

# Quelques bases pour mieux comprendre le reste :

## - Notions élémentaires :

- Tout d'abord la masse d'air est naturellement homogène (même pression). Donc une masse d'air en surpression tend toujours à se délayer vers une autre masse en dépression. Ce principe est en relation avec le fait que naturellement la pression des masses d'air s'équilibre pour être partout la même. En effet, la nature a horreur du vide.

- La relation de Bernoulli sur la mécanique des fluides, en la simplifiant, nous dit que si une masse d'air a sa vitesse qui augmente sa pression va alors diminuer.

- Un écoulement laminaire est un écoulement où l'on peut représenter les différents filets d'air ne se croisent jamais.\*

- Le profil désigne la surface résultant de la coupe vertical de l'aile

\*complément d'information sur l'écoulement laminaire - ne pas lire en première lecture -

On peut définir le cas laminaire par opposition au cas turbulent. Si on fait une mesure de vitesse dans un écoulement laminaire on aura une courbe "lisse", par contre en régime turbulent on aura une courbe plus erratique comme si on ajoutait un bruit à la courbe du cas laminaire. Exemple : En atmosphère calme, une cigarette fumante permet de visualiser un écoulement laminaire, on peut voir aussi des tourbillons se dessiner lorsque la fumée s'élève, l'écoulement est toujours laminaire. Si on inhale la fumée puis la recrache, on voit que le panache de fumée a un aspect beaucoup plus cotonneux, homogène, la l'écoulement est turbulent. (mais fumer c'est pas bien !)

Il existe aussi un régime intermédiaire entre le laminaire et turbulent c'est la transition (du laminaire vers turbulent). dans ce régime on voit l'écoulement laminaire se déstabiliser jusqu'au régime turbulent. Ces différents régimes sont directement liés au  $Re$  ( $Re < 2000 \rightarrow$  laminaire,  $2000 < 4000 \rightarrow$  transition,  $Re > 4000$  turbulent, on peut néanmoins avoir des écoulements laminaires jusqu'à  $Re$  20000 avec des parois très lisses et des conditions expérimentales très contrôlées), dépendent aussi de l'état de surface des parois (quand il y en a !)

## - Les designations d'une aile :



- La corde est la longueur du profil.

- L'envergure est la distance entre les deux extrémités de l'aile

L'allongement est  $\frac{\text{Envergure}^2 \text{ (à plat)}}{\text{Surface}}$

Cet allongement est une donnée significative du comportement d'une aile en vol.

En effet, plus les voiles sont évoluées et plus celui-ci augmente.

---

## - Calcul de l'allongement :

Pour cela il suffit d'un bon mètre et d'une petite calculatrice.

- Pour une voile rectangulaire :

On mesure l'envergure à plat et la corde (qui est tout le temps la même). Avec cela on calcule la surface (=l'envergure multipliée par la corde) que l'on divise par l'envergure.

- Pour une voile elliptique :

On mesure d'abord l'envergure à plat, puis on prend une série de mesures de la corde de la voile. Avec les mesures des différentes cordes, on réalise le calcul de la corde moyenne.

Pour obtenir la surface, on multiplie la corde moyenne par l'envergure.

Le tour est alors joué !

---

## - Influence de l'allongement sur une aile :

L'allongement, pour une même surface, est un paramètre de performance de la voile. Ainsi la différence entre deux voiles de même surface mais d'allongement différent est une meilleure performance pour celle qui a le plus grand allongement.

### Explication :

Si son allongement est supérieur, c'est que l'envergure est plus importante et l'aile beaucoup plus allongée.

La corde des bouts de l'aile est bien moins importante. Ainsi la voile réduit considérablement son vortex.

Donc elle réduit logiquement la trainée. Donc une perte de performance.

Cependant il reste des désavantages : plus une aile a d'envergure, plus elle ratisse large dans la masse d'air, rencontrant des turbulences et différences qui tendent à la déformer.

De plus si on n'augmente pas la rigidité à mesure qu'on l'allonge, on risque d'avoir des bouts d'ailes plus déformables qui auront tendance à prendre de l'incidence et freiner l'aile.

