

Réponses commentées du QCM de l'examen théorique FSVL pour pilotes de parapente, première partie :

AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE **DE VOL**

J. Oberson, instructeur parapente, FSVL/OFAC 4427

www.soaringmeteo.com

2^{ème} édition 2005

Copyright

TABLE DES MATIERES

<i>Vecteurs et addition de vecteurs.....</i>	<i>2</i>
<i>Traînée. Facteurs influençant la traînée</i>	<i>5</i>
<i>Surface oblique d'un objet plat soumise au vent . Portance et traînée</i>	<i>8</i>
<i>Profil d'une aile</i>	<i>11</i>
<i>Polaire des forces, incidence</i>	<i>13</i>
<i>Géométrie d'une aile. Charge alaire</i>	<i>15</i>
<i>Equilibre des forces d'un planeur en vol rectiligne.....</i>	<i>18</i>
<i>Finesse d'une aile</i>	<i>19</i>
<i>Axes et stabilité de vol</i>	<i>21</i>
<i>Polaire des vitesses</i>	<i>23</i>
<i>Polaire des vitesses dans une masse d'air en mouvement.....</i>	<i>26</i>
<i>Equilibre des forces d'un planeur en virage, facteur de charge</i>	<i>28</i>

Vecteurs et addition de vecteurs

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), par exemple une force de 10 kg ou de 16 kg ou une vitesse de 35 km/h, leur **origine** (centre de l'objet qui subit l'un de ces phénomènes physique) et 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 (figure **A1**) : 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.

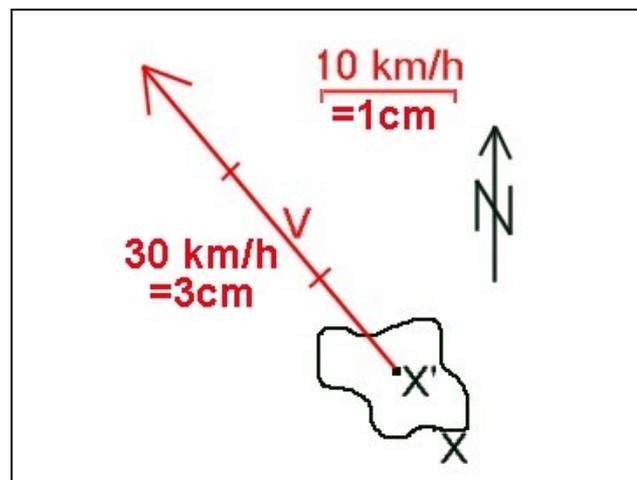


Figure A1 : exemple d'un vecteur V représentant une vitesse. Si 1 cm correspond arbitrairement à 10 Km/h alors 3 cm = 30 Km/h. V se dirige vers le NW et s'applique à l'objet X au point X' .

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.

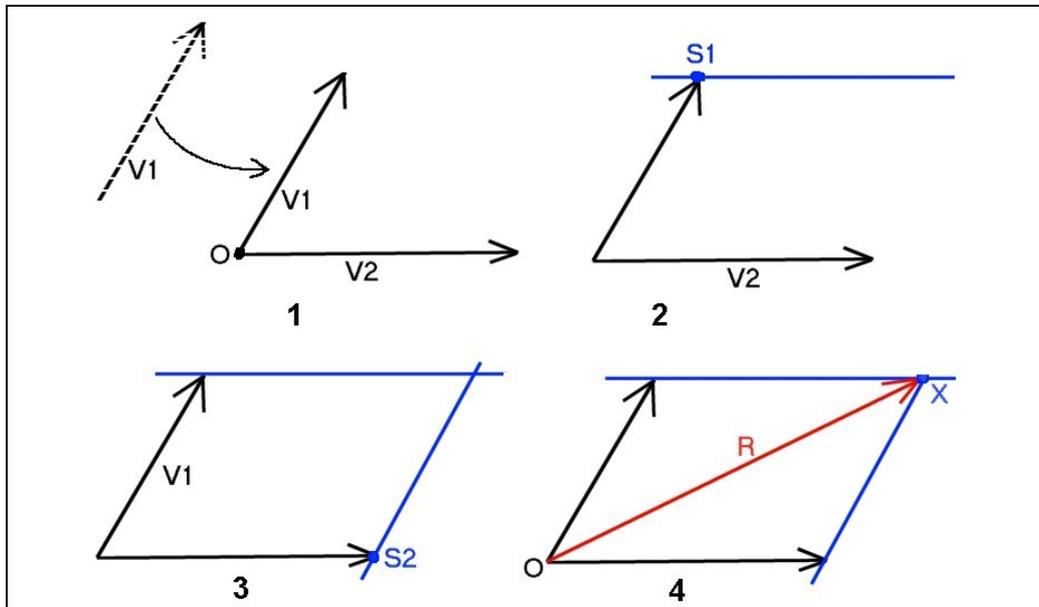


Figure A2 : (1) Glisser V1 sans changer de direction, afin que les deux origines de V1 et V2 se confondent. (2) Tirer de S1 une parallèle à V2. (3) Tirer de S2 une parallèle à V1. (4) Le vecteur résultant R a pour origine O et pour fin l'intersection X des deux parallèles.

