

RÉPONSES COMMENTÉES DE L'EXAMEN  
THÉORIQUE FSVL POUR PILOTES DE PARAPENTE

PARTIE 1:  
AÉRODYNAMIQUE

CAMILLE LENEUF

2025

ADAPTÉ ET MIS À JOUR SELON LES DOCUMENTS DE J.  
OBERSON, 2<sup>E</sup> ÉDITION 2005

<b>VECTEURS</b>	<b>4</b>
<b>DÉFINITION</b>	<b>4</b>
<b>ADDITION</b>	<b>4</b>
<b>TRAÎNÉE</b>	<b>6</b>
<b>DÉFINITION</b>	<b>6</b>
<b>RELATION TRAÎNÉE-SURFACE</b>	<b>6</b>
<b>RELATION TRAÎNÉE-VITESSE D'ÉCOULEMENT</b>	<b>7</b>
<b>RELATION TRAÎNÉE-DENSITÉ DE L'AIR</b>	<b>7</b>
<b>RELATION TRAÎNÉE-FORME DE L'OBJET</b>	<b>8</b>
<b>PORTANCE</b>	<b>9</b>
<b>PROFIL D'UNE AILE</b>	<b>11</b>
<b>INCIDENCE</b>	<b>13</b>
<b>INCIDENCE</b>	<b>13</b>
<b>POLAIRE DES FORCES</b>	<b>13</b>
<b>GÉOMÉTRIE D'UNE AILE</b>	<b>14</b>
<b>GÉOMÉTRIE</b>	<b>14</b>
<b>CHARGE ALAIRE</b>	<b>14</b>
<b>ALLONGEMENT</b>	<b>15</b>
<b>EQUILIBRE DES FORCES D'UN PLANEUR EN VOL RECTILIGNE</b>	<b>17</b>
<b>FACTEURS INFLUENÇANTS LE VOL</b>	<b>18</b>
<b>FINESSE D'UNE AILE</b>	<b>18</b>
<b>AXES ET STABILITÉ DE VOL</b>	<b>19</b>
<b>POLAIRE DES VITESSES</b>	<b>21</b>
<b>CHARGE ALAIRE ET POLAIRE DES VITESSES</b>	<b>23</b>
<b>POLAIRE DES VITESSES DANS UNE MASSE D'AIR EN MOUVEMENT</b>	<b>24</b>
<b>EQUILIBRE DES FORCES D'UN PLANEUR EN VIRAGE, FACTEUR DE CHARGE</b>	<b>26</b>



## VECTEURS

### DÉFINITION

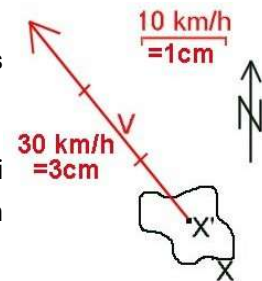
Un vecteur est une représentation pratique de certains phénomènes physiques caractérisés par une valeur quantitative, une origine et une direction.

2 exemples utiles pour le vol libre : (1) la force, (2) la vitesse. Pour caractériser ces 2 phénomènes, il faut connaître :

- leur intensité (= valeur quantitative)
  - une force de 10 kg ou de 16 kg
  - une vitesse de 35 km/h
- leur origine : le centre de l'objet qui subit l'un de ces phénomènes physiques
- leur direction, en 2 ou 3 dimensions.

Pour représenter sur le papier ces 2 phénomènes, on utilise donc les vecteurs (=traits fléchés).

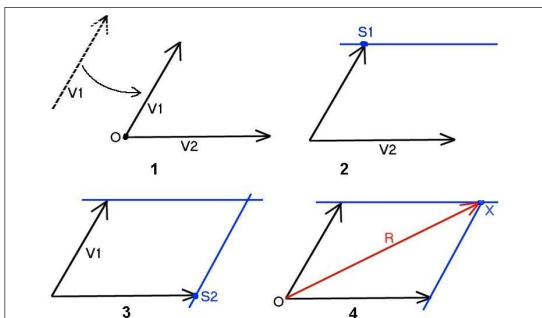
- Longueur d'un vecteur = l'intensité du phénomène physique. Si arbitrairement 1 cm sur papier = 10 kg, un vecteur de 3 cm correspondra donc à une force de 30 kg.
- L'origine d'un vecteur = l'extrémité sans flèche. Par exemple le point d'application d'une force.
- La direction d'un vecteur = montrée par la flèche.



*Exemple : on veut représenter sur papier une vitesse de 30 km/h par un vecteur V, s'appliquant sur l'objet X (centre de l'objet = X') se dirigeant au nord ouest*

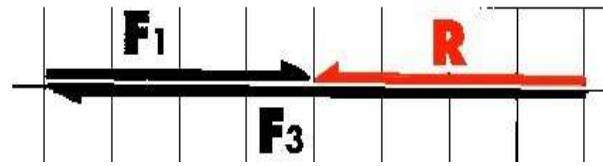
### ADDITION

**Q1, Q2, Q3, Q4, Q5** Lorsque 2 vecteurs  $V_1$  et  $V_2$  exercent leur influence sur un objet, celui-ci est soumis à un vecteur résultant  $R$ . On parle d'addition de deux vecteurs. On ne peut pas simplement additionner leur longueur car il faut tenir compte de leur direction respective. La figure A2 montre la technique pour additionner ces 2 vecteurs. Attention : On ne peut additionner des vecteurs que de même type : par exemple 2 vecteurs « force » mais pas un vecteur « vitesse » et un vecteur « force ».



- Glisser  $V_1$  sans changer de direction, afin que les deux origines de  $V_1$  et  $V_2$  se confondent.
  - Tirer de  $S_1$  une parallèle à  $V_2$ .
  - Tirer de  $S_2$  une parallèle à  $V_1$ .
- Le vecteur résultant  $R$  a pour origine  $O$  et pour fin l'intersection  $X$  des deux parallèles.

Cas particulier : Les deux vecteurs ont la même direction et le même sens, alors leurs longueurs s'additionnent. Les deux vecteurs ont la même direction mais sont de sens opposé, alors leurs longueurs se soustraient.



## TRAÎNÉE

### DÉFINITION

**Vent** : Déplacement d'une masse d'air par rapport à des objets fixes (maisons, arbres...etc.). Dans le QCM, on parle aussi de « filets d'air » ou de « flux ».

**Vent relatif** : Lorsque nous nous déplaçons à une vitesse  $V$  dans une masse d'air immobile, nous ressentons sur notre corps les mêmes sensations que si nous restions immobiles dans un vent de vitesse  $V$ . Quand un objet se déplace dans de l'air, il crée donc pour lui un vent relatif.

**Traînée** : Tout objet soumis à du vent (réel ou relatif) est aussi soumis à une force appelée traînée. Pour un objet quelconque cette force a la même direction et le même sens que le vent. Par exemple si vous mettez une main en dehors de la fenêtre d'une voiture en mouvement, vous sentez une force qui pousse votre main vers l'arrière, dans le même sens que le vent relatif créé par la vitesse de la voiture. La traînée s'exprime en kg ou en Newtons (N).  $10 \text{ N} = \text{environ } 1 \text{ kg}$ .

**Q6, Q14, Q23, Q32** 4 facteurs influencent la traînée d'un objet :

- La surface de l'objet exposée au vent
- La vitesse du vent
- La densité de l'air
- La forme de l'objet.

Il n'y a pas d'autre facteur significatif. A noter cependant que la surface exposée dépend de la grandeur de l'objet.

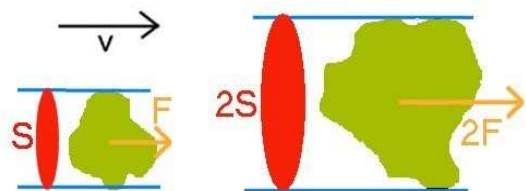
Le poids, le poids spécifique, la masse, la densité moléculaire et la matière de l'objet de même que l'humidité de l'air, le point de rosée, la température de l'air, le gradient de pression n'influencent pas la traînée.

**Q41** Quand on parle de « caractéristiques de surface du corps », cela implique à la fois la surface de l'objet exposée au vent et la forme de cet objet. La surface exposée perpendiculairement à la direction du vent dépend donc du volume et de la grandeur de l'objet. Plus il est grand et plus sa surface exposée a une chance d'être grande.

### RELATION TRAÎNÉE-SURFACE

**Q7, Q8, Q9** La relation entre traînée et surface est linéaire. Quand la surface double, quadruple ou diminue de moitié, la traînée double, quadruple ou diminue de moitié également.

*Exemples*



- **Q10** Si la surface d'exposition au vent d'un objet passe de  $2\text{ m}^2$  à  $4\text{ m}^2$ , cette surface double et donc la traînée double. Si celle-ci était de  $300\text{ N}$  (Newtons), elle sera de  $600\text{ N}$ .

