[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sailing-yachts.Tuiga.Lulworth.Cambria.Cannes.2006-09-26.jpg)Exemple d'effort du vent sur différents types de voile de voiliers classiques lors d'une régate à Cannes en 2006.

Le principe d'une [voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile_(navire)) est de récupérer l'énergie du vent et de la transmettre au bateau. La voile redirige l'air arrivant sur elle dans une autre direction, en vertu de la conservation de la [Quantité de mouvement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Quantit%C3%A9_de_mouvement), une force est créée sur la voile[[1]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-0),[[2]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-1),[[3]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-UNSW1-2). L'effet propulsif est réparti sur toute la surface de la voile. Les éléments à calculer sont l'**effort du vent sur la voile** ou poussée vélique, et le lieu d'application de cet effort ou point vélique. Comme ce point n'est pas fixe, il est défini, par la détermination de ses coefficients de moments, plutôt que par un « centre de poussée ».

Le calcul vélique est essentiel pour bien concevoir un bateau à voile ([Stabilité du navire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Stabilit%C3%A9_du_navire)...). La modélisation d'une voile, c'est-à-dire le calcul de l'écoulement du vent sur cette voile est fondé sur le calcul intégral. Le calcul est fort compliqué et plus complexe qu'une aile d'avion[[Note 1]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-3). Le calcul est du domaine de l'[aérodynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rodynamique) de la [Mécanique des fluides](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides). La conception et l'étude d'une voile de bateau repose sur plusieurs disciplines scientifiques d'avant garde : les modèles d'[Aéroélasticité](http://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9ro%C3%A9lasticit%C3%A9), combinaison de la [Mécanique des fluides numérique](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides_num%C3%A9rique) et des [calculs de structure](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_des_mat%C3%A9riaux) [[4]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Fossati1-4). Les résultats sont néanmoins corrigés par la réalité (les turbulences et le décollement de la couche limite ne sont pas encore totalement maitrisés [[5]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Clay_Navier-Stokes-5)).

Dans la réalité, la voile n'est pas indéformable, le vent n'est pas constant, le bateau n'est pas à vitesse uniforme (il tangue, butte contre les vagues...), le mât n'est pas infiniment rigide, l'air est visqueux (pertes par frottement). L'écoulement de l'air varie (quasiment attaché au près, ou décroché en vent arrière), le mat perturbe l'écoulement (sauf quand il est profilé et pivotant). Dans un souci de clarté, ces phénomènes ne sont pas obligatoirement pris en compte dans cet article. Le calcul numérique inclut plus ou moins ces paramètres [[6]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-6)[[4]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Fossati1-4) mais le calcul numérique reste limité.[[7]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-LEFD1-7)[[8]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-HoffmanJohnson1-8)

L'article se concentrera sur l'interaction des trois éléments suivant :

* une mer plus ou moins plate;
* du vent plus ou moins constant;
* et un jeu de voile[[Note 2]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-9).

|  |
| --- |
| **Sommaire**  [1 Point vélique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Point_v.C3.A9lique)   * + [1.1 Corde de la voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Corde_de_la_voile) * [2 Poussée vélique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Pouss.C3.A9e_v.C3.A9lique)   + [2.1 Rôle de la pression atmosphérique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#R.C3.B4le_de_la_pression_atmosph.C3.A9rique)   + [2.2 Rôle du vent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#R.C3.B4le_du_vent)   + [2.3 Direction de la poussée vélique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Direction_de_la_pouss.C3.A9e_v.C3.A9lique)   + [2.4 Intensité de l'effort](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Intensit.C3.A9_de_l.27effort)   + [2.5 Décomposition de la force : introduction de la notion de portance et de traînée](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#D.C3.A9composition_de_la_force_:_introduction_de_la_notion_de_portance_et_de_tra.C3.AEn.C3.A9e) * [3 Effet de la portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Effet_de_la_portance)   + [3.1 Voile en écoulement décroché](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Voile_en_.C3.A9coulement_d.C3.A9croch.C3.A9)   + [3.2 Voile en écoulement attaché](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Voile_en_.C3.A9coulement_attach.C3.A9)   + [3.3 Contribution de la portance à l'avancement du navire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Contribution_de_la_portance_.C3.A0_l.27avancement_du_navire)   + [3.4 Influence du vent apparent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_du_vent_apparent)   + [3.5 Influence de la tension de la voile sur la portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_la_tension_de_la_voile_sur_la_portance)     - [3.5.1 Cambrure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Cambrure)     - [3.5.2 Position du creux](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Position_du_creux)   + [3.6 Influence de l'allongement de la voile sur la portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_l.27allongement_de_la_voile_sur_la_portance)     - [3.6.1 Influence sur les coefficients aérodynamiques](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_sur_les_coefficients_a.C3.A9rodynamiques)     - [3.6.2 Influence sur les efforts](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_sur_les_efforts)   + [3.7 Influence de la hauteur de la bordure par rapport au niveau de la mer](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_la_hauteur_de_la_bordure_par_rapport_au_niveau_de_la_mer)   + [3.8 Influence des bords de la voile : chute, guindant, et bordure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_des_bords_de_la_voile_:_chute.2C_guindant.2C_et_bordure)     - [3.8.1 Chute](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Chute)     - [3.8.2 Guindant](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Guindant)     - [3.8.3 Bordure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Bordure)   + [3.9 Influence de l'incidence sur le coefficient aérodynamique : polaire d'une voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_l.27incidence_sur_le_coefficient_a.C3.A9rodynamique_:_polaire_d.27une_voile)   + [3.10 Influence de l'altitude : vrillage de la voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_l.27altitude_:_vrillage_de_la_voile)   + [3.11 Influence de la rugosité de la voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_la_rugosit.C3.A9_de_la_voile)   + [3.12 Influence du nombre de Reynolds](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_du_nombre_de_reynolds) * [4 Finesse et puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Finesse_et_puissance)   + [4.1 Limites des performances d'une voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Limites_des_performances_d.27une_voile)   + [4.2 Finesses](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Finesses)   + [4.3 Puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Puissance) * [5 Cas de plusieurs voiles : résolution multidimensionnelle du problème](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Cas_de_plusieurs_voiles_:_r.C3.A9solution_multidimensionnelle_du_probl.C3.A8me)   + [5.1 Équations d'Euler](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#.C3.89quations_d.27Euler)     - [5.1.1 Conservation de la quantité de mouvement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Conservation_de_la_quantit.C3.A9_de_mouvement)     - [5.1.2 Conservation de la masse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Conservation_de_la_masse)     - [5.1.3 Conservation de l'énergie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Conservation_de_l.27.C3.A9nergie)     - [5.1.4 Les équations finales](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Les_.C3.A9quations_finales)   + [5.2 Équations complémentaires](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#.C3.89quations_compl.C3.A9mentaires)   + [5.3 Domaine](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Domaine)   + [5.4 Conditions aux limites](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Conditions_aux_limites)   + [5.5 Simplification](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Simplification)     - [5.5.1 Nombre de Reynolds](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Nombre_de_Reynolds)   + [5.6 Résolution](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#R.C3.A9solution)     - [5.6.1 Origine de la difficulté de résolution](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Origine_de_la_difficult.C3.A9_de_r.C3.A9solution)     - [5.6.2 Couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Couche_limite)     - [5.6.3 Évolution de la couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#.C3.89volution_de_la_couche_limite)     - [5.6.4 Théorie et approche plus simple](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Th.C3.A9orie_et_approche_plus_simple)       * [5.6.4.1 Théorie en dehors de la couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Th.C3.A9orie_en_dehors_de_la_couche_limite)       * [5.6.4.2 Théorie de la couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Th.C3.A9orie_de_la_couche_limite)   + [5.7 Profil de la voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Profil_de_la_voile)     - [5.7.1 Voile rigide](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Voile_rigide)     - [5.7.2 Voile souple](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Voile_souple)       * [5.7.2.1 Problème](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Probl.C3.A8me)       * [5.7.2.2 Avantage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Avantage)     - [5.7.3 Conception du profil](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Conception_du_profil)   + [5.8 Poussée vélique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Pouss.C3.A9e_v.C3.A9lique_2)   + [5.9 Point vélique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Point_v.C3.A9lique_2)   + [5.10 Centre vélique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Centre_v.C3.A9lique) * [6 Introduction à l'aéroélasticité d'une voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Introduction_.C3.A0_l.27a.C3.A9ro.C3.A9lasticit.C3.A9_d.27une_voile)   + [6.1 Problème à une dimension ou voile fixe](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Probl.C3.A8me_.C3.A0_une_dimension_ou_voile_fixe)     - [6.1.1 Couplage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Couplage)       * [6.1.1.1 Couplage en espace](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Couplage_en_espace)       * [6.1.1.2 Couplage en temps](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Couplage_en_temps)   + [6.2 Problème à deux dimensions ou voile souple](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Probl.C3.A8me_.C3.A0_deux_dimensions_ou_voile_souple)     - [6.2.1 Modélisation de la voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Mod.C3.A9lisation_de_la_voile)       * [6.2.1.1 Filaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Filaire)       * [6.2.1.2 Surfacique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Surfacique)   + [6.3 Problème à trois dimensions ou aéroélasticité](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Probl.C3.A8me_.C3.A0_trois_dimensions_ou_a.C3.A9ro.C3.A9lasticit.C3.A9)     - [6.3.1 Formulation faible](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Formulation_faible) * [7 Notes et références](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Notes_et_r.C3.A9f.C3.A9rences) |

1. **Point vélique**

Le lieu d'application est nommé point vélique de la voile. Le point vélique en première approximation est le centre géométrique (ou [centre de gravité](http://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_de_gravit%C3%A9)) de la voile. Dans la réalité, la voile prend une forme de ballon ou d'aile, si la forme de la voile est stable alors le point vélique sera stable. Sur une voile de hunier et par vent arrière, le point d'application remonte un peu vers la [vergue](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vergue) (le haut) suivant la tension des écoutes et du tangon. Sur une voile de génois et à l'[allure du près](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allure_(marine)), le point d'application remonte vers le guindant (avant du bateau) de 10 à 15 %[[9]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Adeps-10).

**1.1 Corde de la voile**

[La corde](http://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rodynamique#Les_termes_de_l.E2.80.99a.C3.A9rodynamique_de_l.E2.80.99aile) est une droite fictive reliant le guindant à la chute (du [Bord d'attaque](http://fr.wikipedia.org/wiki/Bord_d%27attaque) au [Bord de fuite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Bord_de_fuite)). La notion de corde permet d'approcher plus précisément la position du point vélique. L'effort ou poussée vélique est sensiblement perpendiculaire à la corde et est placé sensiblement au maximum du creux de la voile.

1. **Poussée vélique**

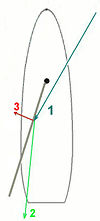
Au niveau microscopique, dans un mouvement perpétuel, les parcelles d'air se déplacent en permanence. Mais macroscopiquement, l'air peut ne pas bouger. Si l'air ne bouge pas, cela signifie que chacune des parcelles reste plus ou moins dans un même lieu (mouvement désordonné). La parcelle d'air se déplace autour d'un point fictif fixe dans l'espace sans trop s'éloigner de ce point (mouvement brownien). Par contre, si l'air bouge, cela signifie que globalement les parcelles se déplacent en grand nombre dans la même direction (mouvement ordonné). Bien sûr le mouvement résultant peut être une combinaison des deux. Il y a deux origines au mouvement des parcelles d'air : la température et l'influence mécanique du vent.

**2.1 Rôle de la** [**pression atmosphérique**](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_atmosph%C3%A9rique)

Les parcelles d'air ne sont pas au repos, elles ont acquis par divers moyens une certaine quantité d'énergie qu'elles ont transformée en [énergie cinétique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_cin%C3%A9tique), autrement dit les parcelles d'air se déplacent en permanence. En se déplaçant, une parcelle d'air va rapidement en rencontrer une autre, et c'est le choc. Le choc modifie les trajectoires. Les deux parcelles rebondissent l'une sur l'autre. Chacune repart approximativement vers son point de départ. Rapidement, de nouveau, elle rencontre une autre parcelle pour un nouveau choc la ramenant de nouveau vers son point de départ etc., etc. Globalement vu de loin, cela donne l'impression que les parcelles ne bougent pas (mouvement désordonné). Donc les parcelles d'air se déplacent en permanence de façon désordonnée ; ce phénomène est très connu et se nomme la [température](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature#Origine_physique).

Plus la parcelle d'air est haute dans l'atmosphère, moins la gravité se fait sentir. Il y a donc moins de force pour la ramener sur Terre, et les chocs sont moins violents et fréquents. Donc plus la parcelle est proche du niveau de la mer, plus les chocs sont violents et fréquents.

Quand la parcelle est très proche de la voile, le choc se produit alors entre la voile et cette parcelle. Ces chocs innombrables sur la voile génèrent une force considérable, la force exercée au niveau de la mer est d'environ 10 tonnes au [m²](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A8tre_carr%C3%A9)[[Note 3]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-11). Cette force s'exerce sur une surface. C'est donc une pression. Cette pression est la [pression atmosphérique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_atmosph%C3%A9rique). Comme une voile a deux faces, la pression atmosphérique va s'exercer des deux côtés. Au final, les deux pressions s'équilibrent parfaitement, la voile ne bouge pas.

* 1. **[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Segeln_gegen_den_Wind.JPG)Rôle du vent**

La particule arrive avec l'énergie (1) et repart avec l'énergie (2) transmettant sur la voile la quantité d'énergie (3) (Les vecteurs du dessin sont des [quantités de mouvement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Quantit%C3%A9_de_mouvement))

Cette fois-ci, une partie du mouvement des parcelles est globalement ordonnée (vu de loin), les molécules se déplacent tous ensembles dans la même direction. Vu de loin, l'air *bouge*, ce qui revient à dire qu'il y a du vent.

Suivant la configuration de la voile, voici ce qui arrive à une parcelle d'air proche de la voile :

* la voile est libre, elle présente au vent que son épaisseur (celle du tissu), la parcelle d'air passe sans être notablement perturbée,
* la voile est perpendiculaire au vent (voile de hunier ou spi en vent arrière), la parcelle d'air s'écrase contre la voile. Elle est quasi stoppée. Les autres parcelles qui suivent l'empêchent fortement de faire marche arrière (rebondir). Les parcelles d'air transmettent un maximum d'énergie à la voile, voire la quasi totalité de l'énergie de déplacement ordonné.
* dans les cas intermédiaires, la parcelle d'air rebondit plus ou moins bien, elle ne délivrera qu'une partie de son énergie. De plus, en rebondissant, elle va perturber le mouvement ordonné de celles qui l'accompagnent par collision. Celles-ci vont à leur tour perturber le mouvement ordonné d'autres parcelles par d'autres collisions, etc., etc. Mais en rebondissant, elle va aussi par conséquence, perturber l'équilibre de pression atmosphérique, créant une surpression au vent et une dépression sous le vent de la voile. C'est une sorte d'[Effet domino](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_domino).

Grâce à l'[Effet domino](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_domino), il vient alors rapidement à l'idée que tout ce qui est poussé d'un côté de la voile va combler ce qui manque de l'autre côté de la voile. En d'autres termes, pour une petite surface S1 de la voile face au vent produisant une surpression, par effet domino, cette perturbation annulera la dépression d'une surface S2 collègue située face sous le vent. De même, la même petite surface S2 sous le vent produisant une dépression par effet domino vient annuler la surpression de la surface initiale S1. Donc globalement les *surpressions* comblent les *dépressions*, globalement il ne se passe rien, c'est le [paradoxe de D’Alembert](http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_de_D%E2%80%99Alembert). C'est là que la [viscosité](http://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosit%C3%A9) intervient [[10]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-12). La viscosité désigne le fait que les chocs ne se passent pas *bien*, le choc est un [choc mou](http://fr.wikipedia.org/wiki/Collision_in%C3%A9lastique)[[Note 4]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-13). À chaque choc de parcelle d'air, il y a une infime perte d'énergie [[Note 5]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-14). De choc en choc de parcelle, le choc est de moins en moins violent. En fait, après des milliers et milliers de chocs transmettant le choc originel, l'énergie du choc originel a quasiment disparu. À l'échelle humaine, il *disparait* rapidement (cf. couche limite). Cela donne l'impression que les surpressions de la face au vent et les dépressions de la face sous le vent sont *indépendante*, ne se perturbent pas (ou peu) par effet domino [[Note 6]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-15).

La perte est infime, donc le choc originel (le choc de la parcelle d'air sur un petit grain de matière de la voile) transfert de l'énergie quasiment sans perte de l'air à la voile. Or, par nature, le tissu d'une voile est du domaine des matériaux. Une voile est bien plus rigide que l'air, les grains de matière ne s'entrechoquent pas, ne glissent pas entre eux. La voile n'est pas soumise à des phénomènes dissipatifs aussi majeurs. Toute la voile profite sans perte de l'apport de chaque chocs de parcelle d'air / grain de matière.

Il y a donc deux phénomènes, le phénomène qui pousse la voile (pression due au vent) et le phénomène qui empêche en partie la pression atmosphérique de s'exercer (dépression due au vent).

**2.3 Direction de la poussée vélique**

Le choc de la parcelle d'air sur la voile fait reculer la voile. Le choc ne déplace que très peu la voile sur le côté. L'effort est quasiment perpendiculaire à la surface de la voile.

**2.4 Intensité de l’effort**

Les parcelles d'air frappent la voile sur ses deux faces donc :

* sur la face au vent, les efforts sont la pression atmosphérique, pression due au vent, et quasiment pas de dépression due au vent.
* sur la face sous le vent, les efforts sont la pression atmosphérique, de la dépression due au vent, et quasiment pas de pression due au vent.

Pour simplifier la manipulation de ces forces, les forces sont sommées en une seule force et ce pour toute la surface du profil (voile) dans une formule simple (valable pour les ailes d'avion comme pour un [safran](http://fr.wikipedia.org/wiki/Safran_(bateau)), une voile, un plan antidérive) [[Note 7]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-16) :

F = C \times E 

E = Effort que peut donner au maximum le vent (voir [Max Q](http://fr.wikipedia.org/wiki/Max_Q)) ;

C = [coefficient](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) aérodynamique ;

**Explication**

Sans rentrer dans les détails trop longs, pour chaque parcelle d'air s'écrasant sur la surface de la voile dS génère un effort dF. La force exercée sur la voile est la [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression) de l'air sur la voile soit \vec dF = -p \, dS\, \vec n[[11]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-17),[[12]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-18).

Suivant le [théorème de Bernoulli](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Bernoulli), en régime permanent, le long d'une [ligne de courant](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_courant), et si les transferts de [chaleur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique) sont négligés, l'air suit la formule :

 \frac{V^2}{2.g} + z +\frac{p}{\rho.g} = \mathrm{constante}

comme les variations d'altitude sont faibles, et sont négligeables par rapport aux autres termes, alors

 \frac{V^2}{2.g} +\frac{p}{\rho.g} = \mathrm{constante}

Le fluide est considéré comme incompressible, c'est-à-dire qu'il y a peu de variation de densité, (à Mach = 0.4, l'erreur reste encore inférieure à 2 %). À vitesse constante, considérer que c'est la voile qui se déplace dans l'air à la vitesse V0ou que c'est l'air qui arrive à la vitesse V0sur la voile est exactement équivalent. Supposons que l'air est fixe et que c'est la voile qui se déplace. En appliquant la formule à la parcelle d'air sur la voile et puis cette même parcelle d'air avant son arrivée sur la voile :\frac{p0}{\rho.g} = \frac{V^2}{2.g} +\frac{p}{\rho.g} d'où p0 = \frac{\rho . V^2}{2} + p

Soit la [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression) sur la voile pest la différence de la pression statique [stagnante](http://fr.wikipedia.org/wiki/Point_de_stagnation) p0à l'infini et de la [pression dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_dynamique) q. La pression statique poest constante quelle que soit la ligne de courant. Donc elle s'annule globalement lors de l'intégration de la formule dF sur toute la surface de la voile, car la pression pod'un côté de la voile est exactement compensée par la pression posur l'autre face de la voile, et est donc éliminée. Il reste la pression dynamique soit \, p = q

La [pression dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_dynamique) est égale à q = \frac12 \times \rho V^2. La [pression dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_dynamique) est la densité volumique l'énergie cinétique de la parcelle d'air q = \frac12 \times \rho V^2 = dE.

d'où \vec dF \cdot \vec n = dE \, dS.

dans cette formule dE est une inconnue mais dE est borné. En effet, V est compris entre 0 et V0 car si la vitesse est supérieure à V0 alors cela signifie que le surplus d'énergie provient d'une autre énergie que l'équation de Bernoulli a négligée, autrement dit la voile entraînerait des phénomènes aérodynamiques non négligeables jamais constatés dans la réalité (onde de chocs...). Son maximum est [Max Q](http://fr.wikipedia.org/wiki/Max_Q)  = \frac{\rho . V0^2}{2}

soit  dE = c \times MaxQ avec \, c un pourcentage de la densité d'énergie cinétique variant de 0 à 100 %. Le pourcentage \, c est inconnu, il devra être déterminé par d'autre moyen (équation supplémentaire ou essais).

d'où en intégrant sur toute la surface : F = C \times E avec

E = Effort que peut donner au maximum le vent  = Max Q \times S =\frac12 \times \rho V0^2 \times S;

C = [coefficient](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) aérodynamique issue de l'intégration ; il est le pourcentage de transmission de la pression dynamique (ou d'énergie).

Attention, la surface S est la surface totale de la voile donc S est égale à la surface de l'intrados \ S_i plus la surface de l'extrados \ S_e  : \ S = S_i + S_e .

Il est possible de diviser l'intégration en deux parties :

* partie extrados
* partie intrados

et donc d'obtenir deux sous [coefficients](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) aérodynamiques issues de l'intégration :

* Ce pour l'extrados ; il est le pourcentage de transmission de la pression dynamique (ou d'énergie) sur l'extrados
* Ci pour l'intrados ; il est le pourcentage de transmission de la pression dynamique (ou d'énergie) sur l'intrados

avec F = C \times Max Q \times S = C_i \times Max Q \times S_i + C_e \times Max Q \times S_e

Mais pour des raisons pratiques de comparaison de profil, la surface S utilisée dans les tables n'est pas la surface totale de l'objet (ou voile) mais une surface caractéristique. La surface de la corde S_cest souvent utilisée comme surface caractéristique.

Surface de la corde, surface de l'intrados et de l'extrados ne sont pas indépendants, ils font partie du même objet, le profil. Il existe donc une relation les liant entre eux. Il faut donc calculer les facteurs de forme \ \alpha_iet \ \alpha_etel que S_e = \alpha_e \times S_c , S_i = \alpha_i \times S_c [[13]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-19).

D'où  F = Max Q \times S_c \times (C_i \times \alpha_i + C_e \times \alpha_e)= Max Q \times S_c \times C_c 

\ C_c= coefficient de portance des tables (ou abaque).

Comme les tables se basent sur la surface caractéristique \ S_c, il en résulte que le coefficient \ C_cdans les tables dépend donc de deux facteurs :

* un facteur de pourcentage de transmission de la pression dynamique (ou d'énergie) C_iet C_e
* un facteur de forme \alpha_iet \alpha_e.

Dans un profil mince tel que voile, safran, la surface de la corde est proche de la surface de l'extrados (dessus de la voile), c'est-à-dire \ \alpha_e \approx 1. Idem pour l'intrados.

Par abus de langage, quand une personne indique qu'une voile est de 10 m2, il veut dire en faite que la surface de l'extrados de la voile est de 10 m2. La surface réelle de la voile (intrados + extrados) est de 20 m2, mais c'est bien la valeur de 10 m2 qui faut employer dans la formule F = C_c \times E = Max Q \times S_c \times C_cdes tables de portance.

Bien sûr, ce calcul est une aide à la compréhension et à l'utilisation des tables (ou abaque). Le calcul de C est complexe et part du principe fondamental de la dynamique. Le calcul est abordé dans la section : Cas de plusieurs voiles. Dans la suite de l'article, pour alléger la notation, \ C_csera noté \ Cet \ S_csera noté \ S.

Suivant le [théorème de Bernoulli](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Bernoulli), l'effort maximal du vent ou densité d'[énergie cinétique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_cin%C3%A9tique) maximale pour toute la surface de la voile est :

E = e_c \times S = Max Q \times S = \frac12 \times \rho \times S \times V^2 

L'expression complète de la force est :

F = \frac12 \times \rho \times S \times C \times V^2

F = la portance, exprimée en [newton](http://fr.wikipedia.org/wiki/Newton_(unit%C3%A9))

\rho(rhô) = [masse volumique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique) de l'air (\rho varie avec la [température](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) et la [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression)) ;

S = [surface de référence](http://fr.wikipedia.org/wiki/Surface_de_r%C3%A9f%C3%A9rence) ; c'est la surface de la voile en m²

C = [coefficient](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) aérodynamique ; Le coefficient aérodynamique est sans unité, il est la somme de deux pourcentages [[Note 8]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-20) : pourcentage de l'énergie récupérée face sous le vent + pourcentage de l'énergie récupérée face au vent. C'est pour cette raison que le [coefficient](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) aérodynamique peut être supérieur à 1. Il dépend de l'angle du vent par rapport à la voile.

V = Vitesse de déplacement soit la vitesse du vent par rapport à la voile ([Vent apparent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vent_apparent)) en m/s.