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.

Pour les 5 questions 001 à 005, on utilise le même graphique de base: voir figure A3. A gauche il y a 5 exemples de vecteurs F1 à F5. A droite il y a 4 exemples de vecteurs résultants R1 à R4.

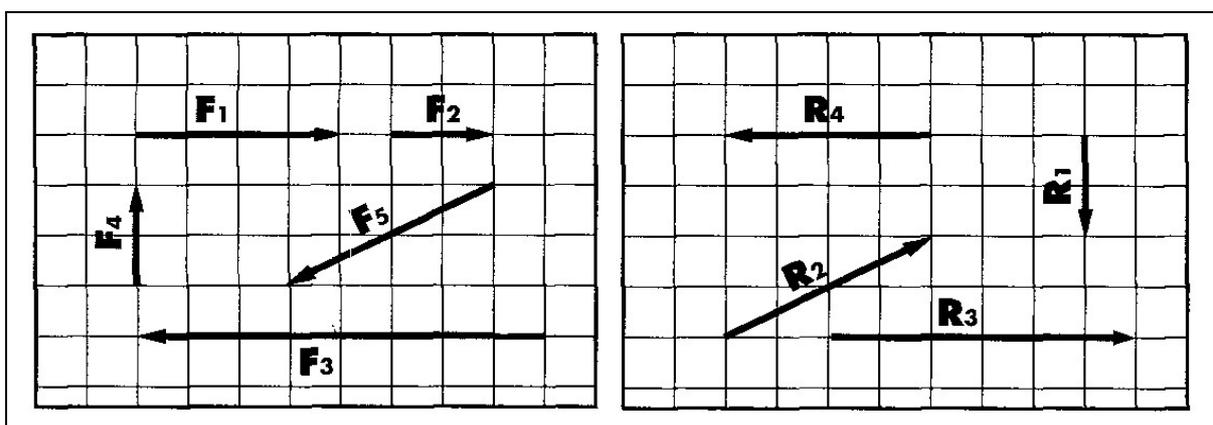


Figure A3 : graphique de base utilisé pour les questions 1 à 5 (aérodynamique) du QCM FSVL de l'examen théorique pour pilote de vol libre.

Question 001. Il faut additionner F1 et F2. Il s'agit du cas particulier où les deux vecteurs sont parallèles et de même sens. Voir figure A4. R correspond donc à R3 de la figure A3.

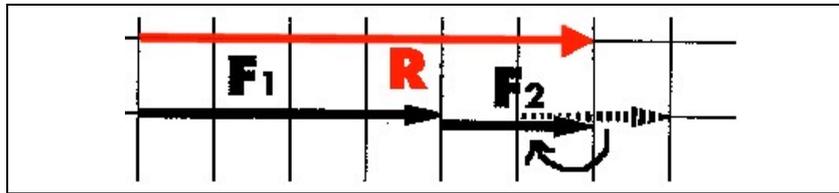


Figure A4 : addition de F_1 et F_2

Question 002. Il faut additionner F_1 et F_3 . Il s'agit aussi du cas particulier où les deux vecteurs sont parallèles et de sens opposé. Voir figure A5. R correspond donc à R_4 de la figure A3.

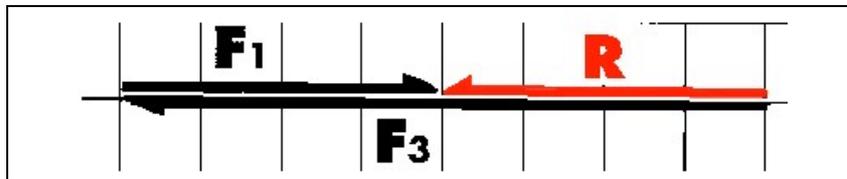


Figure A5 : addition de F_1 et F_3

Question 003. Il faut additionner F_1 et F_4 . Voir figure A6. R correspond donc à R_2 .

