

RESISTANCE A L'AVANCEMENT

Nous avons vu ce qui fait avancer un voilier, et que l'on peut adapter le « moteur » aux conditions de vent et de mer, comment rechercher le rendement optimum d'une voile,... On sait aussi que l'on peut être amené à limiter ce rendement et/ou à orienter différemment la force développée par les voiles, pour limiter la gîte, augmenter la vitesse, diminuer la dérive,...

Nous allons maintenant nous attarder à **ce qui freine le bateau**, ce qui s'oppose à son avancement.

Toutes ces forces qui le freinent sont appelées « résistances », la somme de ces forces est parfois appelée « **résistance de remorquage** ».

Un voilier est soumis à :

- une **résistance de frottement** (aussi appelée résistance visqueuse R_v) : on s'occupe dans un premier temps de la résistance de frottement de la coque.
- vient ensuite la **résistance de vague** (R_w) ; elle est la conséquence du fait que le bateau se déplace à l'interface entre deux milieux de densité différente, et que la surface de l'eau se déforme.
- La coque est pourvue d'**appendice** qui possèdent leur propre résistance (R_{ap}), et qu'on étudie indépendamment.
- Enfin, le vent oppose aussi une **résistance aérodynamique** à l'avancement du bateau ($R_{aéro}$), même si c'est lui qui permet au voilier d'avancer. On remarquera que cette force s'oppose à l'avancement quand on navigue près du vent, alors qu'elle « pousse » le bateau quand on navigue au portant.

I. La résistance de frottement : R_v

Comme pour la force aéro, elle est proportionnelle à la surface (ici la surface mouillée), et au carré de la vitesse de déplacement. On a aussi vu que la résistance de frottement varie considérablement avec l'état de surface de la coque.

II. La résistance de vague : R_w

Pour commencer, **un principe de physique** : il faut savoir que la vitesse de propagation (ou célérité, notée c en m/s) de la déformation d'une surface libre (la surface de l'eau en ce qui nous concerne) est fonction de sa longueur d'onde Λ (en m). Pour ce qui est de la mer, et à condition que la profondeur soit suffisante, plus la houle est longue, plus elle se déplace vite (si les fond remonte, elle ralentit, s'amplifie et déferle, ou s'amortit selon les cas).

La **vitesse de propagation** est donnée par $c = \sqrt{g \cdot \Lambda / 2\pi}$, avec $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ (ce qui donne $c = 1,25\sqrt{\Lambda}$ en m/s ou $c = 2,4\sqrt{\Lambda}$ en nœuds). On retrouvera une formule proche pour calculer la vitesse limite d'une carène.

$c = \sqrt{g \cdot \Lambda / 2\pi}$ peut aussi s'écrire : $c / \sqrt{g \cdot \Lambda} = \sqrt{1/2\pi} \approx 0,4$, qui donne le rapport entre la vitesse de propagation et la longueur d'onde. Là aussi, il y aura une analogie avec un outil de comparaison de la vitesse d'un bateau en fonction de sa longueur.

Pour information enfin, une **houle « transporte » de l'énergie** (cinétique et potentielle) exprimée par une relation de la forme $E = (1/8) \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \Lambda$, c'est à dire qui varie comme la longueur d'onde, mais aussi comme le carré de la hauteur de la houle (H correspond à la distance verticale entre le haut et le bas de la houle, également appelée amplitude), ρ est la masse volumique (1026 kg/m^3 pour l'eau de mer), Λ est la longueur d'onde. C'est, entre autre, ce qui explique qu'il faut plus d'énergie pour faire avancer un bateau qui génère des vagues creuses.

Revenons à notre bateau qui se déplace dans l'eau :

Il entraîne avec lui (et bien sûr à la même vitesse) un système de vagues, dites « vagues d'accompagnement », qui se forme le long de sa flottaison, et dont la célérité correspond à la vitesse du bateau.

Par analogie avec la relation $c / \sqrt{g \cdot \Lambda}$, vu juste au dessus, on définit pour un bateau de longueur L (approximativement longueur de flottaison en m) se déplaçant à la vitesse v (en m/s) une grandeur (sans dimension) : $F_n = v / \sqrt{g \cdot L}$. Ce nombre est appelé Nombre de Froude, et caractérise la vitesse d'un navire par rapport à sa longueur.

