

Hydrodynamique des coques de bateaux

Par Rémi P

Préambule :

Beaucoup d'entre vous se demande régulièrement si tel ou tel bateau est un skiff ?

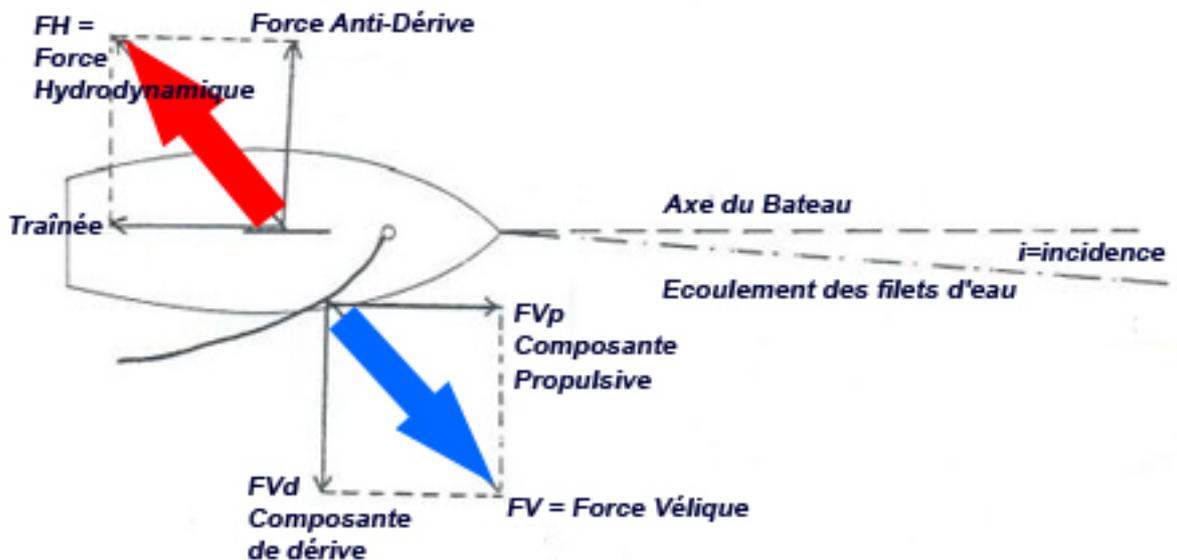
Si l'on ajoute un spi asymétrique sur un 505, obtient on un skiff ?

Surface de voile, couple de rappel, planning à toute les allures ?

Pour essayer d'y voir plus clair, je vais essayer de vous décrire le plus simplement possible quelques notions d'hydrodynamique sur les coques de nos bateaux.

On peut très bien être performant sans comprendre ces notions. Les maîtriser ne vous transformera pas en coureur imbattable (j'en suis la preuve :-). Cependant j'espère que vous en trouverez de temps en temps quelques applications pratiques.

Les Forces en présence : (dans le plan horizontal)



- D'un côté, on a notre moteur : la force vélique (FV) créée par le vent dans nos voiles. Cette force est orientée perpendiculairement à la corde du profil de voile.

A part, plein vent arrière, elle ne sera jamais orientée totalement vers la proue, mais fera un angle avec l'axe du bateau qui peut dépasser 80° au près.

On peut bien sûr décomposer cette force en une force propulsive (FVp) orientée dans l'axe de la coque et une force perpendiculaire (FVd) qui va créer la gîte et la dérive.

- D'un autre côté, on a notre coque et ses appendices (dérive et safran), qui génèrent une force hydrodynamique totale (FH).

Ils vont générer la force antidérive (qui va nous permettre d'aller droit), mais hélas une traînée hydrodynamique qui va limiter notre vitesse.

Je vous propose donc d'approfondir, ces composantes hydrodynamiques.

Les Composantes de la traînée hydrodynamique :

On peut décomposer la traînée hydrodynamique en six éléments :
(Je reprend la décomposition de Bethwaite dans HPS)

- > La traînée de forme
- > La traînée de friction
- > La traînée de création de vague
- > La traînée induite de dérive
- > La traînée de braquage du safran
- > La traînée d'impact des vagues

Ce qui est intéressant c'est que en fonction des types de bateaux, des circonstances de navigation et des régimes, ces traînées vont prendre des importances relatives très différentes

Analysons donc ces composantes en détail.

A) La Traînée de forme :

Pour flotter notre bateau, il doit déplacer un certain volume d'eau.

A l'arrêt, grâce à notre copain Archimède, on sait que pour faire flotter notre bateau on va déplacer un certain volume d'eau. Le poids de ce volume d'eau correspond au poids du bateau.

Ainsi en terme marin, on ne parle pas du poids d'un navire mais de son déplacement.

Lorsque notre bateau se met en mouvement, il va falloir réellement déplacer ce volume d'eau (pour laisser passer le bateau). Essayons de mettre en évidence les paramètres de l'équation.

Intuitivement, on comprend facilement les points suivants :

1. *Le poids du bateau*
Plus le bateau sera léger, moins il faudra déplacer d'eau.
2. *La forme de la coque*
Pour un même volume déplacé, une forme profilée nécessitera moins d'effort, qu'un cube.
Toutes les ruptures dans l'écoulement de l'eau autour de "la forme" engendrent des tourbillons qui "consomment" de l'énergie lors de leur mise en mouvement.
3. *La surface projetée (frontale)*
Si vous déplacez votre main dans l'eau, entre une position tranche en avant, et paume en avant, la résistance sera très différente. La traînée augmente donc avec la "surface projetée".
4. *La vitesse*
Vous pouvez facilement marcher dans une piscine (ou la mer), mais essayez de courir et ça devient rapidement impossible. Quand la vitesse double, la traînée est multipliée par 4.



On retrouve donc la formule typique de la traînée dans un fluide : $T_f = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2$

L'influence de la forme étant dans le paramètre C_x

ρ : est la masse volumique du fluide

S : est la surface projetée

V^2 : le carré de la vitesse.

Comment donc minimiser la traînée de forme ?

Tout d'abord minimisez le poids et donc le volume déplacé ... cette phrase reviendra comme un leitmotiv tout au long de cet article.