Pour résumer, L'allongement est un facteur important pour le rendement de l'aile (planeurs -> 36, mirage 2000 ->2-3). Son effet se joue au niveau de la trainée.

### Complément d'information :

Les vortex de bords marginaux sont responsables d'une trainée dite induite. Induite par la portance car c'est bien la dépression entre les 2 faces de l'aile qui fait voler, mais qui génère aussi ces tourbillons. Ils emportent avec eux une énergie qu'il faut bien payer. La théorie de la ligne portante dit que cette trainée induite est inversement proportionnelle à l'allongement (on voit l'intérêt qu'il soit grand, mais pas trop pour

de question de manœuvrabilité, car l'inertie des ailes en roulis devient trop forte.). Cette même théorie dit que la forme qui minimise la trainée induite est la forme elliptique (ex le spitfire anglais). On voit que les ailes de cerf-volants et parapentes sont très souvent elliptiques. Là où le bas blesse c'est que cette loi n'est valable que pour des ailes PLANES!! C'est loin d'être le cas des parapentes. Dans ce cas l'ellipse est un bon compromis car même si l'aile n'est pas plane, on approche de la forme optimale. De plus l'ellipse donne de la flèche à l'aile et cela permet d'augmenter la stabilité en lacet.

---

## La composition des vents :

Pour la suite de l'explication, il est nécessaire d'expliquer la composition des vents.

On représentera chaque vent par un vecteur qui aura une vitesse (longueur du vecteur), un sens et une direction.

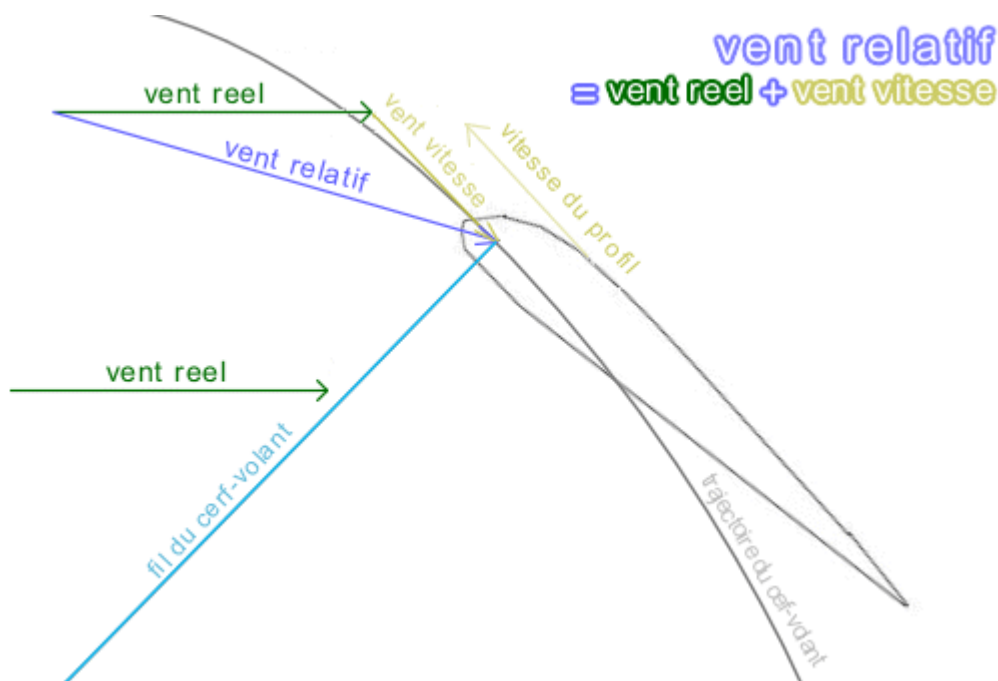
Pour la suite on ne prendra en compte qu'un seul vent : le vent relatif.

Ce vent est la somme des vents qui s'exerceront sur l'objet pris en compte. Ce vent est appelé relatif car il est relatif à l'objet étudié. Ici il sera relatif aux profils étudiés.

Exemple pour l'utilisation d'un profil.

