

Brevet P

Théorie de la planche à voile



Table des matières

1) Le vent.....	4
1. Direction et intensité	4
2. Les différents vents.....	5
a) Le vent réel (VR)	5
b) Le vent vitesse (VV)	5
c) Le vent apparent (VA).....	5
3. Variations des différents vents	6
2) L'aérodynamisme.....	12
1. Physique des fluides.....	12
a) Les caractéristiques du fluide	12
b) La résistance de frottement	13
c) La force appliquée sur une surface.....	14
d) L'effet venturi	15
3. Dynamique des fluides.....	15
a) Effets du vent sur la voile	15
4. La force vélique	19
a) Caractéristiques de la force vélique	19
b) Le centre vélique	21
c) Les facteurs qui influencent la force vélique	23
5. Conclusion pour l'aérodynamisme	23
3) Hydrodynamique.....	24
1. La flottabilité	24
2. La stabilité	25
a) La stabilité statique (hydrostatique).....	25
b) La stabilité dynamique.....	26
3. La résistance à l'avancement	27
4. La résistance due à la gîte, à la dérive et aux modifications d'assiette	28
a) La dérive, son fonctionnement.....	28
b) La surface mouillée (La carène)	30
c) L'effet de carène.....	30
d) L'effet de care	31
5. La vitesse critique pour expliquer le planning.	32
4) Combinaisons des forces aériennes et hydrauliques.....	34
6. Équilibre dynamique	34
7. Les effets directionnels	36

1) Le vent

1. Direction et intensité

Le vent est le déplacement d'une masse d'air vers une autre masse d'air (lien météo). C'est une force qui se caractérise par une direction et une intensité. Celle-ci s'exprime en m/s, km/h ou en nœuds.

Bft	Vitesse du vent moyen		Terme Descriptif	Aspect de la mer	Vagues (m)
	(Nœuds)	(Km/h)			
0	0 – 1	0 – 1	Calme	Comme un miroir.	0,0
1	1 – 3	1 – 5	Très légère brise	Quelques rides.	0,1
2	4 – 6	6 – 11	Légère brise	Vaguelettes ne déferlant pas.	0,2 – 0,5
3	7 – 10	12 – 19	Petite brise	Les moutons apparaissent.	0,6 – 0,9
4	11 – 16	20 – 28	Jolie brise	Petites vagues, nombreux moutons.	1,0 – 1,5
5	17 – 21	29 – 38	Bonne brise	Vagues modérées, moutons, embruns.	2,0 – 2,5
6	22 – 27	39 – 49	Vent frais	Lames, crête d'écume blanche : embruns.	3,0 – 4,0
7	28 – 33	50 – 61	Grand frais	Lames déferlantes, trainées d'écume.	4,0 – 5,5
8	34 – 40	62 – 74	Coup de vent	Tourbillons d'écume à la crête de lames, trainées d'écume.	5,5 – 7,0

L'échelle de Beaufort a été établie par l'amiral britannique *Francis Beaufort* (1774-1857) qui, en 1805, a imaginé une échelle pour quantifier le vent et l'état de la mer et permettre la diffusion d'informations fiables universellement comprises.

En dessous de 8 nœuds :

✓ Beaufort = (nœuds : 5) + 1

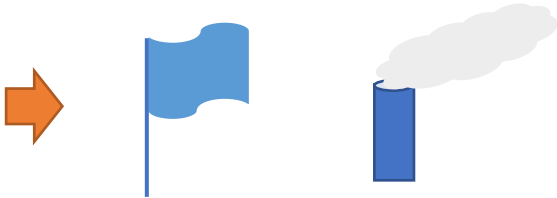
Au-dessus de 8 nœuds :

✓ Beaufort = (nœuds :5)

2. Les différents vents

a) Le vent réel (VR)

Appelé également « vent atmosphérique », c'est le vent qu'on annonce à la météo. C'est le vent qui fait fuser les drapeaux, qu'on observe avec la fumée qui s'échappe de cheminées, ...



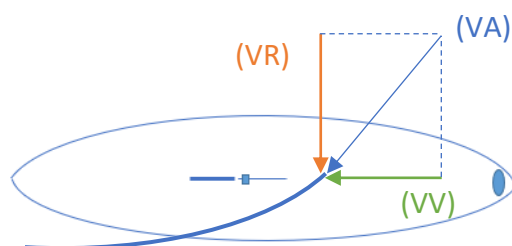
b) Le vent vitesse (VV)

Il est créé artificiellement par notre déplacement et sera égale à la vitesse du déplacement d'un corps, de même direction mais de sens opposé. Il va également freiner ce déplacement (voir aéro). C'est le vent qu'on ressent à vélo, en descendant une pente à ski, le vent dans la main lorsqu'on la sort de la voiture sur l'autoroute, bref, lorsqu'on se déplace. L'appellation « vent » peut paraître bizarre mais physiquement parlant, qu'un flux d'air se déplace sur un corps, ou qu'un corps se déplace dans l'air, les conséquences seront les mêmes.



c) Le vent apparent (VA)

C'est la résultante du vent réel et du vent vitesse. C'est lui qui détermine la manière dont nous devons régler notre voile. On peut croire qu'on ne règle sa voile qu'en fonction du vent réel mais le vent vitesse va l'influencer aussi. C'est pourquoi, par exemple, plus j'ai de vitesse, plus je dois border ma voile. Sans cela mon réglage de voile serait complètement figé en fonction de l'allure que j'ai.

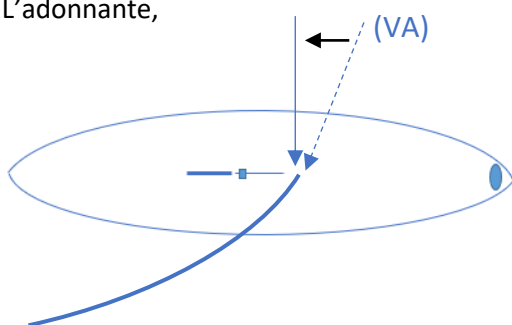


3. Variations des différents vents

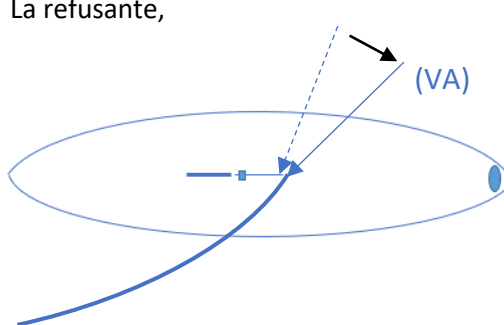
Ces vents ne sont jamais constants, il y a continuellement modification des paramètres (VR et VV), ce qui entraîne un changement du vent apparent et demande donc une adaptation du windsurfer.

Cette modification du VA peut être avantageuse (adonnante) ou désavantageuse (refusante). Quand on dit « avantageuse », cela peut être pour 2 éléments distincts ; la vitesse et le cap. Soit la modification du vent me permet d'aller plus vite, soit il me permet de remonter mieux le vent.

L'adonnante,



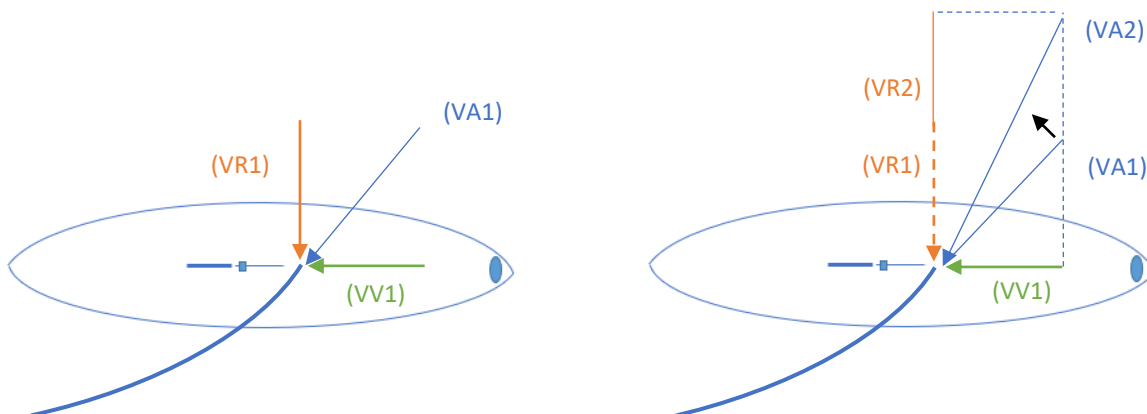
La refusante,



Quelques cas de figure peuvent se présenter à nous,

a) Le vent réel augmente

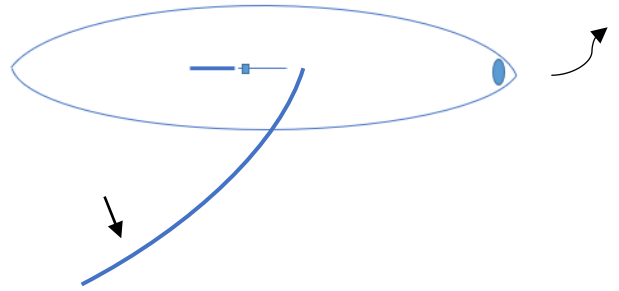
VR augmente quand il y a une risée, une rafale. C'est-à-dire une augmentation soudaine et temporaire du vent réel.