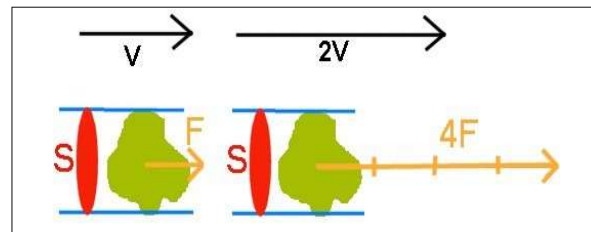
Le fait que la vitesse du vent est donnée à  $30\text{ km/h}$  et que tout se passe au niveau de la mer ne change rien au problème posé et est énoncé dans la question pour tester la solidité de vos connaissances

- **Q11** Si la surface passe de  $2\text{ m}^2$  à  $1\text{ m}^2$  (diminue de moitié), la traînée passe respectivement de  $300\text{ N}$  à  $150\text{ N}$  (diminue de moitié),
- **Q12** Si la surface passe de  $8\text{ m}^2$  à  $2\text{ m}^2$  (diminue d'un facteur 4) de  $1200\text{ N}$  à  $300\text{ N}$  (diminue d'un facteur 4)
- **Q13** Si la surface passe de  $0.5\text{ m}^2$  à  $3\text{ m}^2$  (augmente d'un facteur 6) de  $150\text{ N}$  à  $900\text{ N}$  (augmente d'un facteur 6). Questions 011 à 013.

### RELATION TRAÎNÉE-VITESSE D'ÉCOULEMENT

Pour la vitesse du vent, les choses sont un peu moins simples.

La relation entre la vitesse du vent et la traînée n'est pas linéaire. Autrement dit, si cette vitesse augmente, la traînée augmente beaucoup plus.



**Q15**, Plus exactement, la traînée augmente proportionnellement à la valeur de la vitesse élevée au carré. Plus concrètement, si la vitesse du vent (flux d'air) qui s'exerce sur l'objet augmente d'un facteur 2, la traînée est multipliée par 2 au carré = 4.

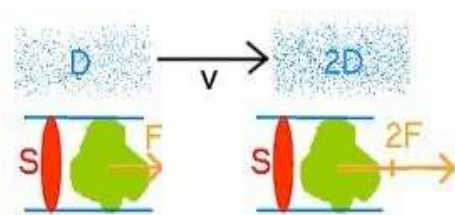
Exemples

- **Q16, Q22** Si cette vitesse triple, la traînée est multipliée par 9
- **Q17** Si la vitesse quadruple, la traînée est multipliée par 16
- **Q18, Q21** Si la vitesse diminue de moitié, la traînée est divisée par 4.
- **Q19** Si la vitesse du vent passe de  $30$  à  $60\text{ km/h}$  (la vitesse double), la traînée quadruple.
- Si la vitesse du vent était de  $300\text{ N}$  (Newtons), elle sera de  $1200\text{ N}$ .

Le fait que la surface exposée au vent =  $2\text{ m}^2$  et que tout se passe au niveau de la mer ne change rien au problème posé.

### RELATION TRAÎNÉE-DENSITÉ DE L'AIR

La densité de l'air : Comme pour la surface exposée au vent, la relation entre la densité de l'air et la traînée est linéaire.



**Q24, Q25** Si la densité de l'air double ou diminue de moitié, de même la traînée double ou diminue de moitié respectivement.

Dans quelle circonstance pratique la densité de l'air varie ? La densité de l'air (et la pression atmosphérique) diminue avec l'augmentation de l'altitude. Autrement dit, l'air se raréfie avec l'altitude.

**Q26** Exemple : aux autres conditions identiques, si un objet s'éloigne de la surface terrestre (c.-à-d. l'objet prend de l'altitude), la densité de l'air diminue comme la traînée. La relation entre l'altitude et la densité de l'air n'est pas tout à fait linéaire. Plus on est haut et plus la densité de l'air diminue lentement.

**Q27** Autrement dit, si un corps soumis à du vent s'éloigne de la surface terrestre (prend de l'altitude), sa traînée diminue plus vite dans les basses couches qu'à haute altitude.

**Q28, Q29, Q30, Q31** Comme ordre de grandeur, à savoir par cœur pour l'examen, à 1100, 2200, 3300 et 4400 m. d'altitude, la densité de l'air et donc la traînée d'un objet soumis à du vent de vitesse invariable, vaudra respectivement 90, 81, 72, 64 % de la densité et donc de la traînée du niveau de la mer<sup>1</sup>.

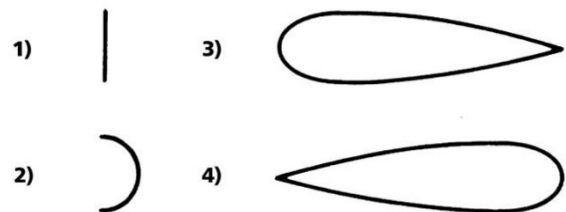
#### RELATION TRAÎNÉE-FORME DE L'OBJET

la forme de l'objet soumis au vent : Pour une surface d'exposition identique un objet « aérodynamique » offrira moins de résistance (moins de traînée) qu'un objet peu aérodynamique.

**Q33** Le nombre qui caractérise la façon dont la forme d'un objet influence la traînée s'appelle coefficient  $C_x$ .

**Q37, Q38, Q39, Q40** Exemples de  $C_x$  :

1.  $C_x=1$
2.  $C_x=1,3$
3.  $C_x=0,08$
4.  $C_x=0,17$



**Q34, Q35, Q36** Dans les mêmes conditions de vent et de surface, la traînée d'un objet avec un  $C_x$  de 1,3 sera 1,3 fois plus grande que celle d'un objet avec un  $C_x$  de 1. La traînée du premier objet sera donc de 30 % supérieure. Un corps d'un  $C_x$  de 0,33 ou de 0,05 produit respectivement, par rapport à un corps avec un  $C_x = 1$ , environ 3 fois ou 20 fois moins de traînée.

---

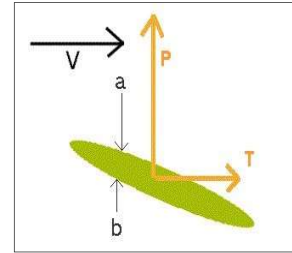
<sup>1</sup> Truc mnémotechnique : la somme doit éga1er100. Aux altitudes approximatives (en hm) 10, 20, 30, 40, les densités approximatives correspondantes (en % de la densité de l'air au niveau de la mer) sont 90, 80, 70, 60.



## PORTANCE

Lorsqu'un objet est allongé et plat (par exemple une aile) et qu'il est soumis obliquement au vent, deux forces perpendiculaires l'une à l'autre s'exercent alors sur cet objet

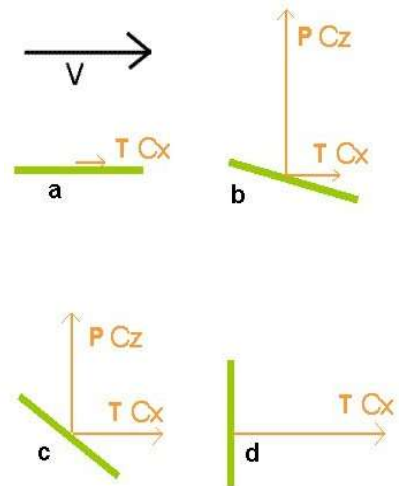
- La traînée, parallèle au vent et de même sens, comme pour un objet quelconque
- La portance, perpendiculaire au vent, du côté de l'extrados



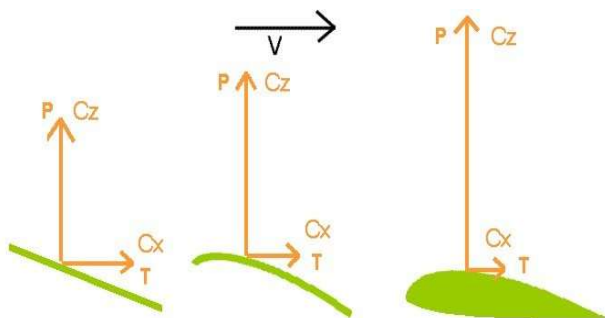
Comme pour la traînée seule d'un objet quelconque, on retrouve les mêmes 4 facteurs qui influencent la traînée et la portance d'un objet plat :

1. La surface de l'objet exposée au vent
2. La vitesse du vent
3. La densité de l'air
4. La forme et l'inclinaison par rapport au vent (incidence) de l'objet.

Les coefficients de la traînée et de la portance, respectivement  $C_x$  et  $C_z$ , dépendent non seulement de la forme de l'objet mais aussi de l'inclinaison de l'objet plat par rapport à la direction du vent. Cette inclinaison s'appelle incidence (schéma ci-contre).



Si la surface ou la densité de l'air double ou diminue de moitié, la traînée et la portance doublent ou diminuent de moitié. Si la vitesse du vent double, la portance et la traînée sont multipliées par quatre (la portance et la traînée augmentent comme la vitesse du vent au carré).