La voile se déforme sous l'effet du vent et prend une forme nommée [profil](http://fr.wikipedia.org/wiki/Profil_(a%C3%A9ronautique)). Lorsque l'écoulement de l'air autour de ce profil est [laminaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_laminaire)[[Note 9]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-21), le facteur dépression face sous le vent devient déterminant. Cet effet est alors appelé [portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance). Les études et la théorie établissent pour une voile[[14]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-22) que:

* la dépression relative sur l'extrados (face sous le vent) représente les 2/3 de la portance,
* la surpression sur l'intrados (face au vent) représente 1/3 de la portance.

**2.5 Décomposition de la force : introduction de la notion de portance et de traînée**

La forme générale de la force F = \frac12 \times \rho \times S \times C \times V^2est calculée ou mesurée dans une veine d'air à vitesse aussi uniforme que possible arrivant sur la voile. La force est décomposable suivant les trois dimensions. La viscosité par nature frotte sur le profil, et donc engendre un effet résistant au mouvement. Plus important cette viscosité perturbe le flux d'air autour du profil ; cette perturbation engendre une force considérable perpendiculairement au profil. De même, comme le profil n'est pas infini, les extrémités du profil engendrent elles aussi un effort dans la dimension restante.

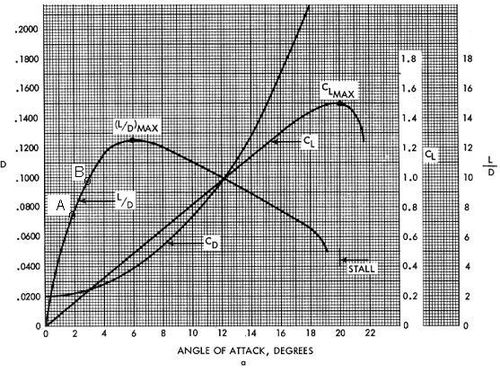
[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:FAA_Lift_Drag.JPG)

Diagramme type d'un profil représentant l'évolution de la traînée \ C_Det de la portance \ C_Lsuivant l'[incidence](http://fr.wikipedia.org/wiki/Incidence_(a%C3%A9rodynamique)). La portance latéral n'est quasiment jamais représenté car le profil est assimilé à un profil d'[allongement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allongement_(a%C3%A9ronautique)) infinie donc les valeurs mesurées sont faibles.

La décomposition suivant les trois dimensions est[]:

\vec{F} = \vec{F_x} + \vec{F_y} + \vec{F_z}.

Avec :

* \vec{x} : l'axe parallèle au mouvement des particules \ Vpas encore perturbées par la voile, c'est-à-dire bien avant que les particules arrivent sur la voile. La force projetée sur cet axe \vec{x}se nomme [traînée](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e).
* Par mesure de commodité, la force à la même équationF_x = \frac12 \times \rho \times S \times C_x \times V^2, ou le coefficient aérodynamique est remplacé par un coefficient \ C_xadapté à cet axe. Par nature cette force est résistive, c'est-à-dire que le profil prend de l'énergie à l'air. Dans la littérature \ C_xest noté aussi\ C_D, avec D pour [drag](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e).
* \vec{z} : l'axe perpendiculaire au mouvement des particules \ Vpas encore perturbées par la voile, et perpendiculaire à l'[allongement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allongement_(a%C3%A9ronautique))[[Note 10]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-26). La force projetée sur cet axe \vec{z}ne nomme [portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance). Par mesure de commodité la force à la même équationF_z = \frac12 \times \rho \times S \times C_z \times V^2, ou le coefficient aérodynamique est remplacé par un coefficient \ C_zadapté à cet axe. L'orientation de cette force varie suivant la valeur de l'[incidence](http://fr.wikipedia.org/wiki/Incidence_(a%C3%A9rodynamique)). Dans la littérature \ C_zest noté aussi\ C_L, avec L pour [lift](http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(m%C3%A9canique_des_fluides)).
* \vec{y} : le dernier axe. La force suivant le dernier axe \vec{y}est nommée portance latérale. La portance latérale a pour équation : F_y = \frac12 \times \rho \times S \times C_y \times V^2. Elle est nulle pour un profil infini. De même, pour un profil d'allongement non infini[[Note 11]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-27), la forme du profil est généralement droite (les profils notablement non droits sont rares : cf. [Aile en mouette](http://fr.wikipedia.org/wiki/Aile_en_mouette)), allongé et mince, ce qui génère une portance latérale faible au vu des deux premiers axes. Dans notre cas de voile de bateau, la portance latérale est négligée. Dans la plupart des cas, il est totalement négligeable. Le profil est alors ramené à un système bidimensionnelle[[Note 12]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-28). Le cas d'un spi est un parfait contre exemple, le spi a un allongement faible et une forte cambrure, il est alors difficile de déterminer nettement l'axe de portance. Le spi génère des efforts suivant les trois axes, et la force verticale a une grande importance pour l'enfournement.

1. **Effet de la portance**

L'étude de l'effet de la portance permet de comparer les cas avec et sans portance[[18]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-29). L'exemple type est une [voile à corne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile_%C3%A0_corne). La voile est approximativement rectangulaire et est en position verticale. La voile a une surface de 10 m², avec 2,5 m de [bordure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile_(navire)) par 4 m de [guindant](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voile_(navire)). Le vent apparent est de 8,3 m/s (environ 30 km/h). Le bateau est supposé à vitesse uniforme, pas de vague. Il ne gîte pas, ne tangue pas. La masse volumique de l'air est fixée à : \rho =1,2 kg/ m^3

**3.1 Voile en écoulement décroché**

Le voilier est par vent arrière. La forme de la voile est approximée par un plan perpendiculaire au vent apparent.

L'effet dépression sur la voile est du second ordre, donc négligeable, il reste :

* sur la face au vent, les efforts sont la pression atmosphérique et la pression due au vent
* sur la face sous le vent, il ne reste que la pression atmosphérique

Les efforts de pression atmosphérique s'annulent. Il ne reste que la pression produite par le vent.

Grosso modo, les chocs des molécules sur la voile transmettent quasiment toute leur énergie due au vent sur 90 % de la surface de la voile. Cela revient à dire que le Cz ou [coefficient](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) de portance aérodynamique est égal à 0.9.

F = \frac12 \times 1.2 \times 10 \times 0.9 \times 8.3^2 = 372 \ newton

**3.2 Voile en écoulement attaché**

Le voilier est au près. Le vent a un angle d'incidence d'environ 15° avec la corde de la voile.

Du fait du réglage de la voile à 15° rapport au vent apparent, la courbure (cambrure) de la voile crée un effet de portance. Autrement dit, l'effet de dépression de la face sous le vent n'est plus à négliger. Comme les efforts de pression atmosphérique s'annulent, les efforts restant sont :

* sur la face au vent, la pression due au vent,
* sur la face sous le vent, la dépression due au vent.

La seule inconnue est le coefficient aérodynamique qu'il faut estimer. Or la cambrure que prend une voile bien réglée est proche de l'extrados d'un profil [NACA](http://fr.wikipedia.org/wiki/National_Advisory_Committee_for_Aeronautics) 0012[[19]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-30), [[Note 13]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-31). Une voile moins bien réglée ou de technologie plus ancienne (vieux gréement), sera plus creuse : la cambrure du profil (le rapport de la flèche à la [corde](http://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rodynamique)) sera plus grande. Le coefficient de portance aérodynamique sera plus élevé mais la voile sera moins performante (finesse plus faible). Les profils plus adaptés seraient des profils plus épais comme NACA 0015, NACA 0018[[20]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-32).

Pour un profil donné, il existe des tables donnant le coefficient de portance du profil. Le coefficient de portance (Cz) dépend de plusieurs variables :

* l'incidence (angle : vent apparent/profil)
* la [pente de portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pente_de_portance) de la voile, qui dépend de son allongement[[21]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-aeroelasticite-33),
* de la rugosité de la surface et du [nombre de Reynolds](http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds), qui influent sur l'écoulement du fluide (laminarité, turbulence).

Le coefficient est déterminé pour un fluide stable et uniforme, et un profil d'allongement infini.

Le nombre de Reynolds est :  \mathrm{Re} = {{\rho {\bold \mathrm U} L} \over {\mu}} = {{{\bold \mathrm U} L} \over {\nu}}

Avec

* **U** - vitesse du fluide ou vent apparent [m/s]
* *L* - longueur caractéristique ou bordure de la voile [m]
* \nu- [viscosité cinématique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosit%C3%A9_cin%C3%A9matique) du fluide : \nu = \eta / \rho [m²/s]
* \rho- [masse volumique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique) de l'air [kg/m³]
* \mu- [viscosité dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Viscosit%C3%A9_dynamique) de l'air [Pa.s] ou Poiseuille [Pl]

Soit pour notre voile  \mathrm{Re} = 10^6environ

Sous une incidence de 15° et un [Nombre de Reynolds](http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds) à un million, le profil NACA0012 atteint un Cz de 1.5 au lieu de 0.9 ou 1 à 90° d'incidence.

F = \frac12 \times 1.2 \times 10 \times 1.5 \times 8.3^2 = 620 \ Newton

La portance a augmenté de 50 %. Cela correspond aussi sur l'[écoute de voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coute_(cordage)) une augmentation des efforts de 50 % pour le même vent apparent[[Note 14]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-34), [[Note 15]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-35).

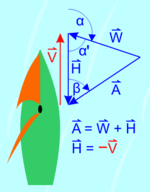
**[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:DiagramApparentWind.gif)3.3 Contribution de la portance à l'avancement du navire**

Schéma détaillé exposant les vecteurs vitesses bateau (V), vent (W) et vent apparent (A) pour une allure du bateau.

Dans le cas sans portance la direction du vent apparent est identique au vent. Si la direction prise par le navire est identique au vent, tout l'effort de la voile contribue à l'avancement du navire. Sans portance de la voile, le navire ne peut aller plus vite que le vent, et la force propulsive décroit au fur et à mesure que le navire se rapproche de la vitesse du vent pour devenir nulle.

Dans le cas avec portance, la voile a une incidence avec le vent apparent. Le vent apparent forme aussi un angle avec le vent. De même, le vent forme un angle avec la direction prise par le navire. L'effort de la voile ne contribue pas totalement à l'avancement du navire. Avec un voilier au près serré les conditions sont[[Note 16]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-36) :

* un angle vent apparent/route (ou [allure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allure_(marine))) du navire de 40 degrés
* la voile avec 20° d'incidence.

La portance ne participe pas totalement à l'avancement du navire, elle forme un angle de 40° soit la force propulsive n'est plus que de 76 % de sa valeur. Le restant soit 36 %[[Note 17]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-37) est perpendiculaire au navire, et forme l'effort qui engendre la dérive du voilier.

Si pour la même voile avec la même vitesse de vent apparent, le coefficient de portance est de 1.5 au près et 1 en vent arrière, la partie de l'effort de la voile participant à l'avancement du navire reste supérieure de 15 % au cas sans portance.

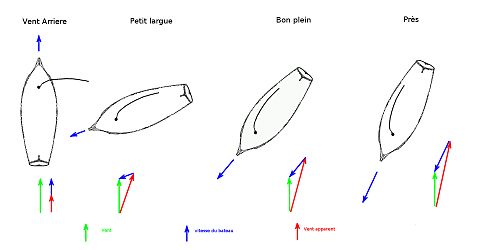
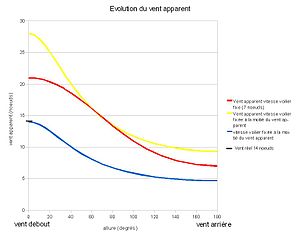
[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Allure.jpg)

Schéma exposant les vecteurs vitesses bateau, vent et vent apparent suivant les allures du bateau.

Autre avantage, plus le bateau accélère plus le vent apparent augmente, plus l'effort de la voile augmente. À chaque augmentation de vitesse la direction du vent apparent bouge, il faut régler de nouveau la voile pour être à l'incidence optimale (portance maximum). Plus le navire accélère, plus l'angle "vent apparent et direction du navire" se rapproche, donc la poussée vélique est de moins en moins orientée en direction de l'avancement du navire, obligeant un changement de cap pour être de nouveau dans les conditions maximales de poussée vélique. Le navire peut donc aller plus vite que le vent. L'angle "direction du navire et vent" peut être assez faible, il en résulte que le navire peut être aux allures de près à travers. Le navire remonte au vent.

**3.4 Influence du vent apparent**

Lorsqu'un navire se déplace, sa vitesse crée un vent relatif. Ce vent relatif se cumule au vent réel. Cette somme des deux vents est appelée [vent apparent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vent_apparent). Si le navire se déplace vent debout, les deux vents se cumulent ; le vent apparent est plus important que le vent réel. Par vent arrière, l'effet est inversé, les vents se retranchent ; le vent apparent est plus faible que le vent réel. Le cumul de ces deux vents peut donc, dans certain cas, augmenter les performances d'un voilier.

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Vent_apparent-apparent-angle_apparent_wind.JPG)

Évolution du vent apparent suivant l'allure du voilier

Le graphe ci-dessus décrit l'évolution du [vent apparent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vent_apparent) suivant l'allure du voilier suivant deux cas. Le vent réel est fixé à 14 nœuds.

Dans le premier cas (courbe rouge), le voilier est à vitesse constante ici 7 nœuds. Ce cas se rencontre lors que le bateau est à moteur ou lorsqu'un voilier à déplacement[[Note 18]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-38) arrive à sa vitesse limite.

Dans le deuxième cas, le voilier n'est pas encore arrivé à sa vitesse limite. Pour simplifier, la performance (ou efficacité) du voilier ne varie pas suivant l'[allure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allure_(marine)) (direction du vent), ni la force du vent, ni ne dépend des voiles hissées ; elle est constante. La performance choisie est la suivante : le voilier est capable d'aller à la moitié du vent apparent, c'est-à-dire que le voilier va deux fois moins vite que le vent apparent. Bien sûr dans la réalité cette efficacité dépend des paramètres précédemment cités[[Note 19]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-39). Elle reste forcément inférieure au vent réel par vent arrière pour ensuite augmenter. Cette approximation reste assez réaliste pour les bateaux de plaisance de loisir (pêche, promenade), par-contre les voiliers de compétition arrivent à dépasser la vitesse du vent réel. Pour les plus performants tels que l'hydroptère cette valeur atteint deux fois la vitesse du vent réel. En jaune est représenté la vitesse du vent apparent et en bleu la vitesse du navire.

À vitesse fixe du navire (courbe rouge), le vent apparent augmente progressivement. Le vent apparent dépasse le vent réel aux alentours de l'allure travers. Au près serré le vent apparent aura doublé. Vent debout le vent apparent est 50 % plus élevé que le vent réel. Cet effet est donc non négligeable.

Dans le second cas (courbe jaune) le vent apparent augmente peu jusqu'au travers puis augmente rapidement, le phénomène est principalement localisé au près. Vent debout, le vent apparent aura doublé. Mais même avec une efficacité faible du voilier, le gain de vent est plus fort que dans le premier cas ; vent debout la vitesse du vent apparent est le double de la vitesse du vent réel, soit 100 % de gain. Le voilier vent debout serait donc aussi rapide que le vent réel. Ceci explique pourquoi, les voiliers sont optimisés au près (de travers à vent debout). Bien sûr ces vitesses ne sont pas atteintes car le voilier ne peut dépasser le près serré. Cet avantage peut être encore plus réduit, un voilier à faible performance comme un vieux gréement dépasse péniblement le bon plein.

Donc, deux phénomènes se cumulent :

* la vitesse du vent apparent au près est bien plus élevée qu'au portant;
* pour un même vent apparent, la portance apporte une poussée vélique supplémentaire de 15 % par rapport au cas vent arrière.

Conséquence pour un vent **réel** identique, le gain de poussée vélique (et de vitesse) au près dépasse largement le cas vent arrière[[Note 20]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-40).

**3.5 Influence de la tension de la voile sur la portance**

Régler une voile consiste au réglage de deux paramètres :

* régler l'incidence, c'est-à-dire régler l'angle "vent apparent/voile" soit au maximum de puissance, soit au maximum de [finesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Finesse_(a%C3%A9rodynamique)) (rapport portance/traînée). Comme le vent varie suivant l'altitude, cet angle varie en hauteur (vrillage aérodynamique)
* choisir le profil de la voile de maximum de puissance ou de finesse.

Une voile est généralement souple[[Note 21]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-41). Lorsque la voile fonctionne en mode portance, si une voile n'est pas gonflée et tendue correctement alors il existe des plis sur la voile. Ces plis forment une rupture du profil. L'air ne glisse plus le long de la voile, les filets d'air se décollent du profil, des zones de recirculation apparaissent. Ces zones diminuent considérablement les performances de la voile. La voile dans notre propos sera donc considérée comme tendue et gonflée par le vent, pour éliminer tous les plis.

Un préliminaire important est à faire, une voile souple peut être rigide ou élastique. Premier cas la voile est rigide, c'est-à-dire la voile est composée de fibre qui ne s'allonge pas sous les efforts. Prenons l'exemple d'un voile composée d'un simple morceau de tissu. Une fois tendue la voile est plate. La voile se gonfle par le vent, si elle est insuffisamment tendue, la voile se creuse alors inévitablement il se crée des plis localisés aux points de fixation de la voile : point d'amure d'écoute ... Pour éviter les plis il faut tendre la voile plus fortement. La tension peut être considérable pour éliminer tous les plis. En théorie dans le cas infiniment rigide, il faut une tension infinie pour éliminer tous les plis. Donc dans le cas rigide, si la voile est bien tendue, la forme une fois gonflée par le vent est unique, creux et position du creux ne bougent pas.

Deuxième cas, la voile est élastique. La voile ne peut être infiniment élastique, la voile avec le moindre vent gonflerait indéfiniment. La voile est donc légèrement élastique. Reprenons notre voile plate. La voile est bien tendue et gonflée par le vent, les petits plis aux points d'attache de la voile disparaissent. La voile grâce à son élasticité se déforme légèrement à ses endroits de forte contrainte sur le tissu, ce qui élimine les plis. La voile n'est plus plate ! Autre conséquence, la voile grâce à son élasticité peut prendre plusieurs formes. En jouant sur la tension de la voile, la voile est plus ou moins creuse. Il est possible de faire varier la forme de la voile sans avoir de plis. Les formes possibles de la voile ne sont pas infinies, les formes sont intrinsèquement liées à la coupe de la voile (forme à "vide" de la voile). Donc dans le cas élastique, il existe une "famille" de formes que peut prendre la voile; le creux et la position du creux bougent.

Dans la réalité, les voileries recherchent une grande rigidité de la voile pour que la forme de la voile une fois gonflée par le vent soit celle calculée par la voilerie. Il faut néanmoins une certaine élasticité à la voile pour qu'elle puisse changer de forme (Cf. par exemple le vrillage de la voile). Effet un profil est optimum pour une unique condition de mer et de vent, en changeant légèrement de forme la voile est alors optimum pour une autre condition proche de vent et de mer. La voile élastique est donc optimum pour une "gamme" de condition de vent et de mer. Bien sûr, plus la voile est rigide, plus la gamme est restreinte.

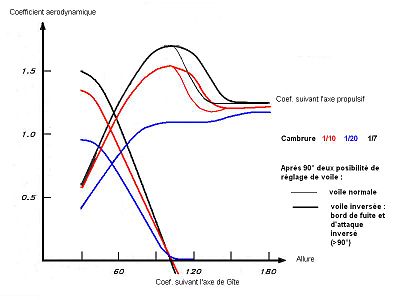
Le profil de la voile évolue suivant les réglages de la voile. À une incidence donnée, la voile peut prendre différentes formes. La forme dépend des tensions exercées sur la voile, essentiellement la tension exercée sur la chute via l'écoute. Autres tensions : au point d'[amure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Amure), le [Cunningham](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cunningham_(nautisme)), le [pataras](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pataras). Ces éléments permettent de décider d'une des formes possibles de la voile. Plus exactement ils permettent de décider de la position du creux maximum sur la voile[[22]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-42).

À chaque profil correspond une valeur adaptée du Cz. La position du creux le long de la corde offrant le plus de portance est à environ 40 % de la corde (bordure) en partant du guindant [[23]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-43). Le profil sous le vent de la voile est alors assez proche de la série NACA 0012 (NACA 0015, NACA 0018, etc. suivant les possibilités de réglage).

La position du creux sur la voile et la cambrure ne sont pas indépendants. Ces paramètres sont reliés entre eux par la forme de la coupe de la voile. C'est-à-dire, modifier la cambrure de la voile modifie aussi la position du creux de la voile.

**3.5.1 Cambrure**

Les courbes de portance (et traînée) en fonction et de l'angle d'attaque dépendent de la cambrure de la voile, c'est-à-dire de la forme plus ou moins prononcée du creux de la voile[[24]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-44), [[25]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-45).

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Evolution_des_coef_aerodynamiques_suivant_la_Cambrure_de_la_voile.JPG)Une voile à forte cambrure a un coefficient aérodynamique plus élevé, donc potentiellement un effort propulsif plus important. Par contre le coefficient aérodynamique engendrant la gîte varie dans le même sens, donc il faudra suivant les allures trouver une cambrure de compromis entre un effort propulsif important et une gîte acceptable.

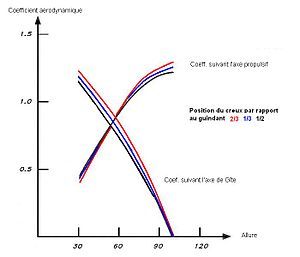
Évolution des coefficients aérodynamiques suivant la cambrure de la voile.

Il est à remarquer aussi qu'une voile trop fine (1/20), les performances se dégradent fortement. Il n'y a plus d'effet de portance, le coefficient propulsif plafonne autour de 1.

**3.5.2 Position du creux**

Les courbes de portance (et traînée) en fonction de l'angle d'attaque dépendent aussi de la position du creux de la voile, plus ou moins proche du guindant[[26]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-46),[[27]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-47).

Évolution des coefficients aérodynamiques suivant la position du creux sur la voile.

**[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Influence_de_la_position_du_creux_sur_la_voile.JPG)**

**3.6 Influence de l'allongement de la voile sur la portance**

Une voile ne génère malheureusement pas, un effort parfaitement perpendiculaire à sa surface. Le choc reste quand même un peu sur le côté. Il n'est pas négligeable. Cet effort de côté c'est-à-dire perpendiculaire à la portance est nommé [traînée](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e). La [traînée](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e) a plusieurs origines :

-allongement de la voile

-les pertes par fortement

-les pertes de formes ...

La traînée dans le cas d'une voile est du principalement à l'allongement de la voile nommé [Traînée induite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e_induite). Cette traînée est liée à la portance, c'est pourquoi le monde scientifique par souci pratique, utilise une formule de la trainée similaire à celle de la portance. Dans cette formule seul le coefficient aérodynamique \ Cx noté \ Ci [[Note 22]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-48) diffère. La traînée est aussi reportée sur les tables ou abaque donnant le coefficient de portance du profil. La formule de l'effort de traînée est :

F = \frac12 \times \rho \times S \times Ci \times V^2

Avec

F = la portance, exprimée en [newton](http://fr.wikipedia.org/wiki/Newton_(unit%C3%A9)) orientée perpendiculairement à la portance.

\rho(rhô) = [masse volumique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique) de l'air (\rho varie avec la [température](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) et la [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression)) ;

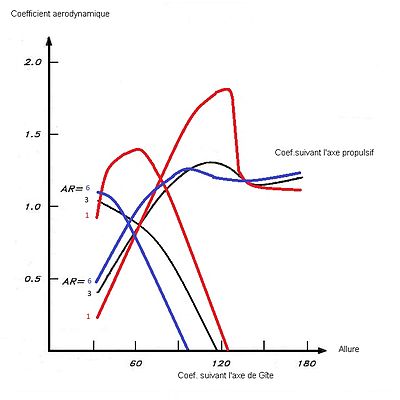
S = [surface de référence](http://fr.wikipedia.org/wiki/Surface_de_r%C3%A9f%C3%A9rence) ; c'est la surface de la voile en m²

Ci = [coefficient](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient) aérodynamique de la traînée. Il est donné dans les tables de portance.

V = Vitesse de déplacement soit la vitesse du vent par rapport à la voile ([Vent apparent](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vent_apparent)) en m/s.

La résolution des [Équations de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes) permet une simulation complète de toutes les types de traînées, mais la résolution de ces équations est pour l'instant "approchante" quoique les résultats partiels obtenus soient très bons (voir Cas de plusieurs voiles : résolution multidimensionnelle du problème). Ce paragraphe se réduira à la traînée d'allongement, pour les autres traînées voir l'article [traînée](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e). Une voile n'est pas infiniment longue. Il existe donc des extrémités, dans notre cas de voile à corne :

* la [bôme](http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%B4me)
* la [corne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Corne_(marine)).

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Influence_de_l'Allongement_sur_une_voile.JPG)Lorsque la voile propulse le navire, la face sous le vent est en dépression, la face au vent est en pression. Aux extrémités de la voile la dépression est en contact avec la pression. Naturellement les molécules d'air comprimées (beaucoup de chocs et fréquents) vont se précipiter dans la zone en dépression (peu de chocs et moins fréquents). La conséquence est que la zone en dépression a plus de molécules d'air que prévu donc la dépression est moins forte (plus de pression que prévue). De même la zone en pression a moins de molécules d'air que prévu donc la pression est moins forte. L'effet propulsif est moindre.