- VR augmente
- VV reste inchangé
- VA augmente et adonne

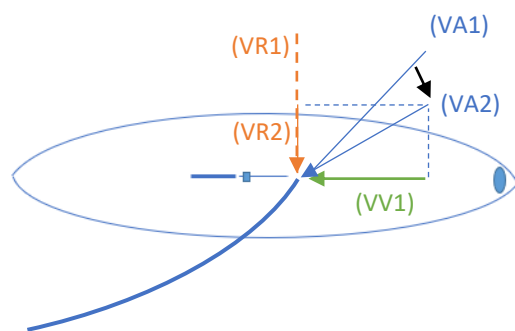
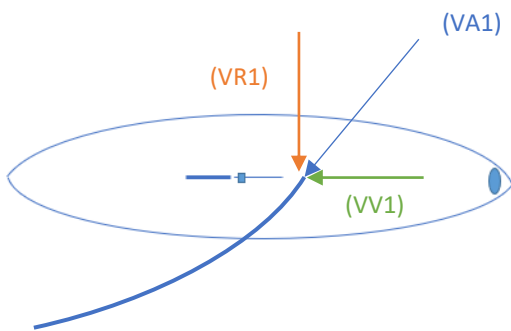
Dans ce cas, deux solutions s'offrent à nous

- ✓ Soit on choque. (En gardant le cap)
- ✓ Soit on lofe.



b) Le vent réel diminue

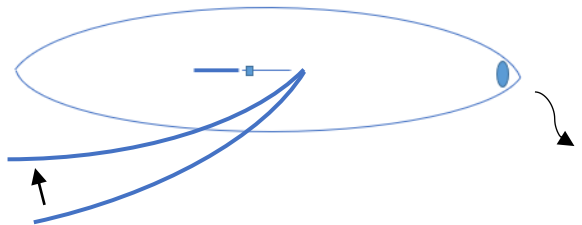
Parce que la risée est passée... Parce qu'un bateau ou un autre planchiste est au vent de nous et prend notre vent.



- VR diminue
- VV reste inchangé
- VA diminue et refuse

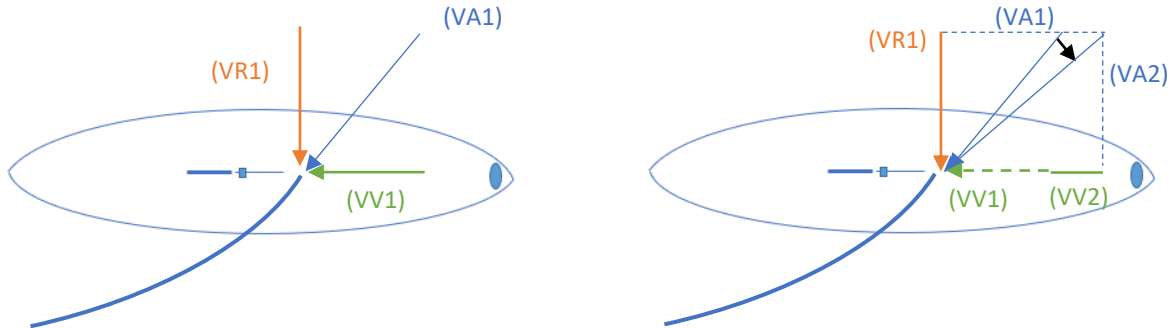
Dans ce cas, deux solutions s'offrent à nous

- ✓ Soit on borde.
- ✓ Soit on abat.



c) *Le vent vitesse augmente*

À la suite d'une accélération, une descente de vague, etc.



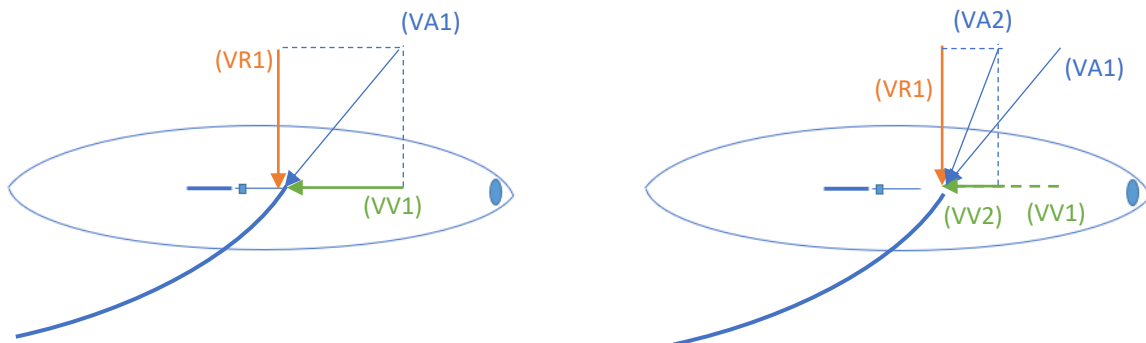
- VV augmente
- VR est inchangé
- VA augmente et refuse

Dans ce cas, deux solutions s'offrent à nous

- ✓ Soit on borde.
- ✓ Soit on abat.

d) *Le vent vitesse diminue*

Par exemple, quand la planche monte une vague, une voile mal réglée, etc.



- VV diminue
- VR ne change pas
- VA diminue et adonne

Dans ce cas, deux solutions s'offrent à nous

- ✓ Soit on choque
- ✓ Soit on lofe

Bref :

Une adonnante : lorsque le vent **apparent** s'écarte de l'axe de progression du support et permet de choquer la voile ou de lofer.

NB : un ralentissement du support donne lieu à une légère adonnante tout en ayant une baisse d'intensité.

Une refusante : lorsque le vent **apparent** se rapproche de l'axe de progression du support et permet de border la voile ou d'abattre.

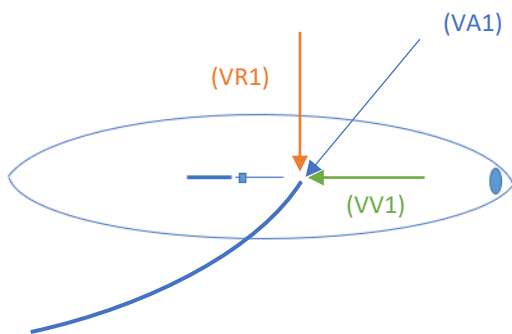
NB : une accélération donne lieu à une refusante tout en ayant une augmentation d'intensité (surf sur une vague).

e) La risée et son évolution

Comme cité ci-dessus, la risée est une augmentation soudaine et temporaire de l'intensité de la force du vent réel. Elle peut se manifester par une intensité accrue, mais également par une variation en direction.

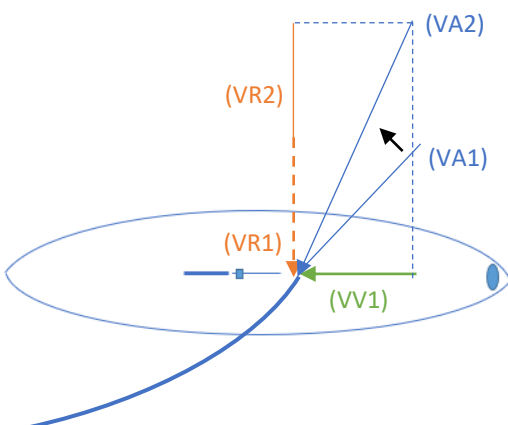
Prenons ici comme exemple l'augmentation d'intensité pour mettre en application ce que nous avons vu précédemment.

(1) AVANT la risée



(2) PENDANT la risée

1^{ère} phase : VR ↑



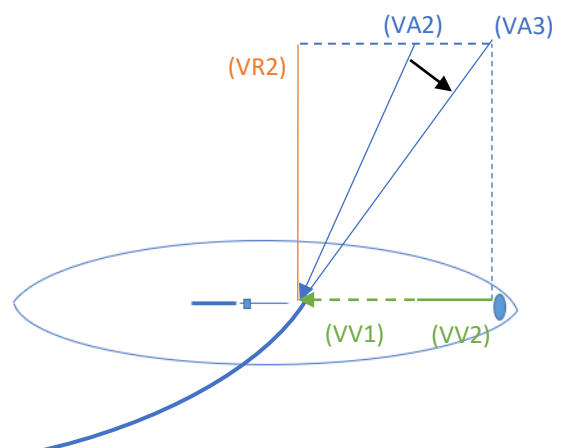
VR1 augmente et devient VR2

VV1 reste constant

VA1 augmente et adonne (VA2)

✓ Donc on lofe et/ou on choque

2^{ème} phase : VV ↑



VV1 augmente et devient VV2

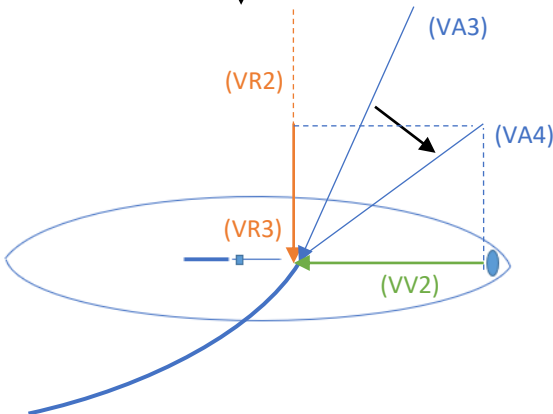
VR2 reste constant

VA2 augmente et refuse (VA3)

✓ Donc on abat et/ou on borde

(3) FIN de la risée

1^{ère} phase : VR ↓



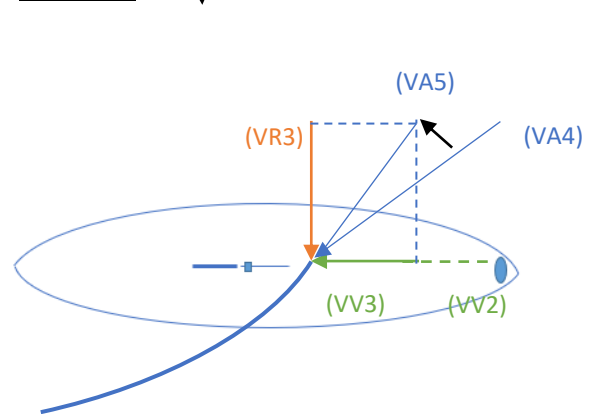
VR2 diminue et devient VR3

VV2 reste constant

VA3 diminue et refuse (VA4)

