynamique a une composante verticale dirigée vers le bas dont l'intensité croît avec la gîte (force vélique à peu près perpendiculaire au plan de voilure) . D'où l'augmentation du déplacement avec l'augmentation de la charge aérodynamique.

Cette observation était vraie pour tous les voiliers. J'ai donc naïvement pensé que si mon système était inversé, la voile s'inclinant au vent au fur et à mesure que la force vélique augmente, je serais alors l'inventeur du voilier du siècle. Non seulement il ne prendrait aucune gîte, mais en plus il se sustenterait d'autant plus que le vent serait fort.

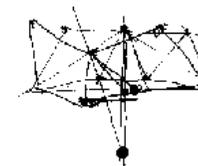
J'ai divagué quelques jours et couvert quelques feuilles avec d'absurdes croquis avant de me rendre à l'évidence : Une force appliquée sur la voilure ne peut en aucun cas provoquer son déplacement dans le sens inverse du point d'application de cette même force ! Pour faire basculer le lest au vent (afin de contrer le moment inclinant), il faut que la force vélique produise un travail, ce travail ne pouvant provenir que du déplacement sous le vent du point d'application de la force vélique.

Tout au plus peut-on imaginer des systèmes dans lesquels la voile se déplace sous le vent mais sans s'incliner vers le bas ou encore des centres de rotations situés tellement haut qu'un fort moment inclinant est de toute façon appliqué au flotteur. Je finis par me rendre compte que la complication d'un système de relevage autorégulé du lest au vent n'apporte rien de plus qu'une quille pivotante réglée pour un vent stable donné, à condition d'avoir une stabilité de forme suffisante pour rattraper les fluctuations de charges aérodynamiques. Sur les 60 pieds open, la stabilité de forme est tellement dominante que le seul moment induit par la force hydrodynamique devient

suffisant pour pivoter la quille au vent. Un système reliant la force aérodynamique à un moment de pivotement de la quille au vent n'a donc d'intérêt que pour un bateau à stabilité de poids très majoritaire.

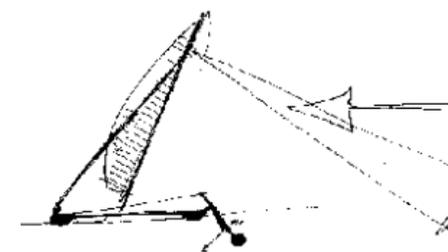
Un autre problème est l'effacement de la dérive. Si l'on imagine la dérive servant également de porte-lest, comme je l'ai fait sur la maquette, la gîte du système (nécessairement importante pour une stabilité exclusivement de poids) provoque une perte de l'efficacité de la dérive au moment même où la composante de dérive de la voilure augmente.

Si pour pallier à ce problème, on décide que la dérive est différente du porte-lest, c'est à dire située sur l'ensemble non oscillant, on se trouve confronté à la nécessité de positionner un centre de rotation de l'ensemble oscillant au niveau du centre de dérive, c'est à dire sous l'eau, afin de ne pas provoquer de gîte de la carène. Faire un point de rotation virtuel sous la flottaison afin de ne pas rajouter de structure immergée a encore été l'occasion purement mazo de migraine. Mais je relève alors mon menton de mes mains sur la réflexion : « de toutes façons, plus le point de rotation de l'ensemble est bas, moins le rappel du lest est grand ».



Il est vain d'imaginer un tel principe d'oscillation de la voilure et du lest pour la compétition. Ce système, qui pourrait autoriser des coques extrêmement fines (au dépend de la légèreté), condamne finalement une finesse excessive pour les problèmes de dérive dont j'ai parlé. Pour la croisière (qui n'était pas mon souci du moment), le principe peut être intéressant par le fait de la gîte peu importante (mais quand même présente) de l'habitat. Par contre, la voilure prend nécessairement de plus grandes inclinaisons, d'où un problème de performance (il en faut un minimum pour la sécurité). Sans parler des complications techniques d'articulation, de gestion des butées,.... malvenues en croisière.

Je ne sais plus la raison qui m'a amené à produire ce drôle de croquis. Je crois que c'était avec la volonté d'avoir un point de rotation de la voilure oscillante non plus intégré à l'unité du flotteur, mais extérieur afin de ne plus avoir de problème de moment inclinant induit par la hauteur du point d'application des



forces latérales (sur le centre de rotation). J'ai donc introduit un troisième mobile au système: **Le cerf-plongeant.**

Cet appendice, inventé par mes professeurs André Herskovitz et Philippe Thômé, m'avait déjà beaucoup intéressé et il apparaissait ici comme la solution express à un problème autrement insoluble.

Seule interrogation: il me fallait un cerf plongeant à plongeon oblique, et celui que j'avais pu voir était à plongeon vertical.

Pour cet autre croquis transitoire, je reste attaché à l'idée d'une régulation de la surcharge aérodynamique par une inclinaison de la voilure; à l'image de la planche à voile. J'abandonne très vite la régulation par balancier lesté, pour un haubanage élastique, plus satisfaisant du point de vue simplicité et légèreté. Néanmoins le système de régulation reste, par inertie cérébrale, toujours lié à la carène, ce qui a le défaut d'introduire sur celle-ci, un moment de contre gîte.

Dans le schéma suivant, le pas est franchi, la régulation de l'inclinaison est dans la suspension de la voilure. Il s'agit alors véritablement d'une voilure que j'appelle volante ou suspendue en ce sens que la coque n'exerce sur la voile qu'une régulation de l'altitude mais pratiquement aucun moment ni force latérale anti-dérive.

Il faut noter que l'idée (venue de la planche à voile) d'une régulation de la surcharge par l'inclinaison de la voilure restera longtemps dans mes préoccupations et ce n'est que récemment que j'ai pensé à d'autre système: régulation par l'incidence, par la dérive... par la vitesse!."

A la suite de la précédente narration, conscient de ramer, j'ai entrepris de me lancer dans le concret avec pour objectif un modèle navigant. Je me suis décidé à dessiner et à construire des cerfs-volants et des cerfs-plongeants. A les mettre dans le vent, dans le courant ou à les tracter. Cette phase de bricolage et d'expériences, pourtant souvent triviales et toujours laborieuses, m'a apporté un énorme bol d'oxygène. Voici ce qu'on peut lire ici ou là dans les marges de mes comptes-rendus d'expérience, témoignages de mes états d'âmes.

"Le mobile suit ses lois avec une intelligence extrême. Rien ne lui échappe. Et tous les paramètres, même ceux que l'on ne connaît pas, jouent. Le cerveau humain n'a qu'à essayer de suivre. Souvent, même l'œil n'arrive pas à enregistrer, même dans la lenteur, car il lui faut attendre que le cerveau accepte. C'est en partie pour cela que je m'efforce de ne changer qu'une variable à chaque expérience. Le cerveau est obligé de se constituer des savoirs-réflexes pour que par la suite il puisse être capable de suivre quelque peu le comportement du mobile."

"Il faut parler de la pêche, le cerf-plongeant en est très proche, d'ailleurs mes premiers véritables intéressés sont des pêcheurs. N'y a t il pas des peuplades qui pêchent au cerf-volant? Et à travers mes mimes de fausses prises, ce sont les passants que j'attrape."

"La présence de passants autour de moi me pousse dans un désir de poésie, de mise en scène qui se ressent jusque dans l'objet fabriqué. Je me prends à imaginer un spectacle qui se donne à voir, à questionner, à amuser, où les éléments eau et air, sont soumis à quelques jeux de piste, à la manière des géniaux mécanismes de Royale de luxe que le spectateur s'amuse à reconstituer."

"Ce sont des enfants dont j'ai le plus peur pendant mes expériences. Car eux seuls peuvent me comprendre. Ils semblent beaucoup plus neufs et clairvoyants que leur pères qui tentent bêtement de les apaiser."

"Même pour la conception, le cerveau a du mal à tout prévoir, pourtant il le fait bien car le mobile, lui, voit tout du premier coup, en instantané, et, comme l'eau, il s'engouffre dans n'importe quelle fissure."

"Attention! Il faut se méfier, la main est plus intelligente que le cerveau. C'est elle qui fait tenir un balai en équilibre improbable, c'est elle qui donne le coupe de pouce aux engins les plus sophistiqués, comme organe de conduite ultime. Je dirais même qu'elle est de connivence avec le reste du corps, pour

*ne pas révéler à la raison des vérités qui pourraient lui déplaire"*

*"Je pense qu'il est judicieux de prendre pour pilotes des éléments naturels, même fluides, car bien qu'aléatoires, ils sont habités d'une infaillible éthique de constance."*

*"L'eau à l'avantage sur l'air d'être palpable et enfermable. Le travail peut être posé, calme et réfléchi. Longuement essayé. La Loire reprend tous les jours son courant imperturbable. Il m'arrive même de m'aider de l'eau pour imaginer l'air."*

*"Ce n'est pas à la taille du tas de gravats qu'on juge de la valeur de la sculpture... heureusement... Il semble qu'il faille trouver le juste milieu entre le primaire et le secondaire. Soit passer des heures à calculer ce qu'une simple maquette peut montrer, soit passer des heures à tâtonner et à bricoler des choses farfelues alors qu'un simple raisonnement nous indique, sinon la bonne voix, la mauvaise..."*

*"De la faiblesse de l'attachement à l'objet fabriqué, qui doit rester suffisamment frustré pour progresser. La perte de ma première aile plombée à dièdre fut un coup de fouet. L'industrie, le design industriel ne sont bons que pour la maturité, pour l'affirmation. Une recherche s'accompagne nécessairement d'objets sales sur lesquels sont portées les traces des multiples questionnements. L'objet expérimental est un assemblage de questions auxquelles l'expérience, l'eau, l'air et le temps viennent répondre."*

*"Par chance, mes premières expériences étaient bien dosées. Je crois que ce sont elles qui, après m'avoir frappé de gaieté, m'aident à surmonter les séries d'échecs."*

*"C'est l'habitude de fréquenter une vérité qui permet de commencer à y croire, à la concrétiser sans se perdre dans l'angoisse ou la jubilation."*

*"A la manière des enfants de favelas, construisant des merveilles avec des boîtes de conserves, je choisis la voie de la simplicité constructive pour aboutir au plus vite à un résultat. Faisant confiance en ma sainte flemme pour guider mes choix vers une simplicité croissante. Car la flemme n'est qu'un message de la raison inconsciente au corps. Ou plutôt du corps intelligent à l'esprit borné. Ce dernier, seul, sans l'exigence du réel, ne se donne lui non plus pas beaucoup de mal, et se laisse facilement aller dans*

*l'autosatisfaction de l'image produite. Belle image, se dit-il, mais à peine songe-t-il à une concrétisation que le réel a déjà écroulé le beau château de carte."*

*"Je ne crois pas à la voie de la brutalité, de l'avion de chasse, du peu subtil. L'hydroptère, monstre de carbone n'en fait pas plus que la simple planche à voile ou le génial bricolage du Long Shot."*

*"Le voilier est plein de ruses, il défie le vent dans un regard biais, montre les crocs mais ne s'aventure pas de face, il loup-voie"*

*"Quel merveilleux silence que l'étanchéité parfaite de l'eau qui coule dans l'œsophage, le coulissement et la régulation sans heurts. Les éléments se laissent guider par leurs lois et nous renvoient qu'un lointain murmure de vent ou de brisants."*

La grosse leçon: il est important d'avoir un regard critique sur sa structure de pensée dépendante du corpus de croyance et d'expérience. Il m'est souvent arrivé, dans les heures suivants des lectures particulièrement pertinentes ou des résultats d'expériences inattendues, de connaître un bouleversement de toute ma structure de pensée; bouleversement en domino cascade pouvant durer plusieurs heures et qui se termine par une tête sortant enfin des mains pleines d'une théorie victorieuse.