Lorsque l'on dessine une coque, on peut influencer sur le C_x et la surface projetée.

L'optimum de forme vous le connaissez, c'est la forme de coque du skiff ...

... mais pas le skiff à voile, le skiff à aviron.



Les coques à faible traînée de forme, sont donc très allongées, le plus étroites possible et à fond semi cylindrique.

En voile également quand on regarde les bateaux optimisés pour une navigation en déplacement (voir plus loin les modes de navigation), on retrouve le même type de coque.

Les catamarans ont également adopté des formes de coques très similaires.



Pour le moment, on est quasiment à l'opposé des formes de coque de nos skiffs ...

Continuons donc notre examen des autres traînées.

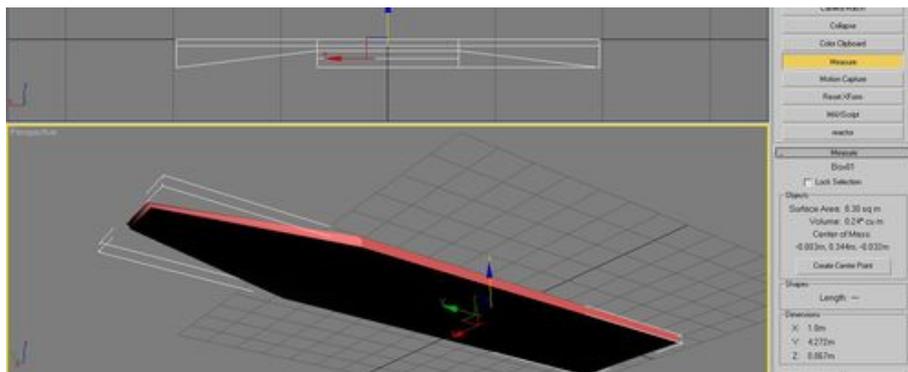
B) La Traînée de friction : (ou Skin Drag en Anglais)

A l'interface entre la coque et l'eau se produisent un certain nombre de phénomènes qui engendrent la traînée de friction. Tant que l'écoulement est laminaire, la couche limite est fine, mais dès qu'une turbulence apparaît, elle devient plus large et la traînée de friction augmente.

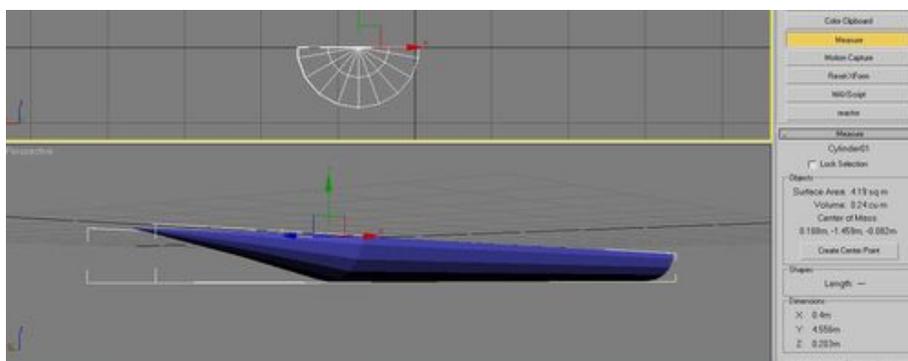
Comme pour la traînée de forme, passons en revue les paramètres qui vont rentrer en jeu :

1. L'influence de la forme de coque

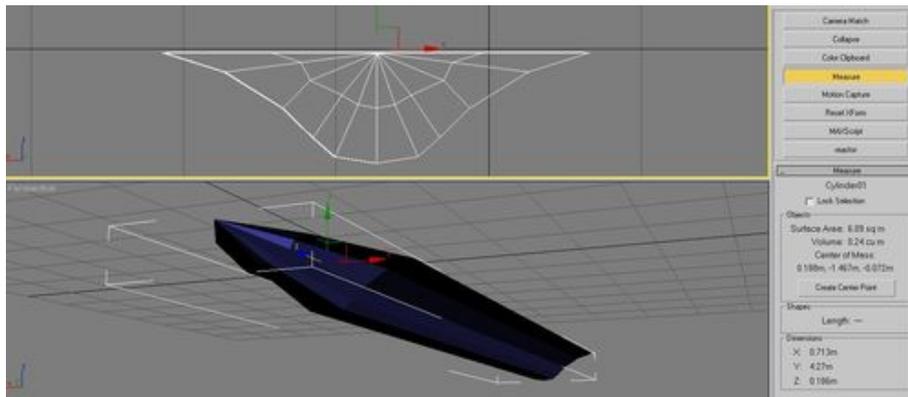
- Plus la surface en contact avec l'eau est grande plus on aura de traînée. Cette surface s'appelle la surface mouillée. Cependant pour flotter notre bateau a besoin d'un volume immergé égal à son poids.
(Entre 160 et 250 litres pour nos skiffs)
En fonction de la forme de coque, ce volume va résulter en une surface mouillée très différente.
- Voici la partie immergée de trois coques extrêmes de 14 pieds réalisées sous 3DSMax
Ces trois coques on un volume de 240 litres, on mesure la surface mouillée
 - La coque n°1 : ultraplate (4,27m * 1,0m * 0,067m)
Pour un volume de 240l on a une surface mouillée de 4,44m²



- La coque n°2 : semi-cylindrique étroite (4,27m * 0,4m * 0,203m)
Pour un volume de 240l on a une surface mouillée de 2,56m²



- La coque n°3 : tulipée (4,27m * 0,713m * 0,186m)
Pour un volume de 240l on a une surface mouillée de 3,30m²



- Les mesures effectuées sur le modèle de coque du B14, nous donnait des surfaces mouillées variant de 3,34m² (assiette plate) à 2,79m² (en enfonçant la proue dans l'eau)
- De nouveau on voit que pour un déplacement donné, on obtient une surface mouillée qui peut varier quasiment du simple au double. De nouveau la forme fine, étroite, et semi cylindrique donne les meilleurs résultats. La coque réelle du B14 est proche de la coque tulipée, mais se rapproche des excellentes performance de la semi-circulaire si on navigue en enfonçant la proue, avec une assiette à piquée.