✓ Donc on abat et/ou on borde

2^{ème} phase : VV ↓



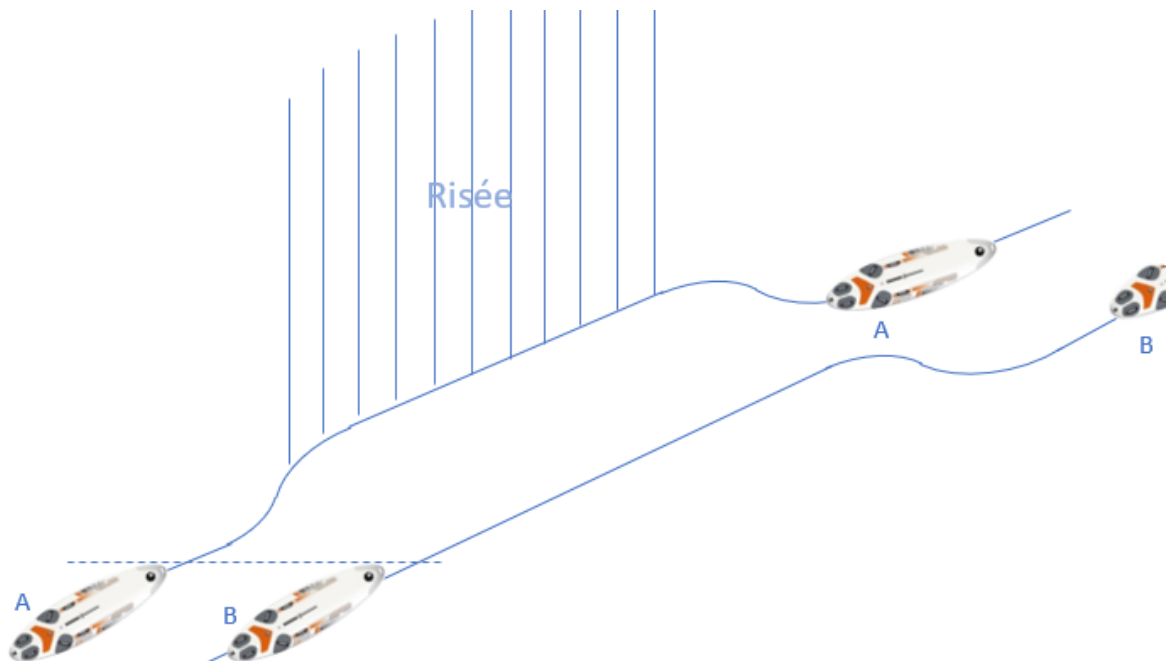
VV2 diminue et devient VV3

VR3 reste constant

VA4 diminue et adonne (VA5)

✓ Donc on lofe et/ou on choque

Toutes ces phases se succèdent sans interruption. En régate, on peut choisir de favoriser le “cap” (et lofer/virer dans la risée) ou la “vitesse” (et régler ses voiles dans la risée). C’est au planchiste de choisir la stratégie qu’il souhaite adopter. C’est ce qu’on appelle la tactique.



On constate que la planche (A) a choisi de lofer dans la risée. Ce qui lui a permis de gagner du terrain au vent par rapport à (B) qui a privilégié la vitesse en réglant sa voile. Cependant, en fin de risée nous observons que la planche (B) est en avance sur la planche (A) mais elle est plus basse par rapport au vent. Ces schémas sont simplifiés mais permettent une bonne compréhension des adaptations qui sont possibles pour le planchiste. La planche A favorise le **CAP**, la planche B favorise la **VITESSE**.

2) L'aérodynamisme

1. Physique des fluides

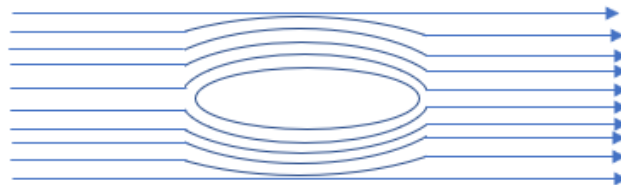
a) Les caractéristiques du fluide

Un fluide réel : l'air et l'eau sont des fluides réels. *Fluides*, parce qu'ils n'ont pas de forme propre et sont facilement déformables. *Réels*, parce qu'ils possèdent une propriété appelée viscosité.

Un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux, s'écoule à vitesse constante en ligne droite tant qu'il n'y a pas d'obstacle pour le perturber. On appelle cet écoulement un « **écoulement laminaire** ».

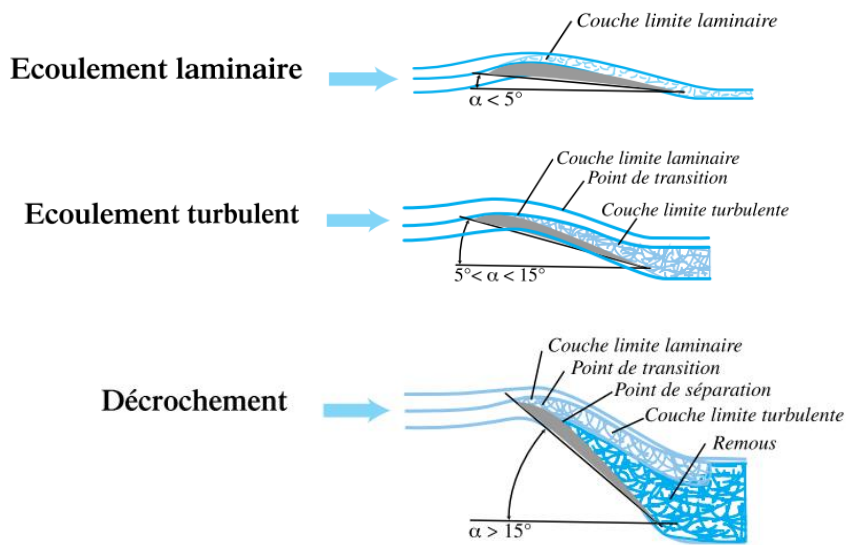


Lorsque ce fluide se trouve face à un obstacle, il y a une modification de la vitesse. Les molécules qui composent le fluide sont ralenties par l'obstacle. En effet, une coque par exemple n'est jamais parfaitement lisse. Comme notre main sur laquelle il y a énormément de petites lignes, les molécules du fluide s'arrêtent dans ces imperfections tout autour de l'obstacle et permettent au reste des molécules de glisser dessus beaucoup plus efficacement. Cette zone de modification des vitesses s'appelle « **la couche limite** ». Au contact de l'objet, les molécules sont arrêtées (la vitesse est nulle). Plus on s'écarte de l'obstacle, plus le ralentissement diminue jusqu'à récupérer sa valeur initiale. C'est le siège de perturbations dans l'écoulement. Elle est à l'origine de la résistance de frottement.



Si la différence de vitesse entre deux filets de fluide est trop grande : des tourbillons apparaissent. Cela crée des turbulences, on parle d' « **écoulement turbulent** ».

Le type d'écoulement qui rencontre un obstacle va dépendre de l'angle d'incidence qu'il a avec cet obstacle.

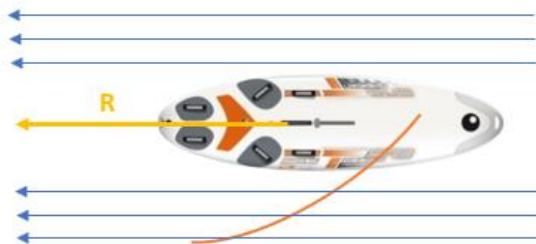


Sur la voile, selon l'angle d'incidence (angle d'attaque), les actions seront plus ou moins efficaces.

- Angle d'attaque de 0° : voile « fasedante », puissance nulle (sauf fardage).
- Angle d'attaque de env. 15° à 20° : voile gonflée, puissante (écoulement laminaire).
- Angle d'attaque à plus de 20° : voile gonflée, début de décrochage (écoulement turbulent).
- Angle d'attaque de plus de 45° : voile gonflée, décrochage fort (écoulement tourbillonnant)

b) La résistance de frottement

La **résistance à l'avancement** (dans l'eau) et le **fardage** (dans l'air) représentent la force exercée sur l'objet dans la trajectoire du fluide. Cette force est dans le même sens et dans la même direction que le fluide.



1. Les facteurs influençant la résistance de frottement

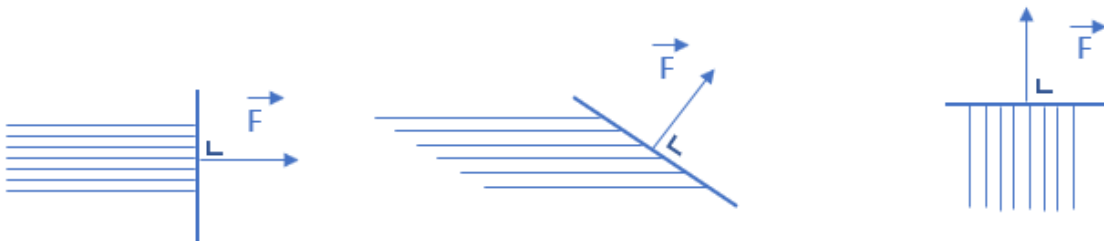
- L'importance de la surface
 - Sur une plaque « longue » → zone d'écoulement turbulent plus longue → augmente la résistance. (Ex : la planche)
 - Sur une plaque « courte » → L'écoulement turbulent n'a pas le temps de se former. (Ex la dérive, l'aileron, etc.)
- La vitesse de l'écoulement
 - Plus la vitesse est élevée plus la zone d'écoulement turbulent sera plus grande
- La viscosité du fluide
 - Plus le fluide est visqueux plus la résistance augmente.
- L'état de la surface du plan
 - Si la surface présente des aspérités (n'est pas régulière), elle augmente les turbulences de la couche limite.

2. Diminuer la résistance en pratique

- Acheter une planche plus courte
- Diminuer la surface de contact avec l'eau
 - Diminuant le poids total (maigrir, vêtements légers, alléger le gréement de la planche, etc.)
 - En jouant sur les assiettes de la planche
- Utiliser les forces extérieures
 - Vent et/ou vagues qui accéléreront la planche (planning) ce qui diminuera sa surface mouillée.
- Réaliser des actions dynamiques ayant pour effet de diminuer la résistance ou la couche limite (par exemple : pomper)

c) La force appliquée sur une surface

Quel que soit son angle d'incidence, le fluide exerce une force perpendiculaire sur l'objet qui lui fait obstacle.