*Traînée  $T$  et portance  $P$ , ou respectivement  $C_x$  et  $C_z$ , d'un objet plat soumis obliquement au vent  $V$  : Plus le profil de l'objet ressemble à une aile aérodynamique et plus  $P$  ou  $C_z$  devient grand par rapport à  $T$  ou  $C_x$ .*

La portance dépend entre autres de l'incidence. Il y a, parmi les réponses à choix, une proposition « piège » qui est fausse, celle de la surface du profil qui ne veut pas dire grand-chose et qu'il ne faut pas confondre avec la surface exposée au vent de l'objet.

**Q56** La portance dépend des 4 facteurs suivants :

1. Surface de l'aile
2. Coefficient de portance
3. Densité de l'air
4. Vitesse du vent.

Répartition de la portance : On peut décomposer la portance en nombreux vecteurs répartis autour du profil d'une aile exposée au vent avec une incidence faible. Trois remarques :

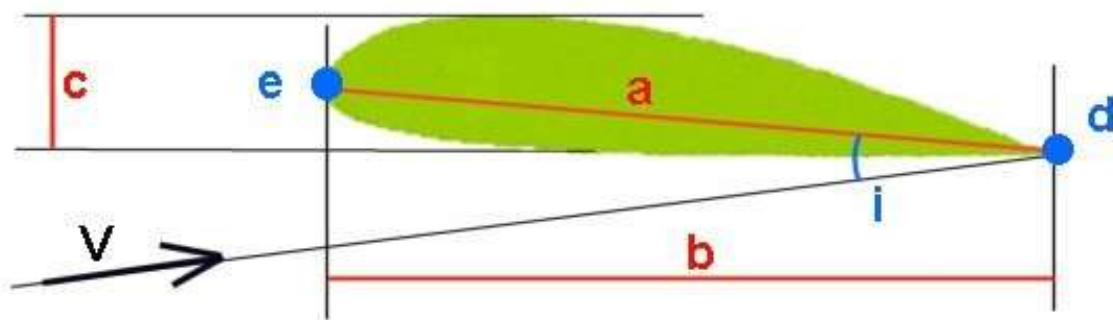
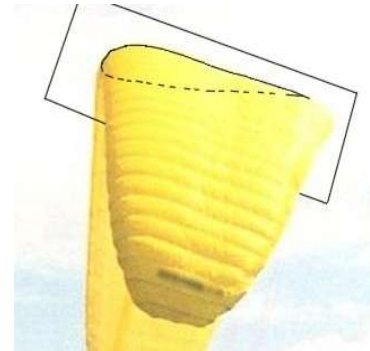
- **Q96** Sur l'extrados, on a un phénomène d'aspiration (pression négative), comme si l'aile était soulevée par un aspirateur à poussière alors que sur l'intrados on a un phénomène de pression positive, comme un ventilateur souffle sur un visage.  
Cette différence de pression entre l'extrados et l'intrados entraîne à chaque extrémité gauche et droite de l'aile des mouvements d'air tourbillonnaires (appelés vortex ou tourbillons marginaux) de compensation depuis l'intrados jusqu'à l'extrados des extrémités.
- **Q97** Ce phénomène entraîne une augmentation de la traînée donc une baisse des performances de l'aile ainsi que des turbulences dans le sillage de l'aile. C'est donc derrière le bord de fuite que se trouvent les turbulences engendrées par un planeur.
- **Q54** Il y a environ 2 fois plus de force d'aspiration sur l'extrados que de force de pression sur l'intrados. A une incidence d'environ  $10^\circ$ , la répartition de la portance est donc de  $2/3$  sur l'extrados et  $1/3$  sur l'intrados.
- **Q55** Il existe aussi une asymétrie de répartition de la portance d'avant en arrière. Les  $2/3$  de la portance se trouve sur le tiers avant de l'aile.

## PROFIL D'UNE AILE

Le profil d'une aile est la forme de la section longitudinale (sens avant-arrière) de cette aile.

**Q48** Le profil des ailes de parapentes actuels est assez épais et asymétrique avec un extrados très bombé surtout sur le tiers antérieur de l'aile et un intrados peu bombé.

**Q47** Le profil est un des éléments importants qui définit les caractéristiques, notamment les performances, de vol d'une aile.

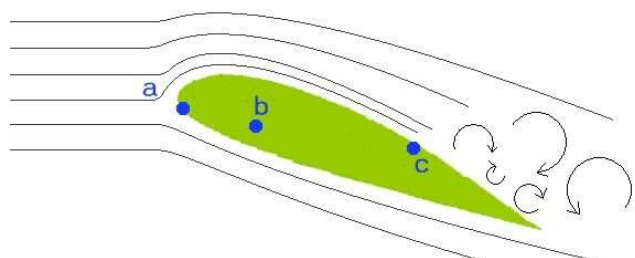


**Q42, Q43, Q44, Q45, Q46, Q47, Q49** Segments et points géométriques remarquables d'un profil

- Segment a : corde médiane du profil, entre d et e
- Segment b : profondeur du profil, presque comme a.
- Segment c : épaisseur du profil.
- Point d : bord de fuite (à l'arrière).
- Point e : bord d'attaque (à l'avant).
- Angle i : incidence. Angle entre la direction du flux d'air (vent relatif) et la corde du profil.

**Q62, Q63, Q64** Points aérodynamiques remarquables d'un profil

- **Q68** Point de stagnation ou point d'arrêt a, point vers le bord d'attaque où les filets d'air du vent relatif se divisent pour s'écouler d'une part sur l'extrados et d'autre part sous l'intrados.
- **Q71** Centre de poussée b, le point d'application de l'ensemble des forces aérodynamiques (portance et traînée).
- **Q65** Point de décollement c, le point sur l'extrados au niveau duquel les filets d'air se détachent de la surface de l'aile et à partir duquel des turbulences se forment et

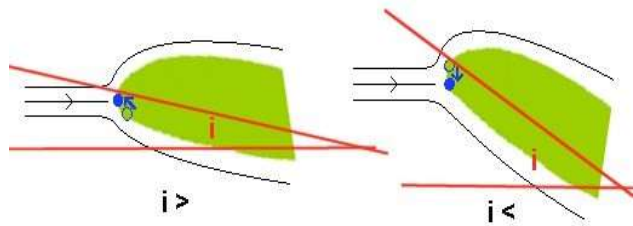


entraînent une composante négative de la portance. Ce point apparaît essentiellement lors de grande incidence.

Ces points aérodynamiques ne sont géométriquement pas fixes, mais varient un peu de lieu suivant l'incidence.

**Q69** Par exemple le point de stagnation. Lorsque l'incidence déjà positive d'une aile, exposée au vent, augmente, le point d'arrêt se déplace sur l'intrados en direction du bord de fuite (droite)

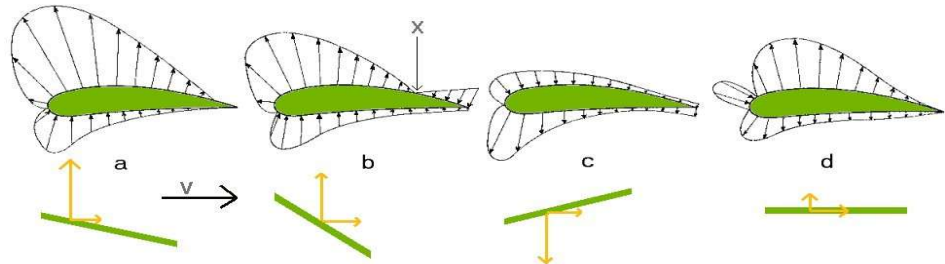
**Q70** Inversement, lorsque l'incidence déjà positive d'une aile, exposée au vent, diminue, le point d'arrêt se déplace toujours sur l'intrados en direction du bord d'attaque (gauche)



## INCIDENCE

## INCIDENCE

**Q50, Q61** La répartition des forces (portance et traînée) varie en fonction de l'incidence.



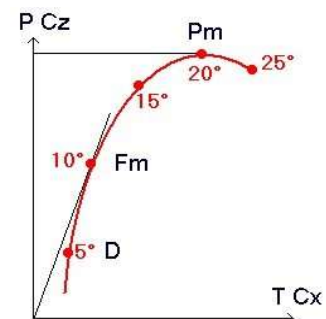
- En a, on trouve l'incidence optimale (environ 10-15°), avec une portance importante et une traînée réduite grâce à une aspiration à l'extrados et une pression à l'intrados homogènes et efficaces.
- **Q51** En b, l'incidence est importante. La portance est diminuée et la traînée augmentée. Un point de décrochage X (voir aussi figure A20) apparaît à l'extrados. A l'arrière de ce point, à cause des turbulences, une composante de pression dirigée vers le bas fait place à la composante d'aspiration.
- **Q52** En c, l'incidence est négative. L'aspiration se trouve à l'intrados et la pression positive à l'extrados, les deux dirigées vers le bas. On a donc une portance négative.
- **Q53** En d, l'incidence est nulle. Alors qu'une traînée persiste, le phénomène d'aspiration se manifeste à l'extrados et aussi, dans une moindre mesure, à l'intrados. Ces forces se neutralisent et entraînent une très faible portance.