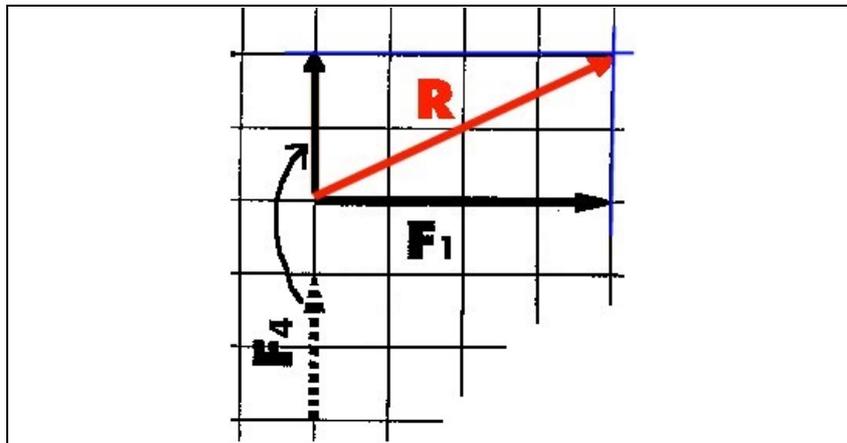


Figure A6 : addition de F_1 et F_4

Question 004. Il faut additionner F_1 et F_5 . Voir figure A7. R correspond donc à R_1 .

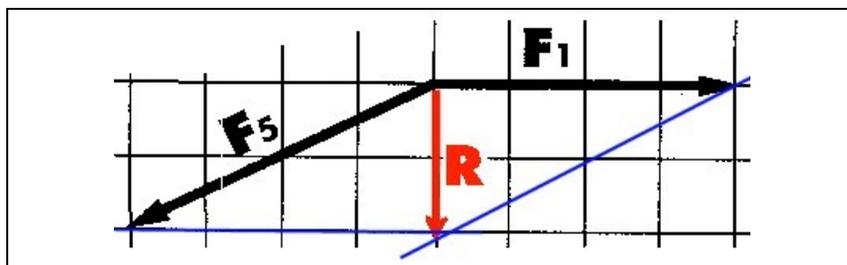


Figure A7 : addition de F_1 et F_5

Question 005. Il faut additionner F_4 et F_5 . Voir figure A8. R correspond donc à R_4 .

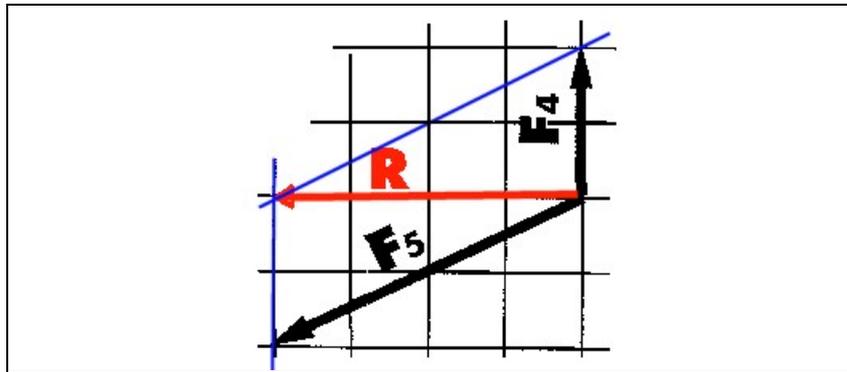


Figure A8 : addition de F4 et F5

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 ».

Traînée. Facteurs influençant la traînée

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 N = environ 1 kg.

4 facteurs influencent la traînée d'un objet : **(1)** La surface de l'objet exposée au vent, **(2)** la vitesse du vent, **(3)** la densité de l'air et **(4)** 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. Voir figure **A9** et **question 006**. 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. **Questions 006, 014, 023, 032, 041**. Pour la **question 041**, la réponse juste « les caractéristiques de surface du corps » implique à la fois la surface de l'objet exposée au vent et la forme de cet objet.

(1) 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. Voir figure **A9**. **Question 006**.

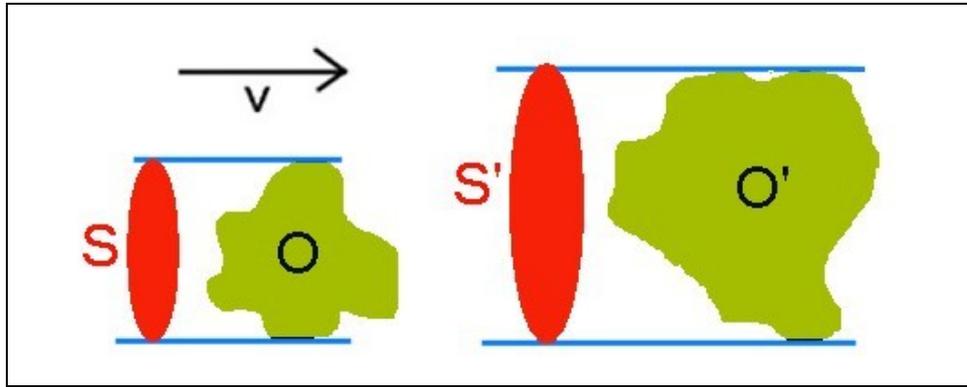


Figure A9 : La surface S de l'objet O exposé au vent V est plus petite que la surface S' de l'objet O' lui-même plus grand que O .