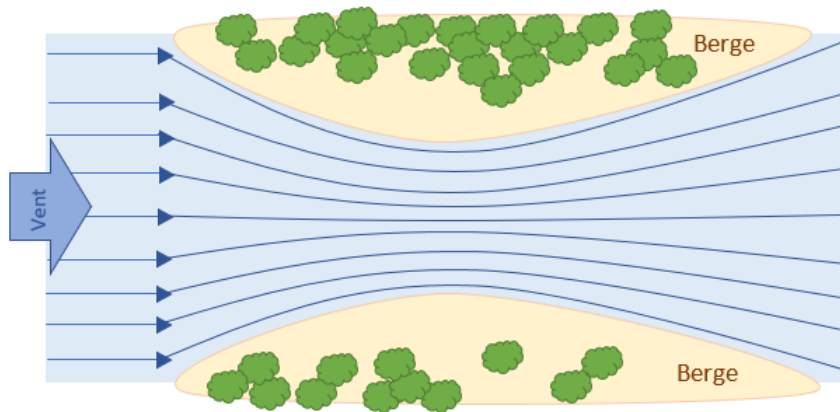
Exemple : Force vélique, Résistance à l'avancement

d) L'effet venturi

Il se caractérise par la modification de la vitesse du fluide au contact d'une surface courbe.

- S'il y a rétrécissement, les particules sont accélérées.
- S'il y a écartement, les particules sont ralenties.

Exemple : rétrécissement par les berges, arbres, ... → Particules du vent accélérées.



3. Dynamique des fluides

a) Effets du vent sur la voile

Il faut savoir que la forme de la voile permet une déviation du flux d'air (comme une aile d'avion).

- Lorsque l'on tient la voile au tire-veille, celle-ci se comporte comme un drapeau. Elle est dans l'axe du vent et les frottements de l'air la font « faseyer ». Si la voile était dépourvue de latte, ou avec des lattes plus petites ou moins nombreuses (comme celle des bateaux), nous observerions ce faseyement.
- ➔ Cette situation ne permet pas de propulsion. Il n'y a aucune force vélique. Le vent agirait quand même pour pousser le mât et la planche dans la direction du vent ce qui, avec les vagues, nous ferait dériver. Cette prise au vent de notre voile et de la planche pour sa partie émergée s'appelle le **fardage**.



- Si l'on commence à border la voile, on ressent une traction déjà plus importante. À nouveau, si notre voile était dépourvue de lattes, on observerait qu'elle se gonfle progressivement en commençant par l'arrière (la chute).

Il y a donc apparition d'une force vélique (F_v) qui pourrait servir à la propulsion. Cependant, le point d'application de celle-ci se situe vers l'arrière de la voile et elle est orientée de façon peu utile à la propulsion. Ce réglage nous ferait avancer de manière limitée.



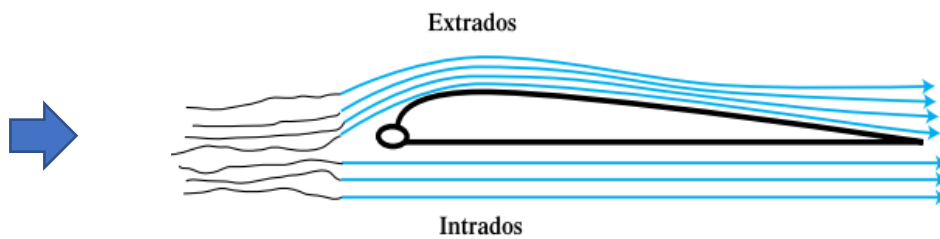
➔ Propulsion non efficace.

- En bordant d'avantage, on utilise l'ensemble de la voile à la propulsion. Une voile est bien réglée lorsqu'elle est à la « limite du faseyement ». Lorsqu'on navigue sur un bateau, il suffit d'observer le comportement de notre voile pour savoir si l'on est bien réglé. En planche à voile, nous n'avons pas de repère visuel et le réglage de la voile se fera au feeling et grâce aux sensations.

➔ Propulsion efficace.



Au fur et à mesure qu'on borde, la voile « se gonfle » (en commençant par la chute vers le guindant) : elle se « remplit » progressivement. Le flux d'air se sépare en deux et on observe sur celle-ci un écoulement laminaire.



Une partie passe **côté intrados** (au vent de la voile) y est déviée en s'appuyant et frottant le tissu en suivant le creux de la voile, il se comprime légèrement et ralentit en créant une pression (une poussée) (Bernoulli).

L'autre partie passe **côté extrados** (sous le vent de la voile). Plusieurs choses vont se passer à l'extrados. La première c'est que l'air va rester collé à la voile. C'est l'effet Coanda. Lorsque vous versez de l'eau d'un verre à un autre, vous avez peut-être déjà remarqué que plutôt que de tomber parfaitement à la verticale en suivant la force de gravité, l'eau vous coule sur la main puis la manche parce que l'eau est restée collée au verre. C'est le même effet qui explique pourquoi l'air suit le profil de la voile à l'extrados. Au même titre que l'eau, l'air est un fluide ils ont un comportement physique extrêmement semblable.



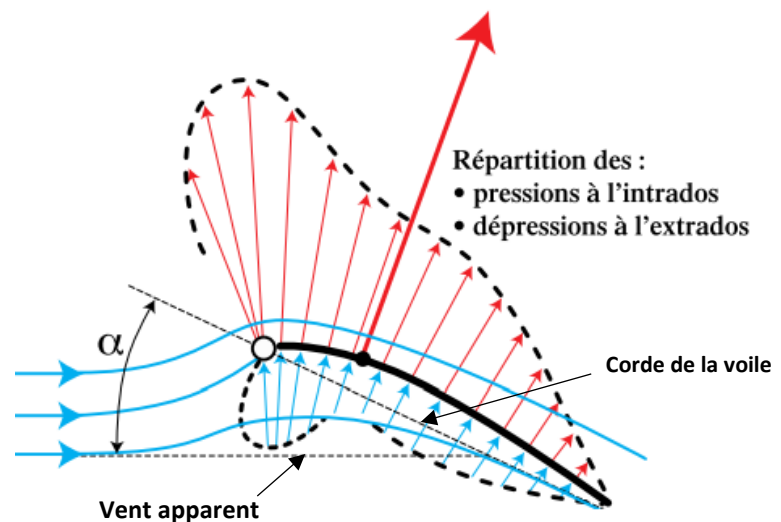
Ensuite (ensuite mais ces phénomènes se produisent en même temps), l'air à l'extrados va accélérer. En effet, et comme illustré sur le schéma suivant, au plus je ferme ma voile, au plus l'air de l'extrados doit compenser une absence d'air sur un volume plus important (un certain vide doit être compensé puisque notre voile fait obstacle à l'écoulement normal du vent). Sur le premier dessin, la zone bleu à compenser est faible, l'air doit accélérer un peu et génère peu de puissance. Au dessin trois, l'angle d'attaque est optimale, l'écoulement reste laminaire et l'air accélère beaucoup. Ce faisant il génère encore plus de puissance. Sur le quatrième dessin, l'air décroche, on passe en écoulement turbulent.



C'est ici qu'intervient encore une fois le principe de Bernoulli. Lors de l'accélération d'un fluide, la pression dans cette zone diminue. Il se crée donc une zone de dépression. Cette dépression engendre sur l'extrados un phénomène de succion qui va nous procurer une grande partie de notre vitesse.

NB : Le volume d'air avant la séparation de la voile est égal au volume après cette séparation. C'est à dire que le volume qui passe du côté intrados est le même que celui qui passe sous l'extrados : il n'y a pas de différence.

Les effets se conjuguent et créent une série de mini pression au vent et dépression sous le vent, réparties sur la toile dans un rapport de 1/3 à 2/5.



La « surpression » sur l'intrados et la « dépression » sur l'extrados s'additionnent pour donner une poussée globale appliquée au centre géométrique du profil, perpendiculaire à la corde du profil. On appelle cette poussée globale la **force vélique**.

- Si on borde encore plus la voile (au-delà de la limite du fâseusement), l'angle vent/ voile (appelé le **braquage ou l'angle d'attaque**) augmente encore plus.
Tant que l'on ne passe pas en écoulement turbulent, la force vélique augmente. Cependant, l'écoulement laminaire passe très vite en écoulement turbulent. On dit que la voile décroche. La force de succion sur l'extrados (dépression sous le vent) est fortement diminuée alors que la poussée (surpression au vent de la voile) augmente légèrement, il en résulte un rapport entre pression et dépression qui revient à une valeur de 1/1. La force vélique totale est moins importante qu'en écoulement laminaire.

NB : Plus la déviation de l'extrados est importante, plus l'aspiration est conséquente. Attention toutefois, dès qu'il y a un décrochage, l'effet d'aspiration diminue car les particules d'air ne collent plus à la voile.

4. La force vélique

a) Caractéristiques de la force vélique

On appelle **force vélique** la résultante de la combinaison de la **portance** et de la **traînée**. C'est l'effet conjugué des forces de pression (poussée) et de dépression (succion) sur la voile.




Portance : composante de la force vélique perpendiculaire à l'écoulement général et à la traînée (force de sustentation par l'aile d'avion). Appelée également « **composante propulsive** » / « **composante d'avancement** ».

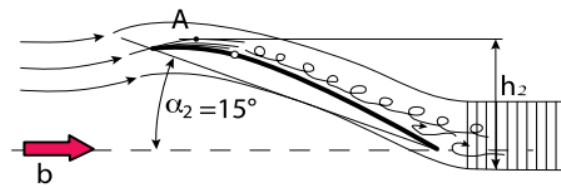
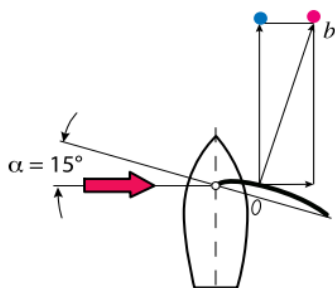
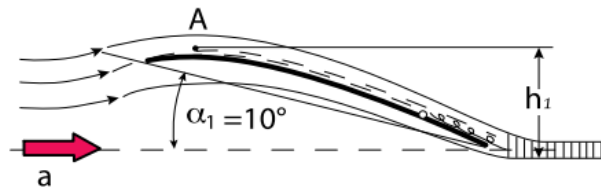
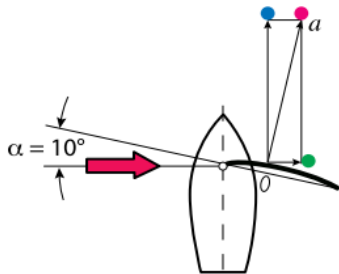
Traînée : composante de la force vélique. Force qui tente d'entraîner le corps immergé dans le sens de l'écoulement général. Appelée également « **composante de dérive** ».