## POLAIRE DES FORCES

On pourrait multiplier les exemples. Mais il est plus pratique et concis de représenter la variation du couple portance-traînée par un graphique x-y appelé polaire des forces. Les valeurs sur le graphique ne sont que des ordres de grandeur données à titre indicatif et n'ont pas la prétention d'être parfaitement exactes.

Les degrés sur le graphique représentent l'angle d'incidence.

Le rapport entre la portance et la traînée d'une aile (profil) donnée dépend donc avant tout de l'incidence.

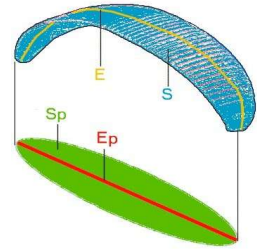


- A environ 10°, le rapport entre portance et traînée est maximal ce qui correspond à la finesse maximale et au meilleur angle de plané.
- En augmentant l'incidence (15°), la portance augmente certes mais la traînée augmente un peu plus encore.
- A 20°, la portance est maximale mais aux dépens d'une assez forte traînée, ceci correspond au taux de chute minimal.
- **Q58, Q60** A 25°, la portance disparaît et l'aile décroche (ne vole plus). Sur le graphique, on voit donc bien que depuis la finesse maximale, si l'incidence est réduite ou est augmentée de 2°, alors  $C_z$  (ou la portance) diminue ou augmente respectivement.

## GÉOMÉTRIE D'UNE AILE

## GÉOMÉTRIE

**Q72 Envergure** : écart (longueur) entre les deux extrémités latérales gauche et droite d'une aile. Elle est exprimée en générale en m. On distingue l'envergure « à plat » (E) (effective), mesurée sur une aile étalée au sol et une envergure projetée (Ep) mesurée sur la projection au sol (ombre) de l'aile gonflée. L'envergure « à plat » est évidemment toujours plus grande que l'envergure projetée.



**Q100 Surface** : surface totale de l'aile. Elle est exprimée en générale en m<sup>2</sup>. On distingue la surface « à plat » (effective) (S), mesurée sur une aile étalée au sol et une surface projetée (Sp), mesurée sur la projection au sol (ombre) de l'aile gonflée. La surface « à plat » est plus grande que la surface projetée ou la surface projetée est plus petite que la surface effective ou éventuellement identique.

**Poids total volant (PTV)** : la somme de tout le poids porté par l'aile, c.-à-d. le poids du pilote, de la voile, du harnais et de tout ce qu'il contient. Il est exprimé en général en Kg. Charge d'une aile = PTV - poids de l'aile, c'est-à-dire le poids total que porte l'aile.

- PTV maximal d'une aile de 5 kg avec une charge maximale de 95 kg = 5 kg + 95 kg = 100 kg.
- PTV minimal d'une aile de 5 kg avec une charge minimale de 70 kg = 5 kg + 70 kg = 75 kg.
- PTV maximal d'une aile de 35 kg avec une charge maximale de 90 kg = 35 kg + 90 kg = 125 kg.
- PTV minimal d'une aile de 35 kg avec une charge minimale de 65 kg = 35 kg + 65 kg = 100 kg.

## CHARGE ALAIRE

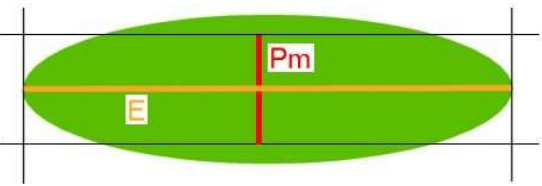
**Q74, Q75 Charge alaire** : charge (poids) moyenne par unité de surface. Question 075 et 076. Elle est exprimée en générale en Kg / m<sup>2</sup>. On obtient la charge alaire en divisant le PTV par la surface (en général projetée). Pour les parapentes, la charge alaire habituelle est située entre 2,5 et 4 Kg/m<sup>2</sup>.

## Exemples de calcul

- **Q84, Q85** Calculer la charge alaire d'une aile de 25 m<sup>2</sup>. Charge max. 95 kg. Charge min. 70 kg. Poids de l'aile 5 kg. Il s'agit typiquement d'un parapente. Avec une charge maximale, la charge alaire = PTV max. / 25 m<sup>2</sup> = 95 kg+5kg / 25m<sup>2</sup> = 4 kg / m<sup>2</sup>. Avec une charge minimale, la charge alaire = PTV min. / 25 m<sup>2</sup> = 70 kg+5kg / 25m<sup>2</sup> = 3 kg / m<sup>2</sup>.
- **Q88, Q89** Calculer la charge alaire d'une aile de 12,5 m<sup>2</sup>. Charge max. 90 kg. Charge min. 65 kg. Poids de l'aile 35 kg. Il s'agit typiquement d'une aile delta. Avec une charge maximale, la charge alaire = PTV max. / 25 m<sup>2</sup> = 90 kg+35kg / 12,5m<sup>2</sup> = 10 kg / m<sup>2</sup>.

Avec une charge minimale, la charge alaire =  $PTV_{min} / 25 \text{ m}^2 = 65 \text{ kg} + 35 \text{ kg} / 12,5 \text{ m}^2 = 8 \text{ kg} / \text{m}^2$ .

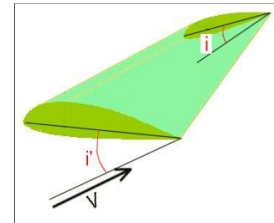
**Q73** Profondeur moyenne : écart moyen (sur toute l'envergure) entre le bord d'attaque et le bord de fuite de l'aile. Elle est exprimée en générale en m. Relation entre la surface S, la profondeur moyenne p et l'envergure e :  $P = S/E$



Par exemple

- **Q83** Si une aile a une envergure de 10m et une surface de 25 m<sup>2</sup>, la profondeur moyenne est égale à  $25 \text{ m}^2 / 10 \text{ m} = 2,5 \text{ m}$ . Les valeurs de poids et de charge données dans l'énoncé de cette question ne servent bien sûr à rien sinon à vous induire en erreur.
- **Q88** Si une aile a une envergure de 10m et une surface de 12,5 m<sup>2</sup>, la profondeur moyenne est égale à  $12,5 \text{ m}^2 / 10 \text{ m} = 1,25 \text{ m}$ .

**Vrillage de l'aile** : Variation d'incidence entre les différentes sections de l'aile. En général le vrillage de l'aile donne une meilleure stabilité de l'aile. Et/ou plus de douceur au pilotage, en particulier le décrochage est moins brusque et plus retardé.

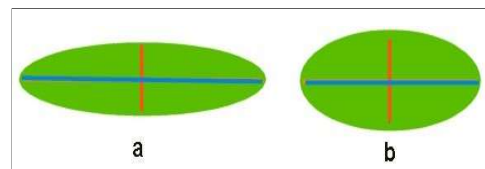


## ALLONGEMENT

**Q76** C'est le rapport entre l'envergure et la profondeur moyenne, c.-à-d. l'envergure / la profondeur moyenne =  $e / p$ .

**Q77** En effet, le produit  $p \times e$  (envergure x profondeur moyenne) n'est autre que la surface de l'aile. Cette dernière formule  $e^2 / \text{surface}$  est plus pratique. Pour l'allongement effectif (aile à plat) on prend les valeurs effectives de l'envergure et de la surface. Pour l'allongement projeté on prend les valeurs de l'envergure et de la surface projetées.

**Q78, Q79** Avec l'expérience et l'habitude, il est facile de reconnaître au premier coup d'œil une aile à grand allongement d'une aile à petit allongement. Les ailes à grand allongement ont donc une grande envergure et une petite profondeur moyenne, inversement les ailes à petit allongement ont donc une petite envergure et une grande profondeur moyenne.



Plus l'allongement est grand, moins les tourbillons marginaux sont importants et moins la traînée est grande, ce qui améliore les performances de l'aile en vol droit.

**Q90, Q91** L'allongement courant d'un parapente actuel de série est de 5, celui d'une aile delta actuelle est de 7.

**Q81, Q82** Une aile d'allongement = 5 aura donc une envergure 5 fois plus grande que sa profondeur moyenne ou une profondeur moyenne 5 fois plus petite que son envergure.