Je peux donc faire l'hypothèse qu'aujourd'hui, certains faits majeurs pour l'analyse ne me sont pas encore connus, mais que quand ils finiront par l'être tout le présent exposé sera hideux de fausseté. Cependant, ce qui me rend aujourd'hui optimiste, c'est que depuis un certain temps, toutes les lectures, les témoignages et les expériences que je réalise sont compréhensibles à travers un tout cohérent et que je retrouve chez d'autres mes façons de voir le problème.

Il ne me reste maintenant plus qu'à éprouver encore plus fortement la solidité de mes théories à travers des expériences d'ailes d'eau complètes, des témoignages et opinions de valeurs. Si l'affirmation résiste encore, s'il s'avère qu'effectivement l'ablation de la coque (entendue comme le lieu de rééquilibrage par appui sur l'interface des forces dynamiques), est possible et efficace, notamment pour des voiliers océaniques, alors je pourrais commencer à m'attaquer aux choses non pas sérieuses mais futiles du voilier de vitesse.

- Qu'y a t il de moins sérieux?



*Le Yacht, 1908*

Course de yachts modèles à Saint-Nazaire. — Le départ

1908





## VIII Annexes, informations complémentaires sur mon travail

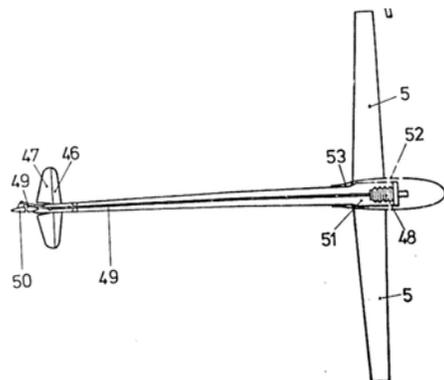
### A- déflecteur sous-marin à «poumons»

Je ne reviendrais pas sur l'intérêt d'un tel cerf-plongeant à immersion régulée, notamment en ce qui concerne l'absence de perforation de l'interface et la polyvalence sur un grand champs de vitesse (voir pour cela le chapitre III, B, p 89).

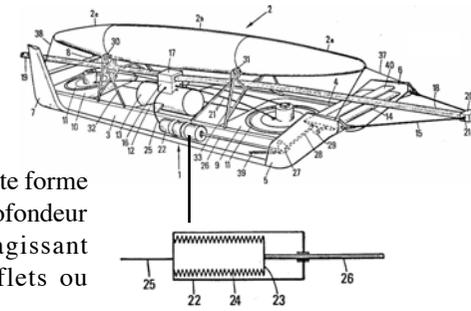
Il faut toutefois rappeler que le système ne peut vraiment bien fonctionner qu'aux faibles angles de grand roulis ( entre 0 et 50°) car c'est principalement l'action sur le lacet qui permettra la régulation efficace de l'immersion.

#### Antériorité

L'idée m'avait tout d'abord semblé loufoque, en tous cas utopique et je suis certain qu'elle émane de la source à idées en tout genre qu'est la bouche de Philippe Thômé, mais lui-même le dément. Quoi qu'il en soit, j'ai récemment découvert que d'autres personnes à y avait fortement pensé bien auparavant.



- En 1973, l'allemand Trommdorff a déposé le brevet d'un déflecteur à «poumons» capteur de pression statique dont la similarité avec mon modèle m'a beaucoup touché. Tout y est: géométrie des prises de pressions statique, poumons relié à un volet d'empennage de lacet et surface «verticales» porteuse pour l'embarquée.



- En 1978, l'Institut Français du Pétrole conçoit une plate forme de détection tractée en complète immersion et dont la profondeur est régulée par une prise de pression statique agissant directement sur le volet de profondeur via soufflets ou «poumons».

- En 1996, l'Américain Theo Schmidt a semble-t-il été tenté par l'idée mais ne l'a pas poursuivi «j'ai essayé un poumon capteur de pression relié à un élévateur mais il était difficile de dire si l'organe fonctionnait correctement...» (Ultimate Sailing III, p 47, 1996).

#### Le principe

La pression statique est un témoin précieux. Si on arrive à renseigner le déflecteur sur la pression statique, on le renseigne sur sa profondeur. Cette information de profondeur a l'avantage d'être en elle-même, un bon lissage de l'irrégularité altimétrique de l'interface. Autre intérêt de la pression: elle peut être directement utilisée pour actionner des organes moteurs jouant sur le comportement du déflecteur.

**Question** (qui m'a longtemps tirillé et a suscité de nombreux débats avec des personnes septiques): un mobile en mouvement par rapport à l'eau peut-il continuer à capter la pression statique? **Réponse:** oui, au moins pour les conditions permettant de remplir les hypothèses du théorème de Bernouilli. Le fluide est parfait (on peut négliger les frottements), il est incompressible, il est dans le champ de pesanteur et surtout: le mouvement est permanent. On démontre facilement que si la prise de pression se situe en un point d'une ligne de courant où la vitesse de l'eau par rapport au mobile est la même en ce point qu'en amont, la pression captée sera égale à:  $r \cdot g \cdot h$  où h est la précieuse information de profondeur.

Sur tous corps fuselés, même d'épaisseur non négligeable, il existe des points où la vitesse au voisinage du fuselage est égale à celle en amont. La prise de pression doit donc s'y situer et pour ne pas déformer la ligne de courant, elle ne doit présenter aucune saillie sur le fuselage; en pratique, un simple trou circulaire bien net et suffisamment petit (d'autant plus que la vitesse est grande) convient parfaitement. Il peut y avoir plusieurs prises de pression statique disposées tout le long d'un fuselage, mais il faut alors veiller à ce que l'intégrale des pressions captées soit bien indépendante de la

vitesse. L'avantage, c'est qu'on a alors une grille de captage qui moyenne les perturbations de pression due à la turbulence (de plus en plus problématiques à mesure que la vitesse augmente. Exemple: à 50 nœuds, une variation de 1% de la valeur de la vitesse au niveau du captage par rapport à la vitesse amont induit une erreur de 60 cm d'immersion).

### Le poumon capteur et moteur

On a vu que le captage de la pression statique avait deux vertus: il permet de se renseigner sur la profondeur et de créer des forces motrices de pilotage. En prenant conscience de ça, j'ai tout de suite aperçu la possibilité d'un engin réalisable avec de faibles moyens économiques et techniques, avec du casto, de la récup et du tâtonnement. La question qui restait cependant en suspens était: suis-je capable de fabriquer un organe capteur-moteur dont la force est suffisante pour piloter un déflecteur d'envergure comprise entre 30 et 40 cm, et dont la précision en terme de profondeur doit approcher les 3cm (objectif de précision fixé pour une immersion de 20 à 30 cm)? Un mois et demi plus tard, je suis arrivé à une réponse positive, notamment grâce à l'utilisation de «bassins à pression» permettant de faire varier la pression relative autour d'un objet entre 0.01 et 0.1bar (10 à 100cm d'eau),



Bassin N°1, permettant l'expérimentation des organes seuls.



Bassins N°2, permettant l'expérimentation des organes et de toute la mécanique associée pour le pilotage du déflecteur.



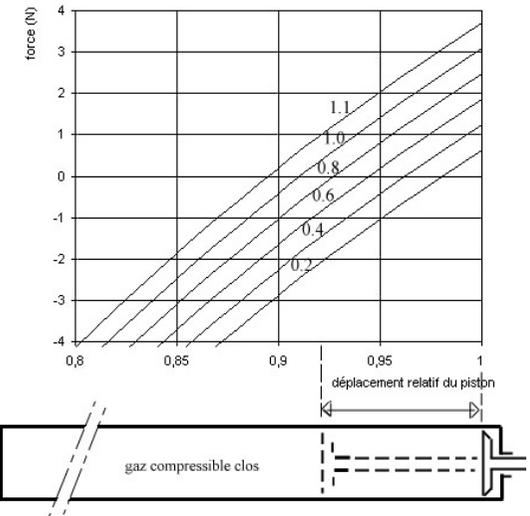
Bassin N°3  
Spécial  
grande taille  
de déflecteur

### Les différents référents de pression envisagés.

Pour que les variations de pression statique puissent produire une force sur un organe moteur, il faut garder une pression «référente» à l'intérieur de l'organe. Différents systèmes peuvent être envisagés.

#### Volume interne clos rempli de gaz compressible.

L'organe fonctionne grâce à la compressibilité du gaz enfermé à l'intérieur. En fait, la pression interne est variable, elle s'adapte aux changements de la pression externe par variation volumétrique de l'organe. C'est cette variation qui peut être transformée en déplacement utile. L'ennui avec un tel système est que pour garantir un débattement suffisant de l'organe il faut ménager un volume d'air non négligeable; volume, qui, même bien caréné, est particulièrement dommageable pour la finesse totale du déflecteur sous-marin. Il faut aussi faire attention à la température qui peut faire varier de façon non négligeable la pression référente interne.



Composante de pression sur le piston ( $F$ ) fonction du débattement relatif ( $d$ ) pour différentes valeurs d'immersion ( $H$ ) avec une pression initiale ( $P_i$ ) =  $P_{atm}$  et un diamètre de piston ( $D$ ) = 0.02m .

$$F = \pi D^2 / 4 \cdot (P_{atm} + \rho g H - P_i / d)$$

#### Volume gazeux interne à pression de vapeur saturante.

Le fonctionnement est similaire au précédent sauf que la loi de compression du gaz est faussée par sa liquéfaction à partir d'une pression proche de la pression atmosphérique. On a alors besoin de très peu de volume interne. L'ennui, c'est qu'un tel système est très sensible à la température. Bien que celle des masses océaniques soit relativement stable, on peut prévoir de nombreuses difficultés, même pour des variations de quelques degrés.

Je n'ai pas beaucoup d'information sur de tels gaz mais je sais qu'ils existent... à creuser tout de même.

*Vide d'air.*

C'est le fonctionnement des capsules de baromètres. Leur variations volumétriques n'entraînent aucun changement de la pression interne qui reste égale à zéro. Du coup, le volume interne initial peut être minuscule et le comportement de l'organe est indépendant de la température. Attention toutefois: les variations de la pression atmosphérique entraîneront des variations de profondeur pouvant aller jusqu'à 80 cm (de 950 à 1030 hpa), ce qui n'est pas négligeable. Maîtriser la solidité et l'étanchéité au vide suppose un minimum de technicité que je n'ai pu atteindre dans le cadre de cet exercice, dommage!.

*Référent externe atmosphérique.*

Comme le système précédent, il autorise un faible volume interne mais il est doté d'une «immunité de pression atmosphérique» en plus d'une «immunité thermique».

Il y a cependant une fâcheuse obligation: relier le fluide interne à la pression atmosphérique à l'aide d'un tube. Ce tube étant le siège d'une certaine «respiration» sa section ne doit pas être négligeable afin de ne pas entraîner de trop fortes pertes de charges dommageables pour le temps de réactions de l'organe. Mais lorsqu'il remplit son rôle interne, le tube devient gênant pour l'extérieur: forte résistance à l'avancement. Entre traînée interne ou externe, il faut choisir ou compromettre!.

**Quelques formes d'organes capteur-moteurs**

Je laisse de côté les idées d'organe-profil pour lesquels les différences de pression créent directement le changement de la forme continue d'un profil «pneumatique». Le plus classiquement, un organe spécialisé se déforme en variant son volume et son déplacement agit sur un volet d'empennage. J'utilise le terme de *poumon* pour désigner ce type d'organe.