2. Le Poids

- Bien entendu chaque variation de poids engendre une variation du déplacement et donc de la surface mouillée. Pour chacune de nos coques type, j'ai fait varier le déplacement de 15%.
 - La coque plate a vu sa surface mouillée augmenter de 3%
 - La coque tulipée de 3.5%
 - La coque semi-cylindrique de 7.8%
 - Le B14 de 9%
- Il faut faire attention dans l'analyse à prendre les variations relatives avec précaution vs variations absolues.
La coque plate semble bien supporter le sur-poids, mais avec une performance de départ bien médiocre.
En valeur absolue les variations sont de 0.15 à 0.25m².
- Cependant comme la traînée de friction est proportionnelle à la surface mouillée, on peut en conclure que 30kg d'écart entre deux bateaux vont correspondre à une augmentation de plus de 10% de la traînée.

3. L'état de surface de la coque

- Comme je l'ai mentionné au début de ce paragraphe, la traînée de friction augmente drastiquement avec l'épaisseur de la couche limite qui se produit dès que l'on passe en régime d'écoulement turbulent.

Il est donc vital de retarder l'apparition du régime turbulent, ce qui se fait par des formes avec des courbures les plus douces possibles (surtout vers la proue), mais aussi avec un état de surface le plus lisse possible.

4. La Vitesse

- Comme pour la traînée de forme, la traînée de friction va augmenter avec le carré de la vitesse.

On obtient finalement une formule très proche de la traînée de forme :

$$T_s = \frac{1}{2} C_f \rho S V^2$$

L'influence de l'état de surface, des conditions d'écoulement (Reynolds) étant représentés par le paramètre C_f (je ne vais pas rentrer dans le détail de ce paramètre)

ρ : est la masse volumique du fluide

S : est la surface mouillée

V^2 : le carré de la vitesse.

Après étude de la traînée de forme et de friction, un type de coque est très performante : fine, allongée, semi-cylindrique... Donc rien qui justifie le développement des skiffs actuels.

En ce qui concerne les valeurs de ces traînées, Bethwaite fourni dans HPS-2, les valeurs à 5kts pour :

- Un 29er, avec un équipage type junior de 205kg de poids total
- Un B14, avec un équipage type de 250kg de poids total

Les deux bateaux ont une traînée de friction identique de 3.5kg, par contre la traînée de forme du 29er est de 4,3kg, et celle du B14 de 5,2kg

Ces traînées étant proportionnelles au carré de la vitesse, à 2.5kts elles sont $\frac{1}{4}$ plus faible ...

Et à 10kts, quatre fois plus grande ? ... en cata peut être mais pour la plupart des autres bateaux, pas du tout ... because ... ce qui suit.

C) La Traînée de création de vague : (ou *Wave making Drag en Anglais*)

PS : J'avais déjà abordé cette traînée dans un post du forum (l'assiette de votre skiff), je reviens ici plus en détail.

Lorsqu'il avance, un bateau crée un système de vague.

Pour des raisons de simplification, je ne vais pas rentrer dans le détail, mais nous focaliser sur la vague d'étrave.

Sans entrer dans les détails d'hydrodynamique, sachez qu'il y a une relation entre la vitesse d'une vague et sa longueur d'onde (distance entre deux crêtes).

Ainsi plus le bateau va vite plus sa vague d'étrave va se creuser et s'allonger.

Il y a donc une vitesse où la longueur de la vague sera égale à la longueur du bateau.
C'est ce qu'on appelle la vitesse de carène

Si V_c désigne la vitesse de carène,
et L_f la longueur de vague en pied (feet), on a : $V_c = 1,32 * \sqrt{L_f}$
ou L_m la longueur de vague en metre, on a $V_c = 2,39 * \sqrt{L_m}$

Tant que le bateau va moins vite que sa vitesse de carène, il va naviguer à plat, avec plusieurs vagues le long de sa coque (image du haut).

Lorsque l'on atteint la vitesse de carène, le sommet de la deuxième vague se trouve donc juste sous la proue. Le bateau est toujours à plat (image du milieu).

Au dessus de la vitesse de carène, le sommet de la 2eme vague se trouve derrière le bateau.
La proue va donc s'enfoncer et se trouver plus basse que l'étrave. (image du bas).
Le bateau cabré va donc être ralenti.



Bow wave system below hull speed (2 periods)



1 bow wave at hull speed, with the length of the boat



Over hull speed, the second crest is aft of the transom

Note the evolution of the pitch as the speed increases:
the boat noses up due to dynamic lift

A ce moment la traînée de création de vague devient importante.
Plus le bateau tente d'accélérer, plus il cabre, et plus la traînée augmente.

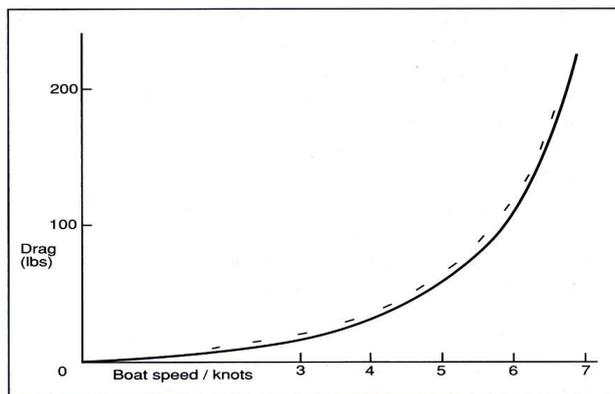


Fig 10.3 Drag curves of Gymcrack

Solid curve – Drag with clean bottom
 Dashed curve – Drag with foul bottom
 (Drags measured at full scale)
 Waterline length 23.77ft
 Weight 6560lb

Suivant les cas l'augmentation est proportionnelle à la vitesse puissance 3, voir puissance 4 dans certains cas.

Plus le déplacement est grand plus la vague est importante (où l'on parle encore du poids ...)

Ainsi pour un quillard traditionnel par exemple dès que la traînée de vague apparaît, elle devient rapidement 10 fois supérieure aux traînées de forme et de friction qui prévalait aux vitesses inférieures.