Exemples de calcul :

- **Q82** Calcul de l'allongement d'une aile de 10 m. d'envergure et de 25 m<sup>2</sup> de surface.  
Les valeurs de poids et de charge données dans l'énoncé ne servent bien sûr à rien sinon à vous induire en erreur et à tester la solidité de vos connaissances.  
Allongement =  $10\text{m} \times 10\text{m} / 25\text{ m}^2 = 100 / 25 = 4$ .
- **Q86** Calcul de l'allongement d'une aile de 10 m. d'envergure et de 12,5 m<sup>2</sup> de surface.  
Les valeurs de poids et de charge données dans l'énoncé ne servent bien sûr à rien.  
Allongement =  $10\text{m} \times 10\text{m} / 12,5\text{ m}^2 = 100 / 12,5 = 8$ .

Autres exemples

- Surface 32 m<sup>2</sup>, envergure 8 m.
- Surface 25 m<sup>2</sup>, envergure 10 m.
- Surface 20 m<sup>2</sup>, envergure 10 m.
- Surface 24 m<sup>2</sup>, envergure 12 m.

**Q92, Q93, Q94** On cherche l'aile avec le plus grand allongement et l'aile avec le plus petit allongement.

L'allongement le plus petit est facile à trouver, c'est a car la surface est la plus grande (32m<sup>2</sup>) et l'envergure la plus petite (8m.). Pour l'allongement le plus grand, c'est à première vue soit c soit d car les surfaces sont les plus petites et les envergures les plus grandes.

- Pour c : allongement =  $10\text{m.} \times 10\text{m.} / 20\text{ m}^2 = 5$
- Pour d : allongement =  $12\text{m.} \times 12\text{m.} / 24\text{ m}^2 = 144 / 24 = 6$

L'aile d a donc finalement l'allongement le plus grand = 6.

Autre exemple : on donne les caractéristiques de 4 ailes (ailes delta) :

- Surface 16 m<sup>2</sup>, envergure 12 m.
- Surface 20 m<sup>2</sup>, envergure 10 m.
- Surface 12 m<sup>2</sup>, envergure 12 m.
- Surface 12,5 m<sup>2</sup>, envergure 10 m.

On cherche l'aile avec le plus grand allongement et l'aile avec le plus petit allongement.

L'allongement le plus petit est facile à trouver, c'est b car la surface est la plus grande (20m<sup>2</sup>) et l'envergure la plus petite (10m.). Pour l'allongement le plus grand, c'est première vue soit c soit d car les surfaces sont les plus petites et les envergures les plus grandes.

- Pour c : allongement =  $12\text{m.} \times 12\text{m.} / 12\text{ m}^2 = 12$
- Pour d : allongement =  $10\text{m.} \times 10\text{m.} / 12,5\text{ m}^2 = 8$

L'aile c a donc finalement l'allongement le plus grand = 12.



## EQUILIBRE DES FORCES D'UN PLANEUR EN VOL RECTILIGNE

Un parapente, non soumis à des changements de force (=sans accélération) vole en mouvement rectiligne uniforme. La résultante de toutes les forces s'exerçant sur l'aile est donc nulle.

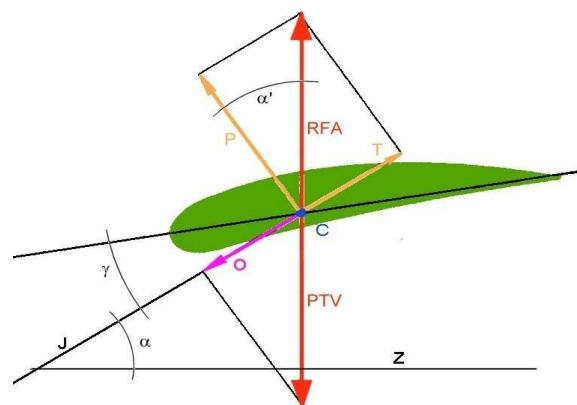
**Q102** Le poids total en vol (PTV), dirigé verticalement vers le bas doit donc être neutralisé par une force contraire, verticale, de même valeur mais dirigée vers le haut.

**Q101, Q104, Q105** Cette dernière force s'appelle la résultante des forces aérodynamiques (=RFA). La RFA peut être décomposée en

- Portance (P), perpendiculaire à la trajectoire et dirigée vers le haut,
- **Q106** Traînée (T), parallèle à la trajectoire (direction de l'écoulement d'air) et dirigée vers l'arrière.

La composante (force) du PTV, parallèle à la trajectoire, dirigée vers l'avant et s'opposant à la traînée (de même valeur que la traînée) s'appelle la poussée (O).

La trajectoire est évidemment identique à la direction du vent relatif. L'angle de plané (alpha) est formé par la trajectoire et l'horizon. Par la géométrie, on démontre facilement que l'angle alpha est identique à l'angle alpha' formé par la portance et la RFA. Cette dernière observation est importante pour définir la finesse (voir plus loin). Il ne faut pas confondre l'angle de plané avec l'incidence (gamma) formé par la corde du profil et la trajectoire.



**Q107, Q108, Q109, Q110, Q111** à l'aide du schéma ci-contre

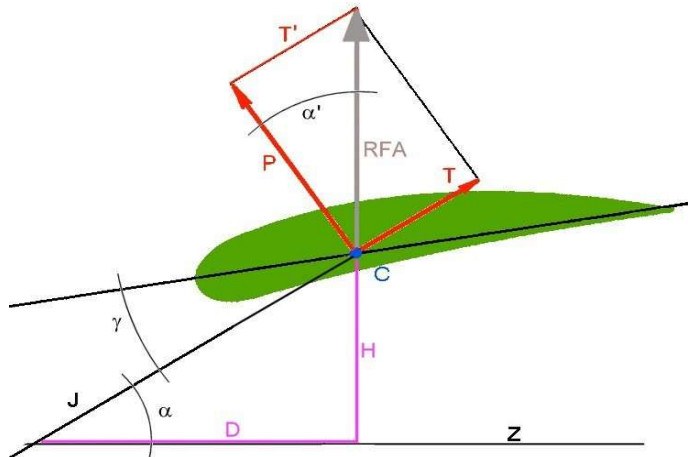
*Equilibre des forces d'un planeur en vol rectiligne uniforme. RFA = résultante des forces aérodynamiques. PTV = poids total en vol. P = portance. T = traînée. O = poussée. J = trajectoire (vent relatif). C = centre de poussée. Z = horizon. alpha = angle de plané. gamma = incidence.*

## FACTEURS INFLUENÇANTS LE VOL

## FINESSE D'UNE AILE

**Q120, Q121** La finesse d'une aile est une caractéristique importante pour évaluer ses performances. Plus elle est grande est plus le planeur est performant.

**Q122, Q123** C'est le rapport de la distance parcourue sur la hauteur perdue. L'ordre de grandeur de la finesse maximale d'un parapente actuel est d'environ 8-10 en air calme. La finesse varie en fonction de l'incidence en même temps que varient la portance et la traînée.



Il existe 4 façons de calculer la finesse, en utilisant le schéma ci-dessus.

1. Finesse = distance horizontale parcourue (D) / hauteur perdue (H).

Puisque la distance horizontale parcourue et la hauteur perdue se réalise dans un même temps, la finesse = vitesse horizontale / taux de chute.

Puisque les angles  $\alpha$  et  $\alpha'$  sont identiques, les triangles droits DH et PT' (où  $T' = T$ ) sont semblables, autrement dit proportionnels.

2. Par conséquent la finesse =  $D/H = P/T$  (= Portance / traînée).

Puisque que les coefficients  $C_x$  et  $C_z$  sont proportionnels à respectivement la traînée et la portance, lorsque les autres conditions sont identiques :

3. la finesse =  $P/T = C_z/C_x$ .

Quelques calculs et exemples pratiques :

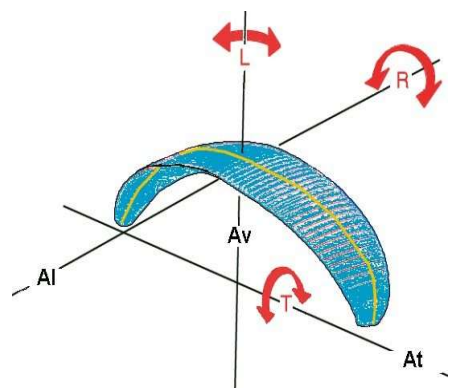
- **Q124** Un planeur de pente d'une finesse 8 vole à 800 m au-dessus du sol. Quelle est la plus grande distance qu'il peut parcourir en air calme ?  $H = 800$  m. et D est l'inconnue.
  - Finesse =  $D/H$  ou  $D = \text{finesse} \times H = 8 \times 0,8 \text{ Km} = 6,4 \text{ Km}$ .
- **Q125** Un planeur de pente d'une finesse 12 vole à 2'400 m au-dessus du sol. Quelle est la distance la plus grande qu'il peut parcourir en air calme ?  $H = 2400$  m. et D est l'inconnue.
  - Finesse =  $D/H$  ou  $D = \text{finesse} \times H = 12 \times 2,4 \text{ Km} = 28,8 \text{ Km}$ .
- Un planeur de pente a parcouru avec 900 m d'altitude en air calme la distance (la plus grande possible) de 5,4 km. Quelle est sa finesse ?  $H = 900$  m. et  $D = 5,4 \text{ Km}$ .
  - Finesse =  $D/H = 5,4 \text{ Km} / 0,9 \text{ Km} = 6$ .
- **Q126** Un planeur de pente a parcouru avec 1'400 m d'altitude en air calme la distance la plus grande possible de 7,0 km. Quelle est sa finesse ?  $H = 1400$  m. et  $D = 7 \text{ Km}$ .