*Le piston.*

C'est le fonctionnement qui vient immédiatement à l'esprit. Cependant son gros défaut est le frottement sur les parois, indispensable pour assurer l'étanchéité. Les mesures de frottements que j'ai réalisés sur des pompes à vélos et sur un piston de jouet, ne laissent pas espérer une sensibilité supérieure à 1 mètre d'eau! (frottements > 2.5N pour un diamètre du piston = 18 mm ). J'ai rapidement abandonné cette piste face à l'énorme marge de progression qu'il restait à effectuer dans la réduction des frottements (exigence de sensibilité à 3cm, soit 300 Pa: aussi sensible qu'un baromètre! )

*La capsule.*

C'est l'organe du baromètre, éprouvé, simple, efficace. Cependant sa géométrie n'est particulièrement pas destinée à être contenue efficacement dans un fuselage. L'idéal serait une série de capsules montées en trains. Je n'ai malheureusement pas pu me procurer de capsules suffisamment petites ( diamètre < 15 mm) mais je conserve l'idée pour plus tard.

*Le soufflet.*

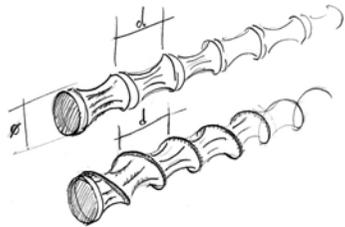
Il peut être considéré comme un train de capsules dont les contenus ne font plus qu'un. Pour des facilités constructives, je me suis rapidement orienté vers les soufflets en dépression à paroi souple et armature rigide. Les multiples expériences que j'ai pu réaliser sur cet organe (une vingtaine de modèles avec mesures de forces et de débattement à l'intérieur de bassins à pression) m'ont permis d'en dégager des lois empiriques de comportement.

Tout d'abord, la force développée.

Elle est supérieure à celle d'un piston de diamètre équivalent car le funiculaire qu'est la paroi souple, crée à ses ancrages, une force longitudinale non négligeable qui s'ajoute à celle de la face circulaire. Le nombre de «cellules» ou la longueur totale du soufflet n'a pas d'influence sur la force développée, seules comptent les caractéristiques d'une «cellule» du soufflet. De façon instinctive, on comprend que plus la paroi de la cellule est fléchie moins elle

développe de force; de la même manière qu'une corde à linge initialement moins fléchie contraindra davantage ses ancrages une fois chargée. Cependant, pour simplifier le problème je considère une peau moyennement fléchie et l'équation suivante se vérifie avec une bonne précision dans la pratique:

$$F = [ K \cdot F \cdot d \cdot p + (p \cdot F^2) / 4 ] \cdot D_p - R$$



Avec F en Newton, K= 0.1, F: diamètre, d: distance entre anneau ou période de spirale, Dp: différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur du soufflet, R: indice de raideur de peaux (et) ou de l'armature spirale, ramené en Newton.

Lorsque le soufflet est totalement clos, sans liaison avec la pression atmosphérique, le différentiel de pression diminue d'autant que l'écrasement s'opère. On peut alors dégager une équation du débattement total (pour une raideur de peau nulle et sans résistance de l'armature).

$$D = L \cdot (1 - P_i/P_e) \cdot (1 - d/(F+d))$$

$$\text{Et All} = (1 - P_i/P_e) \cdot (1 - d/(F+d))$$

Pour un soufflet relié à un réservoir d'air annexe, on retrouve le débattement en utilisant la loi des gaz parfait ( $PV = nRT = \text{cte}$ ).

Dans tous les cas, on observe la loi générale suivante: plus un soufflet est puissant, plus il connaît une forte variation de volume. J'utilise le mot puissance comme qualificatif du produit du débattement par la force moyenne du soufflet au cours de ce débattement.

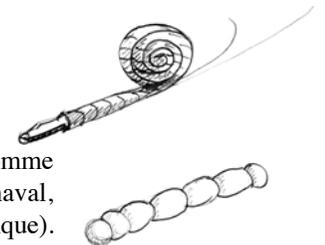
Pour un soufflet à air clos, les peaux doivent présenter une raideur maximale en traction afin de ne pas «gaspiller» de volume. Mais dans le même temps, la raideur en flexion doit être la plus faible

possible afin de ne pas limiter la puissance. La mise en œuvre qui m'a apporté le plus satisfactions est une peau polyester à 35g/m<sup>2</sup> collée à la Néoprène sur bagues en aluminium, le tout recouvert d'une fine couche de silicone (dilué et appliqué au pinceau) pour l'étanchéité aux fortes pression. J'utilise une toile polyester très calandree et avec enduction (toile pour cerf-volant nommée *Ventex*), mais elle a le défauts de ne pas adhérer idéalement avec la couche silicone et des cloques au niveau des plis ne tardent pas à apparaître. Pour remédier à ce problème, on peut alors utiliser un voile polyester 35g/m<sup>2</sup> pour couture (pas de plis et super adhérence) mais la raideur à la traction est un peu moins bonne. De plus la mise en œuvre est plus délicate (le tissu ne se «tient» pas tout seul).

Pour un soufflet sous vide d'air (possible uniquement en mise en œuvre métallique), le débattement n'a de limite que la raideur de flexion des peaux et ou la raideur de réaction à la commande (système élastique de rappel).

*D'autres organes...*

- Le serpentín a section lenticulaire variable, largement utilisé comme organe de tropisme chez les végétaux, comme accessoire de carnaval, comme organe de mesure des hautes pressions (il est alors métallique).
- Mais aussi en surpression interne: le simple ballon à paroi élastique utilisé comme ludion, le ballon saucissonné, et que sais-je encore !

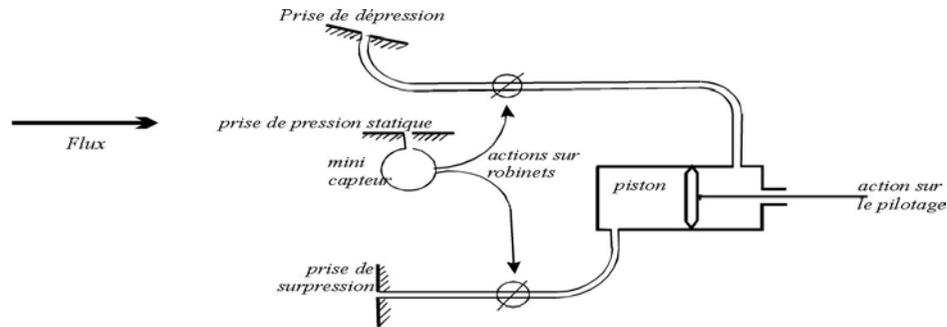


### Séparation des fonctions de captage et de pilotage.

Cette séparation a pour motivation principale, la compacité. On peut envisager des capteurs minuscules du type de ceux utilisés pour les mesures fines en soufflerie ou bassin des carènes. Le *moteur* peut alors être du type électrique relié au *capteur* par une interface électronique.

Si on est plus scrupuleux sur la totale autonomie d'énergie, on peut également imaginer un moteur «pneumatique» similaire au précédent

«moteur-capteur» mais en plus petit car le différentiel de pression peut être accentué par des prises de pressions dynamiques. Le «capteur-moteur» reste indispensable mais il peut être alors minuscule, car dimensionné pour actionner des «robinets» de pression.



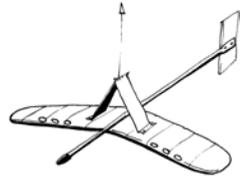
Dans ces deux cas, la technicité de la mise en œuvre n'est pour l'instant pas à ma portée.

## Les modèles plongeant

Après quelques semaines d'essais sur différentes formes de déflecteurs à stabilisation statique puis pilotables par deux fils, histoire de se familiariser quelque peu avec le drôle de poisson, j'ai entrepris la construction de modèles «à poumons».



Modèle N°2. Statique à réulation d'angle de vol par peson d'empennage



Modèle N°1. Statique vertical (perdu en Loire)



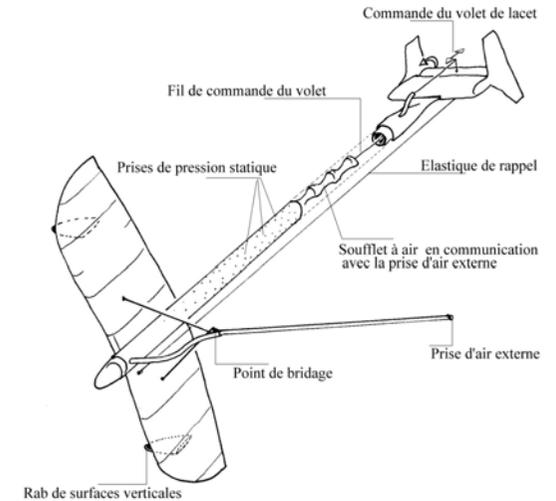
Modèle N°0 Pilotable 2 fils

J'ai construit deux modèles d'aile à poumons. Le modèle N°1 a servit à balayer au maximum le champ des configurations possibles avec des expérimentation s'étalant de septembre 99 à janvier 2000. Le N°2, entrepris depuis début mars 2000 est une première optimisation ayant pour objectif une fiabilité propre à la navigation en aile d'eau.

## Modèle N°1

### Parti général.

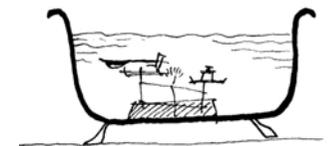
une aile de brute (taillée dans un skate) pour tenir vaille que vaille, très compacte, peu fine mais puissante: envergure: 23cm, allongement: 3, épaisseur relative: 15%. La structure de liaison à l'empennage sert de fuselage au soufflet dont le diamètre suffisant a été estimé à 1cm. Le fuselage est un cylindre de 1,4cm de diamètre avec un nez et une jupe qui se démontent.



### Hydrostatique.

La première construction s'est faite à la hâte, sans devis de masse et avec un fuselage en tube acier. En conséquences, l'hydrostatique de lacet très largement «sortante» n'était corrigible qu'avec un monstrueux nez en plomb et une hydrostatique d'ensemble très négative donc pas intéressante.

Avec un tube alu, ça va beaucoup mieux et je vais pouvoir commencer à jouer avec des carottes de plomb dans le bois de l'aile.



Ma baignoire: Bassin N°4, pour la pesée archimédienne

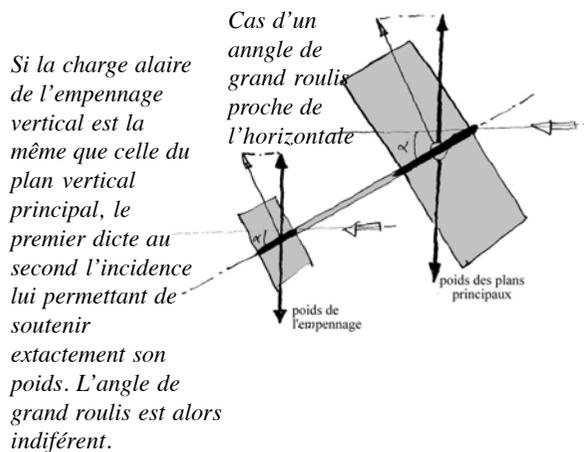
D'un point de vue strictement théorique, plus la vitesse augmente, plus les effets de l'hydrostatique disparaissent (pour mon aile non plombée, ils disparaissent dès 1,5 m/s). C'est en partant de ce constat que j'en suis arrivé à me dire, dans un premier temps, qu'il ne fallait pas trop s'en soucier. Mal m'en a pris, j'ai passé de longues séances d'expérimentation à essayer de détecter ailleurs la cause de

comportements bien indésirables! Dans la pratique (c'est à dire en vol tracté ou dans un courant), la vitesse instantanée est très irrégulière et tombe souvent dans les basses vitesses où l'hydrostatique a son mot à dire. Et il suffit alors de quelques demi secondes... L'aile s'oriente alors différemment et lorsque la vitesse revient, elle repart dans une direction indésirée telle que le rattrapage n'est pas toujours possible ou induit une oscillation catastrophique. Simple, mais ce n'est qu'après plus d'un mois et demi d'expérimentations que j'ai pu enfin faire le constat certain suivant: **l'hydrostatique est le prélude indispensable à l'hydrodynamique**, c'est la main invisible qui «lance», la rampe de lancement du déflecteur dont la régulation dynamique est tout d'abord impuissante.