Le premier vent à considérer est le vent météo. On le supposera parallèle au sol. Ce vent est aussi appelé vent réel. L'autre vent à prendre en compte dans notre étude est la vitesse du cerf-volant ou du profil dans la masse d'air. Sa vitesse lui apporte un deuxième vent qui est le vent vitesse.

Donc, pour un cerf-volant, en milieu de fenêtre remontant vers le haut de celle-ci, on peut trouver un vent relatif de ce type:



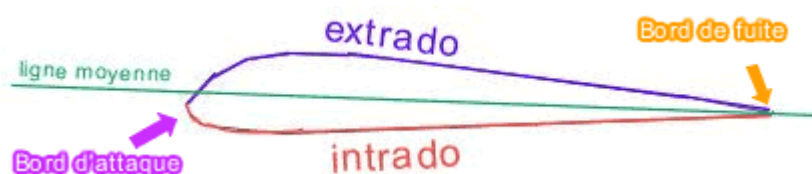
## Le profil d'aile d'avion :

**Attention :** cette explication suppose que dans ce cas l'aile d'avion est rigide.

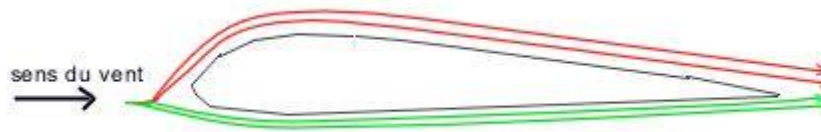
Remarque : Chacune des flèches représente ici l'écoulement de l'air autour de l'aile.

Pour commencer, il est nécessaire, de poser quelques termes de bases:

Aussi le schéma d'une vue en coupe d'un profil d'aile les définit de lui-même :



Puis, le profil ci-dessus schématise l'évolution d'une aile comme celui-ci dans une masse d'air .



En première approche, on remarque que la flèche rouge est plus longue que la verte; donc que la vitesse de l'air au-dessus de l'aile sera plus grande que celle au-dessous de l'aile, car dans un même temps, l'air passant au-dessus du profil aura parcouru une plus grande distance.

D'après la relation de Bernoulli sur l'écoulement des fluides qui nous dit que plus la vitesse augmente plus la pression diminue, on aura une plus faible pression au-dessus (basse pression) et une plus forte pression au-dessous (haute pression). Il y aura donc un phénomène d'aspiration.

Cette explication du chemin plus long pour expliquer la portance est classique et très diffusé, mais malheureusement fausse!!! La première erreur vient de croire que deux particules se trouvant au bord d'attaque se retrouveront au bord de fuite (BF) en même temps. Avant de continuer on peut comprendre qu'il existe alors un couche de cisaillement à l'aval du BF si les vitesses sont différentes. Ce cisaillement produit de minuscule tourbillons qui forme une nappe tourbillonnaire. Une aile vole parce qu'elle s'appuie sur l'air selon le principe d'action-réaction. Imaginons que l'on se trouve sur un toit en regardant un avion passer dans un nuage de fumée, on peut voir : - lorsque l'aile avance dans un air au repos, l'intrados défléchi l'air vers l'avant et le bas. lorsque l'aile est passé les particules d'air restent là où elles sont. A l'extrados l'inertie de l'air tend à diriger le flux d'air tout droit mais la pression atmosphérique interdit les zones de vide ouvertes. On voit donc l'air s'écouler le long de l'extrados (on peut relier cette effet d'inertie avec la dépression de l'extrados, mais on va faire autrement). On comprend bien alors que l'on voit au passage de l'aile un MOUVEMENT de particules (appelé circulation) du type circulaire (oïde) venant de l'intrados, contournant le BA et glissant sur l'extrados. Attention une particule au contact de l'intrados ne va pas se retrouver au BF à l'issue de son parcours. Son mouvement est très petit, mais le mouvement globale des particules créé cette circulation. Si maintenant on prend en compte Bernoulli, on voit que du point de vu de l'aile, le mouvement relatif de l'air est moins véloce sur l'intrados (par rapport à l'extrados). En effet à l'intrados, la vitesse des particules est égale à la vitesse de l'aile moins la vitesse propre des particules (poussées vers l'avant). A l'extrados la circulation s'ajoute à la vitesse de l'aile. D'où surpression et depression.