La distance entre la face sous le vent et la face au vent aux extrémités de la voile est très faible[[Note 23]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-49), une zone de pression aussi proche d'une zone de dépression, le mouvement de transfert des molécules d'une face de la voile à l'autre est très violent. Cela crée des turbulences importantes. Sur une voile bermudienne, la bordure et la chute sont les deux zones où ce phénomène existe. La traînée de la chute est incluse dans la traînée habituelle des courbes de portance où le profil est considéré comme infini (donc sans bordure). Par contre la traînée de la bordure est à calculer séparément. Cette perte d'efficacité de la voile à la bordure est nommée [traînée induite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e_induite).

**3.6.1 Influence sur les coefficients aérodynamiques**

Influence de l'allongement de la voile sur ses performances aérodynamiques

La traînée induite est en relation directe avec la longueur des extrémités. Plus la corne est longue plus la traînée induite est forte. Inversement une voile peut prendre des ris, c'est-à-dire que la surface de la voile se réduit sans que la longueur de la corne change. Cela signifie que la valeur de la traînée induite sera sensiblement la même. Pour une même longueur de corne, plus la voile est grande, plus le ratio traînée induite sur coefficient aérodynamique est faible. C'est-à-dire plus la voile est allongée, plus la traînée induite modifie faiblement la valeur du coefficient aérodynamique.

La forme courbe du mât ainsi que les lattes pour maintenir le profil courbe de la chute sont bien visibles sur cette photo d'une voile de [planche à voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Planche_%C3%A0_voile).

La traînée induite ne dépend que de l'allongement. L'[allongement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allongement_(a%C3%A9ronautique)) est défini[[28]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-50) :

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Windsurf.600pix.jpg)\lambda = {b^2 \over S}

Avec

*b* est la longueur du guindant

*S* la surface de la voile.

La traînée induite est :

Ci = {{Cz^2} \over {\pi \times \lambda \times e}} 

Cz : [coefficient de portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_portance) du profil

\pi(Pi) : 3.1416

λ : allongement (sans dimension)

e : coefficient d'Oswald (inférieur à 1) qui dépend de la distribution de portance en envergure. "e" pourrait être égal à 1 pour une distribution de portance "idéale" (elliptique). Une forme elliptique des extrémités diminuera au mieux la traînée induite. En pratique "e" est de l'ordre de 0.75 à 0.85. Seul un modèle trois dimensions et des essais permettent de déterminer la valeur de "e".

\lambda \times e est nommé [allongement effectif](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allongement_(a%C3%A9ronautique))

La distribution optimale de la portance diminuant au maximum la [traînée induite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e_induite) est de forme elliptique[[29]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-51), [[30]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-52). En conséquence, le guindant sera de forme elliptique, donc le mât sera non plus droit comme sur les vieux gréements mais le mât est courbé avec une forme la plus proche possible d'une ellipse. Cette configuration elliptique de mât est possible grâce aux matériaux modernes. Elle est très prononcée sur les planches à voile. Sur les voiliers modernes, le mât est courbé grâce au [haubanage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Hauban_(voilier)). De même la chute sera elliptique. Ce profil n'est pas naturel à une voile souple, c'est la raison pour laquelle la chute des voiles est rigidifiée avec des lattes pour obtenir cette courbure.

La distribution de portance idéale est elliptique, or la forme des voiles actuelles est plutôt une demi-ellipse, comme si la moitié de l'ellipse complète avait été plongée dans la mer. C'est normal, car comme la vitesse du vent est nulle au contact de la mer, la mer est alors d'un point de vue aérodynamique un ["miroir"](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Effet_de_bord_(physique)&action=edit&redlink=1) [[31]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-53),[[32]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-54),[[33]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-55),[[34]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-56), seul suffit une moitié d'ellipse.

Attention la forme elliptique est obtenue dans un flux d'air uniforme. Or la vitesse et la direction du vent suivant l'altitude est loin d'être aussi simple (cf. vrillage de la voile).

**3.6.2 Influence sur les efforts**

Les relations précédentes sont :

F_z = \frac12 \times \rho \times S \times Cz \times V^2

F_i = \frac12 \times \rho \times S \times Ci \times V^2

Ci = {{Cz^2} \over {\pi \times \lambda \times e}} 

\lambda = {b^2 \over S}

Il est déduit :

F_i= F_z^2/ (0.5 \times\rho \times V^2 \times e \times b^2)

Le résultat important du point de vue des efforts est que la traînée induite n'est pas liée à \lambdamaisb. Le moment de redressement est une limite liée à la capacité du navire à ne pas chavirer donc liée à la carène pas aux voiles. Ce même moment s'oppose au moment généré par les voiles. Si on approxime la trainée totale à la seul traînée induite alors le moment généré par les voiles est lié à :F_i / F_z (cf. le paragraphe *finesse et puissance* de cette article). Il est donc déduit à effort de portance identique que la capacité du navire à porter de la toile est liée à la hauteur du gréement pas son allongement. Ce [concept](http://fr.wikipedia.org/wiki/Charge_alaire) est également largement employé dans la conception aéronautique.

**3.7 Influence de la hauteur de la bordure par rapport au niveau de la mer**

Lors du paragraphe précèdent la mer est d'un point de vue aérodynamique un "miroir", seul suffit une moitié d'ellipse pour obtenir les meilleurs performances (faible traînée). Or dans la réalité la bordure des voiles n'est pas en contact avec la surface de la mer. La bordure est a une hauteur significative de la surface de la mer. Il existe donc un trou entre la bordure de la voile et la surface de la mer. Plus le trou est grand, plus la forme aérodynamique correspond à la forme de la voile sans son reflet; plus le trou est petit plus la forme aérodynamique ressemble à la forme de la voile plus son reflet sur la surface de la mer. Dans le cas d'une forme de demie ellipse de la voile, plus le trou est grand, moins la forme totale aérodynamique (voile + reflet dans la mer) ressemble à une ellipse complète, mais de plus en plus à une demie ellipse seule.

Ce trou a une influence non négligeable sur les performances. En effet il se crée un tourbillon supplémentaire au niveau du point d'écoute. Le tourbillon serait inexistant si la bordure était en contact avec la mer, mais le trou est bien présent dans la réalité. Ce tourbillon supplémentaire consomme de l'énergie et donc modifie les coefficients de portance et de traînée. Le trou n'est pas entièrement vide, suivant les voiles il est partiellement comblé par le franc bord et les superstructures éventuelles du voilier.

Les modifications de performances de la portance et de la traînée sont assez importantes. Seuls des essais ou une simulation numérique poussée permettent de quantifier ce phénomène. Pour fixer les ordres de grandeur, et pour une hauteur entre la bordure de la voile et le pont du voilier de 6 % de la longueur du mât, les variations sont :

* une augmentation 20 % du coefficient de traînée
* une perte de 10 % du coefficient de portance [[35]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-57).

Dans cette approche de la réduction de la traînée du point d'écoute sur les performances de la voile, il est à noter le comportement particulier et performant de la voile [Austronésienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Austron%C3%A9sienne_(voile)) [[36]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-ref-1-58), [[37]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-ref-2-59). Cette voile semble utiliser la surface de la mer pour réduire fortement les deux tourbillons d'extrémités de voile (pied de mat et corne de la voile) ; cela réduit la traînée et donc permet de meilleures performances. Ce comportement est à rapprocher de l'[Effet de sol](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_sol), est encore mal compris.

**3.8 Influence des bords de la voile : chute, guindant, et bordure**

Une voile hissée a une forme en trois dimensions. Cette forme est la forme choisie par le maître voilier. Or la forme 3D hissée est différente de la forme à vide (vue dans l'atelier d'une voilerie par exemple). Il faut tenir compte de cet aspect lors de la découpe de la voile.

La forme générale d'une voile est un polygone déformé. Le polygone est légèrement déformé dans le cas d'une voile bermudienne à fortement déformé dans le cas d'un spi. La forme des bords à vide est différente de la forme des bords une fois la voile hissée. Un bord convexe à vide peut passer à un bord droit voile hissée.

Le bord peut être :

* convexe appelé aussi rond
* concave
* droit

Quand la forme convexe n'est pas naturelle (sauf pour une bordure libre, un spi), la voile est équipé de lattes pour maintenir cette forme quand la forme convexe est prononcée. Excepté les spis qui ont une forme de ballon, les variations de la bordure par rapport à la ligne droite restent faibles, quelques centimètres.

Une fois hissée, une voile de forme elliptique serait l'idéal. Mais comme la voile n'est pas rigide :

* il faut un mât qui pour des raisons de possibilité technique est plutôt droit.
* la souplesse de la voile peut amener d'autres problèmes, qu'il vaut mieux corriger au détriment de la forme idéale elliptique (convexe).

**3.8.1 Chute**

La forme elliptique est l'idéal (convexe) mais, une chute concave à vide améliore le vrillage dans la partie supérieure de la voile et empêche la chute de « gonfler » dans les rafales, améliorant ainsi sa stabilité. La chute concave rend la voile plus tolérante et plus neutre. Une forme convexe est aussi un moyen simple d'augmenter la surface de la voile.

**3.8.2 Guindant**

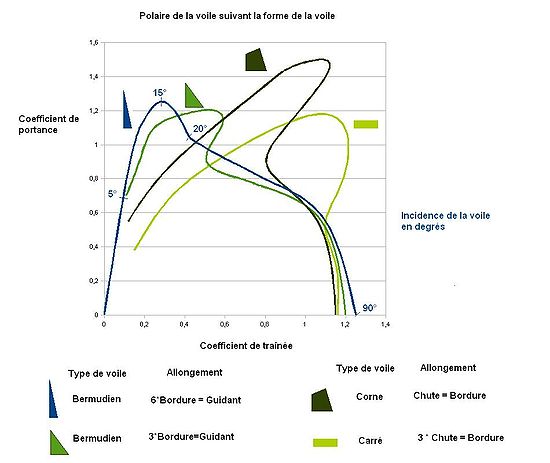
Une fois hissée, le bord doit être parallèle à l'étai ou au mât. Idem quand la voile est à corne. Les mâts et espars sont très souvent (sauf planche à voile) droits, la forme droite du guindant est donc à priori la forme à utiliser.

Mais le creux de la voile est normalement plus proche du guindant que de la chute. Donc pour faciliter la mise en place du creux de la voile une fois hissée, à vide, la forme du guidant est convexe[[38]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-60). La convexité du guindant est nommée rond de guindant. Par contre lorsque le haubanage est complexe, la forme du mât n'est plus droite[[39]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-61). Dans ce cas il faut en tenir compte, et la forme du guindant à vide peut être alors convexe en bas et concave en haut.

**3.8.3 Bordure**

Mise à part le comportement particulier et très performant de la voile [Austronésienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Austron%C3%A9sienne_(voile)) [[36]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-ref-1-58),[[37]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-ref-2-59), les voiles ne mettent pas en œuvre à l'heure actuel des systèmes tel que des [Winglet](http://fr.wikipedia.org/wiki/Winglet). La forme n'a donc que peu d'importance surtout sur des voiles à bordure libre. Sa forme est plus motivée par des raisons esthétiques. Souvent convexe à vide pour être droite une fois hissée. Lorsque la bordure est fixée à une bôme ou un espar une forme convexe est à privilégier pour faciliter la formation du creux de la voile. Par contre sur les bômes à enrouleur, la forme du bord de la bordure est plus choisie en fonction des contraintes techniques liées à l'enrouleur que de considération aérodynamique.

**3.9 Influence de l'incidence sur le coefficient aérodynamique : polaire d'une voile**

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Train%C3%A9-portance_d'une_voile.JPG)

Graphique représentant la relation entre la portance et la trainé pour une voile. Ce type de graphique est appelé « polaire d'une voile ».

Le coefficient aérodynamique de la voile varie suivant l'angle d'incidence. Le coefficient est souvent divisé en deux composantes :

* la composante perpendiculaire au vent apparent est nommée portance ;
* la composante parallèle au vent apparent est nommée traînée.

À chaque angle d'incidence va correspondre un couple unique portance-traînée. Les voileries représentent l'évolution de la traînée et de la portance dans un graphique nommé polaire d'une voile.

Le comportement de la voile suivant l'incidence (angle : vent apparent/voile) se décompose ainsi :

* la voile est libre, autant dire qu'il n'y a pas de voile ; c'est le cas portance et traînée nulles[[Note 24]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-62) ;
* la voile est perpendiculaire au vent, le mouvement est turbulent[[Note 25]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-63). C'est le cas portance nulle et traînée maximale ;
* il reste les cas intermédiaires :
  + De la voile libre à la portance maximale : l'écoulement est attaché, c'est-à-dire que le vent colle au profil. Il n'y a pas de tourbillons (zone morte) créés sur la voile. Il est à noter dans le cas d'une bonne voile bien réglée la portance maximale est supérieure à la traînée maximale ;
  + De la portance maximale, à la zone morte maximale : le vent ne colle plus correctement au profil de la voile. L'écoulement est moins stable il devient petit à petit décroché ou décollé. Il se crée une zone sous le vent, une zone morte diminuant l'efficacité de la voile. À un certain angle, la zone morte a envahi toute la face sous le vent (vers 50°, plus ou moins nette suivant les formes de voile).
  + De la zone morte maximale à la traîné maximale : la zone morte a envahi toute la face sous le vent, seule la face au vent intervient. L'air, à ces fortes incidences, est peu dévié de sa trajectoire, les parcelles d'air ne font que s'écraser sur **toute** la surface au vent de la voile. L'effort est donc quasi constant, donc la polaire de voile décrit un arc de cercle.

Comme la portance est plus efficace que la traînée pour contribuer à l'avancement du navire, les voileries essayent d'augmenter la zone de portance maximale, c'est-à-dire augmenter l'effort de portance et l'angle d'incidence. Tout le savoir d'une voilerie réside dans la diminution de la zone morte aux grandes incidences, soit dans la maîtrise de la couche limite[[40]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-64).

Autre point primordiale, la traînée et la portance ne dépendent pas que de l'angle d'incidence. Par nature une voile est souple, elle peut donc prendre une multitude de formes, donc de profils. À chaque profil correspond une polaire de voile. Un profil dépend de la tension de ses attaches et de la position de ses attaches dans l'espace (amure, drisse, écoute pour des voiles attachées en trois points). Il existe une multitude de polaire pour une même voile. Tous l'art du réglage est de sélectionner le bon profil, donc sélectionner une polaire de voile particulière, puis sur cette polaire choisie, choisir le bon angle d'incidence.

De façon générale les profils performants d'une voile sont proches de l'extrados de la série NACA 00XX (NACA 0009 0012 0015 0018). Donc dans une première phase, le réglage consiste à donner une forme NACA correcte à la voile en supprimant faux plis et autres défauts. Ensuite il faut régler finement (choisir le bon profil NACA) cambrure, creux, et vrillage à partir de cette première ébauche de forme de voile, puis choisir l'incidence.

Grâce à la polaire de la voile mais aussi celle de la carène du voilier, il est défini au niveau du voilier complet une polaire des vitesses du voilier.

**3.10 Influence de l'altitude : vrillage de la voile**

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Bluenose_Sails_Away_-_1921.jpg)Le voilier *The Bluenose* en 1921. On observe sur la photographie, le vrillage sur des voiles bien réglées, particulièrement sur la grand voile.

L'air se déplace principalement par tranches parallèlement au sol. Le sol est dans notre cas la mer. Si la densité de l'air peut être considérée comme constante pour nos calculs d'effort, ce n'est pas le cas de la répartition de vitesse du vent, elle sera différente suivant l'altitude. Comme pour la voile, les parcelles d'air proches de la mer sont accrochées à la mer. Au niveau de la surface de la mer, comme la différence entre la vitesse du vent et celle des parcelles d'eau est nulle, la vitesse du vent varie fortement dans la première dizaine de mètres d'altitude[[41]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-65), [[42]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-66), [[43]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Keikki-67). Cette progression rapide de la vitesse du vent suivant l'altitude, par conséquence, va faire varier aussi le vent apparent. Il en résulte que l'intensité et la force du vent apparent varient fortement pour une altitude comprise en 0 et 20 mètres[[44]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-68). Dans le cas d'une utilisation des voiles avec portance, elles doivent être vrillées pour avoir une bonne incidence par rapport au vent apparent tout le long du bord d'attaque (guindant)[[45]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-69).

K.W. Rugles donne une formule généralement admise de l'évolution de la vitesse du vent suivant l'altitude :

U = \frac {\mu'} {k} \ ln (\frac {z + z0} {z0}) [[46]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-70),[[47]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-71),[[48]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-72)

Avec les données collectées par Rod Carr[[49]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-73) les paramètres sont :

k = 0,42 ;

z l'altitude en m ;

z0 est une altitude qui tient compte de l'état de la mer, c'est-à-dire de la hauteur des vagues et leur vitesse :

0,01 pour 0 à 1 [Beaufort](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_de_Beaufort) ;

0,5 pour 2 à 3 Beaufort ;

5,0 pour 4 Beaufort ;

20 pour 5 à 6 Beaufort ;

\mu' = 0,335 lié à la viscosité de l'air ;

U en m/s.

En pratique le vrillage doit être réglé pour optimiser les performances de la voile. Le moyen principal de réglage est la bôme pour une voile bermudienne. Plus la bôme sera tirée vers le bas, moins le vrillage sera important[[50]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-74).

**3.11 Influence de la rugosité de la voile**

Comme une carène la rugosité joue un rôle sur les performances de la voile. Les petits creux et bosse microscopique ont un effet stabilisateur ou facilite les décrochages de la voile (passage du mode laminaire à turbulent), ils ont aussi une influence sur les pertes par frottement.

Ce domaine fait l'objet de recherche en condition réel (soufflerie), elle est pour l'instant pas encore maîtrisé et donc peu simulé numériquement. Il apparait à grand nombre de Reynolds, bien choisie la rugosité permet de prolonger le mode laminaire de quelques degrés d'incidence de plus. Le comportement est *bizarre* et pour plus d'information voir la référence suivante[[51]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-75), [[52]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-76).

**3.12 Influence du nombre de Reynolds**

La formule F = \frac12 \times \rho \times S \times C \times V^2est une formule pratique simple à manipuler. Le coefficient de portance n'est pas indépendant des variables vitesse du vent et surface caractéristique. Le coefficient de portance dépend du nombre de Reynolds comme l'indique les tables et polaires. Le nombre de Reynolds est définie par \mathrm{Re} = {{{\bold \mathrm U} L} \over {\nu}}. Le nombre de Reynolds dépend donc de U vitesse du vent et L longueur de la bordure. Mais l'influence du nombre de Reynolds est du second ordre par rapport aux autres facteurs ; c'est-à-dire que les performances de la voile varient très peu pour une variation importante du nombre de Reynolds. L'influence très faible du nombre de Reynolds est incluse directement dans les tableaux (ou abaque), en traçant le coefficient de portance (ou de traînée) pour plusieurs valeurs du nombre de Reynolds (généralement pour trois valeurs).

Plus le vent est élevé plus les particules d'air ont tendance à continuer à se déplacer en ligne droite; donc moins elle colle à la voile; donc le passage au mode turbulent est proche. Le nombre de Reynolds est le rapport entre l'effet viscosité et quantité de mouvement du vent. Il caractérise donc le passage du mode laminaire au mode turbulent. Plus le nombre de Reynolds est élevé meilleures sont les performances de la voile [[53]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-77).

Augmenter l'incidence maximale ou encore le coefficient de portance grâce au bon choix du nombre de Reynolds est une optimisation intéressante mais reste très secondaire. Le nombre de Reynolds dépend uniquement de trois paramètres : la vitesse, la viscosité et une longueur.

La viscosité est une constante physique, c'est une donnée d'entrée pas une variable d'optimisation.

La vitesse du vent est une variable d'optimisation. Il est évident qu'il est recherché un vent le plus élevé possible sur la voile pour un effort vélique maximal bien plus que pour des raisons de nombre de Reynolds. Ce paramètre a donc déjà fait l'objet d'une optimisation.

Il reste la longueur caractéristique. La voile est par nature inélastique donc de dimension fixe, donc la longueur caractéristique est fixe pour une voile donnée son optimisation est du ressort de l'architecte naval, sauf pour le marin à changer de voile. L'optimisation des performances des voiles en jouant sur la longueur caractéristique du nombre de Reynolds est masquée par l'optimisation d'autre paramètre, par exemple la recherche de meilleur performance de voile en jouant sur le poids des voiles ; le poids des voiles est un point important pour l'équilibre du navire. Il suffit de peu de poids dans les hauts pour créer un moment important affectant l'équilibre du navire. Or plus le vent est fort plus le tissu de voile doit être résistant donc lourd, le marin recherche un jeu de voile adapté à chaque gamme de vitesse de vent pour des raisons de poids bien plus que pour des raisons de nombre de Reynolds : foc, voile tempête, grand voile, voile de cap, génois léger, génois lourd ... Chaque vitesse de vent a donc sa voile, la forme peut donc changer entre chaque voile. Or plus le vent est fort plus la voile est petite donc des longueurs caractéristiques différentes. Le choix de la forme des voiles (donc la longueur caractéristique) est donc guidé par d'autres critères plus importants que le nombre de Reynolds.

Le prix d'une voile est très élevé et donc pour donner sa chance à tous, la compétition limite le nombre de voiles.

Les coefficients de portance et de traînée, donc l'influence du nombre de Reynolds, sont calculés en résolvant les équations de la physique régissant l'écoulement de l'air sur une voile via la méthode de la simulation numérique. Les résultats trouvés sont bien corrélés avec la réalité, moins de 3 % d'erreur [[54]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-78).

1. **Finesse et puissance**

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:420er_002.jpg)Exemple de voilier au près. L'équipage se met au rappel pour diminuer la gîte.

Les courbes polaires de voile au départ ressemblent à des droites, ceci est très bien expliqué grâce à la [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces). Le rapport trainée et portance est constant, donc à [finesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Finesse_(a%C3%A9rodynamique)) constante. Puis la pente de la polaire devient de plus en plus horizontale, pour passer par un maximum de portance. Puis à incidence plus élevée une zone morte apparaît, diminuant l'efficacité de la voile. Le but du navigateur est de régler la voile dans la zone où la poussée est maximale.

Pour illustrer ce chapitre, les méthodes de réglage proposées se basent sur un voilier à gréement bermudien à bôme. Il est rare de régler un voilier en puissance ou en finesse, c'est-à-dire à ces optimums théoriques ; en effet, le vent apparent n'est pas constant, pour deux raisons :

* le vent lui-même n'est pas constant, ni même simplement variant. Il y a les sautes du vent, il existe des rafales de vent, les risées...
* même en supposant le vent constant, le bateau pouvant être soulevé de manière conséquente selon la houle, en haut d'une vague, le haut de la voile trouvera des vents plus rapides, dans le creux de la vague c'est l'inverse il y a moins de vent (le voilier se redresse). Mais aussi en montant ou descendant une vague le voilier tangue, c'est-à-dire le haut de la voile est propulsé vers l'avant puis l'arrière modifiant constamment la valeur vitesse du vent apparent, relativement à la voile.

Le vent apparent varie tout le temps et très rapidement, il est souvent impossible au marin d'adapter aussi rapidement les réglages des voiles à ces conditions de vents. Donc il est impossible d'être à l'optimum. Or un réglage à l'optimum passe rapidement à réglage désastreux, pour une petite variation de vent. Il vaut donc mieux trouver un réglage certes moins optimum mais plus tolérant aux conditions changeantes du vent apparent [[Note 26]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-79).

Article connexe : [Réglage de la voilure](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9glage_de_la_voilure).

Le paramètre important influant sur le type de réglage de la voile est la forme de la carène. La carène est de forme allongé pour offrir un minimum de résistance à l'avancement. Conséquence, il faut un couple bien plus important pour incliner la carène vers l'avant (assiette) que d'incliner vers le côté le navire (gîte). En vent arrière, la poussée vélique est orienté dans le sens du déplacement donc engendrera une assiette faible. La surface de voile hisser peut être importante sans que l'assiette soit importante. Au près la situation change, une partie de l'effort est perpendiculaire à l'axe principale du navire. Pour la même poussé vélique vent arrière, l'effort perpendiculaire au navire engendre une gîte considérable.

Une voile est placée sur un navire et donc le bon fonctionnement du navire ne dépend pas uniquement du maximum de performance de la voile. En effet, sous forte gîte (ou assiette), la partie supérieure de la voile dévente et ne profite pas des vents plus forts en altitude, c'est-à-dire la zone où le vent peut donner un maximum d'énergie à la voile (et donc au bateau) [[55]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-80),[[56]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-81),[[57]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-82),[[58]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-83),[[43]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Keikki-67).

Or le phénomène de gîte est bien plus sensible à la poussé vélique que l'assiette. En conséquence pour minimiser la gîte, le type de réglage de la voilure sera différent au près ou au portant :

* aux allures du près, le réglage est un réglage finesse,
* aux allures du portant, le réglage est un réglage puissance.