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.

Questions 007 à 009. Voir figure A10.

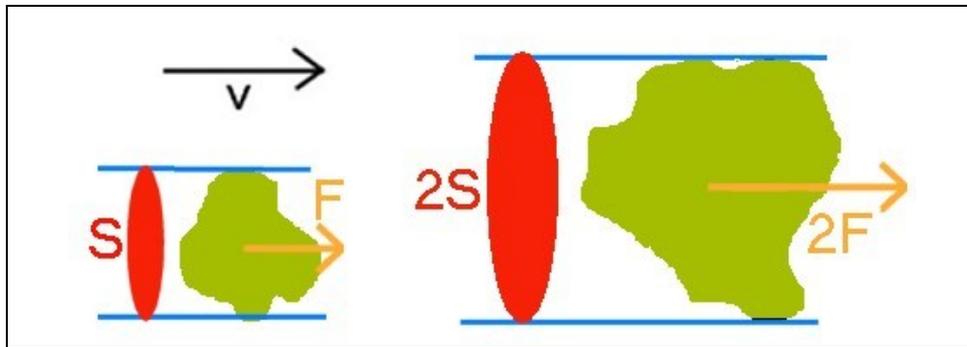


Figure A10 : Pour un vent V identique, si par exemple la surface d'un objet exposé à ce vent double alors la traînée F double aussi.

Autre exemple : Si la surface d'exposition au vent d'un objet passe de 2 m² à 4 m², cette surface double et donc la traînée double. Si celle-ci était de 300 N (Newtons), elle sera de 600 N. Le fait que la vitesse du vent est donnée à 30 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. **Question 010.** Exemples semblables : si la surface passe de 2 m² à 1 m² (diminue de moitié), de 8 m² à 2 m² (diminue d'un facteur 4) ou de 0.5 m² à 3 m² (augmente d'un facteur 6), la traînée passe respectivement de 300 N à 150 N (diminue de moitié), de 1200 N à 300 N (diminue d'un facteur 4) ou de 150 N à 900 N (augmente d'un facteur 6). **Questions 011 à 013.**

(2) 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. Plus exactement, la traînée augmente proportionnellement à la valeur de la vitesse élevée au carré. Voir figure A11. 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. **Question 015.**

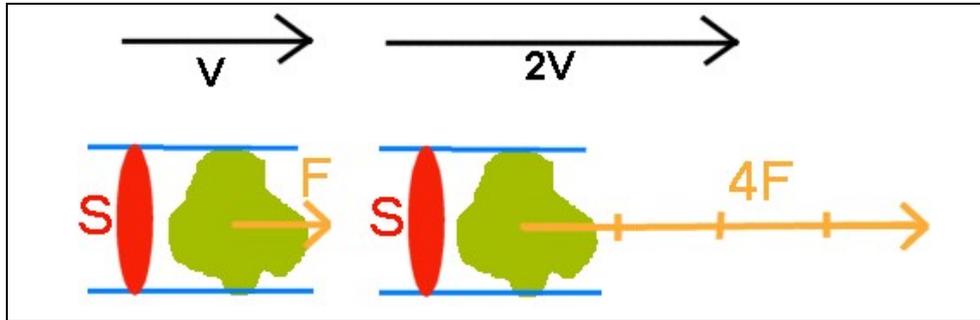


Figure A11 : Pour une surface identique, si par exemple la vitesse V du vent double alors la traînée F de l'objet soumis à ce vent quadruple.

Si cette vitesse triple, quadruple ou diminue de moitié, la traînée est multipliée par 9, par 16 ou est divisée par 4 respectivement. **Questions 016 à 018.** Autre exemple plus concret : Si la vitesse du vent passe de 30 à 60 Km/h (la vitesse double), la traînée quadruple. Si celle-ci était de 300 N (Newtons), elle sera de 1200 N. Le fait que la surface exposée au vent = 2 m² et que tout se passe au niveau de la mer ne change rien au problème posé. **Question 019.** Exemples semblables : Si la vitesse du vent passe de 30 à 90 (triple), de 80 à 40 (diminue de moitié) ou de 20 à 60 km/h (triple), quelque soit la surface exposée au vent, la traînée passera respectivement de 100 à 900 N (facteur 3 au carré), de 1200 à 300 N (facteur 0.5 au carré) ou de 100 à 900 N (facteur 3 au carré). **Questions 020 à 022.**

(3) 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. Voir figure A12.