Cette notion de circulation est assez difficile à appréhender.

Pour éclairer la chose on peut montrer quelques exemples :

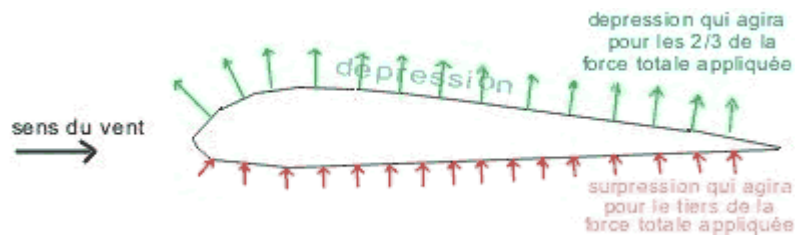
- La balle de golf ou de tennis : on sait que lorsque on lift une balle (tiens le terme anglais est bien approprié!) , i.e quand elle tourne sur elle même subit une force normale à l'axe de rotation. C'est l'effet Magnus. En tournant la balle , d'un côté accélère le fluide à son contact et de l'autre le ralentit, cela créé une circulation d'où force.

- imaginons que nous soyons capable de contrôler un tourbillon cylindrique de rayon R, faisons le tourner sur son axe et déplaçons le dans l'air. Et bien l'air ambiant va avoir le même comportement que pour la balle. Le tourbillon créé une circulation. La théorie de la ligne portante citée plus haut, utilise une modélisation à base de tourbillons en lieu et place de la géométrie de l'aile pour établir ses résultats.

Étonnant non?

C'est ce qui permet donc de considérablement réduire le taux de chute dans le cas d'un avion ou d'un parapente qui utilise exactement ce principe.

Voici le schéma récapitulatif :

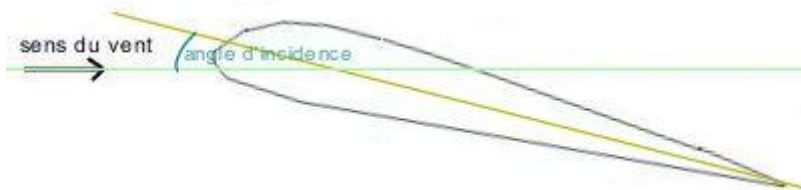


Cependant tout ce phénomène varie en fonction de l'inclinaison de l'aile.

Attention : On admet pour la suite, que l'aile est à caisson. C'est le vent relatif qui remplit les caissons pour leur donner cette forme.

### - L'incidence :

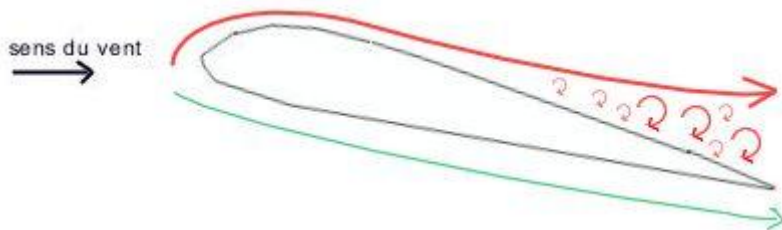
Elle se définit par le schéma ci-dessous:



### - L'écoulement de l'air en fonction de l'incidence:

On constate que plus l'incidence augmente et plus des turbulences apparaissent.

Aussi sur le schéma suivant nous pouvons voir l'écoulement de l'air quand l'incidence augmente un peu.