Un bon modèle devra avoir une hydrostatique générale proche du neutre car sinon, en cas d'arrêt total, le lacet se trouvera perturbé par un flux apparent de descente ou de montée archimédienne. On préférera évidemment une hydrostatique légèrement positive, mais celle-ci a, de toutes façons, de grande chance de s'inverser à une profondeur donnée, à cause de la compression du poumon. Quand a une neutralité totale, chacun sait qu'elle n'est possible qu'en trichant... donc impossible.

L'équilibre hydrostatique du lacet doit être horizontal si l'hydrostatique est neutre. Sinon, l'équilibre du lacet doit corriger la tendance. En fait, il faut appliquer la règle suivante: La charge alaire

apparente de la surface *verticale* de l'empennage doit être la même que celle des surfaces verticales principales. Cette règle s'applique également aux cerf-volant à empennage. Elle est facilement compréhensible quand on fait l'hypothèse que l'incidence du plan vertical de l'empennage est la même que celle du plan vertical principal (voir schéma).



L'équilibre hydrostatique du roulis doit, pour sa part, se trouver le plus proche possible du grand roulis de route. S'il est différent, les accélérations provoqueront toujours des déviations de trajectoires car le lacet se sera adapté au déséquilibre de faible vitesse. l'hydrostatique du roulis doit donc être dissymétrique et pose le problème du changement d'amure. On peut cependant envisager un ballastage automatique par un fluide lourd (mercure) le long de l'envergure de l'aile.

#### Bridages

J'ai essayé deux types de bridage. Le bridage souple en *dyneema* (polyéthylène) n'est pas fiable car la variation d'allongement inévitable des nœuds qui le composent provoque de désastreuses variations dans la position transversale du point de bridage.

Il faut donc se reporter sur un bridage en corde en piano, mais le réglage de la position longitudinale du point de bridage n'est pas aisé.

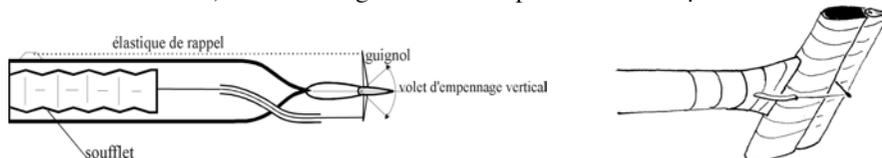
On peut avoir intérêt à dissocier le point de bridage du tangage et celui du roulis (comme c'est le cas dans la dernière version du modèle). En effet, la hauteur de bridage du roulis permet de jouer sur la puissance du lacet sur l'embarquée (voir chapitre II-D p 53), tandis que celle du bridage permet de jouer sur la stabilité de tangage et sur le comportement en remontée de fenêtre.

#### Surfaces verticales principales.

Elles servent à créer l'embarquée par une action sur le lacet (voir chapitre II-C). Le dièdre de l'aile est l'équivalent d'une surface verticale. Je calcule la surface équivalente par une simple projection de l'aile sur le plan longitudinale vertical. Pour le modèle N°1, il s'est avéré insuffisant et il a fallu ajouter différentes surfaces de winglets avant de trouver la bonne surface totale. Plus la surface verticale augmente, plus l'embarquée est réactive, moins la stabilité passive est importante.

### Systèmes de pilotage .

La mécanique du volet est la plus simple possible, le soufflet est relié au volet par un fil souple qui est mis en tension par un élastique de rappel lui-même relié sur l'autre coté du volet. J'ai essayé un système plus compliqué avec liaison rigide du soufflet jusqu'au volet (et système élastique de rappel en amont: compression de l'air du soufflet clos) mais il a le gros défaut de présenter un surplus de frottement.



J'ai expérimenté pendant plus d'un mois un soufflet relié à l'atmosphère par un tube remontant le long du fil. Par ce système, on peut obtenir une grosse puissance du soufflet. En revanche, les fortes différences de pressions pouvant régner au niveau des peaux (> 1m) complexifient le problème de l'étanchéité. D'autre part, la prise d'air peut inopinément se transformer en prise d'eau... Enfin, la perte de charge due à la respiration dans le tube pose des problèmes de temps de réaction.

Pour ces dernières raisons, je suis ensuite passé à un soufflet en pseudo liaison avec l'atmosphère. C'est à dire qu'au bout du tube il n'y a pas un accès direct à l'extérieur mais un ballon gonflé à faible tension de surface générant une faible surpression interne. Cependant le ballon (il s'agissait en fait d'un préservatif), du fait de sa nécessaire faible paroi, était fragile et avait la méchante tendance à exploser en cas d'immersion prolongée.

J'en suis finalement arrivé à un réservoir rigide d'air en bout du tube. Avec ce système, les différences de pressions sur les peaux du soufflet ne sont jamais très fortes (elles dépendent de la tension de l'élastique de rappel), les entrées d'eau en bout de tube sont impossibles et l'élasticité de l'air me permet une progressivité dans la commande qui faisait jusque là quelque peu défaut (voir paragraphe sur la réactivité).

### Réglage de la profondeur.

Il peut se faire sur différents points:

- la tension de l'élastique de rappel.
- La longueur des guignols de commande sur le volet.
- l'état de pliage initial du soufflet.
- La compression initiale de l'air (dans le cas d'un soufflet clos.)

En jouant sur ces mêmes points, on peut régler dans une certaine mesure le «marnage» de la commande, c'est à dire le différentiel d'altitude entre les deux commandes maximales de lacet.

### Réactivité, progressivité, stabilité verticale et problème de pompage.

la réactivité est liée à la courbure de la trajectoire (pour une action donnée de l'empennage). Elle est dépendante de la géométrie du déflecteur: surfaces verticales principales, hauteur du point de bridage mais aussi incidence générale du plan porteur.

La progressivité désigne l'évolution du volet d'empennage en fonction de la profondeur. Elle est liée à la notion de *marnage* de commande. Un volet très peu progressif provoque le débattement complet du volet pour une faible variation d'immersion. A l'extrême, il est en *tout ou rien*. Les réglages de la progressivité sont: la longueur initiale de l'élastique (plus elle est grande, moins c'est progressif, quelle que soit la valeur de la tension neutre), la longueur des guignols, la position de leur tête par rapport à l'axe du volet et enfin, le volume du soufflet clos.

Le pompage est le propre d'un mobile dont l'action d'autorégulation n'est pas auto-contrôlée. La trajectoire du mobile croise la ligne neutre avec un certain angle au lieu de la tangenter (ce qui suppose d'être doué d'anticipation: un captage en avance de phase).

La stabilité verticale désigne la capacité du déflecteur à revenir à l'immersion d'équilibre lorsqu'il est soumis à une perturbation externe (cavement du mobile tracteur en bout de fil ou turbulence de l'écoulement).

Les facteurs favorisant le pompage sont ceux qui provoquent un retard dans l'information de profondeur par rapport à celle du plan porteur principal.

- frottements du mécanisme de commande.
- position aval de la prise de pression statique.

Mais aussi:

- Faible progressivité.
- Forte réactivité.

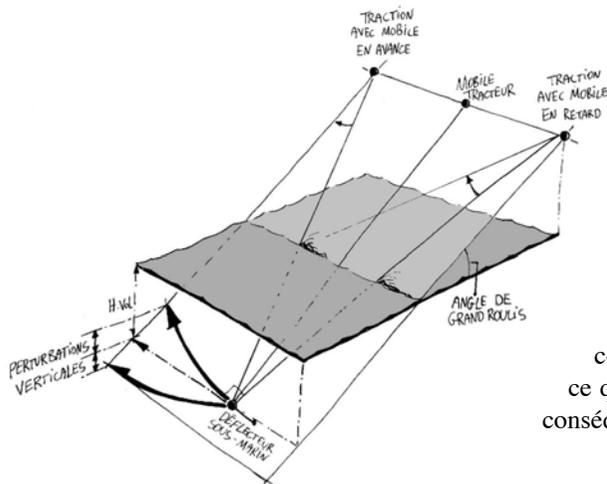
Généralement, je joue sur les deux derniers facteurs (augmentation de la progressivité et diminution de la réactivité) pour compenser une déficience des deux premiers. Mais cela au détriment de la stabilité.

Pour le cas présent (modèle N°1), les deux premiers facteurs ne sont pas du tout favorables (soufflet peu puissant avec forte friction sur les parois du fuselage, prise de pression statique en aval du plan porteur), si bien que la *progressivité* et la *réactivité* ont dû être réglée de telle sorte que le déflecteur est verticalement très *fragile*.

#### *Perturbations verticales par cavement du mobile tracteur.*

Ce problème se retrouve particulièrement dans une configuration d'aile d'eau dont les oscillations d'ensemble dans le plan horizontal sont fréquentes. Une brutale traction du mobile tracteur en retard (le déflecteur aérien, dans le cas de l'aile d'eau) provoque l'équivalent d'une «remontée» de fenêtre (accélération sur trajectoire circulaire)

avec composante verticale d'émersion; il arrive un point où la perturbation est suffisamment brutale pour que la commande de lacet n'ai pas le temps de corriger entièrement, et le déflecteur s'éjecte. Si le mobile est en avance lors de sa brutale traction (ce qui est plus rare), la «remontée» de fenêtre a alors une composante verticale d'immersion; ce qui ne porte généralement moins à conséquences.



Plus l'angle de grand roulis est grand, plus le déflecteur est verticalement sensible aux accélérations en cavement du mobile tracteur. Et on peut être tenté de prévoir un transfert de la commande du lacet vers le tangage, avec action exclusive sur le tangage pour un grand roulis de 90°. Dans la pratique, la régulation de l'immersion par une action sur le tangage (l'incidence) n'est pas efficace, elle ne fait que reculer le bord de la fenêtre et l'augmentation de la force de traction connaît une limite (la vitesse n'augmente pas forcément). De toutes façons pour un grand angle de grand roulis (c'est à dire un voilier très peu fin au portant), la configuration avec déflecteur sous-marin entièrement immergé n'a plus tellement d'intérêt et ne vaut pas une bonne vieille coque de planning dont la régulation d'altitude, même avec un cerf-volant est simple, immédiate et efficace (voir chapitre IV-A p74).

#### *Les protocoles d'expérimentation.*

Il y a eu trois types de lieux:

tout d'abord, la **Loire**. L'opérateur est situé immobile sur un ponton et jette le déflecteur dans le courant. Malgré son confort apparent, ce protocole présente bon nombre d'inconvénients. La Loire charrie des tas d'objets flottants non identifiés risquant d'endommager le déflecteur. La forte turbidité rend difficile l'appréhension du comportement du déflecteur invisible. Le champ de vitesse possible n'est pas très grand (selon l'heure et le coefficient de la marée, la vitesse du courant varie entre 0 et 1.5 m/s). La relativement forte turbulence de l'écoulement rend difficile la décomposition des causes de perturbation de trajectoire.