En s'appliquant sur ce qu'on a vu précédemment, pour chaque « braquage » nous allons observer l'impact sur la force vélique.

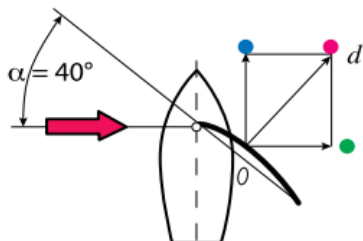
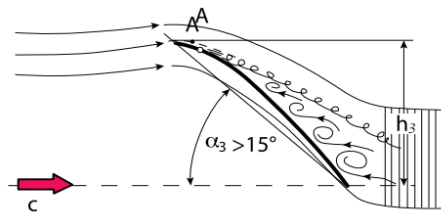
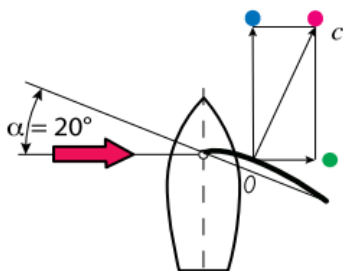
Alpha (α) = Braquage (l'angle vent/voile)

 = vent apparent

 = la portance,  = La traînée,  = La force vélique



Dans la première situation ($\alpha = 10^\circ$), le planchiste borde légèrement sa voile. Normalement, on devrait observer que le point d'application de la force vélique se situe à l'arrière et qu'elle n'est pas efficace pour une bonne propulsion. Plus on borde notre voile ($\alpha = 15^\circ$), plus on s'aperçoit que la force vélique grandit et que son point d'application se centralise pour optimiser la propulsion.



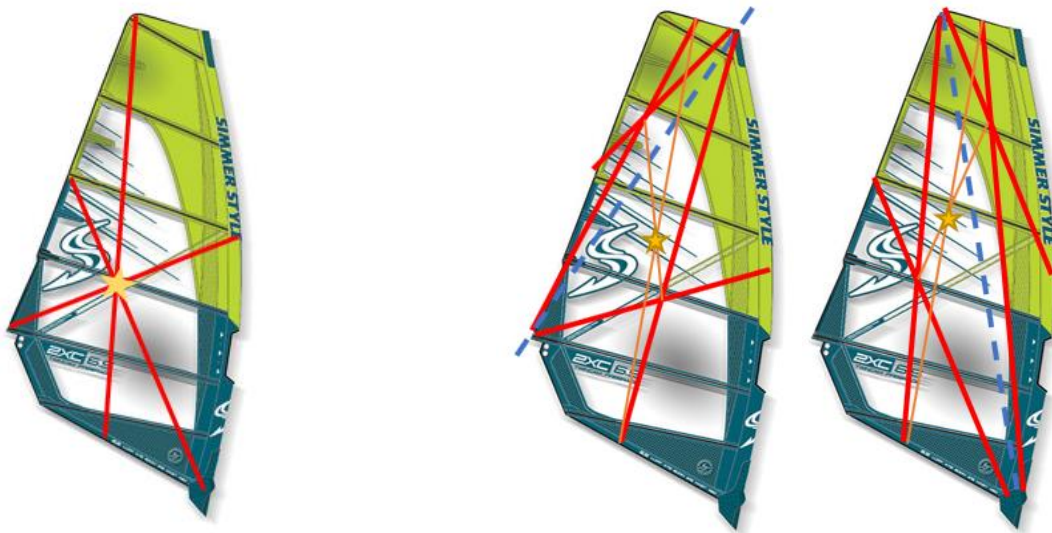
Tant que l'on navigue en écoulement laminaire sur toute la surface de la voile, on dit qu'on navigue *en finesse*. Cela est possible avec un braquage de plus ou moins 20° . Cependant, il est possible d'avoir quelques turbulences dans la chute de la voile.

Au-delà de 20° , la voile est susceptible de décrocher. Nous nous retrouvons en écoulement turbulent.

Au vent arrière, nous serons forcément en écoulement turbulent, pour les autres allures, on navigue en finesse en essayant de conserver un écoulement laminaire.

b) Le centre vélique

Le centre vélique est le point d'application de la force vélique totale. Théoriquement, si l'on considère la voile comme un triangle, celui-ci se situe à l'intersection des médianes, segment de droite qui joint un sommet au milieu du côté opposé (schéma de gauche). Cependant, vous avez dû constater que la voile n'est pas un triangle parfait mais plutôt un trapèze. Alors notre recherche de médiane sera légèrement différente (schémas de droite).



Ce centre vélique théorique correspond également au « centre géométrique ».

Cependant, le centre vélique varie en fonction de l'intensité du vent, des différents réglages (creux de la voile, Cambers, réglage de la chute, ...)

Sur certains bateaux (ex : les lasers avec un système power pack) peuvent régler le creux de la voile dans le but de modifier le centre vélique.

Les réglages :

	PLUS	MOINS
Bordure	Creux important, CV en avant	Creux faible, CV en arrière
Hale-bas	Creux descend et recule	Creux monte et avance
Cunningham	Creux avance et remonte	Creux recule et descend

En planche à voile, il existe également des réglages mais pour la plupart des véliplanchistes, ceux-ci s'effectueront au moment du gréement. Il existe des wishbones avec des bordures réglables qui permettent de régler le creux de la voile en fonction de son allure.



	PLUS	MOINS
Pt d'amure (Cunningham)	Creux vers l'arrière, chute molle → Profil plat	Creux vers l'avant, chute tendue → Profil creux
Pt d'écoute (Bordure)	La chute est tendue et la voile ouvre un peu	La chute ouvre bien

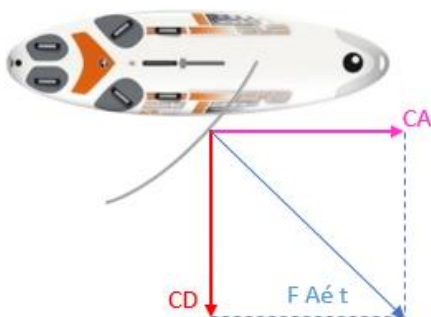
- **La tension dans les lattes** ne doit pas être extrême. Les lattes stabilisent le profil de la voile et permettent certaines accélérations.
- **Les Cambers** fixent un creux permanent et stabilisent le profil de la voile ce qui augmentent la plage d'utilisation de la voile et son rendement. Cette stabilité permet un meilleur contrôle de la voile en vent fort et améliore les écoulements.

c) Les facteurs qui influencent la force vélique

- ✓ La vitesse d'écoulement du fluide (ici, le vent). La force vélique est proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement du fluide.
- ✓ La taille/surface de la voile. La force vélique est proportionnelle à la surface de la voile.
- ✓ La forme de la voile.
- ✓ Le braquage (angle vent/voile) car celui-ci détermine la qualité de l'écoulement.
- ✓ Le creux de la voile. (Il est possible d'intervenir dans les réglages pour obtenir le creux souhaité.)
- ✓ L'effet de cheminée : sur planche tandem. L'air qui passe entre les deux voiles est accéléré. Cela crée une meilleure dépression sous le vent de la voile arrière ; et donc sa FV est augmentée.

Voile plate	Voile creuse
Performance au près	Performance au portant
Utile pour limiter la surpuissance	Puissance ++

5. Conclusion pour l'aérodynamisme



Force vélique (FV) = Force aérodynamique totale (F Aé t)

Traînée = Composante de dérive

Portance = Composante d'avancement

Leur point d'application est le centre vélique (CV).

La **force vélique** est la résultante d'une **pression** en intrados et d'une **dépression** en extrados. La dépression n'est **optimale** que si je ferme ma voile avec le **bon angle d'attaque**. De cette manière je reste en **écoulement laminaire**. Puisque je ferme ma voile en fonction du vent apparent, il est utile de rappeler qu'**au plus j'ai de vitesse, au plus je dois border ma voile**. Cela explique aussi pourquoi un planchiste est capable de rester en écoulement laminaire tout en naviguant au large par exemple. Différents paramètres influencent ma force vélique comme la globalité de ma voile, la force du vent, l'angle d'attaque,...

3) Hydrodynamique

1. La flottabilité

Le principe d'Archimède :

« *Tout corps plongé dans un liquide subit de la part de ce liquide, une poussée verticale, orientée de bas en haut, égale en grandeur, au poids du volume du liquide déplacé.* »

La flottabilité dépend donc du volume.

Le volume de la planche ou son litrage c'est le volume d'eau que la planche déplace lorsqu'elle est complètement immergée dans l'eau. (Le poids de l'eau douce étant égal à son volume exprimé en kg, car la densité de l'eau douce = 1)

Le volume de carène (=déplacement), c'est-à-dire le volume de la partie immergée de la planche lorsqu'elle flotte, dépend donc du poids de la planche, de la densité de l'eau, éventuellement du poids du planchiste et de son matériel.

$$\text{Poussée d'Archimède (PArch)} = \text{densité de l'eau} \times \text{volume de carène (Newton)}$$

Exemple : Pour une planche avec un poids de 18kg, un planchiste de 60kg, un gréement de 10kg.

$$\text{PArch} = 1 \text{ (eau douce)} \times (18+10+60) = 88 \text{ N.}$$

Le rapport de flottabilité : c'est le rapport entre le volume total et le volume de carène. Il nous permet de déterminer si une planche flotte bien.

Exemple :

- Pour une planche seule de 18kg avec un volume de 300 L.

$$300/18 = 16,66$$

- Avec un stagiaire de 42 kg.

$$300/60 = 5 \rightarrow \text{C'est donc une planche très portante et stable.}$$

- Pour une planche de 18 kg, un planchiste de 67kg et un volume total de 80 L (ex : planche de vague).