Voici ci-contre la traînée pour un quillard de 7m et 3 tonnes. Sa vitesse de carène est de 6.3kts, il lui sera quasi impossible de dépasser 7kts

Ranger photographié à sa vitesse maximale de carène (la poupe est posé sur la deuxième ondulation de la vague d'étrave). On est proche des 15kts



Pour aller plus vite, une seule solution : construire un bateau plus grand.
Ainsi si l'on regarde les records de traversée de l'Atlantique en monocoque :

- Charlie Barr en 1905 sur la Goelette Atlantic de 56m (flottaison) à 10.2 kts de moyenne ($V_c=18$ kts)
- Bernard Tapie en 1988 sur Phoecea (r- 21c) de 66m (flottaison) à 15 kts de moyenne ($V_c=19.4$ kts)
- Robert Miller en 2005 sur Mari Cha IV (hors regle 21c) de 43m à 12.6 kts de moyenne ($V_c=15.7$ kts)
Ceci dit quand on regarde la photo ci-dessous de Mari-Cha, on voit que Mari-Cha semble s'affranchir de la trainée de vague !



04_00829 © Th.Martinez, , FRANCE , 27/02/04
"Mari-Cha IV" offshore north coast of Brittany (FRA), on her way to Antigua (West Indies). 25 knots of wind.

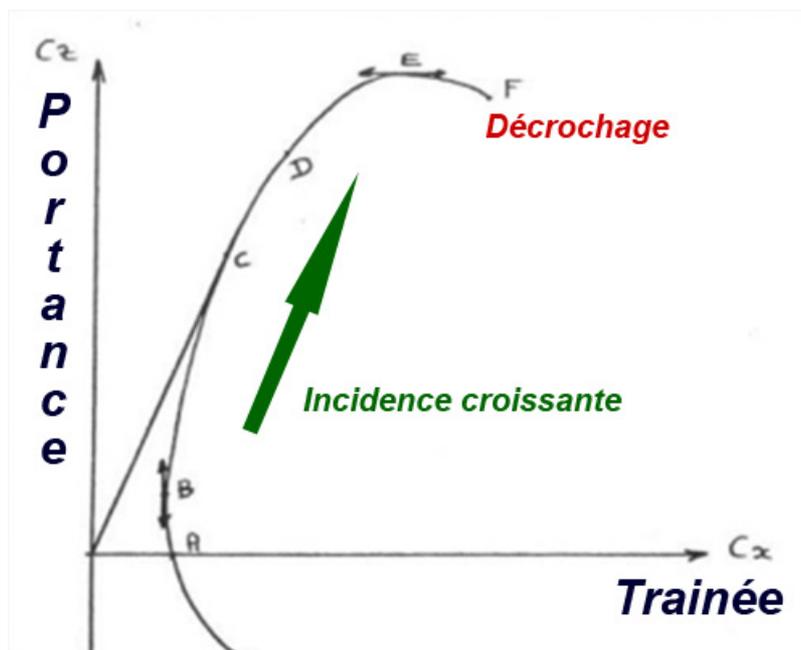
Donc après examen des trainées de forme de friction et de création de vague nos skiffs de 14-18 pieds devraient être limité à 5-6 kts ... heureusement qu'un certain Uffa Fox c'est pensé sur le problème en 1933. Nous le verrons plus loin.

D) La Traînée induite de dérive :

Comme indiqué dans "les forces en présence" notre force vélique n'est généralement pas orientée dans l'axe du bateau. La coque et surtout la dérive vont donc produire une force "anti-dérive" pour permettre au bateau d'aller droit. La dérive, comme tout foil, produit une portance (anti-dérive) mais aussi une traînée induite. La coque elle aussi va traîner quand elle se déplace en crabe (de quelques degrés).

Contrairement aux autres traînées, la traînée induite de dérive va diminuer avec la vitesse.

Non pas par sa formule (qui inclut toujours V^2), mais par son principe de fonctionnement que voici :



Le schéma ci-dessus représente la polaire d'un foil de surface S , comme la dérive. On retrouve les formules similaires aux traînées de forme :

- La portance (force anti-dérive) $P = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2$
- La traînée induite $T_i = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2$

La relation entre C_x et C_z est représentée par la polaire.

Ce ratio varie avec l'incidence.

Les points caractéristiques intéressants sont les suivants :

- Le point B, où la traînée est minimale.
Même si la portance est faible, on a pas forcément besoin de beaucoup d'anti-dérive.
Par exemple à haute vitesse, ou au portant quand la force vélique est bien alignée.
Ce point est également celui où l'on pourra relever la dérive (diminution de S dans la formule)
- Le point C, est le point de finesse max, ou le ratio portance/traînée est optimal.
C'est le point de fonctionnement par exemple au près
- Le point E, est le point de portance maximale qui sera utilisé lorsque l'on veut caper (au détriment de la vitesse : faire une bouée, sortir un adversaire etc etc ...)
- Le point F, représente le décrochage ... le bateau est en travers, la dérive décroche, la traînée monte en flèche.

En fonctionnement normal, nous nous baladerons entre les point B et E.

Plus la vitesse est grande, et l'allure abattu, plus on descend sur la courbe (en réduisant la traînée induite), plus la vitesse est faible et on cherche de "l'appui sur l'eau", plus on monte sur la courbe avec augmentation de la traînée induite.

Ainsi à basse vitesse pour produire la force antidérive, le foil (la dérive) va devoir travailler avec une grande incidence (angle entre la corde du profil de dérive et l'écoulement des filets d'eau).
Ce qui amplifie le problème c'est que quand la dérive travaille à forte incidence, l'angle entre l'axe du bateau et les filets d'eau est important (on avance en crabe), et la traînée de la coque monte en flèche.

Je me souviens d'une régata multi-série par 15-20kts de vent, où en cinq on a enroulé sous le vent juste derrière un paquet de Laser ... on avait l'impression qu'ils avançaient complètement en crabe, comme pour nous barrer la route. En tout cas c'était très perceptible à l'œil nu.