- $Finesse = D/H = 7 \text{ Km.} / 1,4 \text{ Km.} = 5$ .
- **Q99, Q127, Q128** Si la finesse augmente (par exemple  $H$  diminue et/ou  $D$  augmente) l'angle  $\alpha$  (angle de plané) diminue.  
Inversement, si l'angle  $\alpha$  augmente (par exemple  $D$  diminue et/ou  $H$  augmente), la finesse diminue.
- **Q98** Si la traînée d'un planeur diminue, la portance se rapproche par rotation de la RFA, l'angle  $\alpha'$  et donc  $\alpha$  diminuent et la finesse ( $P/T=D/H$ ) augmente.  
Inversement, si la traînée augmente, la finesse diminue et l'angle de plané augmente.  
Dans cette question, une petite faute de langage s'est glissée. L'angle de finesse est bel et bien l'angle de plané, à ne pas confondre avec la finesse elle-même.
- Si le planeur  $X$  a une finesse de 10 et le planeur  $Y$  une finesse de 5 alors  $X$  peut parcourir une distance horizontale double à celle de  $Y$  pour une perte d'altitude identique.
- **Q145** Un planeur de pente vole avec une finesse 10 en air calme à une vitesse horizontale (sol) de 43 Km/h (env. 12 m/s). Quel est son taux de chute ?
  - $Finesse = \text{vit. horiz.} / \text{taux chute}$ , donc  $\text{taux chute} = \text{vit. Horiz.} / \text{finesse} = 12 / 10 = 1,2 \text{ m/s}$ .
- **Q146** Un planeur de pente vole avec une finesse 8. S'il parcourt en air calme une distance de 1'600 m, quelle est sa perte d'altitude ?
  - $Finesse = \text{distance horiz.} / \text{perte alti.}$ , donc  $\text{perte alti.} = \text{dist. horiz.} / \text{finesse} = 1600 / 8 = 200 \text{ m}$ .
- **Q147** Un planeur de pente vole avec une finesse de 9 en air calme et avec un taux de chute de 1 m/s. Quelle est sa vitesse ?
  - $Finesse = \text{vit. horiz.} / \text{taux chute}$ , donc  $\text{vit. horiz.} = \text{finesse} \times \text{taux de chute} = 9 \times 1 \text{ m/s} = 9 \text{ m/s}$ .
- **Q148** Un planeur de pente vole en air calme à une vitesse de 32,4 km/h (9m/s) et avec un taux de chute de 1,5 m/s. Quelle est sa finesse?
  - $Finesse = \text{vit. horiz.} / \text{taux chute} = 9 / 1,5 = 6$ .

## AXES ET STABILITÉ DE VOL

**Q111, Q112, Q113** Un planeur de pente peut présenter un mouvement rotatoire autour de 3 axes

- Axe vertical : le mouvement autour de cet axe s'appelle le lacet (L). C'est un mouvement d'avant - arrière des extrémités de l'aile.
- Axe longitudinal : le mouvement autour de cet axe s'appelle le roulis (R). C'est un mouvement latéral gauche- droit des extrémités de l'aile.
- Axe transversal : le mouvement autour de cet axe s'appelle le tangage (T). C'est un mouvement d'avant - arrière de l'ensemble de l'aile.



Normalement, un parapente est construit de telle manière que lorsqu'il n'est soumis à aucune commande de la part du pilote, il vole spontanément en vol rectiligne uniforme (vol équilibré). De plus, lorsqu'une force (commande du pilote) ou un mouvement extérieur (turbulences) temporaire déséquilibre momentanément un planeur, celui-ci retrouve spontanément son vol rectiligne uniforme à incidence normale. On dit que ce planeur présente des qualités de vol stables.

*Par exemple :*

**Q116** *Un planeur de pente qui passe spontanément du vol rapide (accélération du pilote) au vol rectiligne à vitesse normale, sans intervention active du pilote (lorsque celui-ci lâche l'accélérateur) a des qualités de vol stables.*

**Q114** *Un planeur de pente qui, en vol rectiligne, augmente continuellement et spontanément sa vitesse, sans intervention du pilote, a des qualités de vol instables.*

**Q115** *Un planeur de pente qui garde l'assiette (=état de vol) que lui a donné le pilote sans intervention de ce dernier a des qualités de vol indifférentes.*

**Q117, Q118, Q119** La stabilité d'un planeur peut être définie sur chacun des 3 axes de vol séparément. Un planeur de pente qui, sans intervention du pilote et en air calme, présente des mouvements :

- de lacet, n'est pas stable en direction (sur l'axe vertical)
- des changements d'incidence n'est pas stable en profondeur (sur l'axe de tangage)
- des mouvements de roulis n'est pas stable sur l'axe longitudinal

Ces dernières années (2002-2004), à cause de quelques accidents souvent fatals, on a beaucoup parlé du problème de la « neutralité en spirale ». Pour beaucoup de parapente, même « tranquilles » (homologation basse), la sortie d'une spirale serrée (suite de virages 360° serrés) n'est pas forcément spontanée et automatique mais requiert un minimum de pilotage actif. On peut donc dire que la spirale serrée pour ces parapentes tend à avoir des qualités de vol indifférentes.

## POLAIRE DES VITESSES

**Q129** Précédemment, il a été question de la polaire des forces. Il existe aussi la polaire des vitesses. Les vitesses horizontale (vitesse de vol) et verticale (taux de chute) ainsi que leur rapport (finesse) varient selon l'incidence du planeur.

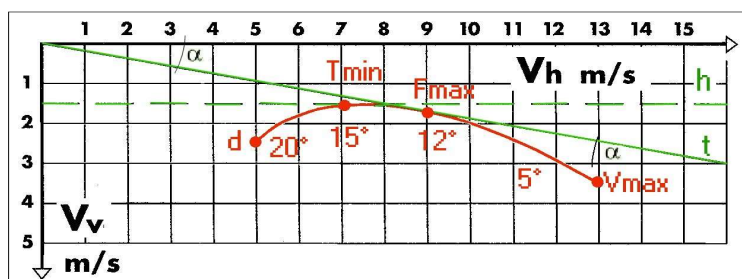
Lorsqu'on diminue l'incidence en faisant « piquer du nez » l'aile, les vitesses augmentent. Au contraire, lorsqu'on augmente l'incidence en faisant « cabrer » l'aile, les vitesses diminuent dans un premier temps puis seule la vitesse horizontale continue à diminuer alors que le taux de chute augmente à nouveau un peu.

L'ensemble des couples de vitesses entre une extrême (vitesse de vol minimale) à l'autre (vitesse de vol maximale) s'appelle la plage de vitesse.

La polaire des vitesses est une représentation graphique (graphique avec axes x-y) des vitesses horizontale (vitesse de vol) et verticale (taux de chute) sur l'ensemble de la plage de vitesse d'un planeur, sous la forme d'une courbe harmonieuse.

Les 4 valeurs en ° sur le graphique représentent 4 exemples d'incidence. Il s'agit d'un ordre de grandeur et non pas de mesures précises.

- Lorsque l'incidence devient petite (environ 5°), le planeur vole vite, on est à droite du graphique.
- À 10-12°, le planeur vole à finesse maximale ( $F_{max}$ ), autrement dit le planeur pourra voler le plus loin.



*polaire des vitesses.  $V_h$  = vitesse horizontale.  $V_v$  = vitesse verticale.  $t$  = tangente à la courbe passant par  $F_{max}$  = trajectoire à finesse max.  $h$  = tangente horizontale.  $\alpha$  = angle de plané.*

- Lorsque l'incidence devient importante (env. 15-20°) l'aile vole lentement.

Lorsque l'incidence d'un planeur volant à finesse maximale est réduite de 2°, la vitesse de vol augmente donc.

Inversement, lorsque l'incidence d'un planeur volant à finesse maximale est augmentée de 2°, la vitesse de vol diminue.

Sur la courbe de la polaire, on remarque 4 points principaux :

- Vitesse à taux de chute minimale ( $T_{min}$ ).  
Il s'agit de la vitesse horizontale à laquelle la vitesse verticale (taux de chute) est minimale. C'est le point du sommet de la courbe par laquelle passe la droite tangente  $h$ .  
*Dans l'exemple ci-dessus  $T_{min}$  = environ 7-8 m/s avec un taux de chute = 1,5 m/s.*
- Vitesse à finesse maximale ( $F_{max}$ ).