$80/85 = 0,95 \rightarrow$ La planche coule jusqu'à ce que le volume déplacé soit égale à 85 kg d'eau. On aura donc les pieds dans l'eau. *Puisque la planche et le planchiste font un total de 85 kilos, et que cette masse est supérieure au litrage de la planche, la planche va complètement couler et il faudra attendre qu'une partie du corps du planchiste subisse aussi la poussée d'Archimède pour qu'il arrête de s'enfoncer dans l'eau.*

Jusqu'à présent nous parlions de flottabilité statique (à l'arrêt) : la force que la planche exerce sur l'eau par son poids ($P = \text{pesanteur}$) équilibrée par la pression de l'eau sur la planche (Poussée d'Archimède). Cependant, dès qu'il y a un déplacement du fluide (air, eau) il apparaît une pression dynamique.

$$(P_{dy} = \frac{1}{2} \rho v^2)$$

La pression exercée par l'eau sur la planche s'accroît d'un facteur 4 lorsque la vitesse croît d'un facteur 2. Ce phénomène ramène le flotteur en surface. Si le planchiste accélère davantage alors le flotteur s'élève partiellement au-dessus de l'eau et la planche plane. Nous verrons ça plus tard.

2. La stabilité

a) La stabilité statique (hydrostatique)

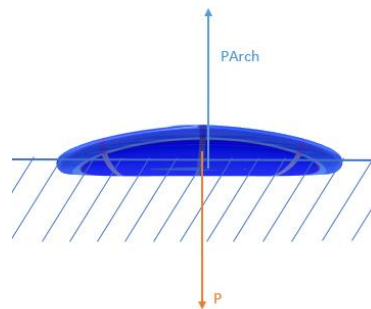
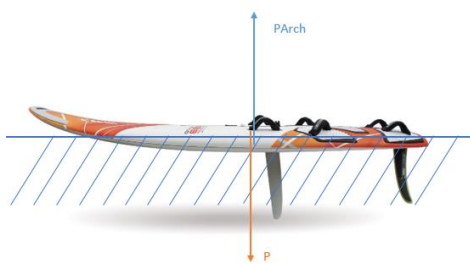
La stabilité va dépendre de la pesanteur et de la poussée d'Archimède.

- La **Pesanteur** (P) est une force qui s'applique verticalement de haut en bas sur le centre de gravité total (CGT). Elle représente le poids total de l'élément.
- La **Poussée d'Archimède** (P_{Arch}), s'applique verticalement de bas en haut sur le centre de carène du support.

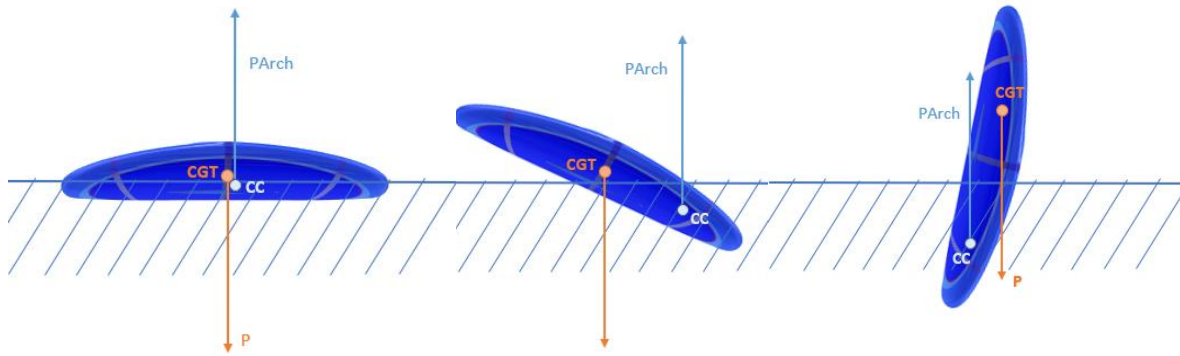
Le **Centre de carène** (CC) : est le centre géométrique de la carène. Il est "mobile" : se déplace en fonction de l'équilibre latéral et longitudinal du support.

Plus précisément la stabilité dépendra de la position de leurs points d'application. Un élément est à l'équilibre s'il y a un alignement (vertical) entre le centre de carène et centre de gravité.

Il y a deux types de stabilité : longitudinale et transversale.



Un couple de rappel/ Un couple de redressement = c'est lorsque la planche s'incline, le CC se déplace d'une distance d sur le côté et crée un couple de forces qui tend à ramener la planche à l'équilibre. Au-delà d'un angle d'une valeur de 90° , le couple devient nul et la planche chavire. On appelle ça un **couple de chavirage**.

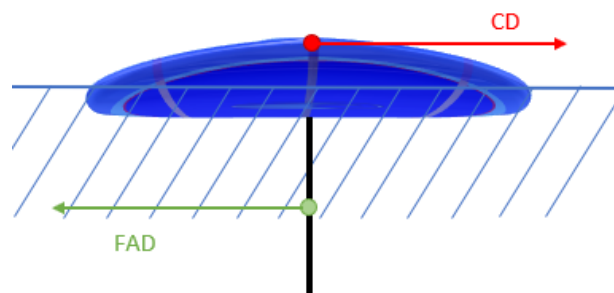


b) La stabilité dynamique

Jusqu'à présent nous avons abordé la stabilité de la planche à l'arrêt. Nous avons pris en compte le poids total (P) appliqué au CGT et la poussée d'Archimède (P_{Arch}) appliquée au CC.

Cependant, lorsque que la planche se déplace, il faut prendre en compte de nouvelles données :

- La **Force Antidériverie** (FAD) qui s'applique sur le centre de dérive (CD). Le centre immergé du plan antidériverie. Elle représente l'action de la dérive et empêche la planche de dériver.
- La **Composante de dérive** (CD) qui n'est autre que la **Force Vélisque** (FV). Comme nous l'avons vu précédemment, elle est engendrée par les pressions dans la voile et transmise au flotteur par l'intermédiaire du planchiste. Son point d'application est au niveau des pieds du planchiste.



3. La résistance à l'avancement

Nous retrouvons un troisième couple de forces agissant sur une planche en déplacement, il s'agit de la composante d'avancement et de la résistance à l'avancement.

- La **Composante d'Avancement** (CA), engendrée par la force vélique. Elle est dans le même sens et la même direction que le déplacement de la planche.
- La **Résistance à l'Avancement** (R) lorsqu'une planche se déplace, elle subit une certaine résistance de la part de l'eau. Cette force est opposée à la composante d'avancement.



La planche accélère tant que la composante d'avancement (CA) de la poussée vélique est supérieure à la résistance (R) engendrée par l'eau. Lorsque la vitesse est constante alors $CA = R$.

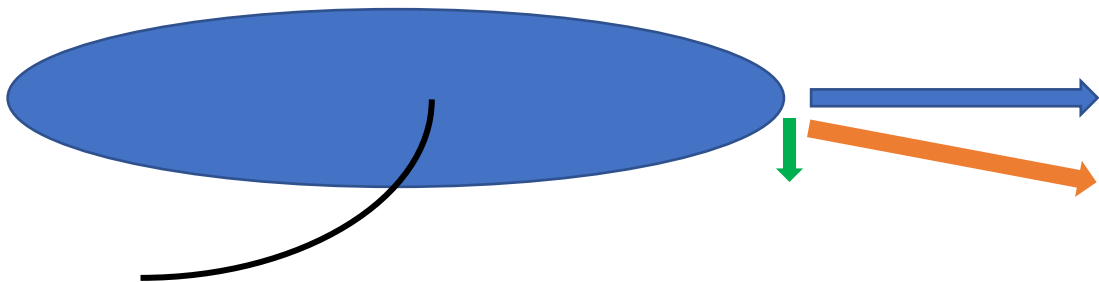
4. La résistance due à la gîte, à la dérive et aux modifications d'assiette.

a) La dérive, son fonctionnement

D'abord, **la dérive**, qu'est-ce que c'est ? **La dérive** : c'est un appendice plat et mobile qui s'enfonce verticalement sous l'eau en pivotant autour d'un axe. Elle aide à l'équilibre et est destinée à s'opposer au phénomène de dérive qui s'impose à la planche à voile. (*Le phénomène de dérive* : c'est l'angle entre le cap et la route du windsurf qui dérive, càd qui « glisse » latéralement poussé par le vent, le courant...).

Il y a donc plusieurs éléments importants à retenir et à prendre en compte pour une bonne compréhension de comment fonctionne une dérive. La première c'est que la dérive est le plus souvent mobile en planche à voile. De ce fait on peut la retirer. Elle aide aussi à l'équilibre puisque si je veux faire pencher ma planche, je vais devoir déplacer toute l'eau qui est « dans le chemin » de la dérive et la dérive va donc exercer une résistance à la gîte et à la contre-gîte.

Cependant, son rôle le plus important est bien sûr sa fonction qui permet à un planchiste de ne pas dériver. Comme montré dans le schéma suivant, une planche ne va jamais parfaitement tout droit.

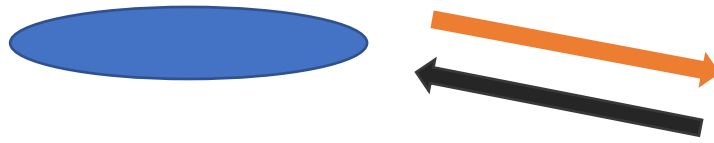


Nous avons ici en bleu l'axe de la planche, censée être la direction désirée.

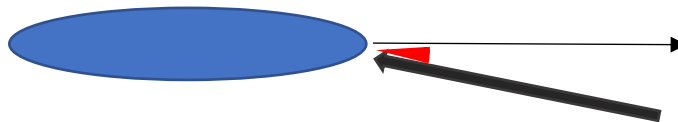
En vert, c'est l'effet de dérive puisque nous sommes partiellement emportés par le vent dans sa direction.

En orange nous avons donc la trajectoire réelle de la planche qui tient compte de cet effet de dérive.