Les essais en **Erdre** permettent de travailler plus sereinement, avec une plage de vitesse plus grande (entre 0 et 3m/s, voir 5m/s avec un vélo) et un écoulement parfaitement laminaire. En effet, l'Erdre offre de quai en pierre de plus de 50 m de long parfaitement dégagé et avec un courant nul, le terrain idéal pour les expérimentations en «vols» tractés.

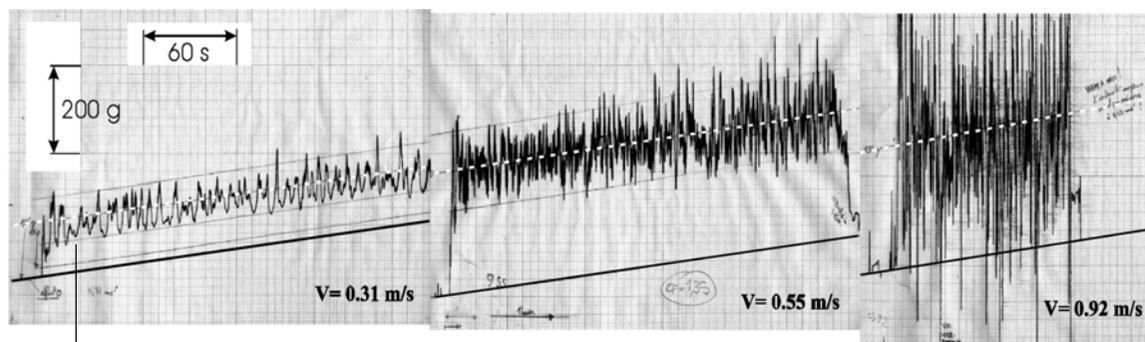
Cependant la turbidité de l'eau n'est pas meilleure que sur la Loire. Les essais finaux en **bassin de circulation** de l'école centrale ont permis de résoudre ce dernier inconvénient. Le champ de vitesse possible varie entre 0 et 1,2m/s car au-delà la turbulence déjà forte devient trop importante. Mrs Marichal et Samson m'ont permis

d'utiliser gracieusement le bassin pendant 4 jours. J'y ai pu effectuer des mesures précises de la traction du fil (à l'aide d'un capteur piézorésistif), une séance de photo et de vidéo. Grâce à ces outils j'ai mis en évidence les grosses lacunes du modèles N°1 ainsi que leur causes.

En visionnant la vidéo il m'est tout d'abord apparu clairement qu'une cause principale du pompage vertical était le captage de la pression statique en aval du plan porteur principaux provoquant un retard d'information de près de 3cm d'altitude soit un total de 6 à 7 cm si ajoute les frottements du mécanisme.

Il s'est ensuite avéré que le réglage de l'incidence avait toujours été trop fort, à la limite du décrochement (près de 15° avec un coefficient de force proche de 1.4). La trop forte incidence provoque une certaine instabilité au tangage qui est accentuée dans l'écoulement turbulent du bassin. Les graphes de traction m'ont mis sur la piste et les photos et la vidéo l'ont confirmé.

L'instabilité horizontale semble imbriquée avec la verticale, et dans ce jeu, la forte variation de la traînée du tube rentrant et sortant de l'eau ne semble pas innocente.



droite d'origine des forces de traction (incliné à cause de la dérive électrique du capteur)

*Le déflecteur travaille à près de 15° d'incidence. C'est pourquoi, à 0,55 m/s, le coefficient moyen de la résultante est de 1,35 . Au delà de 0,9m/s, le déflecteur décroche fréquemment, ce qui abaisse le coefficient moyen à 0,8 .*

*On voit très bien sur le graphe les oscillations de la traction dues aux oscillations en tangage, elles-mêmes dues à la trop forte incidence du déflecteur*

Ces découvertes avaient déjà ébranlé mon respect pour le modèle N°1, respect qui devait finalement s'écrouler dans des conditions tragiques lorsque je l'abandonnai malencontreusement sous l'eau de l'étang de Vioreau, lors d'un réglage de routine avant une tentative de navigation autonome. J'ai finis par le retrouver le lendemain grâce à du matériel de plongée, mais c'était trop tard, j'avais déjà entrepris mon deuil.

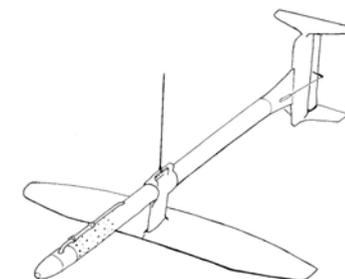
### Modèle N°2

Sa topologie permet une amélioration notable sur trois points principaux: la finesse, la stabilité et la fiabilité.

- Il n'y a plus de tube remontant jusqu'à la surface car le réservoir rigide d'air est compris dans le fuselage nécessairement plus gros.
- Les frottements du mécanisme ont encore été diminués grâce à un soufflet plus court dont l'hydrostatique est quasiment neutre. Les frottements totaux ne provoquent alors plus qu'un retard de 3cm dans l'information d'immersion (0.5 cm pour les patins teflon du soufflet, 1,5 cm pour le fil de commande dans sa gaine et 1cm pour l'axe du volet).

Pour donner un ordre d'idée, le soufflet que j'ai initialement réalisé pour ce modèle, sur la même principe que l'ancien, provoquait par son frottement sur l'intérieur du fuselage, un retard supplémentaire de l'ordre de 8 cm!

- Le captage de la pression statique se fait à 15cm en amont du plan porteur, ce qui permet une anticipation d'information. En comptant le retard par frottement, il s'avère que l'immersion du plan porteur et l'action correspondante sur le lacet sont instantanées. Du coup, le pompage est quasiment inexistant, et on peut se permettre forte réactivité et faible progressivité, donc très bonne stabilité. Pour donner un ordre d'idée, lors d'un «vol» tracté en course à pied le long d'un quai, Pierre a été incapable de faire sortir le déflecteur malgré toutes ses gesticulations effrénées.



système avec réservoir d'air dans le prolongement du soufflet. frottement total équivalent à 10cm d'eau



système avec réservoir d'air amexe et soufflet lesté. frottement total équivalent à 3cm d'eau.

- La position longitudinale du point de bridage peut être fixée de façon fiable, précise et facile. De même, l'empennage d'incidence est facilement réglable. On peut choisir à l'avance l'allure générale de la navigation autonome de l'aile d'eau.
- La surface verticale supplémentaire au dièdre sert en même temps de bridage rigide. Du coup, on fait l'économie des bridages en plusieurs points à bases de cordes à piano et autres fils encombrants.

Si le modèle N°2 est couplé avec le *Lozange* de  $1\text{m}^2$  (cerf-volant décrit au prochain paragraphe), on obtient une aile d'eau très stable dont la vitesse eau n'est que de 0.45 fois la vitesse du vent réel. Me voici donc en possession d'un cerf-plongeant dont l'objectif peut être l'expérimentation sereine des comportements statiques de l'aile d'eau en navigation. D'après les expériences déjà réalisées, je peux affirmer que le système de pilotage de l'immersion est viable. De plus, l'information d'immersion par une captation de la pression statique est largement satisfaisante, au moins pour des vitesses inférieures à 3m/s.

La prochaine étape sera de valider l'information d'immersion par captation de la pression statique à des vitesses plus élevées. Il faudra tout d'abord prévoir un autre système élastique de rappel de la commande du volet (l'élastique actuel étant dans l'écoulement, il a tendance à être étiré par le frottement avec l'eau). Il faudra compenser le volet mais surtout peaufiner les prises de pression statique afin qu'elles induisent un minimum de perturbations par rapport à la vitesse amont (à 10m/s, une perturbation de 1% entraîne une imprécision de 10cm d'immersion, à 15m/s: 22cm, à 20m/s: 40cm et à 25m/s: 60cm!). Les expérimentations pourront se dérouler par tractage en voiture le long d'un quai.

reste l'inconnu du comportement vibratoire du fil à grande vitesse et sa répercussion sur la finesse globale et sur le vol de l'aile.

Si le cerf-plongeant N°2 était validé à grande vitesse, le couplage avec un *lozange* homothétique de  $15\text{m}^2$  permettrait à la vitesse eau

d'atteindre le double de celle du vent réel. commencerait alors l'expérimentation de l'aile d'eau à véritablement grande vitesse...

Car de l'autre côté du fil, le déflecteur aérien a lui aussi fait son petit chemin et son comportement est déjà tout à fait sain pour une navigation dans un vent moyen laminaire.

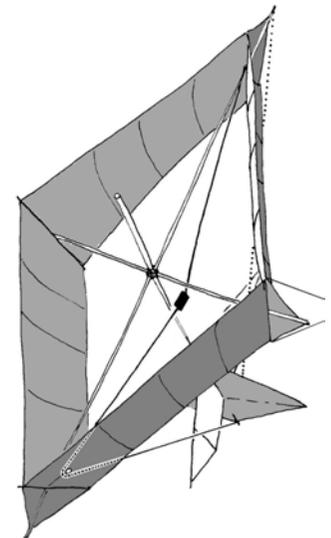
## B- cerf-volant fin à grand roulis régulé

De l'autre côté du fil, le déflecteur aérien a lui aussi fait son petit chemin et son comportement est déjà tout à fait sain pour une navigation dans un vent moyen laminaire.

Habitué du pilotage de cerfs-volants, s'abstenir de penser; sinon vous allez me dire que les cerfs-volants statiques (à un fil) ne peuvent servir de cerf-volant de traction qu'aux allures portantes, en zénith de fenêtre.

Mon cerf-volant à peson (*aujourd'hui tout à fait opérationnel pour des vents pas trop turbulents entre 5 et 18 nœuds*) est la preuve du contraire.

L'objectif atteint est une autorégulation du grand roulis par référent gravitaire de sorte qu'associé à un déflecteur sous-marin régulé en immersion, l'ensemble aile d'eau est stable dans le plan vertical passant par le fil (*voir chapitre III-A p60 pour le déflecteur aérien et chapitre IV-A p75 pour l'équilibre dans le vertical du fil*).

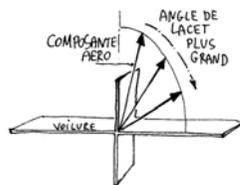


## théorie pour le cerf-volant statique (rappel) voir chapitre III-A p57

### Hypothèses

- 1- Un déflecteur suspendu à un seul fil, sans déformation pilotée du bridage.
- 2- Déflecteur du type à empennage suffisamment éloigné de la déflexion du flux par le plan porteur
- 3- Plan porteur avec surface «verticale» de formes quelconques (dièdre, winglets, etc.), centrée sur le centre de portance.

### Loi de comportement



On peut considérer que la force aérodynamique résultante du plan porteur et de sa surface «verticale» passe toujours sur l'axe longitudinal du cerf-volant ( voir hypothèse n°3) quelque soit l'angle de lacet du moment.

Plus l'angle de lacet est important, plus la force est déviée vers une direction parallèle à l'envergure. La plupart du temps, les surfaces «verticales» étant inférieures aux surfaces portantes, la résultante diminue en intensité à mesure que l'angle de lacet augmente.

Pour un angle de grand roulis donné, la composante d'embarquée correctrice est constante quelle que soit la force du vent grâce à l'effet régulant de l'empennage pesant (voir schéma p120).