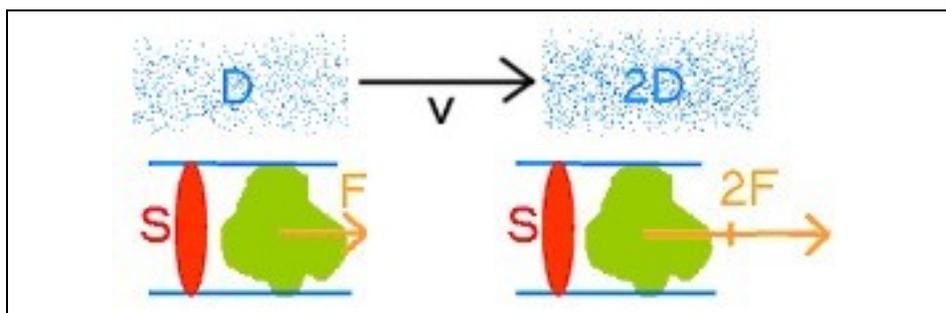


Figure A12 : Pour une surface et un vent V identiques, si par exemple la densité D de l'air double alors la traînée F de l'objet soumis à ce vent double aussi.

Si la densité de l'air double ou diminue de moitié, de même la traînée double ou diminue de moitié respectivement. **Questions 024 et 025.**

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. 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. **Question 026.** 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. 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. **Question 027.** 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. **Questions 028 à 031. Truc mnémotechnique** : la somme doit égaler 100. 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**.

(4) 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. Voir figure **A13**. Le nombre qui caractérise la façon dont la forme d'un objet influence la traînée s'appelle coefficient C_x . **Question 033**. Par exemple, l'objet **a** avec une surface plane perpendiculaire au flux d'air (vent) a un C_x de 1, l'objet creux **b** offre une plus grande résistance au vent est a donc un C_x supérieur de 1,3, l'objet « aérodynamique » **c** a un C_x très petit valant 0,08 tandis que l'objet **d** a une forme aérodynamique favorable mais non optimale avec un C_x valant 0,17. **Questions 037 à 040**. Autres applications : Dans les mêmes conditions de vent et de surface, la traînée d'un objet avec un C_x de 1,3 sera 1,3 X plus grande que celle d'un objet avec un C_x de 1. La traînée du premier objet sera donc de 30 % supérieure. **Question 034**. 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 X ou 20 X moins de traînée. **Questions 035 et 036**.

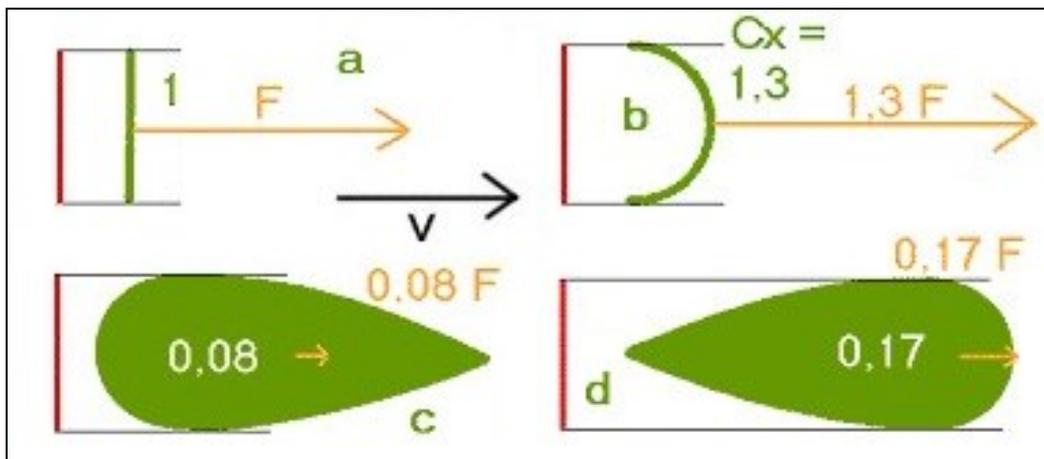


Figure A13 : Pour des surfaces et un vent V identiques, la traînée F varie en fonction de la forme de l'objet soumis au vent. Par exemple l'objet **b** à une traînée 1,3 X plus grande que celle de **a** et l'objet **c** a une traînée 0,08 X plus petite que celle de **a**.

Surface oblique d'un objet plat soumise au vent . Portance et traînée

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, et la **portance**, perpendiculaire au vent, du côté de l'extrados. Voir figure **A14**.