**4.1 Limites des performances d'une voile**

Une voile ne peut récupérer tout l'énergie du vent. Une fois que les particules ont transmis leur énergie à la voile, il faut qu'elles laissent la place à de nouvelles particules qui vont à leur tour donner de l’énergie à la voile. Comme les anciennes particules ayant transmis leur énergie à la voile s'évacuent, cela signifie que ces particules ont conservé une certaine énergie pour pouvoir s'évacuer. Cette énergie restante à la particule n'est pas négligeable. Si les anciennes particules évacuent trop rapidement pour laisser place aux nouvelles particules, ces anciennes particules emportent avec elles une grande quantité d'énergie. Elles ont donc transmis à la voile que peu d'énergie. Il y a donc que peu d'énergie par unité de temps transmis à la voile (ou [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique))). Inversement si les anciennes particules s'évacuent trop lentement elles ont certes transmis beaucoup d'énergie à la voile mais elles empêchent les nouvelles de transmettre de l'énergie. Il y a donc que peu d'énergie par unité de temps transmis à la voile (ou [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique))). Il existe un juste milieu entre vitesse entrante des particules et vitesse de sortie des particules donnant un maximum de [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique)) à la voile. Cette limite se nomme [Limite de Betz](http://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz) :

 P_{extraite}^{max}=\frac{16}{27}.P_{arrivant_sur _la voile}Avec  P_{arrivant_sur _la voile} = P_{cinetique} = \frac{1}{2}.\rho.S.v_{amont}^3 \,

\rho : masse volumique du fluide (1,23 kg/m³ pour l'air à 20 °C)

S : surface de la voile en m²

v_{amont} : vitesse incidente (amont) du fluide en m/s, c'est-à-dire la vitesse du vent apparent dans le cas d'un voilier.

Donc la voile ne peut récupérer au maximum que 60 % de l’énergie contenue dans le vent. Le reste étant utilisé par les parcelles pour s'évacuer de la surface de la voile.

La formule de l'effort sur la voile est F = \frac12 \times \rho \times S \times C \times {V_{vent apparent}}^2

Ou

\ S est une surface caractéristique dans le cas de la voile la surface de la corde.

\ C est le coefficient aérodynamique.

\ C \times S représente le pourcentage d'énergie récupéré sur l'extrados multiplié par la surface de l'extrados plus le pourcentage d'énergie récupéré sur l'intrados multiplié par la surface de l'intrados. Par définition pour une voile, le tissu n'a qu'une faible épaisseur, donc la surface de l'extrados est identique à la surface de l'intrados. En considérant la voile comme peu élastique, le profil de la voile reste relativement mince. La cambrure de la voile ne peut être en mode portance très importante sous peine de voir les filets d'air se décoller du profil et donc diminuer les performances de la voile. Même pour une voile fortement déformé comme un spi, il faut tendre le spi pour intercepter un maximum de vent. La surface de l'extrados et la surface de la corde restent donc proches. Les surfaces intrados et extrados de la voile, la surface de la voile et la surface de la corde sont proches. La surface de la voile est assimilée à la surface de la corde\ S, donc le coefficient aérodynamique \ Ca pour limite supérieur 2.

D'autre part le vent apparent est lié au vent réel par la formule :

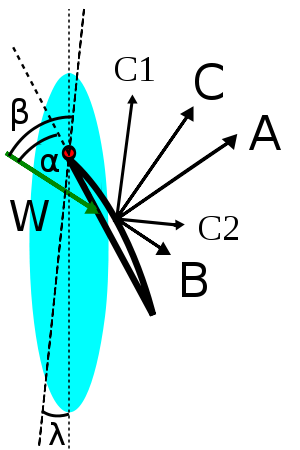
 {V_{vent reel}}^2 = {V_{vent apparent}}^2 + {V_{vitesse bateau}}^2 -2 \times V_{vent apparent} \times V_{vitesse bateau} \times cos (\beta -\pi) 

Avec  \betaangle entre le vent réel et la direction de déplacement du voilier.

Le vent réel dépend du vent apparent et de la vitesse du bateau. C'est-à-dire que le vent réel est indépendant de la vitesse du bateau. Le bateau peut prendre n'importe quelle vitesse, le vent apparent s'adaptera. Donc si le marin arrive à augmenter le vent apparent alors comme le vent réel est quasi fixe, la vitesse du bateau augmente. Et ceci sans limite.

Concrètement, les recherches effectuées ont pour but d’améliorer la vitesse des voiliers. Mais, les améliorations sont limitées par les lois de la physique. Avec tous les avancés technologiques possibles, le coefficient aérodynamique \ Ca une limite théorique, ce qui limite l'effort récupérable à vitesse constante. De toute façon l’énergie récupérée du vent intercepté par la voile est limité à 60 %. Le seul moyen pour le marin d'aller plus vite est d'augmenter l’énergie récupérée par unité de temps (ou [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique))) en augmentant la surface de vent intercepté par la voile. Sans rentrer dans des calculs, plus le voilier avance vite, plus la surface interceptée augmente, plus le voilier reçoit d’énergie par unité de temps, il va encore plus vite. Si le voilier est plus rapide, la surface interceptée est encore plus grande, il reçoit encore plus d’énergie, il va encore plus vite que précédemment ... Le voilier rentre alors dans un cercle vertueux. Le vent apparent augmente indéfiniment; sans problème de gîte et de résistance de carène, le voilier accélérerait indéfiniment. L'autre possibilité est d'augmenter la surface des voiles. Le marin lui ne peut augmenter indéfiniment la surface des voiles, il est limité par les possibilités du gréement. Augmenter la surface des voiles est du ressort de l'architecte naval qui lui est limité par la résistance des matériaux. Mais aussi la préoccupation des architectes navals, particulièrement en compétition, est donc d'augmenter autant que possible ce fameux vent apparent.

**4.2 Finesses**

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sail_force_parts.svg)Décomposition au près des forces vélique noté A : la portance (C) et la trainée (B). C1 est partie de la portance de la voile participant à l'avancement du navire et C2 la portance de la voile participant à gîte du navire. (W) est le vent, (\lambda) la dérive.

Le vent apparent forme un angle avec l'axe du navire et la corde de la voile ne correspond pas à l'axe du navire. Concrètement au près cela signifie que :

* une (petite) partie de la traînée de la voile ralentit le navire
* l'autre partie de la traînée de la voile participe à la gîte du navire
* une grande partie de la portance de la voile participe à l'avancement du navire,
* l'autre partie de la portance de la voile participe à la gîte du navire[[59]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Finot_1-84).

Au près, la moindre poussé vélique engendre un effort perpendiculaire donc de la gîte. La gîte optimum offrant le maximum de poussé vélique est fixé par l'architecte naval. Elle dépend des moyens techniques mis en œuvre pour contrecarrer la gîte nommée aussi contre-gîte (ballast, [Foils](http://fr.wikipedia.org/wiki/Foil) et bien sûr le contrepoids cf. la quille lestée). Il est possible de contrecarrer quasi totalement la gîte grâce à des technologies de mât/quille basculant, de foils type hydroptère, etc. Ces technologies sont couteuses en argent, poids, complexité et rapidité de changement de réglage, elles sont donc réservées à une élite : la compétition. Dans les cas courants, la gîte existe. Or la moindre gîte commence à faire diminuer la poussée vélique, l'architecte doit trouver un compromis entre la quantité de moyens mis en œuvre pour diminuer la gîte et la gîte raisonnable restante. Le navire est donc optimisé pour cette gîte raisonnable restante, la gîte raisonnable restante est donc la gîte optimale. L'architecte naval fixe souvent la gîte optimale entre 10° et 20° pour les monocoques [[60]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-85). En conséquence, le navigateur doit autant que possible être à la gîte optimale choisie par l'architecte. Moins de gîte signifie que le voilier n'est pas au maximum de performance de ses voiles et le profil de la voile a de faibles performances. Plus de gîte signifie que le haut de la voile dévente, et donc une poussée diminuée; dans ce cas le profil de la voile est certes performant, mais ce n'est pas parmi les profils performants, le bon.

Du point de vue du marin, il doit se placer à la gîte optimum. À cette gite optimum correspond un effort perpendiculaire qui est la projection de la poussé vélique suivant cette axe. Le reste de la poussé vélique fait avancer le navire. Le travail du marin est donc de minimiser le ratio effort perpendiculaire sur effort contribuant à l'avancement.

Ce ratio dépend de l'allure, de l'incidence, de la traînée et de la portance pour un profil donné.

Comme la portance est le principal contributeur à l'effort qui fait avancer le navire, et la traînée le principale contributeur à l'effort perpendiculaire, cela reviens en première approche à minimiser le ratio trainée sur portance, donc maximiser la [Finesse (aérodynamique)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Finesse_(a%C3%A9rodynamique)).

L'allure dépend simplement du cap choisie par le navigateur. Le cap dépend lui, de la destination. L'allure est donc un paramètre fixe, pas une variable d'optimisation. Mais chaque allure (angle du vent apparent par rapport à l'axe du navire) a des réglages optimums différents.

Comme la portance est le principal contributeur à l'effort qui fait avancer le navire, le réglage sera d'abord de sélectionner les profils de voile donnant un maximum de portance. À chacun de ces profils correspond une polaire différente.

Une voile est généralement souple, le navigateur modifie le profil grâce [[61]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-86) :

* à la position du creux de la voile en jouant sur les éléments agissant sur la tension du tissu de la voile
* au vrillage plus ou moins prononcé de la voile en jouant sur la bôme via le [Hale-bas](http://fr.wikipedia.org/wiki/Hale-bas).

Il existe autant de polaires de voile pour la même voile que de vrillages et de positions de creux possibles, il faut donc choisir la meilleure polaire de voile.

Le vrillage sera réglé pour avoir une incidence constante le long du guindant. Il serait dommage de ne pas être à l'incidence optimum tout le long du guindant et d'avoir une partie de voile pas à son maximum de performance.

La position du creux de voile influe sur la [finesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Finesse_(a%C3%A9rodynamique)) de la voile. La meilleure finesse sera obtenue lorsque le creux de voile sera le plus avant possible. Plus le creux est sur l'avant plus la courbure du guidant est prononcée. Il arrive un moment où les filets d'air ne collent plus à la voile, la voile décroche. Il se crée une zone morte, une zone de turbulence qui diminue l'efficacité de la voile. Cette zone inefficace apparaît et est située juste après le guindant sur l'intrados, les penons dans cette zone deviennent alors instables[[62]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-BAY_1-87). La règle générale qui guide la démarche du réglage de la voile reste une lapalissade, plus le tissu est tendu plus la voile est plate, moins il y a de creux. Le voilier a plusieurs éléments agissant sur la tension du tissu de la voile :

* la tension du [Cunningham](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cunningham_(nautisme)),
* du point d'amure,
* du point de drisse,
* du point d'écoute de la voile.
* du [pataras](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pataras),
* haubans. Ils agissent de façons indirectes.

Ces éléments peuvent avoir une influence couplée, par exemple la tension du pataras agit aussi sur la tension du point de drisse et donc la forme du guindant. L'influence est largement localisée, par exemple plus la tension est forte sur le point d'écoute de la voile moins il y a de creux proche du point d'écoute de la voile, de même jouer sur le pataras c'est-à-dire la ralingue de guindant a peu d'influence sur l'écoute. Techniquement il est difficile de mettre en place des moyens de réglage indépendant les uns des autres. Plus le gréement est compliqué plus il y a d'interaction entre les réglages. Le réglage du voilier est alors très technique, un véritable casse tête. Pour bien comprendre la difficulté, c'est comme si sur une moto la pédale d'accélérateur bougerait aussi le guidon !

Pour une voile souple, la [cambrure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cambrure) de la voile et la position du creux de la voile sont liés. Leur dépendance découle directement de forme de la coupe de la voile. Donc positionner le creux revient à fixer la cambrure. La cambrure est un facteur prépondérant sur la portance maximal du profil. C'est l'architecte naval ou la voilerie qui fixe la coupe de la voile donc la relation creux-cambrure. L'épaisseur du profil correspond à l'épaisseur du tissu de voile. Les variations d'épaisseur d'une voile à l'autre sont négligeables devant les dimensions de la voile. L'épaisseur n'est pas une variable à optimiser, par contre l'épaisseur du mat lui est un facteur bien plus important d'où les mats profilés [[63]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-88).

D'autre part, pour l'architecte naval, la forme de voile offrant une grande finesse est la voile triangulaire allongée (cf. graphique [polaire d'un voile suivant les formes de voile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Influence_de_l.27incidence_sur_le_coefficient_a.C3.A9rodynamique_:_polaire_d.27une_voile)), ceci explique pourquoi les bateaux modernes utilisent le gréement bermudien[[Note 27]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-89).

La traînée pour une voile à trois origines :

* traînée induite (voir § Influence de l'allongement de la voile sur la portance). Comme le profil n'est pas de longueur infinie, au bord de la voile (bordure et corne), il faut égaliser la dépression de l'intrados et avec la surpression de l'extrados ; cet équilibrage dissipe de l'énergie que l'on retrouve sous la forme de la traînée induite.
* traînée de forme et de frottement, c'est la traînée des abaques des profils. Forme et frottement sont liés au choix du profil.

La théorie de la corde portante de [Prandtl](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Prandtl) appliquée aux [profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) est une théorie moins complexe que la résolution des [Équations de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes) mais explique bien les phénomènes. Elle démontre que la [finesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Finesse_(a%C3%A9rodynamique)) est égale à un terme principal ([traînée induite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e)). Cette théorie est très proche de la réalité pour un profil mince à faible incidence [[64]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-90), dans la réalité, il existe des termes secondaires moins importants, ces termes regroupent la [traînée de forme, de frottement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e). Cette théorie démontre que le terme principal est égal à un coefficient multiplicatif prêt à l'allongement (effectif) [[21]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-aeroelasticite-33). Comme l'allongement est défini par l'architecte lors du choix du plan de voilure, il appartient à l'architecte d'améliorer au mieux l'allongement de la voile, ce qui confirme le choix de gréement bermudien ; le marin lui ne peut que jouer sur le choix du profil influant sur les termes secondaires et le coefficient de portance.

**Explication**

La [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces)[[65]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-91) est appliquée à un profil 3D. Les résultats 2D classiques (profil d'allongement infinie) de la [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) sont complétés. Le profil infini est tronqué et à chaque extrémité du profil tronqué est rajouté un vortex autrement dit une ligne portante est rajoutée sur toute la périphérie du profil.

La théorie donne alors pour la traînée [[66]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-92) :

Ci = {{Cz^2} \over {\pi \times \lambda \times e}} 

avec

* Cz : [coefficient de portance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_portance) du profil
* \pi : pi ou 3.1416
* λ : allongement (sans dimension) \lambda = {b^2 \over S}avec *b* est la longueur du guindant, *S* la surface de la voile.
* e : coefficient d'Oswald

La théorie modélise uniquement la traînée induite les deux autres traînées forme et friction sont négligées [[67]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-93). Pour fixer les ordres de grandeur :

* Cz varie de 0 à 1.5 environ, une valeur de 1 est prise
* e est compris entre 0 et 1 pour une voile il est au environ de 0.8
* \lambda l'allongement. pour un [Edel 2](http://fr.wikipedia.org/wiki/Edel_2) la grand voile est de 10 m2 avec une bordure de 2,5 m soit \lambda = 1.6

\ Ci est pour un [Edel 2](http://fr.wikipedia.org/wiki/Edel_2) de 0.2.

Mais la voile a aussi son reflet dans la mer qu'il faut tenir compte. Si on néglige la distance entre la mer et la bordure de voile alors, la voile et son reflet a une surface double et un guidant de longueur double.

Donc \ Ci est de 0.1.

Dans la réalité \ Ci est situé entre ces deux valeurs. Cette valeur varie suivant l'état de la mer autrement dit suivant la qualité du miroir.

Pour compléter, le calcul du coefficient d'Oswald repose sur le calcul intégral. Il est peu abordé par la littérature car il est calculé de manière indirecte. Les formules ne sont pas toute écrites avec le coefficient d'Oswald, il existe aussi une autre notation, \ \delta :

Ci = {{Cz^2} \over {\pi \times \lambda \times e}} = {{Cz^2} \over {\pi \times \lambda }} (1+ \delta) 

La [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) appliquée en 3 D donne les formules pour la traînée induite [[68]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-94). Il est à noter dans le cas d'une voile, la cambrure peut être forte (exemple un génois). Il faudrait reprendre les calculs en fonction de cette cambrure qui n'est plus négligeable. La mathématique démontre aussi que  \ epeut être calculé non pas via une série de Fourier mais via un calcul intégral [[69]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-95).

Article connexe : [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces).

La finesse est directement déduite de la formule de la traînée induite :

Finesse = Cz / Ci = {{\pi \times \lambda \times e} \over Cz } 

La théorie donne alors pour la portance [[70]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-96) , [[71]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-97) :

Cz = Cz' * ({{\lambda } \over {\lambda + 2}}) 

avec

* λ : allongement (sans dimension) \lambda = {b^2 \over S}avec *b* est la longueur du guindant, *S* la surface de la voile.
*  Cz' coefficient de portance calculé par la théorie avec un profil d'allongement infinie.

Dans le cas d'une voile les vitesses du vent sont très éloignées du Mach ; il s'en suit que le facteur correctif du [Nombre de Mach](http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Mach) est approximé à 1.

La théorie donne alors pour la portance d'un profil d'allongement infini :

\ Cz' = 2 * \pi * (\alpha + \alpha 0) 

avec

*  \alpha angle d'incidence entre la corde de la voile et le vent apparent.
*  \alpha 0en 3D ce coefficient est en fait légèrement diffèrent du calcul 2D.

d'où

Finesse = ({{e} \over {\alpha + \alpha 0}}) * ({{\lambda + 2 } \over {2}}) 

L'architecte naval fixe e et  \lambda . Le marin lui fixe  \alpha et  \alpha 0. Dans la littérature anglaise, les courbes portance en fonction de la traînée sont appelées *drag polar*.

Le marin n'a pas un choix total du facteur  \alpha 0, autrement dit il ne peut pas choisir totalement la forme du profil. L'ensemble des profils possibles est limité. En effet, la voilerie fixe une coupe de la voile donc définit un ensemble de profils possibles que peut prendre la voile suivant les réglages de la voile. Pour illustrer, la voile est coupée pour donner un profil NACA0009, mais si la voile n'est pas bien tendue, la voile peut prendre les profils NACA0012 NACA0015 NACA0018 et intermédiaires ; la forme générale reste la même, les relations entre position du creux et cambrure, galbe/corde, etc. eux sont fixe. Le choix de la forme générale est du ressort de la voilerie (ou l'architecte naval).

Or une finesse élevée correspond dans la gamme des profils possibles de la voile à un creux au maximum sur l'avant (voile bien tendue) [[72]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-98). Du point de vue du marin pour le réglage, il cherchera à avancer le creux, mais cela ne veut pas dire qu'il pourra le positionner où il le veut. Le choix du profil par la voilerie aura peut être comme conséquence de positionner la finesse max quand le creux est à 30 % sur l'avant comme aussi bien à 50 % sur l'avant. Dans le premier cas, il aura la possibilité de positionner le creux entre 30 % et 100 % alors dans le deuxième cas le marin sera limité entre 50 % et 100 %.

Bien sûr, cette explication reste une bonne approche, les simplifications faites et les autres types de traînée forme et frottement ont un impact secondaire mais non négligeable pour la compétition [[73]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-99). La surface perpendiculaire au vent est un facteur important, plus la profondeur du creux (cambrure) est faible, plus la finesse est élevée comme le vrillage [[74]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-100). La voile plate est préférable à un ballon au prés. Cela implique que la forme générale d'une voile bien réglée est une voile tendue au près. Mais la voile ne doit pas être pas trop tendue car elle serait trop plate, la portance alors diminue [[75]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-101).

Ces calculs sont des approximations de la réalité, ils sont encore relativement simples, ils évitent les calculs 3D extrêmement lourds (voir [Effort sur une voile#Cas de plusieurs voiles : résolution multidimensionnelle du problème](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#Cas_de_plusieurs_voiles_:_r.C3.A9solution_multidimensionnelle_du_probl.C3.A8me)). Ils restent pratiques pour dimensionner un gréement ou pour modéliser un gréement en vue de l'étude du comportement à la mer du voilier en entier.

(...)

Une finesse plus élevée signifie moins de traînée, donc moins de gîte pour le même effort de poussée. La finesse maximale sera donc privilégiée. Donc parmi les profils restant qui donnent un maximum de portance, le navigateur sélectionne parmi ces profils le profil ayant une finesse maximale (creux vers l'avant de la voile). Maintenant, le profil de voile est défini, il reste à trouver le point de la polaire de ce profil donnant le maximum de poussée au navire, c'est-à-dire le choix de l'angle d'incidence du profil.

Sur une voile triangulaire, la zone de forte portance (0.9 à 1.5) comporte deux points caractéristiques :

* la finesse maximale (de 0 à 5° d'incidence c'est-à-dire la zone droite) ;
* la portance maximale (l'incidence de 15° du graphique).

Comme la traînée ralentit le navire, il faut que la partie de la portance qui fait avancer le voilier soit supérieure à la contribution de la traînée qui ralentit le navire :

F poussee = portance \times sin(\beta) -trainee \times cos(\beta) > 0

Or

 trainee = finesse(\alpha) ^{-1} \times portance 

D’où

\ finesse(\alpha) ^{-1} < tg(\beta) 

Avec :

 \alpha  angle d'incidence entre la corde de la voile et le vent apparent,

 \beta angle entre le vent apparent et la route fond du navire (route réelle du navire donc incluant sa dérive). Cela signifie qu'il ne faut pas dépasser le point de la polaire où la tangente à ce point est inférieure à l'angle  \beta . D'où entre la finesse maximale notée pt1 (fin de la zone droite) et une finesse de tg(\beta) notée pt2.

L'évolution de la poussée qui fait avancer le navire évolue comme suit :

* de 0° d'incidence au pt1, la poussée croit linéairement ainsi que la gîte.
* de pt1 à l'optimum, la poussée croit toujours mais la polaire s'aplatit, ce qui veut dire que la traînée ralentit plus vite le navire que la portance en rajoute. Mais globalement aussi la gîte augmentant, la voile a un vent apparent plus faible. Le haut de la voile n'est plus dans les vents rapides d'altitude.
* de l'optimum au point pt2, la poussée décroit jusqu'à devenir nulle, le bateau se redresse.

Le réglage d'incidence optimale est entre pt1 et pt2. Le point optimal dépend donc de deux facteurs :

* l'évolution de la finesse ;
* l'évolution de la gîte.

Le navigateur devra trouver le compromis entre ces deux facteurs entre pt1 et pt2. Le point de fonctionnement optimum se trouve ainsi proche du pt1 au près serré, où le facteur gîte est prépondérant. Comme il est plus difficile de faire gîter au grand largue, l'optimum sera plus proche de pt2.

Attention, la finesse est déterminée grâce aux polaires de la voile. Les polaires sont déterminées indépendamment de la vitesse du vent apparent ; or la gîte intervient sur le paramètre vitesse (vent dans la voile), par conséquence la finesse des polaires de la voile ne dépend pas de la gîte.

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Matchrace_kolk.jpg)Trop de gîte est néfaste à la bonne marche du voilier.

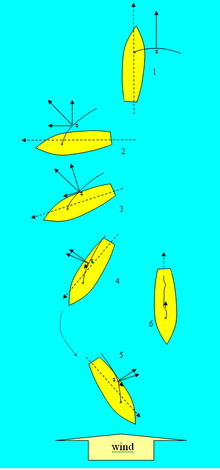
La position du creux reste le facteur prépondérant, dans la recherche de cet optimum. Tout le savoir faire du marin de régate est d'avancer au maximum le creux. Un réglage de "trop" et la voile décroche, la chute de portance est alors très importante. Donc le marin est toujours à la limite du décrochage, le réglage de la voile est donc très fin, d'où le terme de finesse. À ce point particulier optimal de la meilleure polaire de la voile, il est dit que la voile travaille en "finesse". À cet optimum, les penons de chute sont horizontaux et parallèles à la surface de la voile [[76]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-102),[[77]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-103),[[78]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-104).

Le but recherché des réglages du bateau est d'avoir la force propulsive (Fp) la plus importante. Un moyen simple serait de faire des voiles gigantesques mais le bateau a ses limites, il va chavirer, notons Fc la force de chavirage. La littérature définit alors la finesse de la voilure (ensemble des voiles) comme le rapport Fp/Fc.

Au près, là où la portance agit, la finesse est fonction de la hauteur de la voilure, de la coupe des voiles et de leur tissu, mais aussi et surtout du bon réglage des voiles. Au près, il est constaté des variations de la finesse de 100 % d'un couple voiles-équipage à un autre. En course, les bateaux étant souvent proches en performance (rôle des [jauges](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jauge_de_course)) le facteur prépondérant sur la vitesse du navire est l'équipage. La finesse n'est pas une notion secondaire[[79]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-105),[[80]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-106),[[81]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-107).

Un voilier dérive, cette dérive crée une portance de la forme immergée ; cette portance ou effort sert à contrer l'effort perpendiculaire de la poussé vélique. Donc autrement dit, minimiser la gîte revient aussi à minimiser la dérive du navire. Minimiser la dérive, c'est mieux remonter au vent. Par [homophonie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Homophonie_(linguistique)), la finesse d'un voilier est son aptitude à remonter au vent.

Bien que proche, la notion de finesse, existe donc sous plusieurs formes :

* travail en finesse de la voile, ou réglage optimale du marin de la voile au près,
* finesse de la voilure, ou rapport Fp/Fc,
* finesse d'un voilier, ou capacité du bateau à remonter au vent,
* [](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Zeiltheorie2.png)finesse de la voile, ou pente de la polaire.