### Bridage dissymétrique.

On a déjà vu qu'une simple dissymétrisation du bridage conduisait déjà à un angle de grand roulis différent de la verticale. Le seul problème, c'est que cet angle diminue dangereusement à mesure que la vitesse du flux augmente (voir chapitre III-A p 59). Une solution à ce problème est de prévoir une déformation continue du bridage en fonction de la vitesse, de sorte que l'angle reste constant.

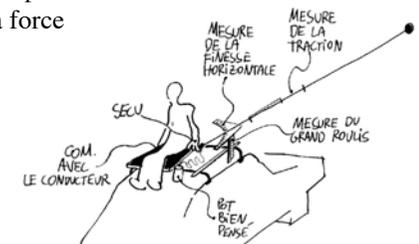
En pratique, pour un simple bridage deux points, il suffit qu'une des

brides soit pourvu d'un élastique très spécialement dosé. La confection d'un tel élastique n'est pas une mince affaire et se fait par tâtonnement.

Marche à suivre pour la conception d'un tel élastique.

Par un jour parfaitement calme, sans feuilles qui bougent, se munir d'une voiture et de son conducteur, monter sur son toit, munir son cerf-volant d'un bridage indéformable avec une forte dissymétrisation donnée et mesurée. Faites progressivement accélérer la voiture. Si tout est normal (tenir le cerf-volant à au moins 4m de la voiture), le cerf-volant diminue progressivement l'angle de son grand roulis (en partant d'un angle quasiment vertical). Il suffit alors de faire stabiliser la vitesse de la voiture au moment où l'angle escompté est atteint, par exemple: 30° (il ne faut pas viser des angles trop faibles: voir chapitre III-A p59). Il ne reste plus qu'à mesurer la force de traction dans le fil principal ou dans la bride du bas (celle qui sera pourvue d'un élastique).

Répéter l'opération pour différents bridages, en diminuant progressivement la dissymétrie (reprendre le bridage du bas au niveau de son point d'accroche sur le cv). Le soir, en rentrant chez soi, reporter les points de mesures sur un graphique avec en abscisse: la longueur de la bride du bas et en ordonnées: la force de traction. Lisser la courbe et confectionner par tâtonnement un élastique composite (à l'aide de plusieurs brins de longueur et de tension initiale variables) aboutissant à cette loi de déformation. Ouf ! Ça y est, le cerf-volant est prêt.



*Le principal problème du protocole vient de l'utilisation d'un dynamomètre dont les effets dynamiques d'allongement perturbe considérablement le vol du cerf-volant.*

Le lendemain, il vole bien pendant le premier quart d'heure, puis ça se détériore, et deux jours plus tard, les brins d'élastique ont tellement vieilli et changé de caractéristiques qu'il faut les remplacer!...

Conclusion: le cerf-volant statique à dissymétrie variable n'est pas très pratique.

## Fonctionnement du peson capteur de verticalité

**Principe (rappel)** voir chapitre III-A p59-60

On dispose d'un cerf-volant statique dont le grand roulis a été rendu indifférent grâce au centre de gravité placé sur le foyer des surfaces «verticales».

Un système pesant dont la masse est relativement faible (nommé peson) produit sur une commande, une force qui varie en fonction de son inclinaison par rapport à la verticale. La commande est reliée à un volet de l'empennage de lacet de sorte que le grand roulis est régulé.

### Le peson externe au bridage

Le bras lesté.

Beaucoup de gros défauts font que j'ai abandonné sa réalisation (pas d'auto-contrôle de l'action, pertes d'information dans l'allongement des fils et dans les différentes poulies de renvoie...). Chapitre III-A p60.

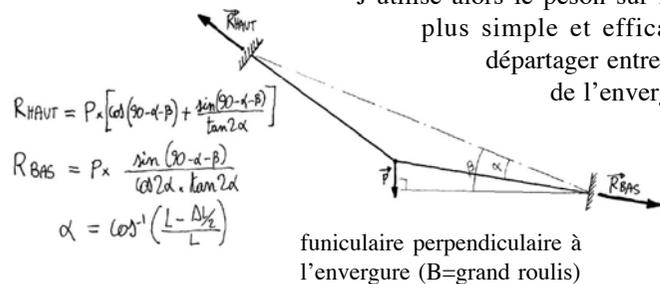
Le funiculaire.

Il permet une importante force de commande et une relative simplicité de mise en œuvre. Par rapport aux précédents, il a le principal avantage de diminuer le nombre de poulies intermédiaires avant la commande directe.

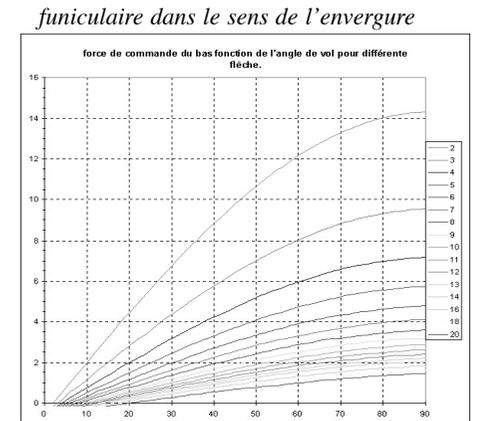
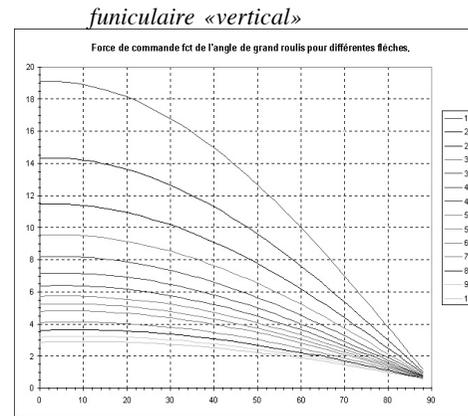
### Le peson interne au bridage.

L'intérêt d'un système interne au bridage est bien évidemment pratique: le cerf-volant peut être treuillé et manœuvré sans gêner son vol régulé.

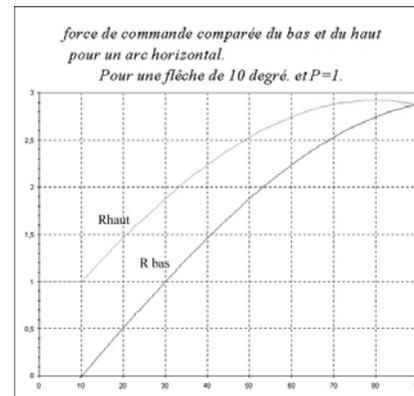
J'utilise alors le peson sur funiculaire sera car c'est le plus simple et efficace. Il ne reste plus qu'à départager entre un funiculaire dans le sens de l'envergure ou perpendiculaire.



Force de commande d'un funiculaire-pilote en fonction du biais et pour différentes valeurs de flèche du funiculaire



Il apparaît clairement que le funiculaire dans le sens de l'envergure est le plus à même d'assurer la régulation des petits angles de grand roulis (il procure le plus de différentiel de force pour un différentiel de grand roulis donné).



Dans le sens de l'envergure, c'est l'extrémité inférieure du funiculaire qu'il faut préférentiellement relier à la commande d'empennage.

### Auto-contrôle de l'action

Le système à peson interne au bridage permet d'envisager un auto-contrôle particulièrement efficace de l'action. Pour s'en rendre compte, il suffit de voir voler le cerf-volant que j'ai réalisé sur ce

*pilotage radiocommandé et laborieux d'un speed wing...  
... vive l'autorégulation!*



mode: il est capable de rejoindre tout seul sa position d'équilibre à partir de n'importe quel point de la fenêtre.

Le fonctionnement est enfantin: lorsque le cerf-volant entame une remontée, le changement du lacet est interprété par le funiculaire comme une augmentation de l'angle de roulis, de sorte qu'il diminue son action de remontée. La remontée le long

de la fenêtre ne peut donc pas être violente et encore moins conduire à une autorotation.

De même, lorsque le cerf-volant entame une descente le long de la fenêtre, le changement dans l'angle du lacet devrait être naturellement interprété par le funiculaire comme un plus grand angle de grand roulis, d'où problème: c'est tout le contraire d'un auto-contrôle! Ce problème est facilement résolu par un blocage vers l'avant de la flèche funiculaire (dans le cas du *Lozange*, c'est la traverse «verticale» qui assure le rôle du blocage).

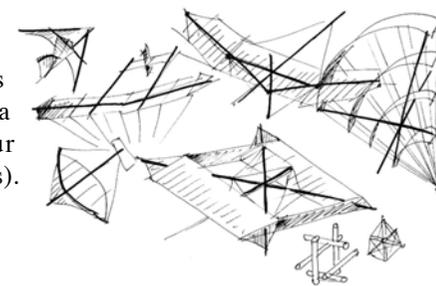


### Structure et forme du *Lozange*

Pour un tel cerf-volant statique autorégulé par une commande sur l'empennage, l'enjeu est une structure rigide et légère (inférieur à 2.5 g/dm<sup>2</sup> pour un bon fonctionnement dans des vent un peu irréguliers et pour faciliter les manœuvre de lancement, la structure doit être autostable, c'est à dire que la voilure doit garder toute sa forme même en cas de total déventement.

J'ai d'abord confectionné des cerfs-volants de formes connues tels que le Speedwing et le Cody pour me faire la main et pour finalement me rendre compte qu'il fallait dessiner soi-même la structure idéale pour mon programme bien particulier.

Ma fainéantise manuelle a largement prolongé la phase de conception et calmé mon ardeur à la consommation de baguette et de tissu. J'ai alors aboutis a une forme qui jusqu'à maintenant m'a toujours porté satisfaction (excepté pour l'empennage qui a été remodelée à cinq reprises). J'ai appelé ce cerf-volant, *lozange*.



### C- cerfs-volants statiques peu fins

Ces cerfs-volants sont inaptes aux allures de finesse, donc aux vitesses importantes. Cependant, il ont la propriété intéressante de présenter une régulation simple et naturelle de l'angle de traction par rapport à l'horizontale qui est égal à la finesse du cerf-volant. Dans le seul but de valider l'équilibre de l'aile d'eau dans le plan vertical du fil (sans avoir à me coltiner le problème de la régulation du grand roulis d'un cerf-volant fin), j'ai réalisé des cerfs-volants statique peu fins.

Le *flowform*.



C'est un statique souple bien connu, d'une bonne stabilité et dont les plan sont en libres circulation sur Internet. Cependant, malgré son allongement inférieur à 1 et son creux redoutable, il est encore trop fin pour moi (je cherche près de 60° de finesse alors que le *flowform* en a 20). La solution peut sembler simple: il suffit d'essayer différentes

manières d'augmenter sa traînée par rajouts de parachutes en tous genres. En pratique, de nombreux problèmes semblent s'opposer à une telle réalisation.

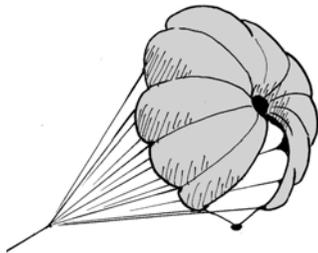
Dans le soucis de ne rajouter qu'un minimum de poids, j'ai tout d'abord réalisé une simple toile s'enfilant dans le bridage de telle sorte qu'elle présente sa surface approximativement face au vent. Ce que j'avais négligé, et dont je m'aperçut très vite, c'est que cette toile allait se comporter comme un autre cerf-volant, mais dont le

travail est opposé à l'autre si bien que les deux se répondent mutuellement dans une oscillation spectaculaire mais inintéressante pour l'objectif initial. Quoi qu'il en soit, ce fut un avant-goût particulièrement effrayant de se que pouvait donner deux déflecteur intersuspendus.