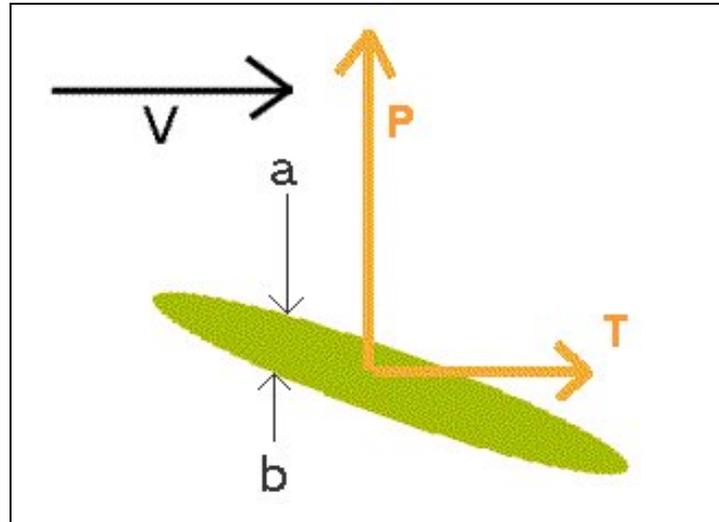


Figure A14 : Traînée T et portance P d'un objet plat soumis obliquement au vent V . a = extrados, b = intrados.

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 et **(4)** la forme et l'inclinaison par rapport au vent (incidence) de l'objet.

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).

Pour le point **4**, les coefficients de la traînée et de la portance, respectivement C_x et C_z , dépendent non seulement de la forme de l'objet (figure A15) mais aussi de l'inclinaison de l'objet plat par rapport à la direction du vent (figure A16). Cette inclinaison s'appelle **incidence**.

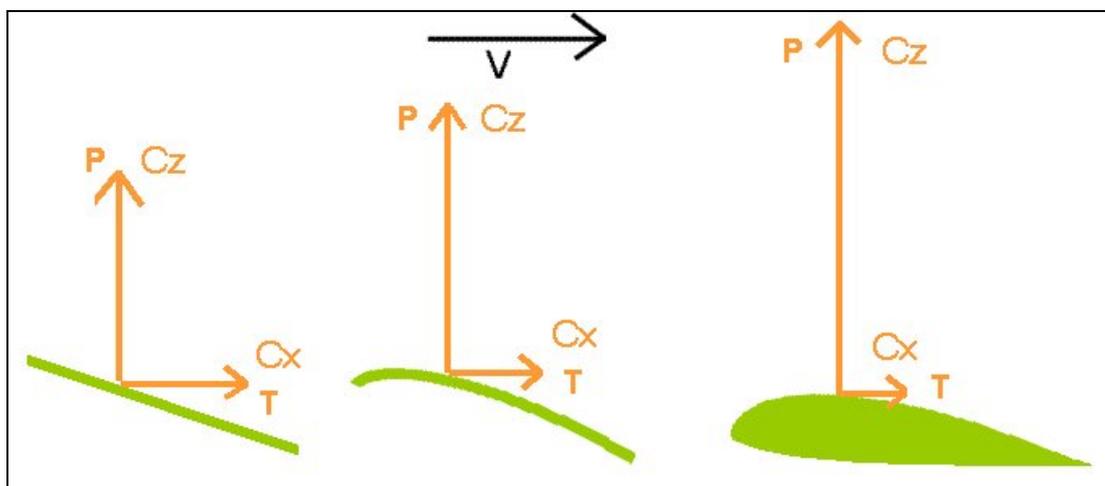


Figure A15 : Traînée T et portance P , ou respectivement C_x et C_z , d'un objet plat soumis obliquement au vent V : Plus le profil de l'objet ressemble à une aile aérodynamique et plus P ou C_z devient grand par rapport à T ou C_x .