Cette courbe polaire est spécifique à chaque profil de foil.
La difficulté en voile est de devoir choisir un profil pour des plages de vitesse importantes, mais aussi des incidences très variées suivant le régime de navigation.

Pour produire une portance aux grands angles d'incidence et basse vitesse, le profil optimal est normalement un profil épais (voir par exemple les ailes épaisses des avions anciens volant lentement, ou des avions à décollage et atterrissage court (ADAC ou STOL) .
Malheureusement les dérives des bateaux rapides sont plutôt prévues pour travailler à plus grande vitesse et faible incidence (profil fin).
Dans les conditions de basses vitesses nos profils travaillent donc hors de la plage optimale (le point de finesse max où le rapport portance/traînée est maximal).

Comment réduire la traînée induite de dérive ?

- En accélérant le plus rapidement possible pour faire fonctionner la dérive à son incidence de conception. On retrouve la relance en sortie de virement de bord, et le décollage pour se sortir de la ligne de départ.

Vous vous demandez sûrement comment on choisit le point de la polaire où va fonctionner notre dérive ? En fait, cela se produit automatiquement, suivant le processus ci après :
Si l'on reprend nos équations, en simplifiant, on peut écrire que :
 $F_{Vd} \text{ (Composante de dérive de la Force vélique)} = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2$ (la force anti-dérive)
(En bleu les deux paramètres qui vont varier)

Si vous bordez votre voile, la force vélique bascule vers l'arrière, et donc la composante de dérive augmente. Le bateau va donc accroître sa dérive. L'incidence de la dérive (angle axe bateau - écoulement de l'eau) augmente, le C_z augmente jusqu'à ce que l'équation soit en équilibre. Bien sûr il y a un deuxième paramètre qui peut varier et ré-équilibrer l'équation : c'est la vitesse. Donc si votre bordé de voile génère également une force propulsive supérieure, le C_z n'augmentera pas nécessairement.

La solution la plus efficace pour diminuer l'incidence, et donc notre position sur la polaire, consiste donc d'abord à agir sur la vitesse (qui est au carré dans l'équation).
Si en sortie de virement par exemple, si l'on choque la GV, on diminue la F_{Vd} , et si on abat un peu, en privilégiant l'augmentation la vitesse, le C_z nécessaire va chuter (et donc la dérive retrouve rapidement son efficacité, à une incidence faible), on peut ensuite reborder sans risquer de faire augmenter rapidement l'incidence, mettre le bateau "en travers" voir décrocher la dérive.
Par vent fort on fait cela naturellement, à cause de la gîte (le temps de sortir au rappel ou au trap.), mais il faut faire encore plus attention par vent faible, où les vitesses sont faibles, justement à cause de cette traînée de dérive.

Plus un bateau a des appendices fins qui risquent de décrocher à basse vitesse plus il faudra soigner la relance pour faire disparaître rapidement la traînée de dérive.

Le pire étant quand la dérive décroche : la coque va alors travailler avec des angles de dérive importants qui traînent terriblement. Cette traînée étant extrêmement présente sur les coques fines type catamaran, surtout si elle sont sans dérive (coque à aileron)

- Plusieurs solutions ont été essayées dans les dernières décennies.

Par exemple la dérive orientable, qui permet de caler la dérive en lui donnant une incidence alors

que l'on garde la coque dans l'axe du déplacement (ce qui minimise la traînée de la coque).

Autre solution essayée sur les Class Américains le volet de trim à l'arrière du voile de quille qui permet de creuser, ou d'aplatir le profil suivant que l'on était en circling à basse vitesse, ou au contraire lancé à "pleine vitesse" ... enfin "pleine vitesse" pour un Class Américain de 25m représentant une vitesse de carène de 12 kts ...

La Traînée de braquage de safran :

Le safran comme la dérive est un foil qui porte lorsqu'il est braqué, mais va donc traîner également.

Contrairement à la dérive qui est conçue pour fonctionner à de faible angle d'incidence (<10°), le safran va généralement travailler vers 20-30°. On retrouve donc des profils plus épais (épaisseur relative rapportée à la longueur de la corde).

Ces profils décrochent tardivement (à plus forte incidence), mais ont l'inconvénient de générer une traînée importante, surtout au grand angles.

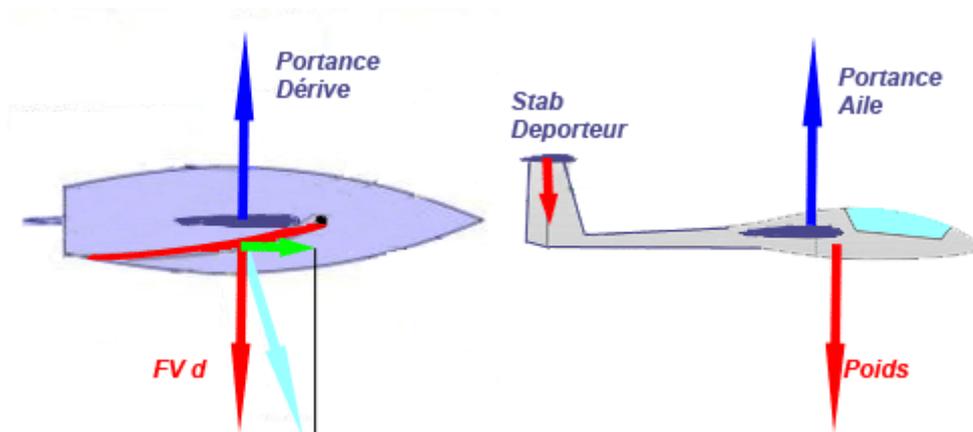
Attention donc aux forts coups de barre, aux braquages importants dans les manœuvres, (qui vont nous "monter" dans la polaire) , voir aux décrochages.

Généralement, au près, lorsque l'on navigue en ligne droite, il est admis que l'on doit aligner le centre de poussée vélique avec le centre de dérive, pour avoir un bateau neutre, ce qui permet de garder le safran centré, propre à minimiser la traînée de safran.

C'est presque vrai ;)

Pour complètement optimiser, allons faire un tour du côté de l'aviation.

Un avion a une problématique très similaire au bateau, et une conception très proche finalement :



La composante de gîte/dérive de la force vélique correspond au poids, la portance de l'aile à la portance de la dérive.