J'ai ensuite plus classiquement accroché des parachutes sur le fil en dessous du point de bridage. Cela donne satisfaction pour des vents biens laminaires. Si tel n'est pas le cas, l'ensemble a également une méchante tendance à l'oscillation (à cause des variations relative de traction entre le parachute et le déflecteur) conduisant à l'irréparable fermeture du *flowform*.

Quand à des parachutes accrochés en aval du déflecteur, sur son bord de fuite, leur poids non négligeable provoque une action non désirable sur le lacet et l'incidence du *flowform*.

#### Le parachute volant.



Devant toutes ces difficultés, j'ai inversé mon approche. Plutôt que d'essayer de rajouter de la traînée à un engin relativement fin, pourquoi pas rajouter un peu de portance à un engin très peu fin. En effet, un déflecteur très peu fin a de grande chance d'être plus stable et plus tolérant.

Dans le cas d'un parachute, il existe un moyen très simple de rajouter de la portance: il suffit de retirer une des laizes et de laisser une fente à sa place. Mon parachute volant n'est rien d'autre qu'un parachute fendu en bas et lesté au niveau de la fente afin d'apporter le référent gravitaire pour la régulation par le lacet. La largeur de la fente est variable afin de pouvoir régler à l'avance la finesse, donc l'angle du fil par rapport à l'horizontale. Le lest est lui aussi variable et doit être augmenté au fur et à mesure que le vent augmente (ce qui n'est pas facile à faire une fois le cerf-volant en l'air!).

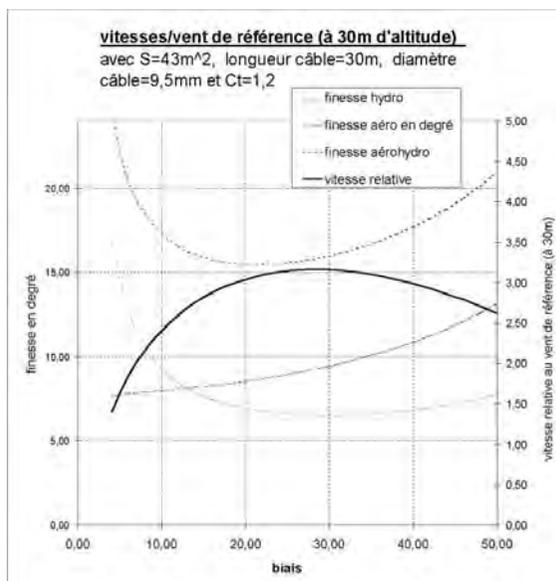
L'intérêt principal du *parachute volant* est de ne jamais se fermer, se retourner ou autre. Sur un sol rigide, il finit toujours par redécoller tout seul. Il est donc particulièrement apte à passer aux travers des turbulences.

Mais, le domaine d'utilisation privilégié de ce cerf-volant reste quand même le vent faible à modéré. En effet, son principale défaut se fait de plus en plus sentir à mesure que le vent augmente: il est doué

d'une très faible stabilité aérodynamique de lacet, si bien que l'ensemble, après un stade de lacet rythmique de plus en plus aigu, finit dans des loopings incontrôlés et autre scratch sur le sol. Si on réussissait à donner au parachute volant (par un artifice quelconques) une bonne stabilité aérodynamique de lacet, on obtiendrait sans aucun doute un cerf-volant d'une fiabilité extraordinaire. Malheureusement, le problème semble plus topologique qu'artificiel; plus la finesse est faible, moins le lacet peut être aéro-stabilisé. A l'extrême, pour une finesse nulle (parachute tirant dans l'axe du vent), le lacet devient totalement indifférent à l'écoulement.

## D- petit programme de prédiction

Tout mon travail repose sur des résultats en termes de vitesse. L'idéal pour le valider serait donc la construction d'un engin compétitif. Bien évidemment cet idéal reste encore relativement lointain, en attendant, l'estimation de la vitesse peut être très grandement simplifiée en posant comme hypothèse qu'il n'y a aucune vague générée. J'ai ainsi montré page 78 et 79 comment on peut facilement construire la polaire entière d'une aile d'eau (hypothétiquement sans masses) à partir des simples polaires des deux déflecteurs (traînée du fil compris) et d'un abaque que j'ai réalisé à cette fin. J'ai également montré que sans aller jusqu'à la polaire entière, une simple idée de la finesse maximale de chaque déflecteur permet l'estimation de la performance maximale par une simple relation trigonométrique. Le principe reste toujours le même mais le calcul devient de plus en plus fastidieux à mesure qu'on commence à introduire d'autres paramètres, tels que la sustentation dynamique d'une masse et d'autres variables, telles que l'angle de grand roulis, la profondeur du déflecteur sous-marin, la longueur totale du câble, le clapot maximal autorisé, la géométrie des déflecteurs, etc. Dans le but de mener des petites études d'optimisation géométrique, j'ai donc réalisé un petit programme de calcul sur Excel. A la page 81, on



trouve un exemple de feuille de résultat. Les abaques de prédiction de vitesse en aéro-sustentation (p92) sont également réalisés à partir de ce programme.

Le graphique ci-contre est un exemple d'utilisation du programme pour l'optimisation de l'aile d'eau. Les variables de géométrie des déflecteur et de profondeur sont bloquées. On fait alors varier le biais. Un grand biais permet d'aller chercher plus de vent en altitude et de minimiser la surface mouillée du câble, en contrepartie, il diminue la finesse horizontale globale. Dans cet exemple le biais optimal en terme de vitesse par rapport à l'eau est: 28°

Je donne ici le contenu des lignes du programme en langage Excel pour le cas particulier du près optimal pour le VMG.

ETUDE DE FINESSE DE L ENSEMBLE  
HYDRO SUSPENDU

AU  
PRES

AU PRES

vitesse max envisagée (nds)

40,00	41,00
-------	-------

en m/s

20,40	C2*0,51
-------	---------

**Géométrie du foil d'eau**

finesse max profil (allongement infini)	70	71
(°)	0,82	ATAN(1/C5)*57,3
coef de portance profil de finesse max	0,32	1,32
incidence du plan	5,1	(10+(20/C12))*C7
coef de traînée profil de finesse max	0,005	C7/C5
pointe de portance	0,7	0,7
surface foil (m <sup>2</sup> )	0,55	0,55
allongement effectif (m)	3,3	3,3
envergure (m)	1,347	(C12*C11)^0,5

surface fuselage	0,385	0,7*C11
surfaces stabilisatrices	0,096	0,25*C11*(1-1/C12)
coef traînée des stab et fuselage	0,03	1,03
coef traînée foil 3D	0,014	C9+(C7^2/(3,14*C12))
coef traînée stab et fuselage / surface foil	0,026	C16*(C15+C14)/C11
coef traînée totale / surface foil	0,045	C17+C18+C9
finesse propre du foil plongeant	7,07	C7/(C19)
(°)	8,05	ATAN(1/C20)*57,3
coefficient de force hydro	0,323	(C19^2+C7^2)^0,5
charge alaire de l'aile en finesse et à 40nds: (daN/m <sup>2</sup> )	6 859	510*C22*C3^2/10

<b>biais réel du fil / horizontal à l'interface (°)</b>	27,00	28,00
---	-------	-------

**effets du câble immergé**

tension câble de finesse max (daN)	3 735	510*C7*C11*C3^2/10
force max dans le câble (daN)	8 171	510*C11*C10*C3^2/10
coefficient dynamique de sécurité	1,50	1,50
limite élastique du fil (daN/mm <sup>2</sup> )	100	100
diamètre du câble (mm)	12,50	(4*((C29*C30)/(3,14*C31)))^0,5
profondeur de l'aile (% de l'envergure)	100	101
(m)	1,35	C33*C13/100
amplitude max du clapot: hauteur entre bout d'aile et surface (m)	0,67	(C13*C33/100)-C13/2
longueur mouillée câble (m)	2,97	(C34)/SIN(C25/57,3)
surface frontale câble (m <sup>2</sup> )	0,03708	C36*C32/1000
Ct carénage câble / surface frontale	0,150	1,150
Ct carénage câble / surface foil	0,01011	C38*C37/C11
<b>finesse foil +cable (sans biais)</b>	5,8	C7/(C19+C39)
(°)	9,82	ATAN(1/C40)*57,3

**effets du biais**

pente de la portance pour finesse foil + câble	27,43	ASIN(SIN(C25/57,3)/COS(C41/57,3))*57,3
<b>finesse projetée du foil plongeant sans</b>	6,28	C20*COS(C44/57,3)
(°)	9,05	ATAN(1/C45)*57,3

<b>finesse globale max hydro.</b>	5,13	C7*COS(C44/57,3)/(C19+C39)
(°)	11,03	ATAN(1/C48)*57,3

ETUDE DE FINESSE DE L ENSEMBLE AERO  
SUSPENDU



vitesse apparente air (noeuds)	25,9	$C123/0,51$
vitesse apparente air (km/h)	47,6	$C123*3,6$
vitesse apparente eau (m/s)	8,2	$C123*C109$
<b>vitesse apparente eau (noeuds)</b>	<b>16,1</b>	<b><math>C126/0,51</math></b>
cap vrai (°)	58,2	$45+C100/2$
<b>VMG (noeuds)</b>	<b>8,5</b>	<b><math>C127*\text{COS}(C128/57,296)</math></b>
vent réel à l'altitude de l'aile (m/s)	6,9	$C126/C110$
vent réel à l'altitude de mesure (m/s)	5,0	$C130/C106$
<b>vent réel à l'altitude de mesure (noeuds)</b>	<b>9,8</b>	<b><math>C131/0,51</math></b>

#### annexe masse d'ensemble et dynamique

le but du jeu est de mettre le pilote sur le centre de gravité de l'engin afin de ne pas augmenter l'inertie de rotation

corde moyenne (m)	5,7	$C60/C59$
épaisseur rel	0,17	0,17
epais. absolue (m)	0,97	$(C60/C59)*C136$
surface profil moyen (m <sup>2</sup> )	3,90	$C135*C137*0,7$
volume (m <sup>3</sup> )	67,05	$C138*C60$
<b>masse d'air (kg)</b>	<b>86,50</b>	<b><math>1,29*C139</math></b>
masse totale aile (pour l'inertie)	<b>125,07</b>	<b><math>C140+C119</math></b>
poids du CP (kg) d'après modèle 30cm	<b>21,74</b>	<b><math>(C13/0,3)^3*0,24</math></b>
position du centre de gravité sans lest (%)	14,81	$C142/(C142+C141)*100$
idem sans compter masse d'air (%)	36,04	$C142/(C119+C142)*100$
distance du CG (sans lest) à l'aile (m)	<b>11,84</b>	<b><math>C143*C70/100</math></b>
idem sans compter masse d'air (m)	<b>28,83</b>	<b><math>C144*C70/100</math></b>

## La phrase du jour

Parfois, il vaut mieux secouer le cocotier que d'y monter.

Mais ça ne coûte jamais d'essayer.

# Les lectures qui ont compté

Celles sans qui cet exposé aurait été différent.

(Jeu spécial: Les illustrations non personnelles sont tirées de quelques unes de ces lectures, remplacez-les !)

## ■ Les publications (pas d'ordre)

### Voiliers, voiles, dérives et océans

C.A. Marchaj, *Aéro-hydrodynamics of sailing*, 2<sup>nd</sup> édition, édition Adlard Coles, 1988.

P. Gutelle, *Architecture du voilier, tome I*, Editions Maritimes et d'Outre-Mer.

Les Glénans, *Le cours des Glénans*, édition du seuil, 1990.

Servaas van der Horst, Nop Velthuisen, *Stunt Kites*, éditions Toth, traduit en français en 1995.