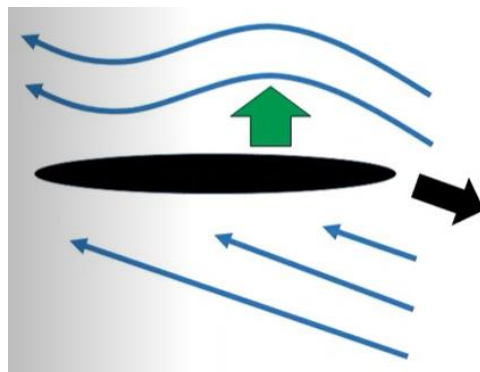
Pour comprendre comment l'eau agit sur la dérive il faut tenir compte de la flèche orange. Si j'avance dans l'eau avec une certaine vitesse et un sens, l'eau rentre en contact avec ma dérive dans le sens opposé et à la même vitesse. Pour que ça soit bien clair, reprenons l'exemple d'un déplacement à vélo dans l'air. Si j'avance à vélo à une vitesse de 20 km/h, je me prends un vent dans la tronche de 20 km/h. Ce vent a donc la même vitesse que moi mais un sens opposé. C'est le même principe qui s'applique ici. Si ma dérive avance dans l'eau à une vitesse de 20 km/h, la dérive se prend l'eau dans la tronche à une vitesse de 20 km/h dans le sens opposé.



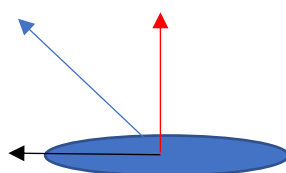
En orange, nous retrouvons la trajectoire réelle de la planche. En noir il s'agit cette fois-ci du sens de l'écoulement de l'eau qui va interagir avec la dérive. On constate sur le schéma qu'il y a un angle d'attaque (en rouge sur le schéma ci-dessous) entre la dérive et le sens de l'écoulement similaire à celui qui existe entre la corde de la voile et le vent apparent.



Et à partir du moment où on comprend cela, on peut faire le rapprochement entre les phénomènes aérodynamiques de la voile et les phénomènes hydrodynamiques de la dérive. En effet, la dérive fonctionne exactement de la même manière avec l'eau que la voile avec l'air.



L'eau représentée par les flèches droites en bleu génère à l'intrados de la dérive une pression (ou une surpression). L'eau représentée par les flèches courbées va rester collée à l'extrados de la dérive et va accélérer, générant par la même occasion une dépression (Bernouilli). L'ensemble des forces appliquées sur la dérive peuvent se décomposer en 2 vecteurs ; la composante anti dérive qui sera toujours perpendiculaire à l'axe de la dérive et la trainée (ou résistance à l'avancement) qui est une force de frottement et qui sera dans l'axe de la dérive mais opposée à la direction globale du planchiste. Sur le schéma ci-dessous, nous avons quand même en noir la trainée, en rouge la composante anti dérive et en bleu, l'addition des deux forces précédentes qui forment la force hydrodynamique totale.



« Mais comment on fait un funboard alors pour aller tout droit ? » Très bonne question Jean-Kevin. La réponse est la suivante : l'aileron. Effectivement, l'aileron va aussi avoir une interaction avec l'eau de la même manière que la dérive. Cependant, l'aileron étant bien plus fin et plus court que la dérive, les forces appliquées sur celui-ci sont bien moins importantes. Le planchiste dérive donc davantage sans dérive qu'avec.

b) La surface mouillée (La carène)

La surface mouillée, c'est l'empreinte laissée par la planche quand elle est posée sur l'eau.

Plus la surface mouillée est faible, plus la traînée est faible et moins le volume d'eau déplacé est important (Archimède). Et nous savons que la vitesse de la planche est inversement proportionnelle au volume d'eau déplacé.

Cette surface mouillée dépend du poids et de la forme du flotteur. C'est pourquoi en fonction de notre niveau et de la discipline que nous choisissons en planche à voile, nous retrouvons différents volumes et différentes sortes de carènes (en « V », concave, cut-out,...)

La déformation de la surface mouillée dans le sens latéral peut avoir des conséquences sur la trajectoire du bateau.

Cette réaction du bateau est un effet de carène.

c) L'effet de carène

Quand une planche à dérive n'est pas au planning, le planchiste utilise l'assiette latérale pour orienter son flotteur. C'est ce qu'on appelle « **L'effet de carène** ».

Quand le flotteur gîte ou contre gîte, la carène de celui-ci se déforme. La forme de la carène à l'arrêt est différente de la forme de la carène de la planche qui gîte ou contre gîte. **L'effet de carène** agit sur la trajectoire de l'embarcation.



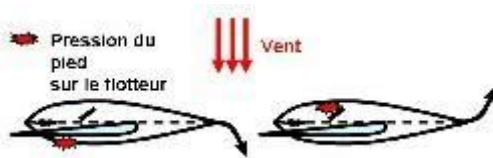
- Sur le dessin de gauche, la pression du pied se fait au vent du flotteur (contre-gîte), la planche à voile **abat**.
- Sur le dessin de droite, la pression du pied se fait sous le vent du flotteur (gîte), la planche à voile **lofe**.

Dans les deux cas, il en résulte un couple de virage, dont le point de pivot est la dérive.

Mais attention de ne pas trop gîter. En effet, si la planche gîte avec un angle trop important, le flotteur déplace un volume d'eau plus important qu'une planche à plat ce qui va la ralentir. De plus, nous pourrions avoir un effet de lof trop important alors que la planche avance en ligne droite.

d) L'effet de care

Cette fois-ci on s'intéresse principalement aux funboards quand elles sont au planning. Le planchiste utilise également l'assiette latérale pour orienter son flotteur. Cependant, « L'effet de care » fonctionne à l'inverse de l'effet de carène.



- Sur le dessin de gauche : lors de la pression du pied sous le vent du flotteur (gîte), la planche à voile **abat**.
- Sur le dessin de droite : lors de la pression du pied au vent du flotteur (contre-gîte), la planche à voile **lofe**.

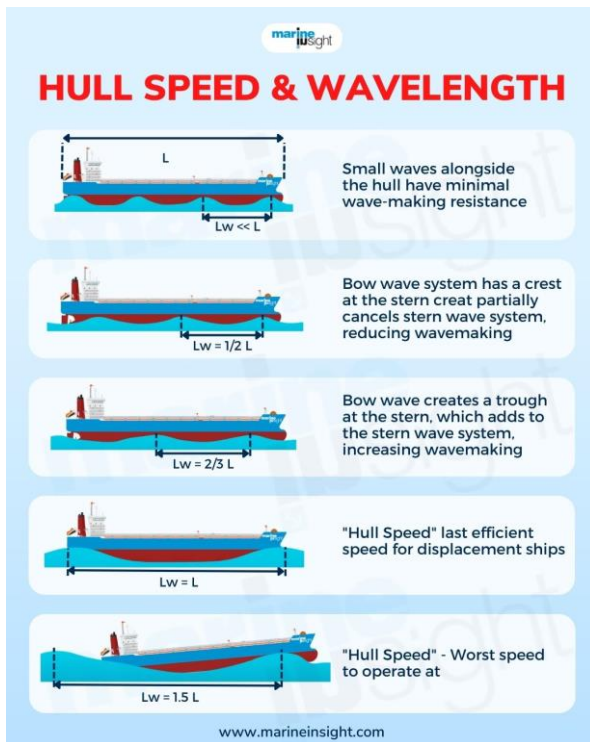
L'effet de care est surtout utilisé en planche à voile et plus particulièrement en funboard.

On le retrouve dans d'autres sports nautiques comme le wakeboard ou le surf (où l'effet de care est l'unique technique pour diriger sa board). Il est également utilisé en ski et en snowboard.

5. La vitesse critique pour expliquer le planning.

Lorsqu'on avance en planche à voile, notre planche déplace un volume d'eau. Ce volume d'eau est coupé en deux par la planche et forme une vague d'étrave (à l'avant de la planche). Cette vague a une longueur d'onde.

Si la planche accélère, le volume d'eau déplacé devient plus important, la vague est plus grosse, la longueur d'onde de celle-ci augmente. On parle de vitesse critique (Hull speed en anglais).



Pourquoi vitesse critique ? Parce que c'est la vitesse maximale d'un support hors planning. Si la planche accélère encore, son nez va dépasser la vague d'étrave et va se lever (voir dernière illustration ci-dessus). Cette situation va générer un ralentissement fort dans un premier temps. Mais si je parviens à accélérer grâce à ma voile et au vent, ma planche peut dépasser sa propre vague étrave. Le nez va donc redescendre et c'est l'arrière de la planche qui sera sur la vague d'étrave. C'est le début du planning.

La vitesse critique dépend de la longueur du support. Plus la planche est longue et plus la distance entre la vague d'étrave et la vague arrière sera longue. Ce qui signifie qu'il est plus difficile d'atteindre ou de dépasser la vitesse critique.

$$V_c = v_d \times 2,4 \text{ (en km/h)}$$

$$V_c = v_d \times 1.34 \text{ (en nds)}$$

Où

d = la longueur du flotteur

2,4 = constante

Note supplémentaire sur l'équilibre dynamique en planche à voile

Si vous lisez ce document, vous avez certainement déjà navigué au planning. Vous avez peut-être aussi déjà remarqué qu'au planning, on entend un certain clapotement sous la planche. C'est parce que si la planche est suffisamment légère, ou si j'ai une vitesse de planning élevée, la planche peut littéralement sauter sur l'eau. Après chaque saut, la planche retombe sur l'eau avant de ressauter. Chaque choc génère ce bruit de clapot.

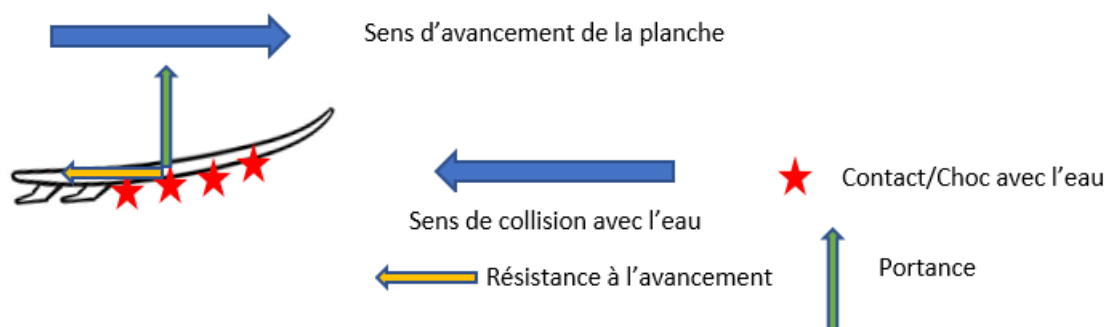
En effet, si nous avons vu en hydrostatique que la planche flotte grâce à la poussée d'Archimède, un autre phénomène intervient en parallèle lorsque la planche avance. C'est ce qui va expliquer comment un planchiste flotte malgré qu'il puisse avoir une planche avec un litrage inférieur à l'addition du poids du planchiste et de son équipement.