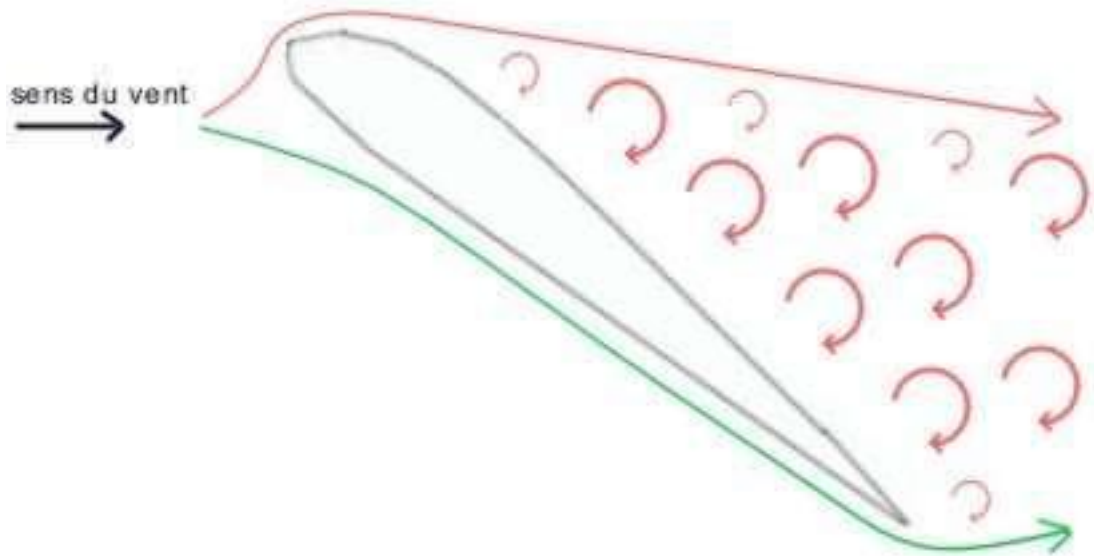


Détails :

le fait que les filets d'air puissent se détacher de l'extrados n'est pas lié directement à la turbulence. L'inertie des particules d'air tend à les faire continuer dans la direction où elles sont, la viscosité et la pression s'opposent à ce que les filets d'air s'éloignent de la paroi. Quand l'incidence est trop forte l'inertie prend le dessus, et un décollement de filet d'air peut se produire près du BF. La portance n'augmente plus. Si on augmente encore l'incidence le décollement remonte brutalement vers l'avant du profil annulant presque toute la portance, c'est le décrochage. Pourquoi le décollement tue-t-il la portance : Le décollement induit des vitesses à la paroi qui remontent l'écoulement, ces vitesses se retranchent à la vitesse de l'aile, avec Bernoulli on comprend vite que la pression sur l'extrados augmente. On peut aussi dire que ces vitesses diminuent la circulation autour de l'aile.

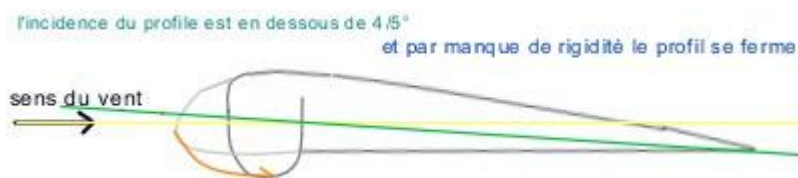
### -le décrochage :

Quand l'incidence est beaucoup trop grande on constate que les filets d'air ne réussissent plus à suivre le contour de l'aile. Il y a alors création de nombreuses turbulences et décrochage : c'est à dire que la surpression et la dépression disparaissent. L'incidence va alors chuter.



### -la fermeture :

Quand l'incidence est trop faible on a, dans le cas d'une aile souple, une fermeture : la pression intérieure n'est plus assez importante... On a alors le bord d'attaque qui se replie.



Détails :

On peut expliquer un peu mieux la fermeture: La voile ferme si la force de pression qui s'exerce à l'extérieur est supérieure à celle qui règne à l'intérieur (et qui lui permet de rester gonflée en temps normal).

Pour détailler le phénomène on a besoin de définir la pression totale  $P_t = P + P_d$  ou  $P_d$  est la pression dynamique  $= 0.5 \cdot \rho \cdot V^2$ ,  $P$  est la pression statique.