C.A. Marchaj, *Sail performance, theory and practice*, Adlard Coles Nautical, 1996

François Beaudoin, *Bateaux des côtes de France*, édition des 4 seigneurs.

D. Charles, *Chasseur de futur, 1870 1914*, EMOM

P. Gutelle, *Voiles et gréements*, EMOM, 1973

Daniel Charles, *Histoire du yachting*, Arthaud, 1997.

Claude et Jacqueline Briot, *Clippers français*, Chasse Marée - Armen, 1995.

J.M. Finot, *Eléments de vitesse des coques*, Arthaud.

Voiles et voiliers, *Ors série Météo*, 1995.

Bertrand Chéret, *Les voiles: comprendre, régler, optimiser*, Ed. Chiron, FFV, 1997

D. Paulet, D. Presles, *Architecture Navale, connaissance et pratique*, éditions de la Vilette, 1998.

Bernard Coat An hay, *Plus vite que le vent à la voile*, auto-édité, 1996.

Frank Bethwaite, *High Performance Sailing*, Mc Graw - hill Companies, 1996.

### Divers

G. Bachelard, *L'eau et les rêves*, José Corti, 1994

G. Bachelard, *L'air et les songes*, José Corti, 1994

M. Tournier, *Le miroir des idées*, Mercure de France, 1994

R. Raletz, *Théorie élémentaire de l'hélicoptère*, Cepadues-editions, 1988

### Vers l'aile d'eau

J. G. Hagedoorn, Paul Ashford, *Ultimate Sailing, The Hapa Revisited*, Edited by Tony Kitson, 1995.

Chris Sands, Peter Lynn, *Ultimate Sailing II, Kite Traction*, Edited by Tony Kitson, 1995.

B. et C. Roeseler, C.P. Burgess, T. Schmidt, D. Costes, *Ultimate Sailing III, Kite sailing*, Edited by Tony Kitson, 1995.

Didier Costes, T. Schmidt, R. Glenross, D. et B. Legaignoux, Peter Lynn, *Ultimate Sailing IV, progress with Kite and Hapa*, Edited by Tony Kitson, 1995.

Schmidt, Barkla, Ellison, *windmills sails and kites*, AYRS, 1983

J. Norwood, *21<sup>st</sup> Century Multihulls I and II*, AYRS, 1996

## ■ Les articles (pas d'ordre)

### Précisions complémentaires

- M. Lecteur, *La turbulence développée*, la recherche N°139, 1982
- M. Aucher, *La cavitation*, la recherche N°168, 1985
- D. Savitsky, P.W. Brown, *Procedures for hydrodynamics evaluation of planning hulls in smooth and rough water, marine technologie*, Marine technologie, vol 13, 1976.
- D. Charles, *Multicoques, de drôle de machines*, [www.therace.org](http://www.therace.org)
- M. V. Peteghem, V. Lorient-Prévoist, Un trimaran pour gagner, [www.therace.org](http://www.therace.org)
- D. Stinton, G. Taylor, *Wing in ground effect*, Ship and boat international, 1995.
- B. Dill, *Land Sailing, Rules of the Speed Games*, Catalyst, 1999.
- A. Sézénat, *La voile à toute vapeur*, voiles et voilier, décembre 1999
- Word Sailing Speed Record Committee, *Record Rules*, [www.dcss.org](http://www.dcss.org)
- Roeseler, Schmidt, Culp, Long, Wallace, *The Case for Transport Sail Craft*, [www.dcss.org](http://www.dcss.org)
- ### Défecteurs aériens, sous-marins
- A. Herskovitz, P. Thômé, *ails plongeantes, rapporte de synthèse*, EAN, ANVAR, 1995
- J.P. Budillon, *Historique du vol libre*, [www.ffvl.fr](http://www.ffvl.fr)
- FFVL, *Histoire du cerf-volant*, [www.ffvl.fr](http://www.ffvl.fr)
- Gérard Clément, *Sauvetage en mer et cerf-volant*, Cerf-Volant Passion n°16, 1998

J. M. Mc. Michael, *Micro Air Vehicles - Toward a New Dimension in Flight*, [www.arpa.mill](http://www.arpa.mill)

D. Babinet, *l'atlantique en cerf-volant (Nicole Van de Kemhove)*, Cerf-Volant Passion n°4, et Voiles et voiliers n°292, 1995

J.L. Noir, *De nouvelles voies pour le cerf-volant*, bateaux n°478, 1998.

Roeseler, Culp, *Kitesailing Progress*, Sail Tech - 89, 1989.

D. Culp, *On Kite Tugs*, [www.dcss.org](http://www.dcss.org)

J. Millecamps, *Les cerfs-volants scientifiques*, Cerf-volant Club Miztral, 1996.

D. Lord, *Stunt Kite Design*, [www.techline.com/~lord](http://www.techline.com/~lord)

Peter Lynn, *Kite Sailing Review*, [www.peterlynnkites.co.nz](http://www.peterlynnkites.co.nz) 1999.

## ■ Les cours (CEAAN 1997, 98, DPEA 98,99) déterminants dans ma façon de travailler.

P. Lucas, *approche global par chiffres et statistiques de la conception*.

Marichal, *introduction à la mécanique des fluides*.

A. Belval, *Mécanique du Navire*.

Laval Jeantet, *Hydrodynamique, résistance à l'avancement*.

Chéret, *aérodynamique des voiles*.

P. Thômé, *histoire du yachting*

A. Herskovitz, P. Thômé, *introduction à la méthodologie expérimentale*.

■ **Les revues** dont l'exploration fréquente des images (mais peu des textes!) m'est une intarissable source d'inspiration.

*Voiles et voiliers* de 1990 à 1998, collection personnelle.

*Le yacht* de 1905 à 1925 et les numéros de 1898, 1947, 1956 et 1961, collection du Musée du Château des Ducs de Bretagne

*Aérial*, n°8,10,11,12 et 13.

Cerf-volant passion n°23,28 et 32

■ **Les brevets** (ordre chronologique) La plus amusante de toutes mes lectures.

- CHATELAIN Pierre, Navire tracté par cerf-volant via un bras articulé, EP0853576 22 07 98
- CAMPBELL Andrew, Embarcation volante pilotable, WO98/17530 du 30-04-98
- REINHARD Andreas, aile pneumatique adaptative pour aéronefs a voilure fixe, WO98/03398 du 29 01 98
- COSTES Didier, Flotteur latéral pour bateau à voile au à cerf-volant, 9712875 ou 2769577 du 15 10 97
- BAKKER Thomas, Engin de navigation à grande vitesse, EP0784563 ou WO96/11840 du 23 07 97
- United Technologies Corporation, Deployable wing, WO 95/14609 du 01 06 95
- COSTES Didier, chien de mer, 9415428 ou 2728533 21 12 94
- ROESELER William G., Kiteski, us 5366182 22 11 94

- SKYSTREME, cv gonflé du type Sled, WO 94/23812 1994
- LEGAIGNOUX Bruno, brides 4 fils pour Wipika, 9214731 ou 2698847 03 12 92
- DURAND Gilles, hydravion/voilier, 9213523 ou 2697794 10 11 92
- BERTHOMME Sylvain, aile à caisson gonflables, WO 90/05663 31 05 90
- HADZICKI Joseph, Révolution, WO 90/03917 19 04 90
- LEGAIGNOUX Dominique et Bruno, Wipika, us 4708078 24 11 87
- EDWIN DES SNEAD, multicoque tétraédrique, us 4708075 24 11 87
- EDWIN DES SNEAD, multicoque tétraédrique, us 4671198 09 06 87
- CAMERON Robert, inflatable airfoil, EP 0222263 20 05 87
- PIZZEY John, multicoque foiler de merde, WO 86/07325 18 12 86
- DURET Jean, Paravane, WO 86/05757 09 10 86
- GQ DEFENCE EQUIPEMENT, clapet anti-retour pour aile à caisson, UK 2170156A 30 07 86
- LEGAIGNOUX Dominique et Bruno, Wipika, WO 86/02902 22 05 86
- BELLINGER Paul, Wing Sail à symétrie bi latérale, UK 2160165A 18 12 85
- DUXBURRY Patrick, engin de plage loufoque, allemand 3248049 A1 28 07 84
- LACHOVIEZ Christophe, Parapente à commande d'ouverture Fr 8401553 ou 2558 791 01 02 84
- SALAUN J.Y. machines à alignement aéro-hydro dont structure tétraédrique, fr 8303812 ou 2542 274 07 03 83
- RIVALLANT Pierre, parachute propulsif sustenté par ballon, fr 8303731 ou 2541964 04 03 83
- DAVID Culp, STEWART K., Surf amphidromique pour cv, UK 2130971A 01 12 82
- DUPLAN Julien, hydravion - voilier, fr. 8214824 ou 2532271 25 09 82
- SALAUN J.Y., premier engin à alignement aéro-hydro, fr. 8208398 ou 2526749 12 05 82

- LARMINAT (de) Paul, planche à voile volante, fr. 8200118 ou 2519311  
05 01 82
- WILFRIED Andrew, le Flexifoil, EP 0023137, UK 1928158 28 01 81
- SMITH Bernard, hydrofoil tétraédrique, us 4228750 21 10 80
- COSTES Didier, planeur aquatique, fr. 7835008 ou 2443378 08 12 78
- STRASSILLA Barre de contrôle pour parachute de traction, us 4127247  
28 11 78
- BRUBAKER Curtis, flyable hydrofoil vessel, us 4080922  
28 03 78
- Etudes et Fabrications Aéronautiques, voile à caisson et à fentes, fr. 7808664  
ou 2420481 24 03 78
- INSTITUT FR. du PETROLE, plate forme à capteur hydrostatique, fr.  
7809196 ou 2420478 24 03 78
- CHRISTOFFEL, Julius Jr., Manœuvrable, inflatable kite à deux lignes, us  
4036504 31 05 77
- Nom russe à dormir debout, parachute de traction à fentes, us 4013248  
22 03 77
- Mc CULLOH Mark, appareil de lancement de parachute tractif, us 3987746  
26 10 76
- SMITH Gordon, Self - launching glider (pour batman!), us 3966143  
29 06 76
- MANKAWICH Joseph, hydroptère, us 3802366 09 04 74
- TRACY Richard, winged sailing craft (aerostab. et aerosust.), us 3800724  
02 04 74
- SHUTT Sidney, High Speed Sailboat, us 3762353 02 10 73
- CHRISTOFFEL Julius, cv rigide deux lignes, us 3746286  
17 07 73
- TROMMDORFF, aile d'eau entièrement suspendue!, allemand 2313644  
1973
- SMITH Bernard, structure tétraédrique à "crochets" flottants, us 3631828  
04 01 72

- COSTES Didier, aile d'eau à plongeant perceur régulé par le poids, fr.  
1594395 10 12 68
- KINSEY Ernest, cv rigide deux lignes, us 3355129 28 11 67
- G.Q.PARACHUTE COMPANY LIMITED, Nasawing perfectionnée, UK  
30197/67, fr. 1570286 30 06 67
- MAY Bob, WILLIAM James, cv rigide deux lignes, us 3421722 13 04 67
- BARISH David, inventeur du parapente monoqueue, glide wing, us 3480238  
27 02 67
- NASON Henry, hydroptère sans masse, us 3286673 22 11 66
- COSTES Didier, chien de mer, fr. 1 494 784 18 05 66





Luc Armant,  
97, rue de coulmiers  
44 000 NANTES  
02 40 29 10 01  
[luc.armant@wanadoo.fr](mailto:luc.armant@wanadoo.fr)