Reprenons brièvement. Une planche à l'arrêt flotte si son poids est inférieur au poids du volume d'eau qu'elle déplace (son litrage). C'est la poussée d'Archimède. Un planchiste flotte si l'addition de son poids et de l'ensemble de l'équipement qu'il utilise est inférieure au litrage de la planche.

Exemple : La Techno One Design fait 205 litres et pèse 13 kilos. Par conséquent, elle flotte. Si je mets dessus un planchiste de 100 kilos avec un équipement de 30 kilos, le volume de la planche (205 litres) devra supporter un poids de $13+100+30 = 143$ kilos. Le planchiste pourra flotter sur sa planche. Si je mets ce même planchiste sur une Techno Wind Foil de 130 litres, il coulera ... En tout cas s'il est à l'arrêt.

En effet, dès qu'un planchiste avance, l'eau qui rentre en contact avec la carène génère sur la planche une force de portance. Cette force va avoir tendance à soulever la planche. Plus la planche se déplace rapidement dans l'eau (puis sur l'eau), moins la poussée d'Archimède intervient dans sa flottabilité au profit de la portance.

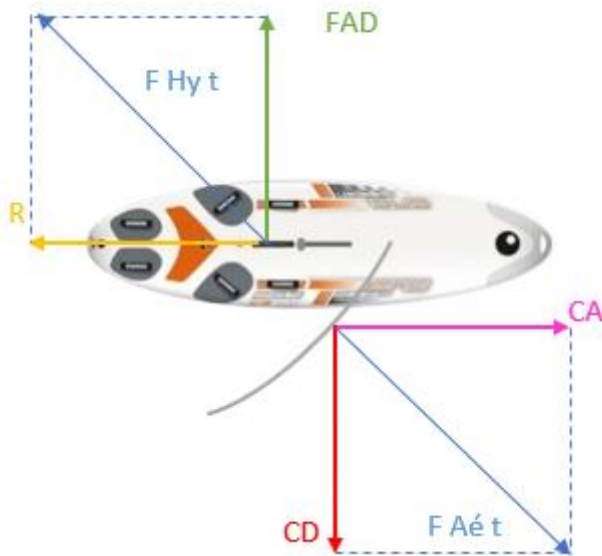
D'où vient cette portance ?



L'eau qui rentre en collision avec la planche le fait dans le sens opposé du sens d'avancement de la planche (on néglige ici le sens des vagues). En contact avec la planche, l'eau génère une force qui se décompose en deux vecteurs. En réaction, la planche est freinée (à cause de la force jaune qui est en opposition au sens d'avancement de la planche, c'est la résistance à l'avancement) ET soulevée (grâce à la force verte, c'est la portance). A haute vitesse, la surface de contact entre l'eau et la planche est tellement faible que la résistance à l'avancement faiblit grandement aussi, et dès que la planche rentre en contact avec l'eau, elle ricoche à la manière d'un caillou générant ce bruit de clapot.

4) Combinaisons des forces aériennes et hydrauliques

1. Équilibre dynamique



$F_{Hy t}$ = Force hydrodynamique totale,

Composée de :

FAD = La Force Antidérive

R = La Résistance à l'avancement

$F_{Aé t}$ = Force aérodynamique totale,

Composée de :

CD = La Composante de dérive

CA = La Composante d'avancement

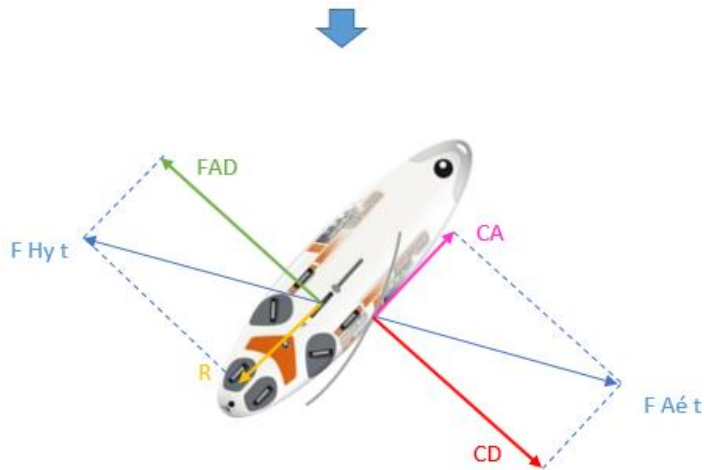
Dans le schéma ci-dessus, la planche à voile est au travers, le système est en équilibre dynamique car $R = CA$, $FAD = CD$ et $F_{Hy t} = F_{Aé t}$. Dès lors, la planche avance en ligne droite à vitesse constante et sans dériver (on dérive toujours un peu, si on ne dérive pas, la dérive ne peut pas fonctionner). C'est une situation de mouvement rectiligne uniforme (MRU).

Si on borde davantage la voile (mauvais réglage de sa voile → vitesse diminue) ;

La force Aérodynamique totale étant très mal orientée, elle ne sert que très peu voire plus du tout à l'avancement. La planche avance « en crabe ». De ce fait, l'écoulement de l'eau sur la dérive passe en écoulement turbulent et la force antidérive diminue fortement.

Dès lors, la planche dérive et n'avance plus.

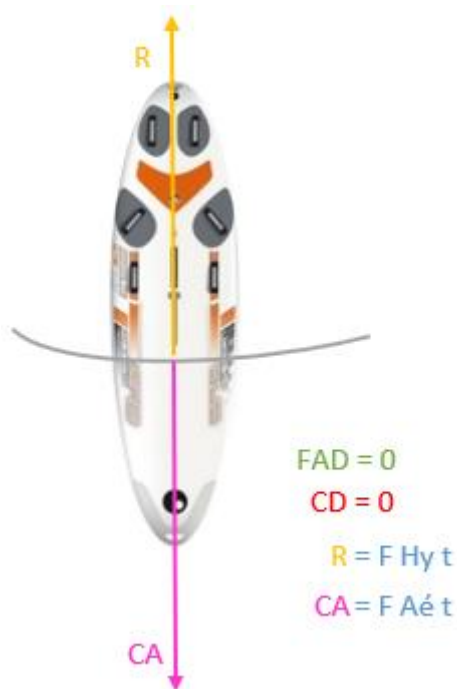
Au près :



L'angle voile/planche diminue,

- La vitesse diminue donc CA et R diminuent.
- L'angle d'incidence entre fluide/dérive augmente,
- CD et FAD augmentent.

Au Vent- arrière :



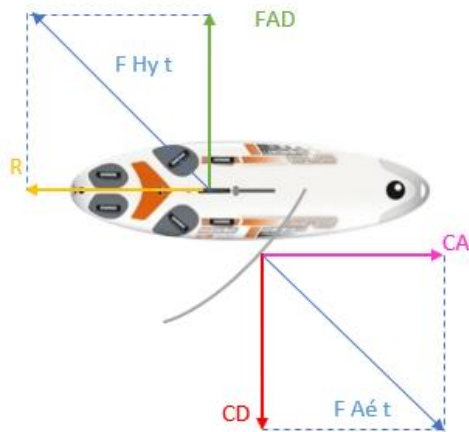
Au Vent Arrière, la dérive ne sert à rien. CD et FAD seront nulles.

La force aérodynamique totale sera donc égale à la composante d'avancement et la force hydrodynamique totale sera égale à la résistance à l'avancement.

2. Les effets directionnels

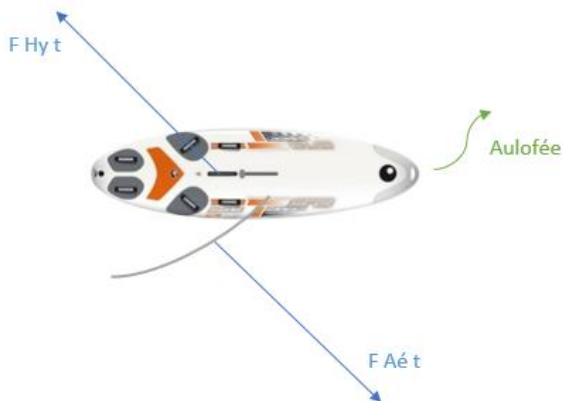
Une planche en déplacement sur l'eau génère deux forces qui se conjuguent dans le but de créer (ou non) un **couple de rotation**. Ces deux forces (force hydrodynamique et force aérodynamique) suffisent donc à expliquer les effets directionnels de la planche à voile.

Nous sommes en équilibre, au point de vue directionnel, quand la $F_{Aét}$ est égale, opposée et dans le prolongement de la $F_{Hy t}$. Dès qu'il y a une rupture dans l'alignement de ces deux forces, il se crée un couple de pivotement. La planche tourne dans le sens de la force qui a le moment le plus important.



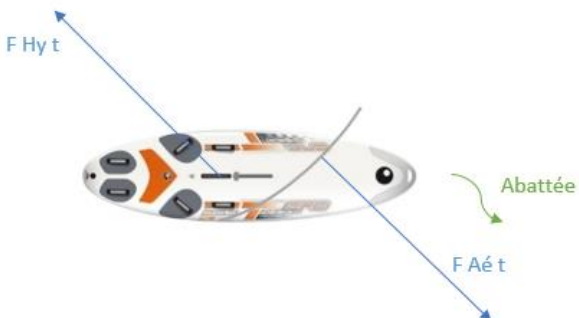
$F_{Hy t}$ est alignée à $F_{Aé t}$ → Pas de couple de pivotement.

- La planche navigue en ligne droite.



$F_{Hy t}$ n'est pas alignée à $F_{Aé t}$ → Couple de pivotement.

- La planche tend à se rapprocher de l'origine du vent.
- C'est une aulofée.



$F_{Hy t}$ n'est pas alignée à $F_{Aé t}$ → Couple de pivotement.

- La planche tend à s'écarter de l'origine du vent.
- C'est une abatée.

La direction que prend la planche dépend donc des positions respectives de $F_{Hy t}$ et de $F_{Aé t}$.