Si on est dans une voiture en marche, avec un capteur de pression, on mesure  $P$  et si on sort le capteur à la fenêtre "face au vent" on mesure  $P_t$ . La  $P_t$  a pour propriété de rester constante le long d'une ligne de courant. Ceci signifie qu'à l'intérieur de la voile la  $P_d$  est convertie en  $P = P_t$  car  $V=0$  (à peu de chose près).

Si on somme la distribution de pression externe on obtient la force exercée sur la peau que l'on a à comparer à la somme de  $P_t$  à l'intérieur.

[ajouter images !]

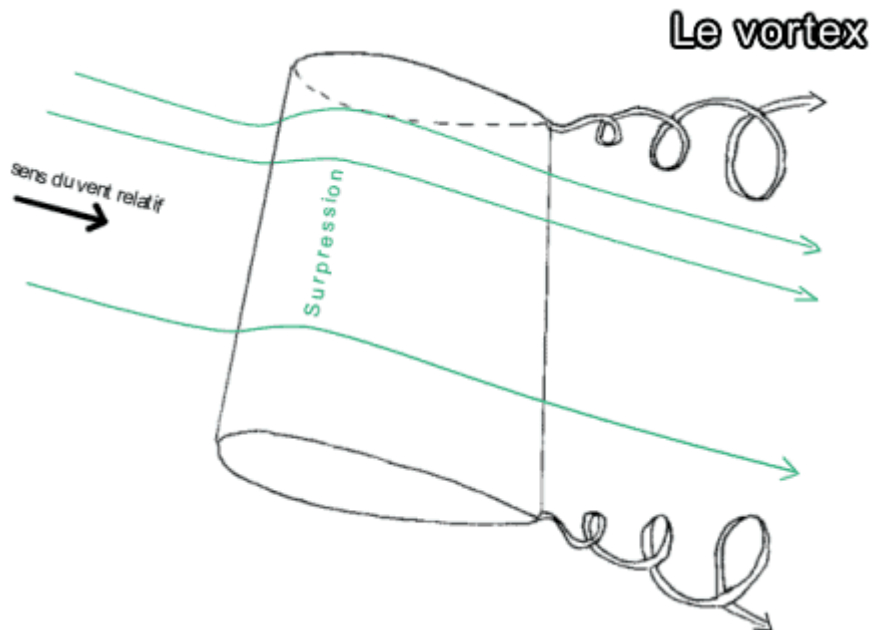
Je joins deux images qui illustrent le propos. en vert la zone dont la force résultante tend à la fermeture. on peut remarquer que : C'est l'intrados qui provoque la fermeture car : La pression interne appliquée une force ascendante sur l'extrados interne tandis qu'elle est descendante sur l'intrados interne. la force ascendante s'oppose à celle issue de la distribution extrados, à l'inverse sur l'intrados ces deux forces vont dans le même sens

---

## Vortex, Trainée, Portance... :

### - Le vortex :

Le vortex est un phénomène qui apparaît en bout d'aile. Il est principalement dû au fait que la surpression tend à aller vers la dépression. Il est source d'une trainée supplémentaire qui détériore les performances en vol. Cette trainée (voir paragraphe suivant) doit être réduite au maximum sur tout engin volant.



### -lutter contre le vortex:

Il existe deux solutions principales :  
- Réduire le corde des bouts d'aile:

On utilisera une géométrie d'aile où les bouts d'ailes seront courts. L'aile elliptique est une bonne solution car elle possède sa corde maxi en milieu d'aile et ses cordes minis en bord d'aile. Réduire la corde de bout d'aile revient à diminuer la surface pour une envergure constante, donc à augmenter l'allongement. Comme on l'a vu ça réduit la traînée induite.

Il existe d'autres géométries d'aile qui réduisent la traînée tout en conservant une surface principale rectangulaire :  
voilà un exemple vu de dessus



- Ajouter un aileron ou une dérive anti-vortex en bout d'aile (ou winglet) :

Cette technique est utilisée même sur les avions, les swifts ... Les dérives sont soit vers le haut comme sur ces derniers, ou vers le bas comme sur les cerf-volants du type des Skytiger de Flexifoil. Ces dérives permettent donc d'empêcher les filets d'air d'être attirés de la surpression vers la dépression.