En général en aviation, on n'aligne pas exactement le poids et la portance pour des raisons de stabilité (que je ne développerai pas ici).

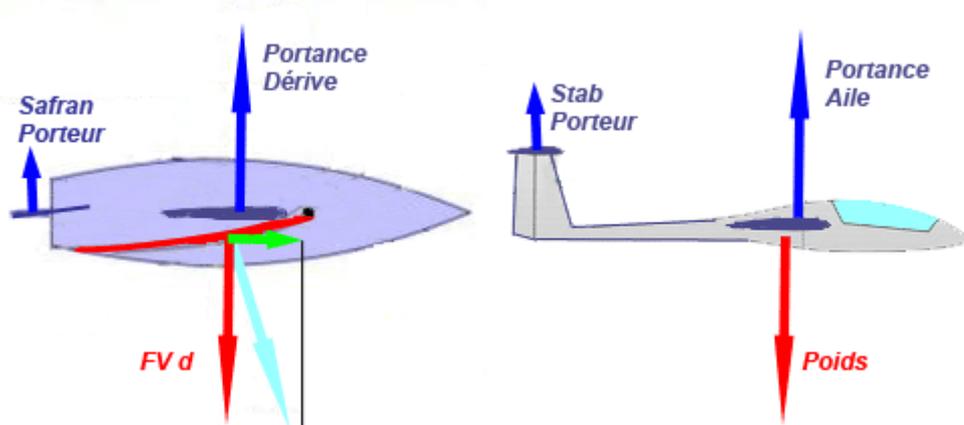
De plus, si l'aile décroche, l'avion va s'enfoncer en piquant du nez, ce qui va diminuer l'incidence et "raccrocher" les filets d'air, l'aile porte à nouveau, et on récupère le décrochage.

Cependant, on s'est rapidement aperçu sur les planeurs, que le fait de reculer le centre de gravité améliorerait les performances de plané. Aujourd'hui sur les gros porteurs, grâce au contrôle par ordinateur de la stabilité, Boeing et Airbus conçoivent maintenant des avions centrés arrière.

Ce faisant, la portance est partagée entre l'aile et le stab (ou plan fixe de l'empennage).

Pour ceux que ça intéresse, voir :

http://legacy.icao.int/icao/en/atb/atbworkshops/2006/workshopfuelemissions/Presentations/Anderson_ops_fr.pdf



Le problème en aviation est cependant un problème de sécurité, cette conception rend les avions instables (ce qui est compensé par le contrôle par ordinateur), et peut favoriser un décrochage queue basse (l'avion ne se remet pas en ligne de vol) ... la question se pose à propos d'un certain vol Rio-Paris ...

Pour notre bateau, pas de problème de sécurité, on peut donc **au près** (où le besoin de portance anti-dérive est maximal), régler notre centre vélique pour rendre notre bateau légèrement ardent. La barre sera donc angulée de 1-2° au vent (ce qui représente 2-3cm au vent en bout de barre).

Sans rentrer dans les détails, l'intérêt d'une telle configuration est renforcée par un autre phénomène, appelé downwash en aviation. Ce terme décrit la déviation des filets d'air vers le bas par l'aile principale. L'empennage travaille donc dans un flux d'air descendant. (un léger cèbré du stab va donc en fait réduire sa traînée).

Le même phénomène se produit sur nos bateaux, où la dérive dévie les filets d'eau sous le vent. Au niveau du safran, l'écoulement n'est donc pas dans l'axe du bateau. Un safran légèrement porteur trainera donc moins.

Avant de clore ce chapitre, je précise à nouveau que ce qui précède n'est valable que lorsque la dérive génère sa portance. Lorsque l'on va abattre et choquer en diminuant la Fvd, la portance anti-dérive nécessaire est moindre, et le safran sera aligné pour minimiser la traînée.

E) La Traînée d'impact des vagues :

La traînée d'impact des vagues (à ne pas confondre avec la traînée de création de vague décrite ci dessus), est mise en évidence par la différence de performance entre une navigation par eau plate, et sur un plan d'eau agité.

Les mesures de traînée de carène effectuée par Bethwaite (par remorquage de coque), sur un plan d'eau avec un clapot de 30cm montre un accroissement significatif de la traînée.

Cet accroissement est d'autant plus fort (en%) que la vitesse est faible.

Pour un dinghy de 14pieds, (ballast à 240kg poids total), remorqué face au clapot, à 2kts, la traînée augmente de 128%, à 4kts +46%, pour des vitesses supérieures l'accroissement se stabilise entre 15 et 12%.

Pour ce qui est de la navigation dans le sens des vagues, l'impact est moins important, sauf quand la vitesse du bateau dépasse largement la vitesse des vagues (cette dernière étant fonction de leur hauteur : 30cm=4kts, 1m=9kts ...).

Un autre facteur intervenant dans la traînée d'impact est la forme de la proue du bateau.

J'en ai fait la cruelle expérience en Fireball lors des internationaux 1987 au Val André (remportés par Ian Pinell). Par petit medium et clapot, le bateau n'avait rien à voir avec mon expérience de Méditerranée, on avait l'impression de planter des pieux.

Le Fireball est probablement un cas assez extrême, mais quand on regarde la population des dériveurs classiques, les entrées d'eau forment souvent un angle de 55°. Le Finn est remarquable avec un carène fine,

et un angle de 30°. Ses performances dans le clapot sont remarquable pour un bateau relativement lourd et peu toilé. Si l'on devait mettre en équation le phénomène, on utiliserait comme paramètre le carré de l'angle de la proue.

Ainsi les coques modernes de nos skiffs, sont généralement beaucoup plus fines à la proue avec un angle entre 20 et 25°.

Les modes de navigation :

Nous avons passé en revue les différents type de traînées, et il devient intéressant d'en faire la synthèse pour comprendre les performances des différents types de bateau, et les paramètres qui influencent les performances dans telles ou telles conditions.

On va ainsi définir 3 modes de navigation.