**4.3 Puissance**

Décomposition de l'effort vélique suivant l'axe de gîte et l'axe principal à différente allure

Au portant, l'effort vélique tend de plus en plus à faire tanguer (basculer vers l'avant) le voilier. Pour une même assiette (inclinaison) (carène non sphérique bien sûr), l'effort vélique à appliquer est bien plus important suivant l'axe de tangage que de l'axe de gîte. Il en résulte que Fc et bien plus important au portant.

Le vent apparent forme un angle avec l'axe du navire et la corde de la voile ne correspond pas à l'axe du navire. Concrètement au portant cela signifie que :

* une grande partie de la traînée de la voile participe à l'avancement du navire
* l'autre partie de la traînée de la voile participe à la gîte du navire
* une grande partie de la portance de la voile participe à ralentir le navire,
* l'autre partie de la portance de la voile participe à la gîte du navire[[82]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-108).

Donc en fonction de l'allure (angle du vent apparent par rapport à l'axe du navire) le réglage optimum ne situe pas au même endroit et c'est la traînée de la voile qui fait avancer le navire. Le navigateur sélectionne donc parmi les profils possibles que peut prendre la voile, les profils offrant un maximum de traînée.

L'assiette (ou gîte) n'est plus vraiment un gros problème diminuant drastiquement la vitesse du voilier. La finesse n'est plus un facteur sélectif du bon profil à appliquer. Le facteur prépondérant est donc de chercher le profil de voile donnant le maximum de poussée (ici au portant la traînée). Dans le cas ou il est recherché un maximum de poussée sans se soucier de la finesse, on dit que la voile travaille en "puissance".

Maximiser la [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique)) ou maximiser l'effort propulsif est équivalent.

La puissance d'un voilier (et non plus la [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique)) au sens physique) est définie comme son moment de redressement [[83]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Finot-Conq-109),[[84]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-110),[[85]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-111).

Mais l'optimisation de la puissance au sens moment de redressement revient à maximiser la puissance au sens physique du voilier, donc au final augmenter la vitesse maximale possible du voilier.

**Explication**

**La puissance physique**

La [puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance) en physique est définie comme

P = \vec{F} \cdot \vec{v} 

ou dans notre cas, le calcul est le calcul de la puissance de la voile :

\vec{F}(en [N](http://fr.wikipedia.org/wiki/Newton_(unit%C3%A9))) est l'effort sur la voile ou poussée vélique

\vec{v}(en [m](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A8tre)/[s](http://fr.wikipedia.org/wiki/Seconde_(temps))), vitesse du navire par rapport au fond noté \ V .

\ Pest la puissance instantanée (en [W](http://fr.wikipedia.org/wiki/Watt))

A vitesse constante du voilier, les efforts contribuant à son avancement sont exactement équilibrés par les efforts de carène :

 \frac{d(m\vec{V})}{dt} = \sum{\vec{\mathrm{F}}_i} = 0  ;

d'où

 \vec 0 = \vec\mathrm{Fvoile} + \vec\mathrm{Fcarene} + \vec\mathrm{Fgravite}

Les efforts sont projetés sur l'axe vitesse :

\ 0 = Fpoussee + Fcarene sur axe vitesse

La carène se comporte comme un profil immergé. La portance est perpendiculaire à l'avancement du navire, donc elle n'intervient pas. La résistance à l'avancement est due à la traînée de la carène. Pour ne pas compliquer, la [route](http://fr.wikipedia.org/wiki/Route_(navigation)) vraie ou route fond est égale à la route surface, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de courant.

 Fcarene sur axe vitesse = \frac12 \times \rho eau \times S \times C \times V^2

avec C coefficient de trainée de la carène.

Les facteurs suivant dépendent peu de la vitesse du navire :

 \ b = \frac12 \times \rho eau \times S \times C 

d'où

 Fcarene sur axe vitesse = b \times V^2 = - Fpoussee

d'où

P = (Fpoussee)^{ \frac{3}{2}} \times (\frac{1}{b})^{\frac{1}{2}} 

Donc optimiser la puissance revient à optimiser l'effort propulsif.

or la poussée (ou effort propulsif) contribuant à la vitesse est :

F_{poussee} = portance \times sin(\beta) -trainee \times cos(\beta) avec  trainee = finesse(\alpha) ^{-1} \times portance 

avec :

 \alpha angle d'incidence entre la corde de la voile et le vent apparent,

 \beta angle entre le vent apparent et la route fond du navire (route réel du navire donc incluant sa dérive).

d'où la formule complète est :

P = (portance \times (sin(\beta) -finesse(\alpha) ^{-1} \times cos(\beta)))^{ \frac{3}{2}} \times (\frac{1}{b})^{\frac{1}{2}} 

Le marin pour faire varier la puissance par uniquement trois facteurs de réglage :

* la finesse
* l'incidence
* mais aussi la portance.

Cela signifie que dans certains cas il faut aussi prendre en compte la portance pour optimiser la vitesse du voilier.

La portance a pour équation  portance = \frac12 \times \rho air \times S \times C \times V^2avec C le coefficient de portance, S la surface de la voile, et V la vitesse du vent apparent. La vitesse n'étant pas identique le long du guindant, il faut prendre une moyenne pondérée (à déterminer via des essais). L'effort portance dépend de plusieurs paramètres dont principalement la vitesse (moyenne sur toute la voile) du vent apparent, vitesse moyenne qui dépend fortement de la gîte du navire.

**La puissance d'un voilier**

La puissance physique ne peut augmenter indéfiniment, il arrive un moment où l'effort est tel que la gîte (ou tangage) est trop importante, le bateau va chavirer. La puissance est donc limitée par la capacité du bateau à résister à la gîte (ou tangage), autrement dit son moment de redressement.

Le monde maritime préfère donc définir la puissance comme suit : la puissance d'un voilier est son moment de redressement [[83]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Finot-Conq-109). Cette notion est légèrement différente de la notion de puissance utilisée par les physiciens.

Ce qui empêche le voilier de chavirer, c'est le moment des moyens de contre gîte (ballast, carène, quille...). Ce moment équilibre exactement le moment généré par l'effort du vent dans les voiles lorsque le navire est à vitesse constante. Cette simplification (vitesse constante) évitera de partir dans des raffinements de formule trop complexe.

 \vec 0 = \vec\mathrm{M}_{voile/G} + \vec\mathrm{M}_{carene/G} 

avec

* G centre de gravité du voilier
* \ \vec\mathrm{M}_{voile/G} = \vec{F_{propulsif}} \times distance_{centre de gravite - centre velique} 
* \ \vec\mathrm{M}_{carene/G} moment de redressement du voilier, ce moment inclus les effets des ballasts de la quille de la carène, etc.

Ces moments sont décomposables suivant les axes du navire : gîte, tangage, lacet. Chaque axe a sa limite (Fc faible à la gite élevé au portant), soit :

* Moment maximum à la gîte \ M_{gite_{max}} 
* Moment maximum au tangage \ M_{tangage_{max}} ;

Bien sûr, il n'est pas possible de chavirer suivant l'axe de lacet. L'axe de tangage n'aura pas le même moment de redressement que l'axe de gîte. Par nature même d'une forme de carène, une carène est faite pour offrir le moins de résistance de déplacement, la limite suivant l'axe de tangage est considérablement plus importante que suivant la gîte :

\ M_{gite_{max}} << M_{tangage_{max}} 

Pour fixer les ordres de grandeur sur un monocoque, \ 10 \times M_{gite_{max}} = M_{tangage_{max}} , bien sur cette valeur est plus faible pour un multicoque.

Un voilier est généralement composée de plusieurs voiles, pour ne pas alourdir le propos, le jeu de voiles sera ramené en une seule voile équivalente. Cette voile aura sa propre polaire de voile. Les résultats trouvés pour cette voile équivalente sont applicables à chacune des voiles; comme les voiles s'influencent mutuellement, le bon réglage sera légèrement diffèrent du réglage voile équivalente. Cette différence est déterminable via des logiciels de calcul ou l'expérience du marin sur son voilier (voir Cas de plusieurs voiles : résolution multidimensionnelle du problème).

L'effort dans les voiles changent de direction et d'intensité suivant l'allure, la limite admissible par le voilier au portant est diffèrent du prés ou du vent arrière. L'effort vélique se décompose en portance et traînée. Il sera noté \ D_{tangage} le bras de levier du tangage et \ D_{gite} le bras de levier de la gite de l'effort vélique par rapport au centre de gravité.

d'où

\ M_{tangage}= D_{tangage} \times (portance \times sin(\beta) -trainee \times cos(\beta)) = D_{tangage} \times portance \times (sin(\beta) -finesse(\alpha) ^{-1} \times cos(\beta)) 

\ M_{gite} = D_{gite} \times (portance \times cos(\beta) +trainee \times sin(\beta)) = D_{gite} \times portance \times (cos(\beta) +finesse(\alpha) ^{-1} \times sin(\beta))

avec \ \beta angle de l'[allure](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allure_(marine)) [[86]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-112) Ces moments peuvent aussi être exclusivement exprimés suivant les moyens de contre gite. Une analyse suivant les moyens de contre gîte sort du cadre de cet article. Néanmoins le calcul suivant la carène est fort complexe, mais les résultats de calcul montre que \ M_{gite}et \ M_{tangage} évolue respectivement suivant l'angle de gîte et de tangage. La valeur des moments crois assez linéairement pour passer par un maximum puis elle diminue. L'approche généralement choisie est l'approche [métacentrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_de_car%C3%A8ne) :

\ M_{tangageougite} = A \times GM \times sin(\phi) 

avec

* \ \phi angle de gîte ou de tangage
* \ GM distance du centre de gravité au [métacentre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_de_car%C3%A8ne)
* \ A constante, différente suivant gîte ou tangage [[87]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-113),[[88]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-114).

Dans la littérature, le moment calculé suivant l'approche voile est appelé en anglais heeling moment; l'approche via la carène est appelée en anglais righting moment.

La littérature utilise souvent une équation simplifiée pour calculer le heeling moment ou \ M_{gite} vue des voiles.

\ M_{gite} = D_{gite} (portance \times cos(\beta) +trainee \times sin(\beta)) 

et la portance et la traînée sont de la forme :

F = \frac12 \times \rho \times S \times C \times V^2

La vitesse du vent n'est pas constante suivant l'altitude, la vitesse dépend de la gîte (ou assiette). Différentes formules simplifiées sont employées :

*  V= a \times cos(\phi)

qui débouche sur :

\ M_{gite} = pressure \times S \times A {cos(\phi)}^n 

avec

\ pressure pression moyenne sur la voile

\ A {cos(\phi)}^n est appelé heeling arm [[Note 28]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-115)

\ \phi angle de gîte ou de tangage

\ S surface des voiles

\ A constante

n un coefficient à déterminer[[89]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-116) .

* ou  V^2= b\times (1 - a \times \phi)[[90]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-117) qui donnera une autre formule,
* ou autre formule [[91]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-118).

Plus la gîte est importante plus le voilier se rapproche de ses limite de sécurité, la gîte n'est donc pas souhaitable. De même d'un point de vue effort la gîte n'est pas souhaitable car elle diminue les efforts donc les performances du navire. Les deux phénomènes vitesse et sécurité agissent dans le même sens. La prise en compte de l'effet vitesse du vent dans la suite de l'explication n'apporte rien, elle accentuerait les résultats trouvés sans apporter d'élément nouveau. Dans la suite de l'explication les angles (gîte, tangage) seront considérés comme faible donc négligé.

De ces courbes, il est déterminé \ M_{tangage_{max}} et \ M_{tangage_{max}} . Ces points sont des maximum, il suffit d'une risée, d'une sur-vente et la limite est dépassée, donc le navire est en situation de danger. De plus les angles sont trop élevés et la voile ne profite pas des vents rapide d'altitude. Pour ces raisons, il est choisi dans la zone linéaire une limite plus faible donc des angles plus faibles que nous appellerons gîte optimum et tangage optimum.

La force vélique se décompose en traînée et portance, au portant la portance ralentit le navire au prés inversement c'est la traînée qui ralentit le navire. Donc au portant la portance est minimisée, au prés c'est la traînée qui est minimisée. Par corollaire, la portance au portant est plus faible que la traînée, inversement au prés. La transition entre ces deux comportement se situe avant vent de travers, le mode de réglage bascule alors de recherche de traînée maximale à portance maximale. La transition correspond aussi à un écoulement sur la voile de turbulent (recherche de trainée) à laminaire (recherche de portance).

Pour fixer les ordres de grandeur, le voilier est considéré à faible gîte (autrement dit une approche métacentrique), si le voilier est bien conçu alors il est ni mou ni ardent donc le centre vélique est approximativement au-dessus du centre de gravité sur la même vertical :

\ D_{gite} \approx D_{tangage} 

De plus \ D_{gite} = D_{tangage} est reste peu variant en première approximation :

* le centre vélique est proche du centre géométrique des voiles
* le cas le plus courant est le voilier sans ballast de plus d'un tonne, donc la majeure partie des poids est fixe, le centre de gravité bouge peu.

**Vent arrière \ \beta \approx 180 **

Au portant, une remarque primordiale est à faire, le bord d'attaque est la chute et le bord de fuite c'est le guindant. La situation est inversé par rapport au prés. Au portant le profil de voile fonctionne en marche arrière. Comme au portant, la traînée fait avancer le navire, et la portance le ralenti, il faut donc une traînée maximale c'est-à-dire une voile qui barre la route au vent, donc une voile à forte incidence donc un mode d'écoulement du vent sur la voile turbulent.

Considérons le cas simple de vent arrière \ \beta = 180 d'où

\ M_{tangage}= D_{tangage} \times trainee 

\ M_{gite} = - D_{gite} \times portance

Or en vent arrière la voile travaille exclusivement en traînée, la portance est nulle donc :

\ M_{tangage}= D_{tangage} \times trainee \times 1 

La gîte n'est pas un problème, le risque est un risque d'enfournement [[92]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-119). En vent arrière, le voilier ne peut aller plus vite que le vent, plus le voilier se rapproche de la vitesse du vent réel plus le vent apparent est faible donc plus la poussé vélique est faible. Il est donc hisser un maximum de surface de voile pour faire avancer le voilier aussi proche que possible de la vitesse du vent réel.

Il faut modérer le dernier propos. Dès que le vent n'est plus exactement vent arrière, l'effet vent apparent apparaît. Le vent apparent augmente, donc l'effort vélique aussi; si les voiles hissées étaient calculées pour une limite d'enfournement en vent arrière, cette limite est dépassée. La voilure hissées doit être plus réduite. À ces allures l'effet vent apparent augmentant reste modéré, le voilier est donc toujours à une vitesse inférieure à la vitesse du vent réel. Les limites de vitesse de carène sont donc atteinte par grand vent (de brise, à tempête), or dans des conditions pareils, le marin raisonnable n'est plus dans une recherche de vitesse mais dans une recherche de sécurité maximale du navire, il réduit fortement la voilure.

Donc dans la réalité il est hissé une grande surface de voile sans être à la limite de sécurité. La perte de vitesse par rapport au cas surface maximum sera très minime, car en vent arrière le bateau ne peut pas aller plus vite que le vent.

**De vent arrière à grand largue \ \beta \approx 120 **

La portance ralentit le navire donc il faut la minimiser. Attention le profil est inversé. La polaire de la voile donnant la traînée maximum et la portance la plus faible est pour une incidence de 90° [[93]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-120). Il faut donc maintenir l'incidence perpendiculaire au lit du vent apparent. Dans ce cas la portance reste nulle donc les contraintes sont :

\ M_{tangage}= -D_{tangage} \times trainee \times cos (\beta) 

\ M_{gite} = D_{gite} \times trainee \times sin(\beta) 

D'autre part la portance n'est plus parallèle à la route du voilier. Une partie perpendiculaire apparait qui engendre de la gîte.

Le voiler profite de l'effet vent apparent, le bateau accélère. Comme une gîte apparait, le voilier compense la gîte grâce à la dérive. La dérive augmente les efforts résistants de la carène. De vent arrière à grand largue, le bateau est de plus en plus rapide,en profitant de l'effet vent apparent en augmentation. Puis à l'approche du largue, la résistance de la carène prends le dessus, le bateau ralenti un peu[[94]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-121).

Comme \ M_{gite_{max}} << M_{tangage_{max}} , ici \ 10 = \frac{M_{tangage_{max}} } { M_{gite_{max}} }.

Il existe un point de basculement ou la contrainte dimensionnement passe de la contrainte de tangage à la contrainte de gîte :

\ \frac {-D_{tangage} \times trainee \times cos (\beta) }{ D_{gite} \times trainee \times sin(\beta)} = \frac {cos (\beta) }{sin(\beta)} = 10 

soit

\ \beta = 174.3°

L'angle est proche de vent arrière. Pour un ratio faible de \ 3.5 = \frac{M_{tangage_{max}} } { M_{gite_{max}} },Il est encore de 165°.

Donc la contrainte est :

\ M_{gite} = D_{gite} \times trainee \times sin(\beta) 

**Au largue, la zone de transition**

Au largue, si le voilier garde le même profil de trainée qu'au grand largue, voile bien réglée la portance est nulle. L'effort propulsif suit la formule :

\ F_{propulsif}= - trainee \times cos (\beta) 

Donc plus le voilier se rapproche du travers plus la poussée diminue, jusqu'à devenir nulle. Il arrive donc une allure, au largue ou il est préférable de passer au mode portance du travers.

De même de façon inverse, si le voilier garde le même profil portant qu'au travers, tant que l'incidence n'est pas trop proche de zéro la voile garde sont profil, et propulse le bateau en mode portance. Par contre plus l'allure se rapproche de grand largue, plus l'incidence diminue, plus l'effort propulsif diminue. Il arrive donc une allure, au largue ou il est préférable de passer au mode traînée c'est-à-dire positionner la voile pour couper la trajectoire d'un maximum de vent comme fait au grand largue. Ce point particulier de basculement diffèrent suivant les voiliers et les jeu de voiles disponible. Par exemple un multicoque a des moyens de contre gîte bien plus performant qu'un monocoque, le point de basculement sera donc différent.

**Au travers \ \beta \approx 90 **

Proche du travers, la portance s'inverse, elle contribue à l'avancement du navire, et la traînée ralenti le bateau. L'effort propulsif suit la formule :

\ F_{propulsif}= portance \times sin(\beta) - trainee \times cos(\beta) = portance 

comme l'angle n'est pas parfaitement à \ \beta = 90 le cas idéal serait donc de trouver un point de la polaire de la voile avec une trainée nulle et une portance maximale. Malheureusement contrairement au portant ou la trainée maximale correspond à une portance nulle, la [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) démontre que dès qu'il y a portance il existe une trainée. Le choix de la bonne incidence de la voile vas dépendre de la finesse de la voile (voir finesse). Par nature pour une voile travaillant en portance \ portance >> trainee .

Les contraintes sont :

\ M_{tangage}= D_{tangage} \times portance 

\ M_{gite} = - D_{gite} \times trainee 

Comme \ portance >> trainee , la contrainte est :

\ M_{tangage_{max}} > D_{tangage} \times portance au travers si la voile travail en portance

Au travers, il faut la portance la plus élevée possible donc le choix du profil se tourne vers une voile la plus creuse possible [[95]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-122). Mais plus la voile est creuse plus l'écoulement se rapproche d'un écoulement turbulent. Il faut trouver la limite car dans un écoulement turbulent la portance s'effondre.

Le profil étant sélectionné, il faut trouver la bonne incidence. La bonne incidence sera au point de le polaire avec le plus de portance (une incidence de 20° environ, qui varie suivant les voiles).

La gîte ne pose pas encore de problème car la composante gîte ne contient que la trainée, qui dans ce mode par nature assez faible. La traînée n'est pas la plus faible possible car, il a été choisi le profil avec un maximum de portance donc très creux donc générant beaucoup de traînée pour un profil travaillant en portance).

Comme l'incidence optimum est de 20°, il est possible de régler la voile en mode portance pour des allures correspondant inférieur à \ \beta = 90 . La limite est \ \beta = 70 , à cette allure l'incidence est nulle, l'effort propulsif devient nulle, la voile n'est plus gonflée par le vent.

Il n'est pas rare de voir au travers un voile réglée en trainée. Cette situation comme le démontre les formules donnent une forte gîte, la voile est mal réglé. L'effort propulsif est assuré par la trainée \ F_{propulsif}= trainee \times cos (\beta) , comme \ cos(\beta) est proche de zéro, l'effort propulsif reste faible. Par contre le reste la quasi totalité de la traînée fait gîter le voilier.

**De petit largue au bon plein**

Au allure du prés, la voile travaille en portance pour pouvoir remonter au vent. Par contre la gîte de vient de plus en plus important, il faut donc limiter la gîte en améliorant la finesse de la voile (voir paragraphe finesse de cette page de wikipédia). Il faut une voile avec de moins en moins de creux.

Les contraintes sont :

\ M_{tangage}= D_{tangage} \times (portance \times sin(\beta) -trainee \times cos(\beta)) = D_{tangage} \times portance \times (sin(\beta) -finesse(\alpha) ^{-1} \times cos(\beta)) 

\ M_{gite} = D_{gite} \times (portance \times cos(\beta) +trainee \times sin(\beta)) = D_{gite} \times portance \times (cos(\beta) +finesse(\alpha) ^{-1} \times sin(\beta)) 

Comme \ M_{gite_{max}} << M_{tangage_{max}} , ici \ 10 = \frac{M_{tangage_{max}} } { M_{gite_{max}} }.

Il existe un point de basculement ou la contrainte dimensionnement passe de la contrainte de tangage à la contrainte de gîte :

\ \frac {D_{tangage} \times portance \times (sin(\beta) -finesse(\alpha) ^{-1} \times cos(\beta)) }{D_{gite} \times portance \times (cos(\beta) +finesse(\alpha) ^{-1} \times sin(\beta))} = 10 

soit

\ \beta = \pi - Arctg(\frac{1}{10}) - Arctg(finesse) 

avec

[\ Arctg ](http://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_tangente)la [fonction réciproque](http://fr.wikipedia.org/wiki/Bijection_r%C3%A9ciproque) de la [tangente](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_trigonom%C3%A9trique) \ tg(Arctg(x)) = x.

\ \beta en radian

Or \ finesse >> 1 , dans la pratique \ finesse > 10 donc \ Arctg(finesse) \approx \frac{\pi}{2} .

Le point de basculement est proche du travers, même avec un ratio faible de \ 3.5 = \frac{M_{tangage_{max}} } { M_{gite_{max}} }. Donc rapidement après le travers, la voile réglée à la plus grande portance (donc très creuse) créera une gîte excessive. Le réglage change, la voile sera progressivement réglée pour obtenir la finesse la plus élevée possible (voile de plus en plus plate).

La contrainte est :

\ M_{gite} = D_{gite} \times portance \times (cos(\beta) +finesse(\alpha) ^{-1} \times sin(\beta))

**Prés serré**

Les formules sont identiques à précédemment. Par contre la position sur la polaire de la voile change, l'incidence diminue. En effet, l'angle avec le lit du vent devient de plus en plus faible, jusqu'à devenir si faible que c'est la voile qui n'est plus gonflée donc sans profil, la voile flotte au vent.

**Analyse des résultats**

Les contraintes suivant les allures sont :

\ M_{tangage_{max}} > D_{tangage} \times trainee en vent arrière

\ M_{tangage_{max}} > D_{tangage} \times portance au travers

et

\ M_{gite_{max}} > - D_{gite} \times trainee \times sin(\beta) au grand largue et une partie du largue

\ M_{gite_{max}} > D_{gite} \times portance \times (cos(\beta) +finesse(\alpha) ^{-1} \times sin(\beta))au prés.

Donc à chaque allure va correspondre une limite différente. or

\ F_{poussee} = trainee \times cos(\beta) au grand largue et une partie du largue

\ F_{poussee} = trainee en vent arrière

\ F_{poussee} = portance au travers

\ F_{poussee} = portance \times (sin(\beta) -finesse(\alpha) ^{-1} \times cos(\beta))au prés et une partie du largue.

donc :

\ M_{gite_{max}} > D_{gite} \times F_{poussee} \times \frac{sin(\beta)}{cos(\beta)}au grand largue et une partie du largue

\ M_{tangage_{max}} > D_{tangage} \times F_{poussee} au travers

\ M_{tangage_{max}} > D_{tangage} \times F_{poussee} en vent arrière

\ M_{gite_{max}} > D_{gite} \times F_{poussee} \times sin(\pi - \beta -Arctg(finesse)) au prés

L'allure n'est pas une variable d'optimisation mais une donnée entrante. Elles est fixées par le navigateur est dépend naturellement du cap choisie pour rallier sa destination. L'allure varie du prés serré à vent arrière soit de 30° environ à 180°.

La finesse d'une voile lorsqu'elle fonctionne en portance est assimilable à un profil mince. La théorie des profils minces donne la formule de la finesse. Mais l'architecte naval ou la voilerie pour augmenter les performances du voilier chercheront à avoir une finesse aussi élevée que possible (voir paragraphe finesse). Ce paramètre est donc par conception assez élevé. Le facteur \ sin(\pi - \beta - Arctg(finesse)) \approx sin(\frac{\pi}{2} - \beta) est donc assez indépendant de la poussée et est peu variant à allure fixée. Mais suffisamment variant pour qu'au prés la formule montre que l'optimisation des performances passe aussi par l'optimisation du facteur finesse. Cette optimisation donnera un réglage different du réglage purement puissance, appelé finesse (voir paragraphe finesse).