On peut schématiquement distinguer quatre cas :

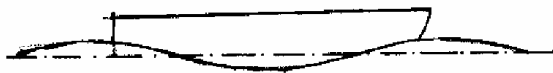
1. A faible vitesse,



Les vagues d'accompagnement ont une longueur d'onde inférieure à la longueur du navire ($\Lambda < L$). Il y a plusieurs vagues le long de la flottaison. Ce cas correspond à un petit nombre de Froude ($F_n < 0,4$).

Lorsqu'il y a deux vagues ou plus (ce qui correspond à $F_n \leq 0,4 / \sqrt{2} \approx 0,28$) on peut admettre que la résistance de vague est relativement faible, tandis que la résistance de frottement est nettement prédominante (de l'ordre de 60 à 90% de la résistance totale selon F_n et la forme de la coque). Ensuite (moins de deux vagues), la résistance de vague augmente progressivement avec la vitesse.

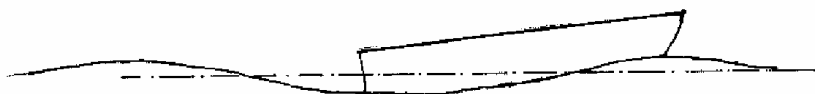
2. Vitesse critique de carène



Lorsque la vitesse augmente, la longueur d'onde des vagues augmente jusqu'à correspondre approximativement à la longueur du bateau ($\lambda \approx L$). Celui-ci est alors en quelque sorte « porté » par une seule onde, constituée d'une crête à l'étrave, d'une crête à l'arrière et un creux au milieu. Ceci correspond à un nombre de Froude $F_n \approx 0,4$, pour lequel la vitesse du navire est souvent appelée « vitesse limite théorique » de la carène.

Pour connaître cette vitesse limite, il suffit de « retourner la formule de Froude » : $v = F_n / \sqrt{g \cdot L}$, avec $F_n = 0,4$ et $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, on obtient $v = 1,25 \sqrt{L}$ (en m/s), ou $v = 2,4 \sqrt{L}$ (pour obtenir une vitesse en nœuds). Pour fixer les choses, ça donne une vitesse limite théorique de l'ordre de 6,1 Nds pour un Mini, 7,7 Nds pour un Figaro, et 10,3 Nds pour un 60' open.

3. le bateau cherche à dépasser sa vitesse critique



Si la vitesse augmente encore, la vague arrière s'éloigne du bateau, dont l'arrière n'est plus porté par la crête, mais par la pente de la vague entre les deux crêtes. Le navire est alors cabré, une situation très défavorable du point de vue de la résistance à l'avancement. Ceci correspond approximativement à un nombre de Froude compris entre 0,4 et 0,7, avec $L < \lambda < 3L$. La résistance de vague est largement prédominante (de 70 à 85% de la résistance totale, selon F_n et la forme du flotteur).

4. le planning



Le bateau « plane » sur l'eau, la résistance de vague diminue nettement (par rapport au cas 3), mais la résistance de frottement augmente considérablement (Rappel : la résistance de frottement R_v augmente au carré de la vitesse).

En reprenant nos exemples précédents, on obtient des vitesses de planning à partir de $v = F_n / \sqrt{g \cdot L}$, avec $F_n = 0,7$ (g vaut toujours $9,81 \text{ m/s}^2$), c'est à dire $v = 2,2 \sqrt{L}$ (en m/s), ou $v = 4,25 \sqrt{L}$ (pour obtenir une vitesse en nœuds). Ce qui donne une vitesse de 10,8 nds pour un mini, 13,5 nds pour un Figaro, et 18.2 Nds pour un 60' open.

5. S'affranchir de la résistance de l'eau

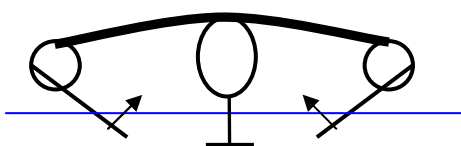
Nous venons de voir que le vent permet à un voilier d'avancer, mais que la résistance de l'eau sur sa coque limite sa vitesse.