Il s'agit de la vitesse horizontale à laquelle la finesse est maximale. C'est le point de la courbe par laquelle passe la droite tangente  $t$  issue de l'origine des axes X-Y.

Dans l'exemple ci-dessus  $F_{max} =$  environ 9 m/s avec un taux de chute = 1,7 m/s. Plus pratiquement, la droite  $t$  matérialise la trajectoire à finesse maximale. On ne voit bien qu'aucune autre droite passant par la courbe et l'origine xy ne peut présenter un meilleur angle de plané  $\alpha$ .

- Vitesse maximale ( $V_{max}$ ).

Il s'agit de la vitesse horizontale maximale. La finesse n'est pas maximale.

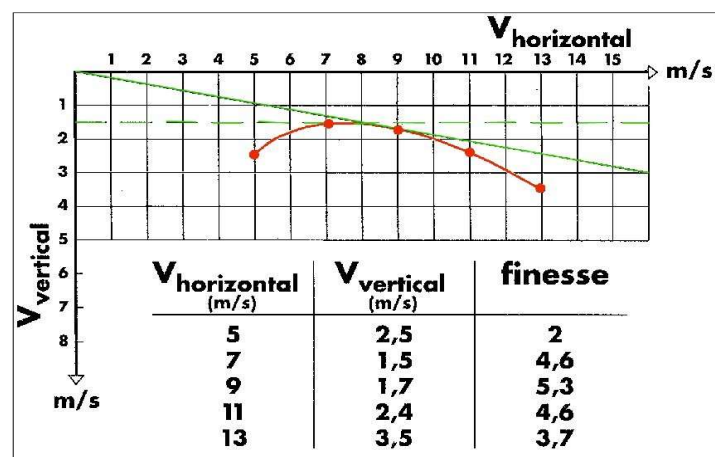
Dans l'exemple ci-dessus  $V_{max} =$  environ 13 m/s avec un taux de chute = 3,5 m/s. La finesse est donc égale à  $13/3.5=3.7$

- Vitesse de décrochage ( $d$ ).

Il s'agit de la vitesse horizontale où l'aile décroche (ne vole plus et « tombe » verticalement). Juste avant on a la vitesse minimale de l'aile.

Dans l'exemple ci-dessus  $d =$  environ 5 m/s.

Toutes les questions suivantes se basent sur le même graphique (ci-dessous). Les valeurs de vitesse et de finesse données sous forme de tableau correspondent à la courbe de la polaire dessinée juste au-dessus du tableau. En fait, pour répondre aux questions, il n'y a pas besoin de regarder la courbe. Toutes les réponses se trouvent sur le tableau.



- **Q130** Quelle est la vitesse de vol (horizontale) correspondant à la finesse maximale ? Dans la colonne « finesse » du tableau, on trouve la finesse maximale. Elle est de 5.3. A la même hauteur, on va chercher, dans la colonne de la vitesse horizontale, la valeur de la vitesse de vol correspondante qui est d'environ 9 m/s (33 km/h).
- **Q131** Quelle est la meilleure finesse ? Dans la colonne « finesse » du tableau, on trouve la finesse maximale. Elle est de 5.3.
- **Q132** Quelle est la vitesse de vol correspondant au taux de chute le plus faible ? Dans la colonne «  $V_{vertical}$  » (c.-à-d. le taux de chute) du tableau, on trouve la valeur minimale. Elle est de 1,5 m/s. A la même hauteur, on va chercher, dans la colonne de la vitesse horizontale, la valeur de la vitesse de vol correspondante qui est d'environ 7 m/s (26 km/h).
- **Q133** Quelle est la finesse à la vitesse du taux de chute minimum ? Dans la colonne «  $V_{vertical}$  » (c.-à-d. le taux de chute) du tableau, on trouve la valeur minimale. Elle est

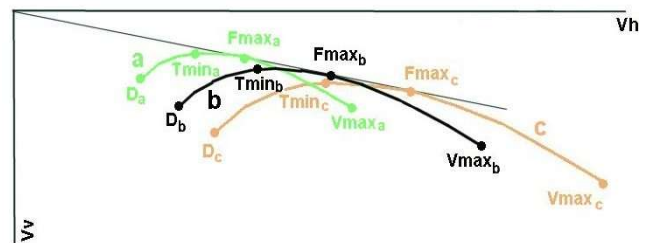
de 1,5. A la même hauteur, on va chercher, dans la colonne « finesse », la valeur correspondante qui est de 4,6.

- **Q134** Quelle est la vitesse de vol minimale ? Dans la colonne «  $V_{horizontal}$  » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur minimale. Elle est de 5 m/s. Il s'agit de la vitesse en dessous de laquelle l'aile décroche. La vitesse de vol minimale pratique est donc légèrement supérieure, mettons 5,6 m/s (20 km/h).
- **Q135** Quelle est la finesse à la vitesse de vol minimale ? Dans la colonne «  $V_{horizontal}$  » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur minimale. Elle est de 5 m/s. A la même hauteur, on va chercher, dans la colonne « finesse », la valeur correspondante qui est de 2.
- Question 138 : Quelle est la vitesse de vol la plus élevée ? Dans la colonne «  $V_{horizontal}$  » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur maximale. Elle est de 13 m/s environ (48 km/h).
- **Q136** Quelle est la finesse à la vitesse maximale ? Dans la colonne «  $V_{horizontal}$  » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur maximale. Elle est de 13 m/s. A la même hauteur, on va chercher, dans la colonne « finesse », la valeur correspondante qui est de 3,7.

### CHARGE ALAIRE ET POLAIRE DES VITESSES

La charge alaire modifie un peu la polaire d'une aile. Plus la charge alaire est grande et plus la RFA sera grande pour que l'équilibre des forces soit réalisé dans un vol rectiligne uniforme. Puisque la RFA augmente et diminue avec la vitesse du vent relatif (est proportionnelle à la vitesse au carré), l'inverse est aussi vrai pour assurer cet équilibre.

Autrement dit, la vitesse propre de planeur augmente ou diminue avec l'augmentation ou la diminution de la charge alaire. Comme la vitesse propre d'un planeur se décompose en vitesse horizontale ( $V_h$ ) et en vitesse verticale ( $V_v$ ), ces 2 vitesses augmentent ou diminuent ensemble avec la charge alaire à chaque incidence.



*a = charge alaire faible, b = charge alaire moyenne, c = charge alaire forte*

Par exemple, les valeurs  $d$ ,  $T_{max}$ ,  $F_{max}$ ,  $V_{max}$  de la figure précédente augmentent ou diminuent avec l'augmentation respectivement la diminution de la charge alaire.

Cependant le rapport des vitesses horizontale et verticale (c'est-à-dire la finesse) ne change pas pour une incidence donnée sauf si la charge alaire est soit beaucoup trop petite soit beaucoup trop grande (nettement en dehors de la fourchette) ce qui entraîne une déformation de profil donc un changement de comportement de vol de l'aile.

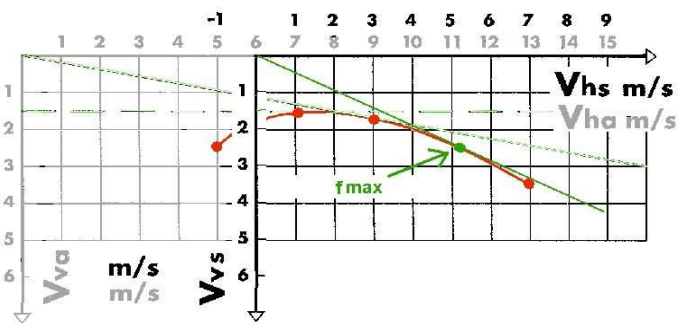
**Q66, Q67** La vitesse de décrochage obéit aux mêmes règles : elle diminue, respectivement augmente avec la diminution respectivement l'augmentation de la charge alaire.



## POLAIRE DES VITESSES DANS UNE MASSE D'AIR EN MOUVEMENT

## VENT DE FACE / VENT ARRIÈRE

Jusqu'à maintenant, on a étudié la polaire des vitesses et la finesse d'un planeur qui évoluait dans une atmosphère parfaitement calme sans mouvement vertical ou horizontal aucun (sans vent). Lorsqu'il y a du vent (vertical ou horizontal), la polaire et la finesse du planeur ne changent pas par rapport à la masse d'air mais changent par rapport au sol.



Par exemple imaginons un vent de face de 6 m/s.