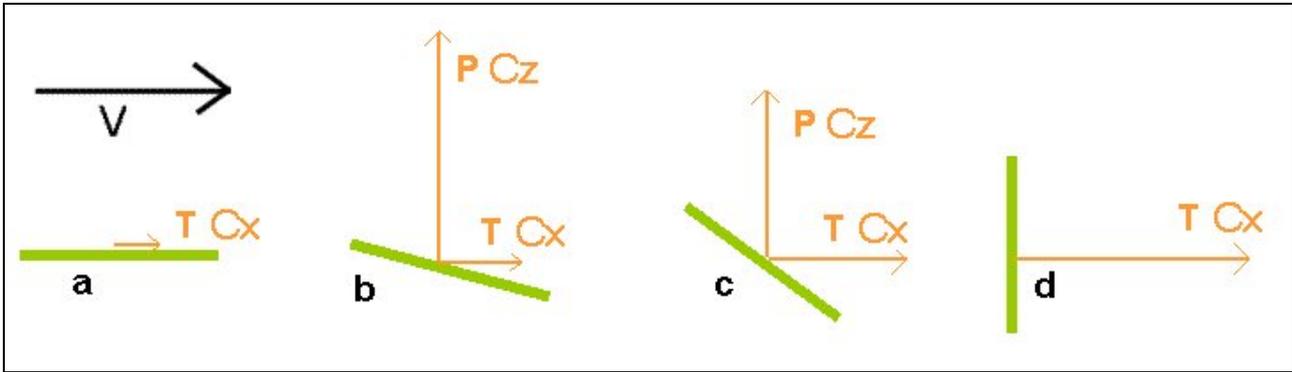


Figure A16 : Traînée T et portance P , ou respectivement C_x et C_z , d'un objet plat soumis obliquement au vent V , en fonction de l'incidence. a = incidence nulle : P nul et T très faible. b = incidence faible : P maximal et T faible. c = incidence moyenne : P moyen et T moyen. d = incidence maximale (surface perpendiculaire au vent) : P nul et T maximal.

On peut maintenant répondre aux questions 050 et 056 :

Question 050. La portance dépend entre autre de l'incidence. Il y a, parmi les réponses à choix, une proposition « piège » qui est fautive, 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.

Question 056. La portance dépend des 4 facteurs suivants : Surface de l'aile, coefficient de portance, densité de l'air, 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. Voir figure A17. Trois remarques :

- (1) 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. **Question 097.** 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. **Question 098.**
- (2) 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° , la répartition de la portance est donc de $2/3$ sur l'extrados et $1/3$ sur l'intrados. **Question 054.**
- (3) 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. **Question 055.**

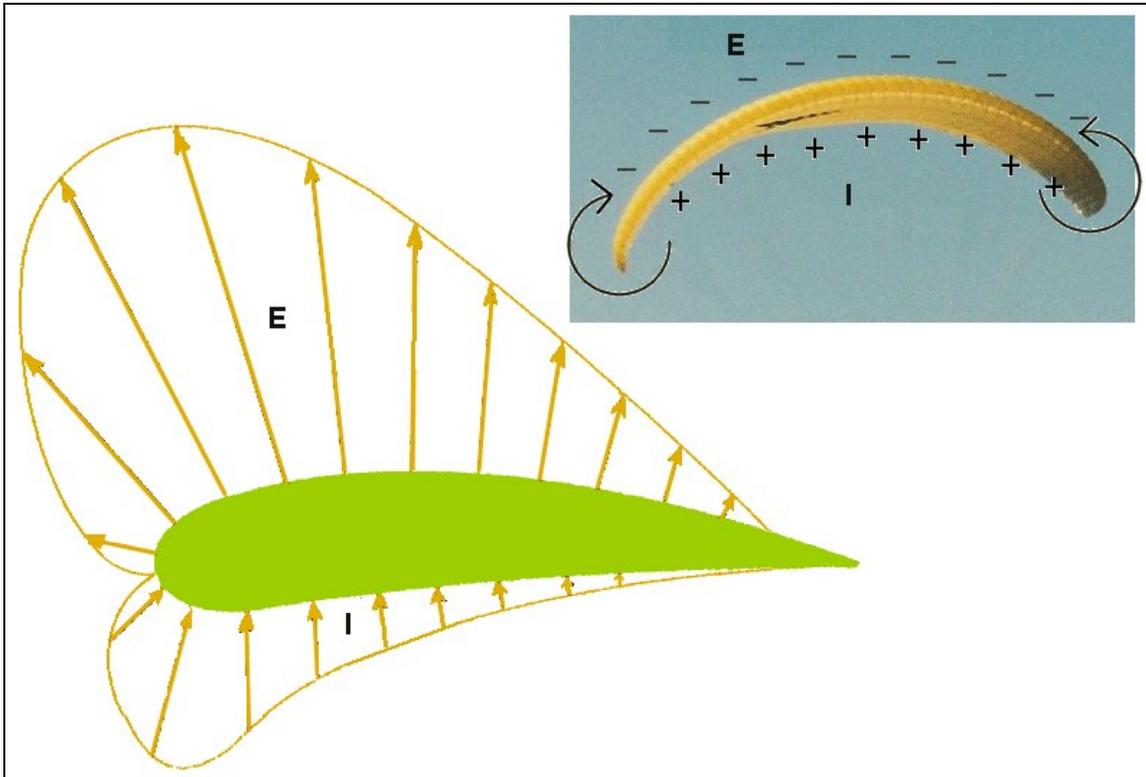


Figure A17 : Répartition des forces aérodynamiques autour d'un profil. E = extrados = aspiration. I = intrados = pression.