Donc les contraintes sont directement liées à la poussée. Or la puissance physique est directement liée à la poussée P = (Fpoussee)^{ \frac{3}{2}} \times (\frac{1}{b})^{\frac{1}{2}} . Donc la puissance au sens redressement est directement lié à la puissance au sens physique.

Au final, on revient à la même notion que la puissance physique, plus il est difficile de faire chavirer le bateau, plus le bateau supporte une grande surface de toile, plus la force propulsive est importante, plus le voilier avance vite, donc plus il est [puissant](http://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_(physique)). Il est bien entendue que l'explication reste un guide de calcul et le lecteur pourra s'il le désire obtenir des formules plus complète en opérant à des approximations moins sévère que celle faite dans ce guide. Ce domaine est peu vulgarisé et peu abordé par la littérature (voir les publications scientifiques de l'université de Southampton) [[96]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-123),[[97]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-124),[[98]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-125).

D'autre part le vent apparent est la somme vectorielle du vent réel moins la vitesse du bateau, la mathématique démontre que :

 {V_{vent reel}}^2 = {V_{vent apparent}}^2 + {V_{vitesse bateau}}^2 -2 \times V_{vent apparent} \times V_{vitesse bateau} \times cos (\beta -\pi) 

La formule met bien en évidence le gain potentiel de vent apparent suivant l'allure du voilier; gain potentiel que le voilier mettra à profit entre prés serré et largue. L'effort propulsif est déterminé grâce : F = \frac12 \times \rho \times S \times C \times {V_{vent}}^2et la vitesse du vent V_{vent} = \frac {\mu'} {k} \ ln (\frac {z + z0} {z0}) . Sans rentre dans les détails, l'effort des voiles est compensé par la gravité, les efforts hydrodynamiques de la carène et la poussé d'Archimède. En incluant donc toutes les formules, il est possible de déterminer la vitesse maximale du voilier avec un bonne précision suivant son jeu de voile et l'allure. Les logiciels réalisant ce calcul sont nommées des VPP. Les résultats donnent que le navire est le plus rapide au environ de l'allure du travers (de large à petit largue), c'est-à-dire la zone ou la portance des voiles se fait sentir, ainsi que le gain vent apparent sans que la compensation des efforts de gîte (dérive amenant une forte résistance de la carène) soit trop élevé.

Le guide de calcul a pour fil rouge : maximiser la vitesse du voilier. Mais suivant les conditions de route, d'autre choix sont possible amenant à d'autre type de réglage, il vient à l'esprit que les réglages seront diffèrent lors de coup de vent, ou bien que le guide ne décrit pas un voilier qui fait route à contre.

Dans la réalité au portant il faut respecter au mieux une incidence de 90° avec le vent apparent, assez simple pour une grand voile avec bôme par contre pour les voiles d'avant c'est plus délicat, même avec des tangons. Mais cette condition n'est pas respectée donc la portance n'est pas nulle. Les performances sont alors moins bonne que prévu.

Cette approche est côté voile, elle permet de mieux comprendre les réglages et optimisations à apporter. Pour l'architecte naval, la même démarche est menée en plus en utilisant les formules liées cette fois à la carène [[99]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-126); si l'architecte dispose de moyens puissants, il sera capable de faire cette optimisation non plus en statique (vitesse constante du voilier et du vent) mais en dynamique, c'est-à-dire capable d'inclure plus ou moins bien les phénomènes très complexes et variables de la mer (houle) et du vent (la risée).

Un moment est un effort multiplié par son bras de levier. Donc, pour la partie carène, la distance doit être la plus élevée possible et pour les voiles la plus faible possible. Le marin a peu de prise sur la longueur des bras de levier ; le gros du travail d'optimisation sera donc à faire par l'architecte naval pour la carène (ballast quille) et la voilerie pour les voiles. Bien sûr, cette optimisation n'est pas indépendante, elle est liée à d'autre éléments, elle est limitée par exemple par la recherche des vents en altitude donnant un maximum d'effort propulsif. Le résultat final sera donc un compris entre toutes les contraintes :

* au près, c'est la finesse qui sera l'élément majeur pour la voilerie
* de vent arrière au portant, c'est de minimiser le bras de levier voile centre de gravité qui sera l'élément majeur pour la voilerie.

Les polaires "puissances" ont un effort propulsif maximal supérieur aux polaires "finesses". La polaire de voile donnant le maximum de traînée est pour un creux situé en arrière de la voile. Contrairement au réglage optimum au près, il n'y a pas de chute brutale de la poussée si le creux est réglé un peu trop loin. Le réglage de la voile est donc plus large, plus tolérant[[62]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-BAY_1-87).

La puissance de la voile dépend quasi uniquement de la partie de l'effort vélique contribuant à l'avancement du navire (suivant l'axe de vitesse du navire ou [route](http://fr.wikipedia.org/wiki/Route_(navigation)) fond), la puissance par abus est assimilée à la partie de l'effort vélique contribuant à l'avancement du navire. Donc attention, la puissance est déterminée grâce à la polaire de la voile. Les polaires sont indépendantes de la vitesse du vent apparent ; or la gîte n'intervient sur la voile que sur le paramètre vitesse, par conséquent la gîte n'est pas prise en compte dans les polaires de voile (idem pour la finesse d'une polaire de voile). La prochaine phrase compte tenu des définitions précédentes de finesse et puissance n'est pas contradictoire. Au près, le profil de maximum de puissance n'est pas le profil de maximum de finesse. Un réglage "puissance" engendre trop de gîte au près, erreur assez classique [[100]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-127).

Bien que proche, la notion de puissance (la gîte non prise en considération), existe sous plusieurs formes :

* le point de la polaire d'un profil quelconque ou la partie de l'effort vélique contribuant à l'avancement du navire est maximale ;
* la meilleure des polaires (donc le meilleur des profils) pour une allure donnée, donnant un effort propulsif (la partie de l'effort vélique contribuant à l'avancement du navire) maximum ;
* le moment de redressement du voilier.

1. **Cas de plusieurs voiles: résolution multidimensionnelle du problème**

Un bateau est rarement gréé d'une seule voile. La méthode précédente pour estimer la poussée vélique de chaque voile ne sera plus valable mais restera une bonne approximation.

Les voiles sont souvent proches les unes des autres. Elles s'influencent mutuellement[[101]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-128). Dans le cas d'un voilier gréé en sloop. La voile de proue (génois) va modifier le flux d'air arrivant sur la voile à corne. Le génois peut déventer la voile à corne, comme la voile à corne peut empêcher le flux d'air du génois de « sortir ».

La condition d'un fluide stable constant et uniforme, nécessaire aux tables donnant le coefficient aérodynamique n'est plus respectée.

L'effet cumulatif de plusieurs voiles sur un bateau peut être aussi bien positif que négatif. Il est bien connu qu'à surface de voile totale identique, deux voiles bien réglées sont plus efficaces qu'une seule bien réglée. Deux voiles peuvent augmenter la poussée vélique de 20 %[[102]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-129). Seul un modèle à deux dimensions, modélise et explique le phénomène.

Cette section *Cas de plusieurs voiles* se penchera sur les équations de la [thermodynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermodynamique) permettant de calculer l'effort du vent sur une voile pour une voile rigide suivant une approche Eulérienne. L’aéroélasticité n'est donc pas abordé dans cette section.

**5.1 Équations d’Euler**

La voile est plongée dans l'air. Le but est de déterminer en tout point de l'espace la vitesse (ou la distribution de vitesse).

La vitesse est la dérivée par rapport au temps de la position de la particule dans l'espace. L'approche classique décrit le comportement d'une parcelle d'air. L'observateur est placé sur une parcelle d'air, en mouvement. Le mouvement de la parcelle est décrit par sa positon en fonction du temps : \vec{molecule} = \vec{molecule}(t)d'où

\vec{V} = \vec{V}(\vec{molecule}) = \vec{V} (t)

Une approche eulérienne est choisie, c'est-à-dire l'observateur est à une position fixe dans l'espace[[Note 29]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-130). L'approche d'[Euler](http://fr.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Euler) est de décrire ce qui se passe, en un point précis de l'espace. Comme il y a de l'air dans chaque point de l'espace, chaque point de l'espace décrit le comportement de l'air en ce point. Cependant à ce point précis de l'espace, les parcelles ne font que passer. À chaque instant "t", ce n'est donc jamais la même parcelle d'air qui est décrite.

La position fixe de l'espace est : \vec{OM}

\frac{d\vec{OM}}{dt}=\vec{U}(\vec{OM},t) 

Avec \vec{OM}(t=0)=\vec{OM}_{0}

Quand la parcelle passe par le point \vec{OM}, donc à t=0

\vec{U}(\vec{OM}_{0}, 0)=\vec{V} (0)[[Note 30]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-131)

Donc donner la valeur de la vitesse de chaque parcelle d'air dans l'espace est exactement équivalent à donner la valeur de la vitesse en chaque point de l'espace[[Note 31]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-132).

Ce changement de point vue, modifie toutes les équations habituelles. Le calcul de l'accélération suivant le point de vue Eulérien est le suivant :

 \vec{\gamma} = \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} = \frac{d \vec{\frac{d \vec{OM}}{dt}}}{dt} = \frac{d \vec{U}(\vec{OM} ,t)}{dt} =
\frac{d \vec{U}(\vec{OM (t)} ,t)}{dt} = \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{d \vec{OM}} {dt} .grad(\vec{U})

 \vec{\gamma} = \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} .grad(\vec{U}) 

Suivant d'autres notations :  \vec{\gamma} = \frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{\partial\vec{U}}{\partial t} +
\left(\vec{U}.\vec{\nabla}\right)\vec{U} = \frac{\partial\vec{U}}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left(\vec{U} \otimes \vec{U} \right) 

**5.1.1 Conservation de la quantité de mouvement**

Pour une quantité élémentaire d'air, le [principe fondamental de la dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_fondamental_de_la_dynamique) s'applique : il y a conservation de la quantité de mouvement. Dans le cas de l'observateur fixé à la parcelle d'air, l'équation est :

 \frac{d(m\vec{V})}{dt} = \sum{\vec{\mathrm{F}}_i}  ;

Où

* \vec{\mathrm{F}}_idésigne les forces extérieures exercées sur l'objet ;
* *m* est la masse de la quantité élémentaire d'air ;
* \vec{V}correspond à la [vitesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vitesse) de son [centre d'inertie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_d%27inertie) G.

Les forces sont :

* les forces de pression s'exerçant sur toutes les faces de la quantité élémentaire d'air ;
* les forces électromagnétiques s'exerçant sur tout le volume de la quantité élémentaire d'air ;
* les forces de gravité s'exerçant sur tout le volume de la quantité élémentaire d'air ;
* les forces de frottements (ou visqueux quand le solide n'est plus solide) sur toutes les faces de la quantité élémentaire d'air ;
* les forces massiques (le rayonnement thermique par exemple dont l'effet est la dilatation).

Dans le cas d'un point de vue Eulérien, on ne connait pas la masse qui passe par le point \vec{OM}par contre à ce point il existe une certaine densité de l'air. La densité de l'air est définie par  \; m = \rho \times volume 

Les forces ne sont plus exprimées pour une masse donnée mais exprimées pour un volume donné.

Les forces sont :

* la pression  - \overrightarrow{\nabla} p 
* les frottements (viscosité)  \overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} 
* les autres forces massiques  \rho \vec{f}

D'où l'équation de la conservation de la quantité de mouvement Eulérienne \frac{\partial\rho\vec{U}}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{U} \otimes \vec{U} \right) = - \overrightarrow{\nabla} p + \overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} + \rho \vec{f}

L'équation de quantité de mouvement dans le cas d'un fluide est appelée l'[équation de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes).

**5.1.2 Conservation de la masse**

La nouvelle variable densité \; \rho pour être résolue nécessite une nouvelle équation. La densité peut varier; par contre la masse de la petite quantité d'air ne varie pas du tout\; m = \rho \times volume = constante. La mathématique prouve \; m = constantepour un observateur fixé à la parcelle est équivalent à \frac{\partial \rho}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0pour un observateur fixe dans l'espace. Cette équation est nommée l'Équation de la conservation de la masse ([Équation de continuité](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_de_continuit%C3%A9)).

**5.1.3 Conservation de l’énergie**

L'énergie ne se volatilise pas. Le [Premier principe de la thermodynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Premier_principe_de_la_thermodynamique) s'applique à la quantité élémentaire d'air, soit :

\Delta E = \Delta Ei + \Delta Ec + \Delta Ep= W + Q \,

* \Delta E \,est la variation totale d'énergie du système.
* \Delta Ei \,est la variation de l'[énergie interne](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_interne) du système; c'est-à-dire son énergie propre correspondant aux énergies cinétiques et potentielles microscopiques, des particules qui le constituent[[Note 32]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-133)
* \Delta Ec \,est la variation de l'[énergie cinétique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_cin%C3%A9tique) à l'échelle [macroscopique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Macroscopique) (mouvement du système dans un référentiel donné).
* \Delta Ep \,est la variation de l'[énergie potentielle](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_potentielle) à l'échelle macroscopique, du système en interaction avec des champs gravitationnels ou électromagnétiques.
* W \,est la partie de l'énergie qui correspond au travail échangé avec le milieu extérieur. Le [travail](http://fr.wikipedia.org/wiki/Travail_d%27une_force) n'est pas une [fonction d'état](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_d%27%C3%A9tat,_variable_d%27%C3%A9tat,_%C3%A9quation_d%27%C3%A9tat) mais un mode de transfert ordonné d'énergie entre le milieu extérieur et le système.
* Q \,est la quantité d'énergie mise en jeu sous forme de [chaleur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique). Elle est transmise essentiellement par trois processus d'échange thermique : [conduction thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique), [convection](http://fr.wikipedia.org/wiki/Convection), [rayonnement](http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement). La chaleur n'est pas non plus une fonction d'état mais un mode de transfert d'énergie microscopique désordonné. C'est en quelque sorte un transfert d'[agitation thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Agitation_thermique) entre le système et le milieu extérieur, qui est par nature désordonné.

Cela signifie donc que si l'énergie d'un système varie cela veut dire qu'il y a eu un échange d'énergie entre celui-ci et le [milieu extérieur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_thermodynamique) sous la forme de travail ou de chaleur ou les deux à la fois.

L'énergie par unité de volume \; E=\rho e(où \;eest l'énergie par unité de masse) est une variable d'état thermodynamique[[Note 33]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-134).

Pour une petite variation d'énergie, l'équation est ([[Note 34]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-135)) :  \; d E = \delta W + \delta Q 

Du point de vue Eulerien[[103]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-136),[[104]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-137),[[105]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-138),[[106]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-139) :

 \delta Q = transfert \ de \ chaleur + rayonnement = - \overrightarrow{\nabla} \cdot \vec{\dot{q}} + r

 \delta W = travail \ de \ la \ pression + travail \ des \ efforts \ visqueux + travail \ des \ efforts \ de \ masse \ (gravite \ , \ electromagnetisme) 

 = - \overrightarrow{\nabla} \cdot \left[ \; p \vec{U} \; \right] + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left(\overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} \cdot \vec{U} \right) + \rho \vec{f} \cdot \vec{U}

 d E = \frac{\partial \left(\rho e\right)}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left[ \; \rho e \vec{U} \; \right]

D'où

\frac{\partial \left(\rho e\right)}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left[ \; \left (\rho e + p\right) \vec{U} \; \right] = \overrightarrow{\nabla} \cdot \left(\overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} \cdot \vec{U} \right) + \rho \vec{f} \cdot \vec{U} - \overrightarrow{\nabla} \cdot \vec{\dot{q}} + r

**5.1.4 Les équations finales**

Les équations précédentes forment le système des équations d'Euler qui régissent les écoulements :

\frac{\partial \rho}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0

\frac{\partial\rho\vec{U}}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{U} \otimes \vec{U} \right) = - \overrightarrow{\nabla} p + \overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} + \rho \vec{f}

\frac{\partial \left(\rho e\right)}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot \left[ \; \left(\rho e + p\right) \vec{U} \; \right] = \overrightarrow{\nabla} \cdot \left(\overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} \cdot \vec{U} \right) + \rho \vec{f} \cdot \vec{U} - \overrightarrow{\nabla} \cdot \vec{\dot{q}} + r

Dans ces équations :

* treprésente le [temps](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temps) (unité SI :\rm s) ;
* \rhodésigne la [masse volumique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique) du fluide (unité SI :kg.m^{-3}) ;
* \vec{U} désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI :\rm m.s^{-1}) ;
* pdésigne la [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression) (unité SI :\rm Pa) ;
* \overrightarrow{\overrightarrow{\tau}}est le [tenseur des contraintes](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tenseur_des_contraintes) visqueuses (unité SI :\rm Pa) (voir [Rhéologie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Rh%C3%A9ologie));
* \vec{f}désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI :\rm N.kg^{-1}) ;
* eest l'énergie totale par unité de masse (unité SI :\rm J.kg^{-1}) ;
* \vec{\dot{q}}est le [flux de chaleur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Flux_de_chaleur) perdu par conduction thermique (unité SI :\rm J.m^{-2}.s^{-1}) ;
* rreprésente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI :\rm J.m^{-3}.s^{-1}).

Le système des trois équations précédentes n'est pas encore résolvable. Il y a encore trop d'inconnues : e, \vec{\dot{q}}, \overrightarrow{\overrightarrow{\tau}},\vec{f}, r. Il faudra rajouter des équations comme l'équation d'état du fluide.

**5.2 Équations complémentaires**

Les équations complémentaires vont permettre d'établir un ensemble d'équations résolvables. Certaines équations ont été simplifiées, des effets ont été négligés. Les équations complémentaires sont :

* l'air ne rayonne pas significativement : \; r = 0
* De même l'air ne s'échauffe quasiment pas ([adiabatique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_adiabatique)) \vec{\dot{q}} = \; \vec{0}
* les forces externes sont négligées ou nulles : pas de gravité, pas de force électromagnétique ... \; \vec{f} = \vec{0}
* L'hypothèse de [Newton](http://fr.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton) est appliquée : relation de proportionnalité entre tenseur des contraintes visqueuses et tenseur des taux de déformation. \overrightarrow{\overrightarrow {\tau}}a donc la forme suivante :

\overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} = \mu \left[ \left(\overrightarrow{\nabla} \otimes \vec{U} \right) + \left(\overrightarrow{\nabla} \otimes \vec{U} \right)^{transpose} \right] + \eta \left(\overrightarrow{\nabla} \cdot \vec{U} \right) \; \overrightarrow{\overrightarrow {I}}[[Note 35]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-140)

* Pour l'équation de l'énergie, la viscosité est négligeable \overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} = 0 et l'air est considéré comme un [Gaz parfait](http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_parfait).

Un gaz est parfait lorsque : \; pVol = NRTavec

* *p* est la [pression](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pression) du gaz (en [pascal](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pascal_(unit%C3%A9))) ;
* *Vol* est le [volume](http://fr.wikipedia.org/wiki/Volume) occupé par le gaz (en [mètre cube](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A8tre_cube)) ;
* *N* est le nombre de particules, la [quantité de matière](http://fr.wikipedia.org/wiki/Quantit%C3%A9_de_mati%C3%A8re) est en [mole](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mole_(unit%C3%A9))
* *R* est la [constante universelle des gaz parfaits](http://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_universelle_des_gaz_parfaits), *R* = 8,314 472 J·K-1·mol-1
* *T* est la [température](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature) absolue (en [kelvin](http://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin)).

L'énergie interne suit alors la relation \; Ei =\frac{1}{\gamma-1}\frac{p}{\rho}avec :\; \gamma=C_{p}/C_{v},\, R=C_{p}-C_{v}

Comme l'énergie cinétique \; Ec = \frac{1}{2} \times \rho \times U^2et l'énergie potentielle : \; Ep = \rho \ g \times z, l'énergie totale \; E , est entièrement déterminée. L'équation d'énergie dépend des variables\ \rho \ U \ p. Si \; \rho est constante, alors l'équation d'énergie est une équation superflue et donc peut être éliminée du système d'équation à résoudre.

**5.3 Domaine**

L'espace dans lequel est plongée la voile est nommé domaine. Le domaine est l'univers entier (infini) ou une partie de l'espace (fini). Pour un domaine fini, les dimensions de ce domaine doivent être appropriées. Le vent doit pouvoir se perturber *tranquillement* autour de la voile. Un domaine d'au moins trois à quatre fois la dimension de la voile est un minimum. La voile est positionnée, bien entendu, dans le domaine, et plutôt au milieu du domaine pour éviter des effets de bord. Évidemment, la voile a plus ou moins d'incidence par rapport au vent.

Le domaine fini est souvent employé en simulation (résolution numérique) et en essais ([soufflerie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Soufflerie)). Le rectangle (en deux dimensions) et le parallélépipède rectangle (en trois dimensions) sont souvent choisis en résolution numérique.

**5.4 Conditions aux limites**

Le cas de notre modélisation est représenté par les conditions suivantes :

* le vent

La vitesse aux bornes d'entrée du domaine en amont de la voile est constante et non nulle  \; \vec{U} = \vec{Va}

* présence d'une ou plusieurs voiles soit la condition

La vitesse est nulle sur la voile  \; \vec{U_{voile-air}} = \; \vec{0}avec \vec{U_{voile-air}} = \vec{U} + \vec{U_{voile-mer}}.

Si la voile est fixe \; \vec{U} = \; \vec{0}.

* en aval, très loin de la voile, la voile n'a plus d'effet ou d'influence sur le fluide

Contrainte nulle aux sorties des bords du domaine en aval de la voile \overrightarrow{\overrightarrow{\tau}} = 0

Dans les résolutions classiques, il est considéré la voile comme rigide et à vitesse constante. Le gréement, les œuvres mortes et superstructure peuvent aussi être inclue, et sont considérer comme rigide et évoluant à la même à vitesse constante que les voiles. De même la mer peut être ajouté mais considérer comme plate.

Les conditions sont :

*  \; \vec{U_{voile-sol}} = \; \vec{Constant} = \vec{U_{greement-sol}} = \vec{U_{oeuvre morte-sol}} ...,
*  \; mer_x = mer_y = 0 .

**5.5 Simplification**

Les équations à résoudre sont trop complexes pour nos ordinateurs actuels. Il faut les simplifier. Les simplifications généralement faites sont:

* Comme la vitesse du vent est très inférieure à la vitesse du son ([Nombre de Mach](http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Mach)), l'air ne se comprime quasiment pas  \; \rho = Constante
* L'écoulement est stationnaire \frac{\partial \vec{U}}{\partial t}= 0 [[Note 36]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-141)
* La simplification la plus importante : la voile est considérée comme rigide[[Note 37]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-142),[[107]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-143)

Cela va aider à la résolution de l'[Équations de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes). Les équations restantes simplifiées sont :

* équation de la conservation de la masse

\overrightarrow{\nabla} \cdot (\vec{U}) = 0

Donc \overrightarrow{\overrightarrow {\tau}} = \mu \left[ \left(\overrightarrow{\nabla} \otimes \vec{U} \right) + \left(\overrightarrow{\nabla} \otimes \vec{U} \right)^{transpose} \right] + 0 

* équation de la conservation de la quantité de mouvement

 \rho \vec{U} \cdot (\overrightarrow{\nabla}\vec{U}) = - \overrightarrow{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{U} 

* les conditions aux limites

**5.5.1 Nombre de Reynolds**

Procédons aux changements des variables suivantes :

\; x' = \frac{x} {B} \ , \ y' = \frac{y} {B} \ , \ z' = \frac{z} {B} 

\; U' = \frac{U} {Va} 

\; p' = \frac{p} {\rho \times Va^2} 

Avec

\; B la longueur de la bordure de la voile

\; Va vent apparent ou vent à l'infini (ou bord amont du domaine)

L'équation de la conservation de la quantité de mouvement devient : \vec{U'} \cdot (\overrightarrow{\nabla}\vec{U'}) = - \overrightarrow{\nabla} p' + \frac{\mu}{\rho \times Va \times B} \nabla^2 \vec{U'} 

\; Re = \frac{\rho \times Va \times B} {\mu} est appelé nombre de Reynolds. Cette transformation démontre qu'à nombre de Reynolds identique le comportement de la voile est identique. Le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inerties et les forces de viscosités.

D’où

\vec{U'} \cdot (\overrightarrow{\nabla}\vec{U'}) = - \overrightarrow{\nabla} p' + \frac { \nabla^2 \vec{U'}} {Re} 

Les performances (la trainé, portance, finesse...) ne sont pas liées à la taille de la voile. Les performances d'une voile sont identique au facteur d'échelle près à la même voile de dimension réduite (voir de la taille d'une voile de bateau de modélisme), du moment que les nombres de Reynolds sont identiques dans les deux cas. Conséquence pratique de cette caractéristique de l'équation de Navier-stokes, il n'est pas besoin de faire des essais sur une voile grandeur nature, mais l'essai peut être fait sur un modèle réduit de la voile, par conséquence la soufflerie nécessaire sera de dimension bien plus modeste donc au final des essais bien moins couteux.

Le nombre de Reynolds est pour une voile ce qu'est le [Nombre de Froude](http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Froude) pour une carène[[108]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-144).

**5.6 Résolution**

Il suffit de résoudre l'équation de mouvement. La vitesse en tout point du domaine est résolue. Ce résultat permettra de calculer, grâce à l'équation de mouvement, la pression en tout point. L'énergie est ensuite facilement calculée.