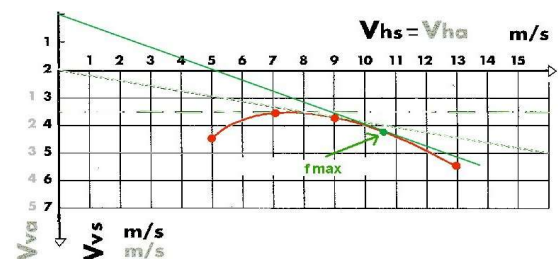
- Toute la plage de vitesse de vol (horizontal) par rapport au sol est diminuée de 6 m/s alors que la plage de vitesse par rapport à la masse d'air ne change pas. Cela revient au même de déplacer l'axe du taux de chute et l'origine des axes vers la droite de 6 m/s.
- Avec une vitesse propre dans la masse d'air de 7 m/s, la vitesse de vol par rapport au sol sera de 1 m/s.
- Avec une vitesse propre de 10 m/s, on aura 4 m/s par rapport au sol.
- A vitesse de vol (horizontal) minimale (près du décrochage), à 5 m/s par rapport à la masse d'air, l'aile recule de 1 m/s par rapport au sol (-1 m/s).

**Q140** Pour voler à finesse maximale face au vent, il faut accélérer son aile. Sur la figure ci-dessus, la tangente à la polaire venant de la nouvelle origine des axes donne un point de contact avec la polaire située à une vitesse de 11 m/s dans la masse d'air ou de 5 m/s par rapport au sol. C'est à cette vitesse que la finesse est maximale pour notre planeur face à un vent de 6 m/s. La finesse vaut alors environ  $5/2.5 = 2$  seulement. Plus le vent de face est fort et plus il faut voler vite pour obtenir une finesse maximale.

## VENT ASCENDANT / VENTE DESCENDANT

Si l'on vole vent arrière, un raisonnement identique montre qu'il faut voler à une vitesse horizontale proche de la vitesse de taux de chute minimale pour avoir la finesse maximale.

Imaginons maintenant l'évolution d'un planeur dans une masse d'air descendante à 2 m/s. Cela revient au même que de déplacer toute la polaire vers le bas de 2 m/s ou de remonter l'origine des axes de 2 m/s.



**Q139** Pour obtenir la finesse maximale (tirer la tangente à la polaire depuis la nouvelle origine des axes), il faut à nouveau voler plus vite qu'à finesse maximale en air calme. Cependant, si l'on vole à une incidence donnée (par exemple au taux de chute minimal), la vitesse de vol



(sous-entendu horizontale) ne varie pas que ce soit en air calme, en air ascendant ou en air descendant.

Exemples :

- **Q137** A quelle vitesse de vol le planeur de pente avec une polaire présentée dans le document doit-il voler avec un vent de face de 8 m/s (29 km/h) pour parcourir, dans ces conditions, la plus grande distance possible (c.-à-d. avec la plus grande finesse possible face à ce vent) ?

Graphiquement, on voit que la tangente (à la polaire) qui passe par l'origine formé par le point 8 m/s sur l'axe des vitesses horizontales touche la polaire à une vitesse horizontale de 13 m/s (ou  $13 - 8 = 5$  m/s par rapport au sol).

On peut vérifier par calcul : si l'aile vole à 11 m/s (ou 3 m/s par rapport au sol) sa finesse sol sera de  $3 / 2,4 = 1,25$ .

Si l'aile vole à 13 m/s (ou 5 m/s par rapport au sol) sa finesse sol sera de  $5 / 3,5 = 1,43$ .

Les valeurs de 2,4 et de 3,5 étant bien entendu les taux de chute respectifs à 11 et 13 m/s de vitesses horizontales par rapport à l'air (vent relatif) ou à 3 et 5 m/s de vitesses horizontales par rapport au sol.

- **Q141, Q142** Un libériste vole à une vitesse de 36 km/h (10 m/s) et à un taux de chute de 1 m/s. Il atteint une zone de courant descendant de 1 m/s. Quels sont la vitesse et le taux de chute (attention, on sous-entend par rapport au sol) à l'intérieur du courant descendant ?

La vitesse horizontale ne change pas (10 m/s), mais le taux de chute devient  $1 + 1 = 2$  m/s.

- Quelle est la finesse si la vitesse de vol est maintenue ?

La finesse est donc  $10 / 2 = 5$  alors que sans vent descendant la finesse est de  $10 / 1 = 10$ . La finesse passe donc de 10 à 5.

- **Q143, Q144** Un planeur de pente vole à une vitesse de 54 km/h (15 m/s) et avec un taux de chute de 2 m/s. Sur sa trajectoire de vol souffle un vent de face de 18 km/h (5 m/s). Quels sont son taux de chute et sa vitesse (horizontale) et quelle est sa finesse par rapport au sol ?

Le taux de chute ne change pas (2 m/s). La vitesse de vol est diminuée de 5 m/s, elle devient  $15 - 5 = 10$  m/s (36 km/h). La finesse =  $10 / 2 = 5$ .

## EQUILIBRE DES FORCES D'UN PLANEUR EN VIRAGE, FACTEUR DE CHARGE

En virage stabilisé (c.-à-d. qu'il a déjà été initialisé et qu'il présente une courbe régulière) une force horizontale supplémentaire s'ajoute au poids total volant (P), c'est la force centrifuge (Fc), dirigée vers l'extérieure du virage.

Puisque P (vertical et dirigé vers le bas) et Fc (horizontal et dirigé vers l'extérieur) sont deux forces de même origine, les règles d'addition des vecteurs s'appliquent.

La résultante R (appelé aussi charge effective) est dirigée obliquement en bas et vers l'extérieur. Elle présente une valeur plus élevée que P.

Plus le virage est serré (angle d'inclinaison de virage  $i$  élevé), plus Fc est grande et plus R est grand et incliné.

**Q150** On quantifie R en fonction de P par le nombre de fois que R est plus grand que P. Ce nombre s'appelle le facteur de charge. Donc le facteur de charge = R divisé par P.

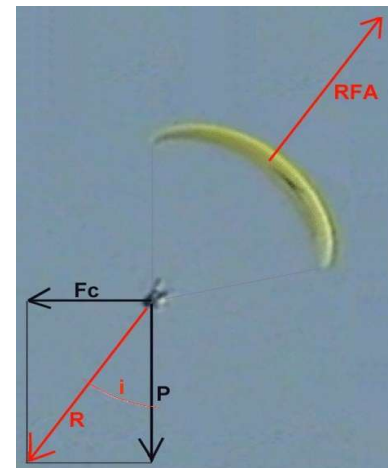
**Q151** Le facteur de charge se mesure en G. Si  $P = 100$  kg et que  $R = 250$  kg, le facteur de charge =  $250 / 100 = 2,5$  G

Dans un virage stabilisé, la résultante des forces aérodynamiques (RFA) va s'opposer exactement à R (et plus à P comme dans un vol droit stabilisé). Plus le virage est serré, plus Fc est grande, plus R est grand et incliné vers le bas et l'extérieur et plus la RFA est grande et inclinée vers le haut et l'intérieur. Puisque la charge alaire = RFA / surface de l'aile et que la surface de l'aile reste identique, la charge alaire augmente aussi dans les virages, dans les mêmes proportions que la RFA.

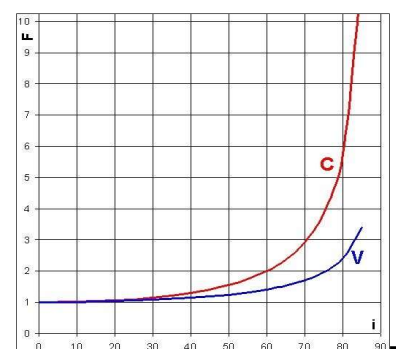
On se souvient également que plus la vitesse du vent relatif (vitesse propre de l'aile par rapport à l'air) augmente plus la RFA est grande (elle augmente au carré de la vitesse). Si la vitesse double, la RFA est multipliée par 4. L'inverse est aussi vrai.

**Q152** Dans un virage stabilisé, la RFA augmente pour équilibrer (« neutraliser ») R. Pour obtenir cette RFA augmentée, la vitesse du planeur va devoir elle-même augmenter, dans une moindre mesure. Autrement dit, dans un virage c'est l'ensemble de la plage de vitesse qui augmente y compris la vitesse minimale. Lors d'un passage d'un vol droit stabilisé à un virage (aussi stabilisé), la charge alaire et la vitesse de vol minimale augmentent.

La figure ci-contre montre la relation (courbe c) entre l'angle d'inclinaison d'un virage et le facteur de charge ainsi que la relation (courbe v) entre l'angle d'inclinaison d'un virage et le facteur d'augmentation de la plage de vitesse.



Equilibre des forces d'un planeur en virage. RFA = résultante des forces aérodynamiques.  $i$  = angle d'inclinaison de l'aile. Fc = force



*Par exemple :*

- *À 30° d'inclinaison, l'augmentation de la charge et de la vitesse est insignifiante.*
- *A 45°, le facteur de charge = environ 1,4 G et le facteur d'augmentation des vitesses 1,2.*
- *A partir de 45°, les choses vont beaucoup et de plus en plus vite.*
- *A 60°, on a 2 G et les vitesses augmentent de 1,4. Si on décrochet en ligne droite à 20 Km/h, on peut décrocher dans un tel virage à 28 Km/h.*
- *A 70° on subit théoriquement 3 G et à 80° 6 G !*