- > La navigation en déplacement
- > La navigation forcée
- > La navigation au planning

1: La Navigation en déplacement

La navigation en déplacement se produit pour des vitesses comprises entre zero et la vitesse de carène. Je rappelle que la vitesse de carène est définie par $V_c = 2,39 * \sqrt{L_m}$ où L_m est la longueur du bateau.

Comme nous l'avons vu, à très basse vitesse la traînée induite de dérive peut être très importante, en particulier si l'on sollicite un appui important sur la dérive qui va générer une incidence importante. Pire si la dérive décroche, et que l'on se retrouve "en travers".

Lorsque la vitesse va augmenter, cette traînée de dérive va laisser la place aux traînées de formes et de friction. Ces traînées vont augmenter avec le carré de la vitesse.

Dans ce mode de navigation, les coques les plus performantes sont celles qui minimisent la traînée de forme et la surface mouillée. On retrouve les coques fines, très arrondies.

Lorsque l'on navigue sur un bateau donné, on doit chercher à minimiser la surface mouillée, par exemple avec une assiette à piqué qui sur certains skiffs va utiliser la partie de la coque la plus "ronde et ventrue".

Le poids est également un facteur prédominant puisque sur des coques de dériveur, une 30aine de kg va impacter la surface mouillée et donc la traînée de 10%.

Le coin du rating :

Pour chaque mode je ferai un petit aparté pour définir les paramètres importants à prendre et compte pour comparer les performances de deux bateaux.

Dans ce mode de navigation, les performances d'un bateau vont donc dépendre d'une part de son **moteur (surface de voilure), d'autre part de sa surface mouillée (lié à sa forme de coque, et au poids).**

Pour deux bateaux identiques, c'est le poids (via l'impact sur le déplacement et la surface mouillée) qui influera les performances. Même pour des coques supportant bien les variations de poids, pour des bateaux léger la non égalisation des poids sera donc un facteur important d'inéquité.

Le coin du skiff :

Pour chaque mode je ferai un petit aparté pour mentionner les spécificités des skiffs.

En navigation en déplacement, les skiffs sont exactement comme tous les dériveurs, avec leur qualités propres (grande surface de voile, faible poids), mais également avec leurs défauts (carène très plate à l'arrière), l'assiette à piquer est un must pour performer dans le petit temps.

2: La Navigation en force

La navigation en force se produit pour des vitesses comprises entre la vitesse de carène et la vitesse de planning. Bien évidemment pour les bateaux qui ne planent pas (quillard classique (non ULDB), catamarans, beaucoup de dériveurs au près, la navigation en force commence dès que l'on atteint la vitesse de carène.

Dans ce régime, en plus des traînées de forme et de friction, la traînée de création de vague apparaît et va d'ailleurs devenir prédominante en particulier pour les monocoque non planant (elle croît avec le cube ou la puissance 4 de la vitesse).

Le mode de navigation en force est le plus pénalisant, le bateau se cabre et consomme rapidement toute l'énergie de son moteur. Il est donc fondamental d'essayer de sortir le plus rapidement de ce mode en passant si possible au planning.

Lorsque l'on navigue sur un bateau donné, on doit chercher à déclencher le planning, via ajustement de l'assiette du bateau, chercher la trajectoire parmi les vagues, abattre pour obtenir le surcroît de vitesse (dans les conditions limites). Le poids est également un facteur prédominant puisque à coque égale un bateau plus léger partira au planning plus tôt.

Le coin du rating :

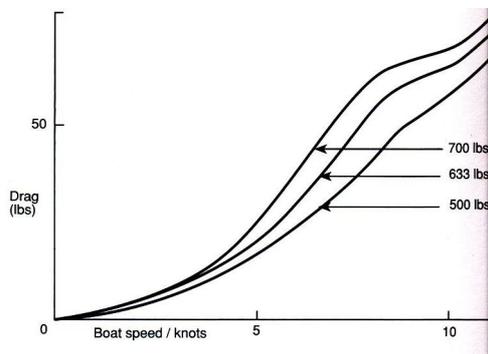
Dans ce mode de navigation, les performances d'un bateau vont donc dépendre d'une part de son moteur (surface de voilure et couple de rappel de l'équipage si on atteint la surpuissance), d'autre part de sa capacité à partir au planning (lié à sa forme de coque, et au poids).

Pour deux bateaux identiques qui ne sont pas en surpuissance, c'est le poids (via l'impact sur le départ au planning) qui influera les performances.

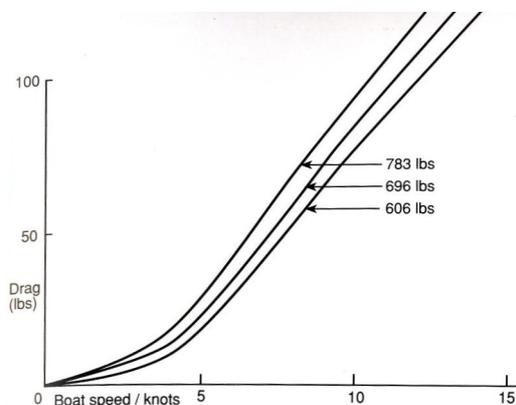
Le coin du skiff :

C'est ici que la "révolution skiff" c'est produite dans les années 80.

Les dériveurs traditionnels étaient capable de planer au portant, ou marginalement au près pour les plus puissants (505, FD), mais leurs courbes de traînée/vitesse faisaient toujours apparaître, une bosse avant le départ au planning (d'autant plus prononcée que le poids était élevé).



Les coques développées en Australie (en particulier par Bethwaite), ont permis de passer du mode déplacement au mode planning sans "passer par la navigation en force"



Ainsi contrairement au tradi, on n'a pas cette sensation de blocage puis de lâché des chevaux au départ au planning.

A noter sur la courbe l'impact du poids sur le départ puis planning.

3: La Navigation au Planning

La navigation au planning a été "découverte" dans les années 30 par Uffa Fox.

On quitte le domaine d'Archimède, puisque le bateau ne va plus être sustenté uniquement par le volume d'eau déplacé, mais également par la portance dynamique.

Ainsi, un funboard "sinker" qui n'a pas le volume suffisant pour flotter et porter son planchiste va planer sur l'eau avec un déplacement quasiment nul. Rapidement l'intégralité de la sustentation sera assurée par cette portance dynamique.