La résolution d'équation aussi complexe n'a pas encore de solution analytique ([Problèmes du prix du millénaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Probl%C3%A8mes_du_prix_du_mill%C3%A9naire)). Par contre, grâce aux ordinateurs, des valeurs numériques sont calculables. Les logiciels résolvant des [équations différentielles](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_diff%C3%A9rentielle) reposent souvent sur la [Méthode des éléments finis](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_%C3%A9l%C3%A9ments_finis). C'est une méthode qui donne une solution numérique approchante de l'équation. Le domaine est découpé en petits morceaux (discrétisation). L'équation est "résolue" pour chaque morceau. Un morceau doit être petit par rapport aux dimensions de la voile pour être réaliste. Plus le nombre de morceaux est élevé plus le résultat est précis.

De même plus le domaine est grand par rapport aux dimensions de la voile plus la modélisation est réaliste.

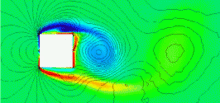
Des morceaux petits et un grand domaine font exploser les temps de calcul.

Les logiciels arrivent à trouver des solutions numériques pour une modélisation en deux dimensions. Par contre en trois dimensions, les logiciels ont du mal à converger vers une solution, il y a trop de turbulences qui déstabilisent la résolution numérique.

**5.6.1 Origine de la difficulté de résolution**

Le [paradoxe de D’Alembert](http://fr.wikipedia.org/wiki/Paradoxe_de_D%E2%80%99Alembert), exprime simplement que sans viscosité, il n'y a pas de portance[[109]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-145). La viscosité est un élément du second ordre, c'est-à-dire que le second ordre n'est plus négligeable aisément. La rugosité des parois par exemple n'est plus sans influence. Or, introduire la viscosité introduit le phénomène de tourbillon ou turbulence. Les turbulences sont des phénomènes très instables.

Simulation du détachement tourbillonnaire dans le sillage d'un cylindre carré

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Viv-carre.gif)Si les remarques précédentes sont valables aussi pour une aile d'avion, le cas de la voile est plus compliqué. Une voile est souple.

**5.6.2 Couche limite**

La forme générale (ou distribution de vitesse) de l'écoulement est due à la présence de la voile. L'air suit plus ou moins bien le profil. L'effet majeur est la viscosité. En 1904, Ludwig Prandtl expliqua que la viscosité d'un fluide joue seulement un rôle très proche de la paroi et ce d'autant plus que le nombre de Reynolds est grand[[110]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-146). Donc l'essentiel de la perturbation du vent est très proche de la voile. La vitesse nulle sur la voile, passe rapidement à la valeur du vent apparent[[111]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-147),[[112]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-148),[[113]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-149).

La zone de perturbation est appelée [Couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite). Le domaine est ainsi divisé en deux régions. La première est la région ou l'écoulement du fluide n'est pas affecté par la viscosité (la majorité de l'espace), l'autre région, proche des surfaces, est la région ou la viscosité joue un rôle important ou "couche limite". La couche limite est le volume de l'espace autour de la voile délimitée par :

* La voile \vec{U}= 0
* La vitesse n'est plus perturbée \vec{U}= Vaou va est le vent apparent. Dans la réalité, la vitesse est perturbée sur tout le domaine c'est pourquoi le critère est ramené à \vec{U}= 0.99 \times Va.

En conséquence, au bord de la voile les vitesses évoluent très rapidement, la discrétisation au bord de la voile doit être serrée pour avoir des résultats réalistes.

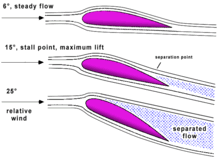
Autres conséquences, en appliquant une approximation par [analyse d'échelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_d%27%C3%A9chelle) à chaque région, les équations régissant l'écoulement du vent dans le domaine peuvent être simplifiées. La couche limite a son propre jeu d'équations simplifiées à résoudre, diffèrent du jeu d'équations simplifiées du reste du domaine. Cette méthode est un moyen de contourner l'insolvabilité analytique actuelle des équations de [Équations de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes).

*De facto*, en dehors de la couche limite, l'écoulement est stationnaire \frac{\partial \vec{U}}{\partial t}= 0 . De plus en dehors de la couche limite l'[analyse d'échelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_d%27%C3%A9chelle) confirme bien l'hypothèse simplificatrice : l'air ne se comprime quasiment pas  \; \rho = Constante.

De facto, les phénomènes in-stationnaires ([turbulence](http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbulence)) sont exclusivement dans la couche limite. Modéliser la [couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite) c'est [modéliser les turbulences](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_des_turbulences).

Un point est épineux : la dimension de la couche limite. Elle n'est pas connue, ni maîtrisée. L'affirmation de Prandtl est mise à mal par la réalité, et la couche limite peux être grande dans le cas de couche limite turbulente. Dans les méthodes de résolution actuelles, la dimension de la couche limite est arbitrairement définie par le praticien suivant l'expérience. Comme le phénomène n'est pas bien compris le praticien peut faire de grosses approximations, et alors la dimension de la couche limite ne correspond pas à la réalité physique.

**5.6.3 Évolution de la couche limite**

[](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:StallFormation.gif)

[http://bits.wikimedia.org/static-1.20wmf7/skins/common/images/magnify-clip.png](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:StallFormation.gif)

Formation d'une « zone morte ».

À faible nombre de Reynolds, les efforts visqueux sont prépondérants. L'air est collé à la voile, la couche limite est petite. L'écoulement est laminaire.

À nombre de Reynolds élevé, les efforts d'inertie sont prépondérants, donc l'effet visqueux est petit. C'est-à-dire que l'air une fois lancé, a une forte tendance à continuer de se déplacer en ligne droite. L'air n'est dévié que lorsqu'il rencontre une masse solide : la voile. L'air ne colle plus à la face sous le vent, l'air est décollé. Le volume de la couche limite est énorme. L'écoulement est turbulent[[114]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-150),[[115]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-151).

La zone où l'air est décollé, est appelée zone morte. La zone morte diminue d'autant la zone où l'effet de portance s'applique. En vent arrière, c'est toute la face sous le vent qui est décollée, et donc qui n'a quasiment plus d'effet propulsif.

**5.6.4 Théorie et approche plus simple**

Le domaine est donc divisé en deux parties : la couche limite et le reste du domaine. Des théories et approches ont essayé de contourner la difficulté de résolution analytique actuelle ou de sa résolution numérique demandant beaucoup trop de puissance de calcul.

**5.6.4.1 Théorie en dehors de la couche limite**

Généralement, ces théories considèrent que la viscosité n'a plus d'effet. La viscosité est donc supprimée dans ces théories. Des simplifications et approximations sont faites, deux théories ressortent, elles sont :

* la [théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces)[[116]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-152),[[117]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-153),[[118]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-154).
* la [Théorie des écoulements à potentiel de vitesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_%C3%A9coulements_%C3%A0_potentiel_de_vitesse), plus complexe que la précédente

Articles détaillés : [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) et [Théorie des écoulements à potentiel de vitesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_%C3%A9coulements_%C3%A0_potentiel_de_vitesse).

Pour une voile, ces théories ne s'appliquent que pour de faibles incidences, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de turbulences. La théorie décrit le comportement au portant mais pas une voile en vent arrière. La voile est quasiment toujours considérée comme rigide pour alléger le calcul.

**5.6.4.2 Théorie de la couche limite**

Généralement les [Équations de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes) sont simplifiées par les équations de [Ludwig Prandtl](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Prandtl), qui elles sont un peu plus résolvables tout en maintenant une grande partie de l'effet turbulent[[119]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-155),[[120]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-156),[[121]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-157),[[122]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-158). En créant la notion de deux régions dans le domaine, la couche limite (ou la zone où la viscosité se fait sentir) et le reste du domaine (la majorité du domaine), et en simplifiant un peu les équations (on passe d'équation différentielle elliptique à parabolique), les équations ainsi simplifiées deviennent résolvables (voir [Couche limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite)).

Comprendre la couche limite c'est aussi comprendre les [turbulences](http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbulence). Des approches plus complexes essayent de modéliser les [turbulences](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_des_turbulences). Cela fait des siècles que les turbulences sont étudiées pour les comprendre[[123]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-159). Certaines approches ne se contentent pas de modéliser que la couche limite, mais elles s'appliquent à tout le domaine. Les approches peuvent aussi bien être numériques qu'analytiques.

Article détaillé : [Modélisation des turbulences](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_des_turbulences).

De même, les voiles sont considérées comme rigides, pour alléger le calcul. Il n'est pas rare de voir que le praticien utilise pour la résolution du problème un jeu d'équations spécifiques pour la couche limite et un autre jeu d'équations pour le reste du domaine. Le praticien doit être attentif aux conditions permettant la transition d'un jeu d'équations à l'autre, c'est-à-dire les conditions aux limites concernant le bord de la couche limite.

**5.7 Profil de la voile**

Une voile est généralement souple, rare sont les voiles rigides comme les [turbovoile](http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbovoile). La voile n'est pas un simple morceau de tissu[[124]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-160), une voile plane a de faibles performances au près, c'est-à-dire peu d'effet de portance. L'enjeu est de définir une forme de voile (ou profil) permettant les meilleures performances, c'est-à-dire la meilleure portance suivant les conditions de mer et de vent. Le poids de la voile intervient aussi pour des questions de stabilité de navire mais pas de performances aérodynamiques.

**5.7.1 Voile rigide**

Une voile dite "rigide" peut avoir un seul profil ou plusieurs profils en série (aile + un ou deux volets orientables) comme ceux des catamarans de la classe C. Beaucoup d'études ont été faites sur les profils rigides. Les plus connues étant les études menées par la [NASA](http://fr.wikipedia.org/wiki/NASA) (ex [NACA](http://fr.wikipedia.org/wiki/National_Advisory_Committee_for_Aeronautics)), dont les profils sont bien connus. Si le choix du profil est bien maitrisé dans le cas d'une voile rigide, le cas d'une voile souple est encore très mal maîtrisé et repose principalement sur des tests en situation réelle (ou en soufflerie) et/ou le savoir-faire des voileries. Il suffit de se rapporter aux paragraphes précédents pour constater les limites de nos savoirs et maîtrises actuels sur le sujet. Le calcul analytique commence à peine à comprendre les profils rigides.

**5.7.2 Voile souple**

La voile souple concerne la majorité des cas. La souplesse est un avantage mais présente quelques inconvénients. Une fois le vent établi et la voile bien réglé, la voile prend le profil prévu par le fabriquant[[125]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-161),[[126]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-162). La voile est constituée d'un assemblage de tissus plus au moins sophistiqué. Pour assurer un profil conforme au profil désiré par la voilerie[[127]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-163), la voilerie rigidifie le profil grâce aux lattes. Par définition le tissu est un matériau fin, donc avec peu de matière. La matière sous l'effort du vent va se tendre et donc s'allonger[[128]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-164). Si la matière s'allonge le profil de la voile va changer. Actuellement les voileries recherchent des tissus (Mylar, carbone, kevlar, vectran [[129]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-165)...) le moins élastique possible.

La souplesse et l'élasticité des matériaux sont à la fois un gros problème et un gros avantage[[59]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Finot_1-84),[[130]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-166).

**5.7.2.1 Problème**

Les profils de voile sont dessinés par ordinateur, et simulés par ordinateur[[131]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-167),[[132]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-168),[[133]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-169), bien sûr, un essai en soufflerie est la meilleure solution, mais demande beaucoup de temps et est onéreuse. Le problème de la souplesse de la voile et des autres éléments (haubans, mât, bouts) est que la forme désirée de la voile n'est pas respectée, la voile se déforme constamment sous l'action variable du vent. Donc le profil n'a pas les performances prévues. Des zones mortes (zones de recirculation) peuvent apparaître, diminuant d'autant la performance de la voile.

**5.7.2.2 Avantage**

Un profil est adapté à une condition de vent ou vitesse du vent. Le profil optimum par un petit temps n'est pas le profil optimum par gros temps. Par petit temps, il y a peu de vagues donc la vitesse du bateau est uniforme, par conséquent le vent apparent est stable. Par plus gros temps le bateau butte contre les vagues, le vent s'établit en rafale. Par conséquent le vent apparent est très changeant. Le cas idéal serait que le profil de la voile évolue suivant les conditions météorologiques, c'est-à-dire suivant la vitesse du vent apparent[[134]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-170). Grâce à la souplesse du tissu, la voile peut changer de forme. Grâce à cela les voileries conçoivent des voiles qui changent de forme suivant la force du vent. C'est le cas des voiles double-profil utilisées en planche à voile.

**5.7.3 Conception du profil**

Le choix et la conception du profil est une méthode itérative. Cette approche ce nomme [VPP](http://fr.wikipedia.org/wiki/Velocity_prediction_program) (Vélocity Prediction Program) [[135]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-171),[[136]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-Vpp_en-172),[[137]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-173). Cette méthode est composée de cinq phases. Chaque phase fera de la part de la voilerie une étude plus ou moins détaillée. La méthode est bien sûr à adapter pour un nouveau jeu de voile sur un voilier existant.

**La 1ère phase** est le choix du gréement (en dehors du champ de cet article).

**La 2ème phase**, est le choix d'une condition de marche du bateau :

* allure
* vitesse du vent

**La troisième phase** est le choix

* d'un ou plusieurs profils[[138]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-174)
* et les paramètres à optimiser.

Considérons un voilier au près, le choix d'un profil de départ pourrait être un des profils NACA 0009 à 0018. La vitesse du vent apparent va permettre de prendre le profil NACA avec le plus fort coefficient de portance. Mais la vitesse du vent apparent dépend de la vitesse du bateau. La vitesse du bateau dépend des efforts des voiles et du profil de la carène (résistance à l'avancement et la gîte du bateau). Bien sur le profil NACA sera vrillé[[139]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-175) pour avoir un profil à incidence constante (voir paragraphe précèdent). Il est également choisie une forme ou des formes possibles de la chute, c'est-à-dire l'emploi ou pas, de latte, en vue de réduire la traînée incidente. Il faut aussi se poser la question : l'optimisation porte sur chaque voile ou sur le jeu de voile complet. D'autre paramètres peuvent être pris en compte comme :

* l'élasticité de la voile,
* l'évolution du coefficient de portance suivant l'incidence,
* le lieu du point vélique qui crée de la gîte,
* la stabilité de la performance de la voile malgré la variation des conditions par exemple le vent (vitesse et direction)
* suivant les raffinements du programme le gréement ainsi que la partie hydrodynamique peut être partiellement inclus dans l'optimisation. C'est-à-dire prendre en compte les interactions du gréement sur la voile. La déformation du gréement suivant les efforts de la voile déforment à leur tour la voile.

La question du niveau de précision de calcul de l'écoulement de l'air autour de la voile est une question à se poser ([Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) ou [Théorie des écoulements à potentiel de vitesse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_%C3%A9coulements_%C3%A0_potentiel_de_vitesse) ou [Modélisation des turbulences](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_des_turbulences)).

**La quatrième phase** est l'optimisation par calcul. Cette phase repose sur des logiciels. Ces logiciels sont appelés VPP[[136]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Vpp_en-172),[[140]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-176),[[141]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-177),[[142]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-178). Ces logiciels ne prennent en compte qu'une partie de la réalité pour définir la voile, le voilier dont le gréement et les conditions de vent et de mer. Ils prennent donc qu'une partie des paramètres possibles, néanmoins certains logiciels arrivent à prendre en compte plusieurs dizaines de paramètres. Il faut distinguer deux parties :

* la partie calcul (aérodynamique, hydrodynamique...)
* la partie optimisation

La partie calcul consiste à calculer l'écoulement de l'air sur le profil, c'est-à-dire la distribution de vitesse. Ce calcul est mené pour différents profils. Sur ce point précis, le VPP peut faire appel à des logiciels spécialisés[[143]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-179) :

* les logiciels de dynamique des fluides ou CFD (Computer Fluid Dynamics)
* les logiciels de calcul par élément fini ou FEA (finite element analysis).

Les résultats de calcul sont ensuite injectés dans le logiciel VPP. La partie optimisation est souvent itérative. Le logiciel est capable d'optimiser un ou plusieurs paramètres. Pour cela le logiciel a besoin :

* d'un profil de base
* d'une formule itérative.

Par exemple optimisons l'élasticité comme on pourrait le voir dans les voileries[[144]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-180). La voile sous vent (donc déformée) doit avoir le profil choisi. C'est-à-dire qu'il y a deux profils :

* le profil sans vent (non déformé)
* le profil avec vent (déformé).

Avec l'objectif que le profil avec vent soit identique au profil choisi. Le problème est qu'il n'y a pas de relation simple entre profil avec vent et sans vent. Donc le profil à construire (profil sans vent) n'est pas connu. Il faut donc calculer les déformations de la voile. Or la difficulté est que les déformations sont calculées à partir du profil sans vent, et non pas l'inverse. Pour contourner le problème, la méthode itérative est employée :

* Un profil de base est choisi, puis le logiciel tourne pour calculer la distribution de vitesse, donc les efforts sur la voile donc la déformation de la voile.
* il y a donc une différence entre le profil et le profil déformé.
* grâce à une formule itérative un profil intermédiaire est créé à partir de ces deux profils.
* on recommence le processus, le logiciel tourne pour calculer la distribution de vitesse sur ce profil intermédiaire.

Normalement de profil intermédiaire en profil intermédiaire la voile doit être de plus en plus proche de la solution.

À la fin de cette phase il reste un ensemble restreint de profils candidats.

**La cinquième phase** est l'étude en soufflerie des profils candidats trouvés[[145]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-181). Le calcul est une approche approximative de performances réelles (à quelques pour-cent). Le calcul donne un classement des profils suivant les performances. Il faut maintenant s'assurer de la validité de ce classement par des essais en réel (soufflerie) pour choisir le meilleur profil. Les essais en soufflerie coutent très cher. Seule la compétition peut se permettre la recherche de ces derniers pour-cent de performance [[146]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-182),[[147]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-183).

Concrètement, l'optimisation génère un profil. Ce profil virtuel optimisé va être reproduit dans le réel. Deux approches[[148]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-184) pour la confection de la voile :

* la méthode 2D, la voile est conçue à partir d'un assemblage de morceaux de tissus plans. Chaque morceau est appelé laize.
* la méthode 3D[[149]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-185), la voile n'est plus composée de plusieurs morceaux tissés mais la voile est composée d'un seul morceau tissé directement en 3D.

La méthode 3D respecte plus fidèlement le profil. En conséquence, la surface en 3D ne présentera pas de ruptures entre les laizes, la surface sera plus lisse. Donc le flux d'air se décollera moins de la voile, donc moins de zone de recirculation avec une voile 3D que 2D, donc la zone morte est plus faible. Une voile 3D est donc plus efficace.

**5.8 Poussée vélique**

La résultante de la poussée vélique de toutes les voiles ou poussée vélique totale sera la somme des poussées véliques de chaque voile. Le résultat du calcul donne la vitesse du vent en chaque points de l'espace noté V (= U). Le [théorème de Kutta-Joukovski](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Kutta-Jukowski), permet de calculer la poussée vélique d'une voile noté F :

F = \rho V(\infty)\Gamma

Avec

\Gamma=\oint_{C}\mathbf{V}\cdot\mathbf{dl}

 C un contour très proche de la voile, mais en dehors de la couche limite (zone turbulente)

 V(\infty)vitesse du vent à l'infini ou autrement dit la vitesse du vent apparent

 \rhodensité à l'infini ou autrement dit la densité de l'air à la pression atmosphérique

La définition du contour est un point délicat. Les [équations de Navier-Stokes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes) ne sont pas encore résolvables analytiquement, donc pour les résoudre, il est nécessaire de procéder à des simplifications. Simplifier revient à négliger les facteurs du second ordre, or la portance est directement liée à un paramètre du second ordre, la viscosité. Donc comme la viscosité est généralement négligée loin du contour, il faut un contour proche de la voile, mais pas trop proche.

En effet comme précédemment expliqué, la pression de la face sous le vent rencontre une pression différente de la face au vent à la chute de la voile. Comme la distance à la chute de la voile séparant les deux zones de pression est très faible, la rencontre va être violente et provoquer une turbulence de vitesse extrêmement élevée, en théorie quasi-infinie. Or une vitesse infinie n'est pas intégrable, donc le contour ne doit couper cette turbulence. Le même constat est à faire suivant l'incidence pour la bordure, le guindant, elles génèrent des turbulences. Autrement dit le résultat du calcul de la vitesse en tout point du domaine, se trouvera dans l'une des deux situations :

* le calcul n'a pas entraîné de turbulence, dans ce cas pas de problème ;
* le calcul a entraîné des turbulences, le contour doit alors éviter les zones de forte turbulence. Le contour doit être suffisamment éloigné de la voile, quasiment en dehors de la couche limite.

**5.9 Point vélique**

De même, la position du point vélique Gest définie par la relation suivante :

\int_{\mathcal{C}} \overrightarrow{GM} \wedge p(M)\vec{n}(M)~\mathrm dS=\vec{0}

Avec

 C contour très proche de la voile

 \vec{n}(M)vecteur normal au contour en M

 p(M) pression au point M du contour

Pour calculer  p(M) , à partir de la vitesse, il suffit d'appliquer le [théorème de Bernoulli](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Bernoulli).

Si  p(M) pression au point M du contour est contant, alors le point G est le centre géométrique de la voile.

**5.10 Centre vélique**

La résultante de la poussée vélique de toutes les voiles s'applique en un point, que l'on nomme centre vélique[[9]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-Adeps-10). Le centre vélique est défini comme le barycentre des points véliques de chaque voiles. Le centre vélique a la même formule que précédemment, sauf que le contour de l'équation précédente englobe non plus une voile mais toutes les voiles[[150]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-186).

Article connexe : [Équilibre d'un navire sous voiles](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quilibre_d%27un_navire_sous_voiles).

1. **Introduction à l'aéroélasticité d'une voile**

Les conditions aux limites de l'approche classique (voir Cas de plusieurs voiles : résolution multidimensionnelle du problème), ou les éléments sont rigides et à vitesse constante, ne reflètent pas la réalité. Malgré tout avec ses simplifications la résolution est déjà quasi hors de porté de nos possibilités actuelles.

L’élasticité des voiles, du gréement, le voilier qui butte sur les voiles etc. sont des paramètres qui peuvent amener à des optimisations donc des performances de voile non négligeable en compétition. La prise en compte de ses éléments amène à considérer que les mouvements des parties solides (voile, gréement, etc.) influe sur le comportement du fluide (l'air). Ce couplage est nommé [aéroélasticité](http://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9ro%C3%A9lasticit%C3%A9). Ce domaine est en pleine phase de recherche.

Le cas de notre modélisation plus complète est représenté par les conditions suivantes :

* le vent

La vitesse aux bornes d'entrée du domaine en amont de la voile est constante et non nulle  \; \vec{U} = \vec{Va}

* présence d'une ou plusieurs voiles soit la condition

La vitesse est nulle sur la voile  \; \vec{U_{voile-air}} = \; \vec{0}avec \vec{U_{voile-air}} = \vec{U} + \vec{U_{voile-mer}}.

Si la voile est fixe  \; \vec{U} = \; \vec{0}.

* en aval, très loin de la voile, la voile n'a plus d'effet ou d'influence sur le fluide

Contrainte nulle à la sortie des bords du domaine en aval de la voile \overrightarrow{\overrightarrow{\tau}} = 0

Suivant la finesse des simulations il est possible de rajouter par ordre croissant de difficulté :

* le mat,
* le reste du gréement : hauban, flèche de mat ...
* le reste du bateau : œuvre vive et superstructure
* la mer.

La condition est : la vitesse relative du vent sur ses éléments est nulle  \; \vec{U_{element-air}} = \; \vec{0}. Il ne faut pas oublier que la mer est fixe et que le bateau bouge avec son gréement. Les vitesses absolues seront donc différentes. La modélisation de la mer est plus ou moins raffinée suivant les possibilités de calcul :

* par un plan [[151]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-187),[[152]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-188),[[153]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-189)
* avec une houle modélisée par une sinusoïde voir plus complexe
* plus complet la modélisation inclue le sillage du bateau [[154]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-190).

Dans une modélisation avec la mer, l'interaction voilier-mer fait giter rouler tanguer le navire. La voile bouge dans tous les sens compliquant d'autant la simulation. Le praticien choisi souvent parmi ces trois solutions :

* le voilier est [statique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Statique) avec de la gite (ou pas).
* le voilier est [dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique). Le voilier bouge mais ses déplacements possibles sont réduits à gite et tangage.
* [](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Tacoma_Narrows_Bridge_destruction.ogg)la simulation la plus complète avec roulis gite tangage et le bateau qui monte et descend la vague.