- à **faible vitesse** (peu de vent), le bateau fait peu de vague, donc la résistance de vague est réduite. C'est la **résistance visqueuse** qui est prépondérante, d'où l'intérêt d'une faible surface mouillée et d'une carène propre.

- **Quand la vitesse augmente**, le bateau la **résistance de vague** augmente (plus vite que la résistance visqueuse), jusqu'à limiter la vitesse du bateau à sa « **vitesse critique de carène** ».

- Il faut un pic d'énergie pour que le bateau « monte sur sa vague d'étrave », et ne parte **au planning**. La résistance de vague atteint son maximum juste avant que le bateau ne plane. Ensuite elle diminue considérablement (ce qui explique que l'on peut réduire les gaz d'un zodiac que déjauge, sans perdre de vitesse). Mais la **résistance visqueuse**, qui dépend du carré de la vitesse, augmente énormément. Et **le bateau ne peut pas accélérer indéfiniment...à moins qu'il ne sorte de l'eau !**

Il existe différentes voies explorées pour limiter la résistance de l'eau, notamment l'adoption de foil.



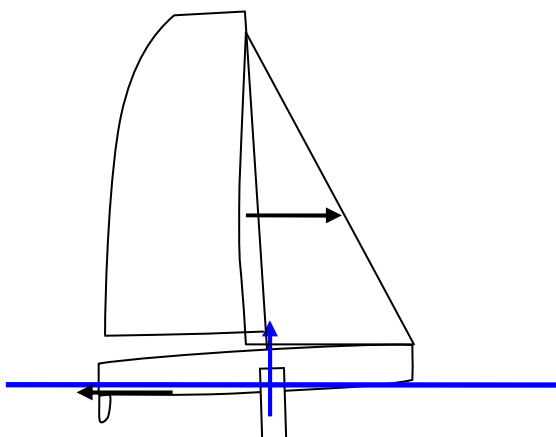
Les foils sont des plans porteurs placés sous les flotteurs. Comme les ailes des avions, ils sont dissymétriques. Ils sont plus bombés du côté de la surface de l'eau.

Dès que le bateau avance, il crée une portance perpendiculaire au foil, orientée vers le haut.

Dans le cas de l'hydroptère, la portance des deux foils s'additionne pour donner une force dirigée vers le haut, qui sort le bateau de l'eau. Un 3^e appui au niveau du safran permet de maintenir le bateau à l'horizontal.

Dans le cas des Moth international, il n'y a que 2 plans porteurs horizontaux, un sous la dérive et l'autre au bout du safran.

Et pour finir par les trimarans ORMA (ou groupama 3), seul le foil sous le vent est utilisée. Sa portance s'ajoute à la Poussée d'Archimède du flotteur, donc le moment de redressement augmente, et ils peuvent porter plus de voile.



Au portant ils ont permettent de cabrer le bateau, et donc de s'opposer au couple « piqueur » qui fait enfourner le bateau.

Le poids et la Poussée d'Archimède ne sont pas représentés.

III. La résistance des appendices : R_{ap}

Elle a été abordée lors de l'étude de la force aéro.

Pour mémoire, la force hydro dépend, elle aussi de la vitesse de l'écoulement, de la surface de l'appendice, de son profil et de l'angle d'incidence. Elle se décompose en une portance (perpendiculaire à l'écoulement, orientée vers l'extrados) et une traînée (parallèle à l'écoulement, mais de sens opposé).

La traînée hydro des appendices est ici appelée résistances des appendices. Elle peut à son tour se décomposer en traînée de frottement, traînée de forme, et traînée induite (s'il y a une incidence).

IV. La résistance aérodynamique : $R_{aéro}$

C'est la résistance à l'avancement des parties émergées du bateau, ce que l'on appelle aussi le fardage. Elle est fonction de la surface exposée au vent et de la vitesse du vent (ou plus précisément du carré de la vitesse du vent apparent).

Elle est bénéfique au portant car bien orientée par rapport à la route du bateau, mais particulièrement néfaste au près.