Logiquement la dérive vers le haut est la plus efficace car elle est au niveau de la surpression alors que celle orientée vers le bas n'empêche qu'une partie des filets d'air d'aller vers le bas.

détails :

Les winglets permettent de réduire la traînée induite en éloignant le vortex de l'aile. Mais leur design est assez complexe car le remède peut être pire que le mal. En effet, cela rajoute de la surface mouillée donc de la traînée (visqueuse).

Tout le truc est que le gain en traînée induite doit être supérieure à la traînée des winglets.

- Nouvelle technique : un tube en bout d'aile

Cette nouvelle technique a été mise au point par le pilote Henri Choresz qui a adapté cette technique à son avion ce qui lui a permis d'augmenter la vitesse et la puissance de son avion. Incroyable, Non ! Cela est d'autant plus incroyable par le gain : une pente de montée augmentée de 25%, une distance franchissable de 41% ... Mais quel est donc ce système alors ? Elle consiste à implanter des bouts de tube placés en bout d'aile d'un avion. Ces tubes appelés tuyères permettent apparemment de supprimer le vortex. L'efficacité de ce système a tellement été grande que les laboratoires de Dassault et de l'Aérospatiale ont immédiatement lancé des recherches sur ces tuyères anti-vortex.

Leur ajout transforme le comportement d'un avion à ailes rectangulaires en celui d'un avion qui aurait des ailes à profil elliptique. Cette technique a été testée par des aéromodélistes qui en ajoutant ce système à leurs avions ont eu un gain extraordinaire de consommation mais aussi un comportement en vol énormément amélioré en stabilité.

Apparemment le diamètre du tube ne doit pas être trop réduit si on veut conserver son efficacité. La longueur optimale de ce tube est de la moitié au deux tiers de la corde de l'aile. De plus l'article qui m'a fait découvrir ce système proposait de remplacer les tubes par des cônes à très faibles pentes qui permettraient peut-être d'augmenter la pression en sortie du cône pour éliminer complètement ce si gênant Vortex ?

Pour la théorie aérodynamique, je ne suis pas encore fixée. Mais je suppose que forcer l'air en



suppression à contourner tout le tube pour rejoindre celui en dépression diminue considérablement l'amplitude du mouvement.  
Remerciements tous spéciaux à Olivier D.

### - La trainée et la portance :

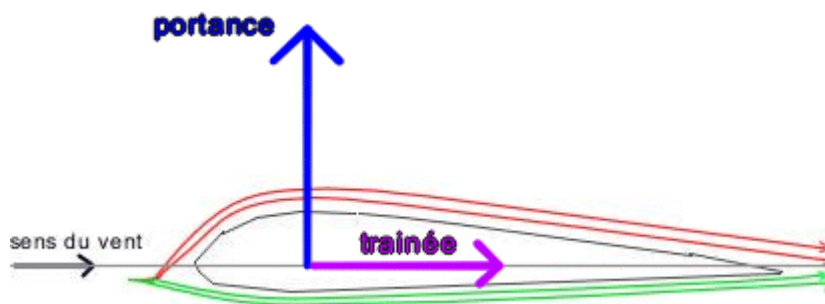
Ces notions sont des grandeurs très importantes. Elles modélisent sous forme de vecteur les différentes forces exercées sur le profil.

La portance est la force, due à la surpression-dépression, exercée sur le profil lors de son vol, qui est orientée perpendiculairement à l'axe du vent relatif.

La trainée est la force exercée par le vent relatif sur le profil. Elle a le même axe que le vent relatif. la trainée est donc un obstacle à la vitesse de l'aile car elle le ralentit. La trainée est une source de pertes de performances aérodynamiques.

La trainée doit être toujours minimisée car elle est source de pertes. La trainée s'applique aussi aux lignes de vos cerf-volants. Plus les fils sont gros, plus leur trainée est importante, donc plus ils ralentissent l'ensemble (ligne)-(cerf-volant).

Schéma illustrant ce phénomène :



On aura donc une force résultante sur l'aile qui est la somme de la portance et de la trainée.