Exemple célèbre de couplage fluide-structure : Tacoma Narrows Bridge

Le problème de l'écoulement de l'air sur la voile lui aussi peu être l'objet de raffinement de calcul. Dans une approche simple la voile est considérée comme indéformable. Ce niveau est déjà en soi hors de porté de nos possibilités de calcul actuelles, les écoulements turbulents ne sont pas très bien simulés. Mais une voile est souple, ceci est le deuxième niveau de complexité. Et pour finir les matériaux à voile sont élastiques. Très peu élastique mais suffisant pour engendrer des phénomènes d'[aéroélasticité](http://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9ro%C3%A9lasticit%C3%A9). Dans ce dernier niveau de complexité nous avons affaire à un couplage entre un fluide (l'air) et une structure (le tissu de la voile), la littérature parle de couplage fluide structure. La structure est du domaine de la résistance des matériaux. Le but est donc de coupler la science de la résistance des matériaux et la science de la mécanique des fluides. Cette section sera principalement basé sur les références suivante [[155]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-191),[[156]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-192),[[157]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-193),[[158]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-194),[[159]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-195),[[160]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-196),[[161]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-197),[[162]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-198),[[163]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-199),[[164]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-200),[[165]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-201) :

**6.1 Problème à une dimension ou voile fixe**

La voile est considéré comme rigide. Le profil de la voile est donc entièrement connu. La voile peut être composée de plusieurs profils avec des incidences et vrillage différent. À part le spi, les points de situé au quart avent de la corde (ou sens de l'allongement) est proche d'une droite : foc, grand voile et génois.

Le calcul (ou l'essai en soufflerie) peut se limiter à un voilier immobile, c'est-à-dire à gite tangage et lacet constant. Seul suffit pour la simulation un logiciel de [mécanique des fluides](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_des_fluides_num%C3%A9rique). La simulation peut être détaillée en incluant les super structures et autre gréement. Mais grâce au progrès de l’électronique la puissance de calcul a rapidement permit de simuler avec une bonne précision un voilier un peut plus réaliste : le voilier bouge, c'est-à-dire que suivant les efforts de la voilure le voilier va giter ... et si on rajoute de la houle, le système devient bien plus réaliste. C'est le premier couplage entre un fluide et une structure, ici considérée comme indéformable.

Il est noté que la puissance de calcul est une limite cruciale pour une simulation. Il est possible de simuler les fluides en incluant la viscosité de l'air, mais quand plusieurs modèles mathématiques interviennent dans la simulation, chaque modèle doit être simplifié pour avoir un temps de calcul raisonnable. Souvent dans un modèle d'aéroélasticité, le sous modèle du fluide est sans viscosité, les interactions fluides structure sont linéarisé, l'inertie est négligée, les déformations élastiques sont linéaires, pas de déformation plastique ... Les types de simulation ne s'excluent pas entre elles, une simulation d'aéroélasticité permet de voir un comportement général du voilier alors qu'une simulation d'un profil avec viscosité permet de voir des comportements de détail de la voile.

**6.1.1 Couplage**

La simulation est une simulation dynamique, c'est-à-dire que l'on regarde l'évolution des variables (efforts, positions) au cours du temps T_0 à T_{fin}. Pour ce faire le temps est découpé en très fine "tranche" \delta t . À chaque incrément de temps t_n, les logiciels recalculent tout. Plus le temps est découpé finement meilleur est la simulation, mais plus long est le temps de calcul.

La simulation est composée de trois éléments :

* le logiciel de calcul du fluide
* le logiciel de calcul de la structure
* l'interface qui lie les deux logiciels ou couplage.

Le couplage permet le transfert des résultats d'un des logiciels vers l'autre. Le bord de la voile est l'élément en commun des deux logiciels, les données échangées sont les résultats de calcul obtenu au bord de la voile. La difficulté et le problème est que les résultats sont interdépendant alors que les calculs de chaque logiciel sont indépendant. Pour l'heure il n'existe pas de logiciel monolithique fusionnant les deux logiciels. Le problème est donc que le résultat du logiciel structure donne une nouvelle forme à la voile. Or lui le logiciel fluide pendant ce temps ne peut uniquement calculer les efforts sur la voile avec l'ancienne position. Si les efforts du fluide on changé, ce changement change la forme de la voile et vice versa. Si on procède par très petit pas de temps, les résultats de calcul à chaque itération varient très peu. La petite erreur commisse est alors négligée. L'effort au bord de la voile calculé par le logiciel fluide n'est pas exactement égal à l’effort au bord de la voile calculé par le logiciel structure, le [Principe fondamental de la statique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_fondamental_de_la_statique) est violé. Attention l'erreur n'est pas négligeable car elle a tendance à se cumuler, c'est-à-dire que chaque petite erreur correspond à un ajout ou retrait d’énergie dans le système air voile. Les logiciels d'aéroélasticité essais de limiter le plus possible, c'est le couplage temps. Autre problème, les logiciels sont numérique et donc modélise la l'espace en un maillage. Les logiciels calculent les efforts et déplacement à des points particulier du maillage (les sommets). Or rien ne dit que les deux maillages aux bords de la voile sont identiques. Prenons par exemple les efforts. Si les maillages ne correspondent pas alors le lieu ou l’effort calculé par le logiciel fluide aux bords de la voile sur l'un des sommets ne correspond pas à un sommet sur l'autre logiciel. Il faut alors procéder a une moyenne (ou autre formule de répartition) pour répartir cette efforts sur les sommets proche de l'autre logiciel, c'est le couplage en espace.

**6.1.1.1 Couplage en espace**

Soit  \Theta l'ensemble des points fluide et structure du domaine modélisé.

Soit l'[opérateur différentiel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Op%C3%A9rateur_diff%C3%A9rentiel) \displaystyle R_{fluide}(.)pour le fluide et \displaystyle R_{structure}(.)pour la structure, ou des changements de variables sont opérées pour avoir les mêmes variables dans les deux opérateurs. De même  Sol_{fluide}est la solution à  0 = \displaystyle R_{fluide}(Sol_{fluide})et  Sol_{struc}est la solution à  0 = \displaystyle R_{struc}(Sol_{struc}).

Les conditions initiales sont notées par l'ensemble \mhoqui est l'ensemble à t=0 de la vitesse et la position de chaque point de matière de  \Theta .

À l'interfaces fluide-structure noté \ Contour, le principe fondamental de la statique donne à tous instant  t de la simulation :

 \forall (x,y,z) \in Contour, Sol_{fluide} (x,y,z,t) = Sol_{struc} (x,y,z,t) .

Comme la résolution directe du problème est hors de porté de nos connaissances actuelles. Les [opérateurs différentiels](http://fr.wikipedia.org/wiki/Op%C3%A9rateur_diff%C3%A9rentiel) \displaystyle R_{fluide}(.)et \displaystyle R_{structure}(.)pris séparément sont trop complexe pour notre mathématique actuel, on ne sait pas les résoudre directement (analytiquement), mais via des solutions approchantes.

Les solutions approchantes utilisent la [Méthode des éléments finis](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_%C3%A9l%C3%A9ments_finis). Trouver toutes les fonctions solutions à un problème quelconque est aussi hors de porté de notre mathématique. Par contre les mathématiciens savent trouver les fonctions solutions qui respectent quelques propriétés topologiques, c'est-à-dire trouver les solutions de la reformulation du problème sous forme un peu moins contraignante appelée [formulation faible](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_faible). Ensuite la [formulation faible](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_faible) est réécrite sous forme de [Formulation variationnelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_variationnelle). Ensuite grâce au [Théorème de Lax-Milgram](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Lax-Milgram) utilisant le résultat remarquable de l'[Équation d'Euler-Lagrange](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_d%27Euler-Lagrange), il est prouvé que la formulation est ré-solvable et admet une solution unique. Ce qui est remarquable est que la solution repose sur la minimisation d'une fonctionnelle. Cette fonctionnelle est une re-transformation de notre [Formulation variationnelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_variationnelle). Donc trouver le minimum unique de cette fonctionnelle, c'est trouver la solution de la [Formulation variationnelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_variationnelle) donc la solution de la [formulation faible](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_faible) donc la solution à notre problème  0 = \displaystyle R(.).

Il suffit de calculer le minimum de cette fonctionnelle, or les mathématiciens ne savent pas trouver une solution analytique. Par contre, en discrétisant (c. à d. trouver des solutions en un nombre finie de points de  \Theta ) le problème les mathématiciens savent le résoudre. Ces points particuliers sont les nœuds d'un [maillage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Maillage) du domaine  \Theta . Le maillage est choisie par le praticien résolvant ce problème de modélisation. Plus le maillage est fin plus la solution est réaliste, mais aussi plus le temps de calcul est long. Le processus consiste à trouver donc un minimum en ces nœuds, la méthode est une méthode récursive ou à chaque itération on se rapproche de plus en plus du résultat.

Si le problème est stationnaire seul une discrétisation de l'espace via un maillage est nécessaire; par contre si le problème est dynamique (évolutif), alors le temps sera aussi discrétisé (coupée en petit morceau).

La méthode actuelle consiste résoudre n'ont pas le problème mais un problème approchant. Le problème approchant est de résoudre chaque opérateur séparément, soit la transformation de :

 \forall (x,y,z) \in Contour, Sol_{fluide} (x,y,z,t) = Sol_{struc} (x,y,z,t) .

En

 \forall (x,y,z) \in Contour, n \in \N , Sol_{fluide} (x,y,z,t_{n}) = constante_{t_{n}} = Sol_{struc} (x,y,z,t_{n}) .

Or le gros problème de cette méthode est que :

 Contour_{fluide} (t_{n+1}) \neq Contour_{struc} (t_{n+1}) .

Il faut aussi rajouter le problème des maillages. Rien ne dit que sur le contour les maillages du fluide correspondent au maillage de la structure. C’est-à-dire que sur les contours ou bord de la voile, les nœuds sont communs au maillage fluide et au maillage structure. Ce problème est courant et rajoute de la difficulté. En effet, le fluide est modélisé par un maillage 3D alors que pour une voile (la structure) il est souvent préféré un maillage surfacique (2D).

(...)

**6.1.1.2 Couplage en temps**

La résolution utilise deux solveurs fluides et structure. Il est facile de faire coïncider chaque incrément de temps, chaque logiciel prenant le même pas de temps. À la fin de chaque incrément chacun des solveurs donnent un résultat de calcul c'est-à-dire la position nouvelle de chaque nœuds avec la force associé à chaque nœuds (ou pression). Pour l'incrément suivant il faudra transférer les résultats de chaque solveur de l'un vers l'autre. Dans la pratique le transfert des informations est automatisé, le professionnel crée une interface informatique d’échange des données entre les deux solveurs.

Le problème n'est donc pas de synchroniser les deux solveurs, mais dans l'échange des données. Comme indiqué précédemment la loi fondamentale de la dynamique est un peu violer, il faut limiter cette violation. C'est dans l'interface que cette opération de minimisation est faite. Les données échangées vers chaque solveur sont donc légèrement retravaillées via un algorithme. L’algorithme peux même refaire des calculs séparer aux solveurs pour mieux choisir les valeurs des données à échangée.

Il existe trois catégories d'algorithmes [[166]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-202) :

* les algorithmes décalés en temps, pour lesquels en gros chaque solveur travaille chacun leur tour. Les données sont retravaillées pour permettre de respecter le plus possible la loi fondamentale de la dynamique (notamment de minimiser l’énergie artificiellement introduite dans le système) ;
* les algorithmes parallèles, les deux solveurs sont avancés en temps parallèlement. De même pour la même raison de non-respect du principe fondamental de la dynamique qui introduit artificiellement de l’énergie dans le système simulé (voile + vent) les données sont retravaillées ;
* les algorithmes d’itération, cette approche fait tourner plusieurs fois les solveurs. Un résultat des algorithmes décalés en temps ou parallèle sont considérée comme une étape intermédiaire. En réinjectant cette étape intermédiaire, les solveurs donnent un nouveaux résultat qui viole un peu moins le principe fondamentale de la dynamique que précédemment. D’itération en itération, le résultat est de plus en plus proche de la perfection. À partir d'un certain seuil d’erreur (en énergie ou force) l'algorithme passe à l’incrément de temps suivant.

**6.2 Problème à deux dimensions ou voile souple**

La voile est souple et indéformable. La voile a un seul profil lorsque celle-ci est gonflée par le vent. Dans cet état gonflé par le vent, la résolution du problème revient au cas "voile rigide". L'état opposé est lorsque la voile est dégonflé, cette état n'a pas d’intérêt et est donc pas étudié. Il reste les cas intermédiaires aux deux précédents, c'est-à-dire lorsque qu'une partie de la voile n'est pas gonflé; le cas le plus connu est la voile qui [fasèye](http://fr.wikipedia.org/wiki/Faseyer) au vent. Ce cas apparait sur le bord de la chute quand l'écoulement est turbulent. Dans la zone morte sur la chute une turbulence se crée, puis elle s'échappe de la voile; de nouveau une nouvelle turbulence se reforme. Lorsque les turbulences sont fortes, elles arrivent à générer une dépression. Une partie de la voile est aspirée. La voile bouge, la turbulence s'échappe. L'équilibre "normal" de pression se rétablie, la voile se regonfle. Comme les simulations arrivent péniblement à simuler les turbulences, ces cas intermédiaires ne sont pas encore maitrisés. La littérature assimile souvent ces cas intermédiaires au domaine de l’aéroélasticité mais ces cas restent peu étudiés.

* [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b4/Vortex-street-animation.gif/120px-Vortex-street-animation.gif](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Vortex-street-animation.gif)

Exemple numérique de turbulence autour d'un profil rigide rond ou autrement dit influence d'un mât de vieux gréement sur l'air.

* [](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Shivering_sail_killendes_Segel.gif)

Conséquences des fortes turbulences sur un profil non rigide, la forme de la voile bouge. La résolution numérique ou analytique de ce comportement (déformation importante de la voile et fortes turbulences) est hors de portée de nos possibilités actuelles.

|  |  |
| --- | --- |
| http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/35/Information_icon.svg/16px-Information_icon.svg.png | *Cliquez sur une vignette pour l’agrandir* |

**6.2.1 Modélisation de la voile**

La voile est par nature un morceau de tissu. L’épaisseur du tissus est très très faible comparé aux dimensions de la voile. Les variations d’épaisseur de la voile du aux efforts sur la voile sont faible par rapport à l’épaisseur. Les variations sont donc totalement négligeables. La voile qui est un volume est donc assimilée à une surface. Les modèles de résistance des matériaux sont donc simplifier en conséquence. Deux approches existent :

* modéliser la voile par un ensemble de fil
* modéliser la voile par un ensemble de petite surface élémentaire.

La suite de l'article ne décrira en détail qu'un des modèles surfaciques, bien que d'autre modèle existent [[167]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-203).

**6.2.1.1 Filaire**

Ce modèle a été développé par O. Le Maître et E. Souza De Cursi[[168]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-204),[[169]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile" \l "cite_note-205).

**6.2.1.2 Surfacique**

La méthode a été développée par Imbert [[170]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-206). La méthode se nomme CST. La voile est décomposé en petite surface triangulaire jointive les unes des autres. Les petits triangles peuvent être de surface différente et se resserrent dans les zones à forte déformation pour avoir un calcul le plus réaliste possible. Le triangle est composé de trois sommet appelé nœuds. Chaque nœuds est repéré par sa position {x, y, z} noté {X}. Il existe deux repères :

* le repère lié à chaque petit triangle donnant { X_l}
* le repère général de la voile { X_g}. À noter que le repère de la voile peut être lui aussi mobile.

Il faudra faire des changements de repère. Ces changement peuvent être mis sous forme de matrice [ \lambda] avec { X_l} = [ \lambda] { X_g}. Les coefficients de la matrice évoluent au cours du temps bien sur, il faut les remettre à jour à chaque itération de calcul, c'est-à-dire entre les instant t et t+1. Pour remettre à jours ces coefficients entre chaque itération, il suffit de savoir que le déplacement { Q } lie dans le repère locale { X_{l_{(t)}}} et { X_{l_{(t+1)}}} via la relation :

{ Q } = { X_{l_{(t+1)}}} - { X_{l_{(t)}}}

À chaque nœud, le problème est de relier entre eux les forces { F } et les déplacements { Q }. Pour cela il suffit de trouver une matrice [K] tel que { F } = [ K ] { Q }

Imbert propose pour des éléments en 2 dimensions telles qu'une voile :

[K] =eA [B]^{\operatorname t}\![C]\![B]~

Où

* e est l’épaisseur de la voile,
* A son aire,
* [C] une matrice (3 \* 3) de comportement du matériau,
* [B] une matrice (3 \* 6) d’origine géométrique qui lie :
  + les déplacements { Q } aux déformations \epsilon : \epsilon= [ B ] { Q }
  + les contraintes \sigmaaux efforts { F } : { F }  = e A [ B ]^{\operatorname t} {  \sigma }

ainsi : { \sigma} = [ C ] { \epsilon}

La matrice contient les équations de la résistance des matériaux. Souvent comme ces équations sont fort compliqués, et que dans leur zone élastique, la forme de l'équation est proche d'une droite passant par l'origine, les équations sont linéarisées en un seul coefficient le [Module de Young](http://fr.wikipedia.org/wiki/Module_de_Young).

\sigma = E \varepsilon

Où :

* \sigmaest la [contrainte](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tenseur_des_contraintes) (en unité de pression),
* **E** est le **module de Young** (en unité de pression),
* \varepsilon est l'allongement relatif, ou déformation ([adimensionnel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Grandeur_sans_dimension)).

Dans le cas de voile composé de plusieurs couches de matériaux différent la matrice [ C ] est simplement la somme des matrices de chaque matériau. Attention à l'orientation du matériau, en particulier dans le matériau orienté tel que les fils de [voile laminée](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riaux_%C3%A0_voile) la matrice est plus complexe pour prendre en compte cette orientation [[171]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_note-207)

**6.3 Problème à trois dimensions ou aéroélasticité**

L’opérateur de la simulation a choisie deux modèles mathématiques, l'un fluide l'autre structure. Le problème est donc de résoudre c'est deux modèles lié. La diversité des modèles structures et fluides suive le même chemin pour leur résolution. La section suivante donnera le guide général de la résolution de ce problème.

6.3.1 [**Formulation faible**](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_faible)

Les deux modèles dans leur aspect les plus complexes sont des équations différentielles. Elles sont définies sur un domaine, c'est-à-dire que les conditions aux limites sont connues :

* pas de déplacement de fluide au bord des objets : voile, gréement, superstructure, mer, etc.
* la position initiale des objets : voiles, gréement, superstructure, mer, etc.
* et généralement un vent uniforme et constant en aval du domaine.

La plus grosse approximation systématiquement faite pour alléger les calculs est de négligé l'inertie, soit appliqué le [Principe fondamental de la statique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_fondamental_de_la_statique) au lieu du [Principe fondamental de la dynamique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_fondamental_de_la_dynamique).

Soit l'[opérateur différentiel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Op%C3%A9rateur_diff%C3%A9rentiel) \displaystyle R_{fluide}(.) pour le fluide et \displaystyle R_{structure}(.) pour la structure, ou des changements de variables sont opérées pour avoir les mêmes variables dans les deux opérateurs. De même  Sol_{fluide}est la solution à  0 = \displaystyle R_{fluide}(Sol_{fluide}) et  Sol_{struc}est la solution à  0 = \displaystyle R_{struc}(Sol_{struc})

Aux interfaces fluides structure noté \ Contour, le principe fondamental de la statique donne à tous instant  t  de la simulation :

 \forall (x,y,z) \in Contour, Sol_{fluide} (x,y,z,t) = Sol_{struc} (x,y,z,t) .

Comme la résolution directe du problème est hors de porté de nos connaissances actuelles, la première étape est de formuler le problème sous la forme de [Formulation faible](http://fr.wikipedia.org/wiki/Formulation_faible).

(...)

1. **Notes et références**

* Notes

1. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-3) une voile est déformable, pas une aile d'avion
2. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-9) Ce domaine encyclopédique est déjà en soit bien ambitieux et vaste !
3. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-11) La tonne est à prendre au sens de [kgf](http://fr.wikipedia.org/wiki/Kilogramme-force) soit une tonne est égale 1 000 kgf.
4. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-13) L'inverse d'un choc mou est appelé [Choc élastique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Choc_%C3%A9lastique). Un choc *dur* (ou [Choc élastique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Choc_%C3%A9lastique)) c'est par exemple le choc des billes de [billard](http://fr.wikipedia.org/wiki/Billard). Un choc mou serait de jouer au billard avec des [chamallow](http://fr.wikipedia.org/wiki/Guimauve_(confiserie)).
5. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-14) l'énergie mécanique *disparu* est transformé sous forme de chaleur par exemple.
6. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-15) cette indépendance dépend de l'importance de la viscosité
7. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-16) voir [Portance (mécanique des fluides)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(m%C3%A9canique_des_fluides))
8. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-20) La voile est considérée comme mince, les coefficients de forme sont approximés à 1 autrement dit négligés (voir le menu déroulant *explication* de ce paragraphe)
9. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-21) Les penons de la voile ne gigotent plus
10. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-26) la référence pour l'allongement est généralement la droite que décrit l'ensemble des points situés au quart avant des cordes de la voile. Le quart avant est choisi car il correspond à une valeur particulière du moment du profil  \ C_M(1/4c) = - \pi /4 (A_1 - A_2) (voir [Théorie des profils minces](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces)); cet ensemble de point est souvent proche d'une droite.
11. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-27) pour une voile, le profil a deux extrémités et donc la pression atmosphérique s'équilibre parfaitement. Il reste qu’à modéliser les effets du vent.
12. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-28) Attention, cela ne veut pas dire que l'on élude la troisième dimension, les effets 3D sont bien pris en compte, mais on s'intéresse qu'aux conséquences de l’existence de cette troisième dimension sur les deux autres dimensions. Cela permet de simplifier les diagrammes ou les calculs. Par exemple, la [Traînée induite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e_induite) est un phénomène purement 3D mais sa [modélisation](http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_profils_minces) est faite en 2D.
13. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-31) bien que le profil d'une voile soit dissymétrique et que le profil NACA 0012 soit symétrique
14. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-34) Les efforts sont transmis pour moitie au mât, l'autre moitié au point d'amure. Soit un effort sur l'écoute de la moitié de l'effort de la voile.
15. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-35) Dans la pratique, les voileries doublent les efforts maximum mis en jeu pour dimensionner la résistance de la voile. Ceci permet de tenir compte des rafales de vent.
16. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-36) la trainée et la dérive ne sont pas pris en compte
17. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-37) Il suffit de projeter la poussée vélique sur l'axe principal (Fprin) du navire et sa perpendiculaire (Fper) soit F la poussé vélique alors Fprin = F\* cos 40° = 76 % \* F et Fper = F \* sin 40° = 36 % \* F
18. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-38) Un bateau est dit à déplacement lors que celui-ci n'arrive pas à planer ou partir en surf. La résistance à l'avancement grimpe exponentiellement (voir [Nombre de Froude](http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Froude)). Pour les bateaux à coque planant, ils arrivent à se "hisser" sur la vague, la résistance alors chute. Mais pour les bateaux à déplacement, qui n'arrivent pas à se hisser sur la vague, la résistance devient rapidement gigantesque sans pour autant que le navire avance significativement plus vite. Le bateau arrive donc à sa vitesse limite.
19. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-39) Dans la réalité la courbe n'est pas aussi *lisse* et croissante, la courbe présente des ruptures. Par exemple bout au vent la voile étant souple elle ne garde plus sa forme donc son profil, la voile ne fait plus avancer le navire, le voilier recule. De même au près très serré l'incidence n'est plus constante, elle diminue au fur et à mesure que le voilier se rapproche de bout au vent, elle devient nulle, donc l'effort propulsif aussi diminue fortement. De même les voiles hissées dépendent de l'allure, à chaque allure correspond un jeu de voile différent; les transitions entre jeu de voile et leurs performances qui varient suivant l'allure sont autant de paramètres qui font fluctuer la performance du voilier donc sa vitesse donc la valeur du vent apparent.
20. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-40) Bien évidemment le cap du voilier est différent dans chaque cas. Pour rejoindre le plus rapidement sa destination il faut utiliser le [VMG](http://fr.wikipedia.org/wiki/VMG)
21. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-41) la planche à voile ne répond pas forcément à ce critère, ou par exemple les [turbovoiles](http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbovoile)
22. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-48) \ Ci  : i pour induite
23. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-49) La distance est l'épaisseur de la voile plus les vergues éventuelles (corne ou bôme)
24. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-62) Si la voile n'est pas tendue, la voile faseille, donc offre une certaine résistance. La voile fait légèrement reculer le navire, dans ce cas il y a une légère traînée. Il est à noter aussi que dans ses conditions le mat, le gréement, les superstructures et les œuvres mortes gêneront bien plus d'effort aérodynamique que la voile elle-même.
25. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-63) les penons sont instables
26. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-79) ou plus sécurisante pour des équipages moins expérimentés ou des conditions météo difficiles
27. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-89) le bateau de course utilise plus la corne allongée pour avoir plus de toile dans la zone de fort vent (altitude), cela engendre plus d'effort perpendiculaire mais les moyens qu'il dispose pour contrecarrer la gite sont bien plus importants : ballast, foil, multicoque, largeur de coque
28. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-115) ne pas confondre avec wind heeling arm qui le moment divisé par le déplacement du navire
29. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-130) C'est grâce à l'approche d'Euler qu'il est possible de trouver un ensemble d'équation résolvable au problème.
30. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-131) heureusement, les deux approches décrivent la même chose !
31. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-132) notez bien la nuance ! elle est de taille pour les calculs
32. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-133)  Ei \, est plutôt noté  U \,, mais ici  Ei \, est utilisé pour éviter les confusions avec la vitesse
33. [↑](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile#cite_ref-134) Les différentes formes d'énergie (par unité de volume) dans un gaz sont :
    * l'énergie cinétique \; Ec = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 ;
    * l'énergie interne : \; Ei = \rho \ ei  énergie cinétique interne des molécules ;
    * l'énergie potentielle : \; Ep = \rho \ g \times z