Le départ au planning, va permettre de s'affranchir de la traînée de création de vague.
Il reste donc les traînées de forme et de friction.

Mais comme le bateau déjauge, la forme immergée diminue, et la surface mouillée va également diminuer grandement (dans le cas du sinker mentionné ci dessus, la surface mouillée n'est plus que de quelques dm²).

Cette diminution de la surface mouillée avec le planning, fait que dans ce troisième mode de navigation, la traînée croît quasiment proportionnellement avec la vitesse.

Les bateaux planant, vont ainsi pouvoir continuer d'accélérer (pour autant que le couple de rappel, permette l'augmentation de puissance) et rejoindre vers les 20kts, les catamarans qui eux, une fois leur 2ème coque hors de l'eau, restent en mode forcé avec une traînée de friction qui augmente avec V^2

Le coin du rating :

Dans ce mode de navigation, les performances d'un bateau vont dépendre de la puissance du moteur, et du poids.

Au portant, on peut considérer : **la surface de voile / poids total**

Au près, on peut considérer : le **"sail carrying power" / poids total**

en effet on atteint plus rapidement la surpuissance.

Pour déterminer cette puissance vélique, on sait que le couple de rappel, est égal au couple de gîte.

Ce dernier est égal à = FVd * distance entre le centre de dérive et le centre vélique.

Ainsi si l'on compare un 505 et un B14 :

Le cinquo avec un équipage de 160kg, aura un couple de rappel de 254 kg*m , le bras de levier vélique étant d'environ 3m, il peut supporter 80kg de puissance vélique. Avec son poids total d'environ 300kg, on a un ratio puissance / poids de 26%

Le B14 avec un équipage de 150kg, aura un couple de rappel de 278 kg*m, et donc une puissance vélique supportable de 87kg.

Avec son poids total de 250kg, on obtient un ratio de 35%

Ce seuil de 26%-27% semble être la limite pour pouvoir planer au près.

Par comparaison on peut citer chez les skiffs :

29er=32% , 49er =45% , RS700, Musto=35% , B14=35%

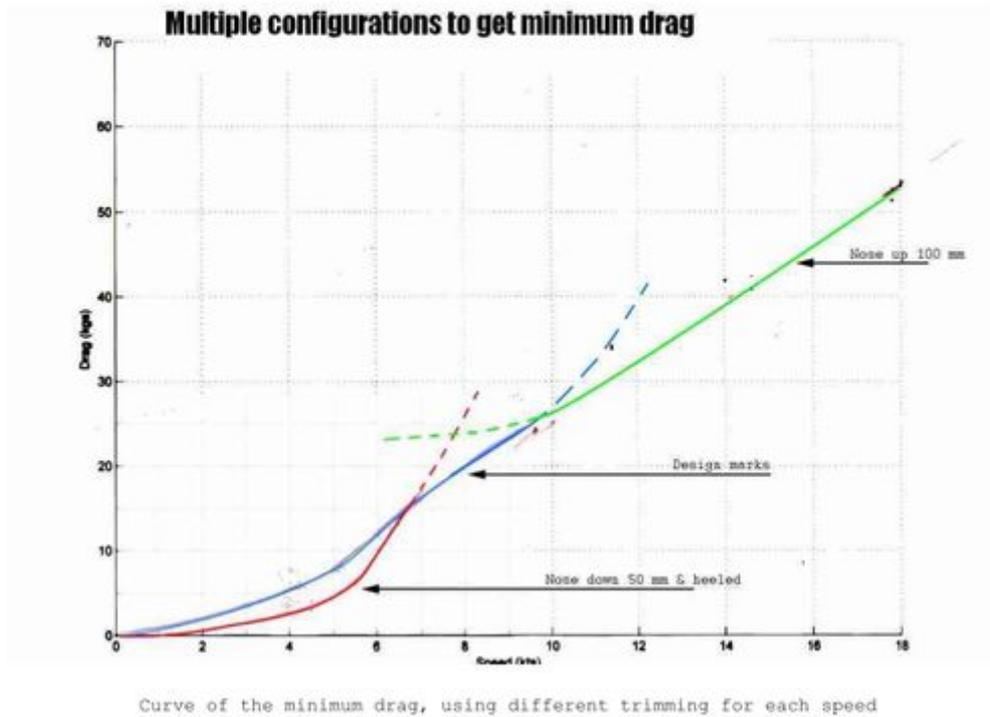
Le coin du skiff :

Une fois au planning, c'est la réduction de surface mouillée qu'il faut privilégier et donc un déjaugage maximum. Une assiette à cabré devient alors favorable.

Voici ci dessous, l'optimum de traînée que l'on obtient pour un skiff, en ajustant l'assiette correctement à chaque mode de navigation.

(Piqué en mode déplacement, à plat en mode forcé, cabré en mode planning).

Eventually we were able to draw the most efficient drag curve by using the best attitude for each speed range



Conclusion :

J'espère que ce tour d'horizon des forces hydrodynamiques vous aura fait toucher du doigt ce qui se passe sous la coque.

Je ne peux que vous encourager à vous équiper pour les entrainements d'un Speedo GPS, qui vous indiquera clairement quand vous passez d'un mode à l'autre (5kts est la frontière pour la plupart de nos skiffs).

Nous avons la chance de naviguer sur ces superbes machines à planer qui ont révolutionné la voile légère ces 20 dernières années mais en contrepartie nous devons faire face à des modes de navigations hydrodynamiques très différents les uns des autres, et devons apprendre à comprendre et utiliser le vent relatif.

Pour ce qui est des rating, on voit qu'une hiérarchie en mode de déplacement, sera complètement remise en cause en mode forcé ou planning. Les facteurs intervenant au près ou au portant étant aussi différents (et donc la part de ces bords dans le parcours total : triangle O, superO, Banane 3B, 5B, %portant) ...

Cependant, je compte affiner les comparaisons de Puissance Vélique / Poids / Surface Voile / Surface Mouillée en effectuant une campagne de mesures complète sur nos canotes l'été prochain.

Have Fun

Rémi