Profil d'une aile

Le profil d'une aile est la forme de la section longitudinale (sens avant-arrière) de cette aile. Figure A18. 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. **Question 048.** Le profil est un des éléments importants qui définissent les caractéristiques, notamment les performances, de vol d'une aile. **Question 047.**

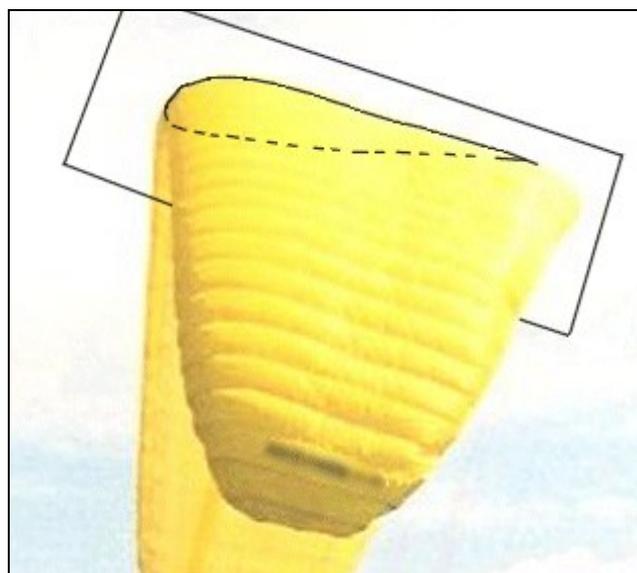


Figure A18 : Profil d'une aile.

Segments et points géométriques remarquables d'un profil :

Voir figure A19. Questions 042-046 et 049.

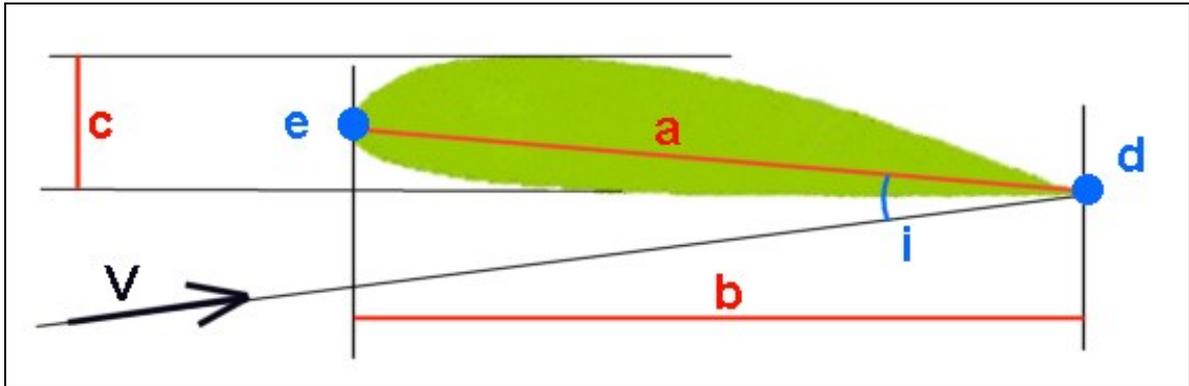


Figure A19 : Segments et points géométriques remarquables d'un profil.

- 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.

Points aérodynamiques remarquables d'un profil :

Voir figure A20. Questions 062-065, 068, 071.

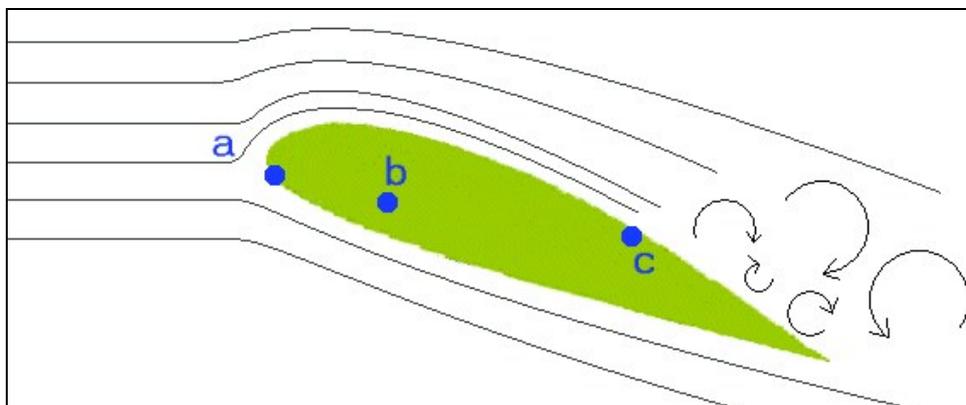


Figure A20 : Points aérodynamiques remarquables d'un profil.

- 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.
- Centre de poussée **b**, le point d'application de l'ensemble des forces aérodynamiques (portance et traînée).
- Point de décrochage **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. Par exemple le point de stagnation. **Questions 069 et 070.** Voir figure **A21**. 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 : figure **A21** droite. 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 : figure **A21** gauche.

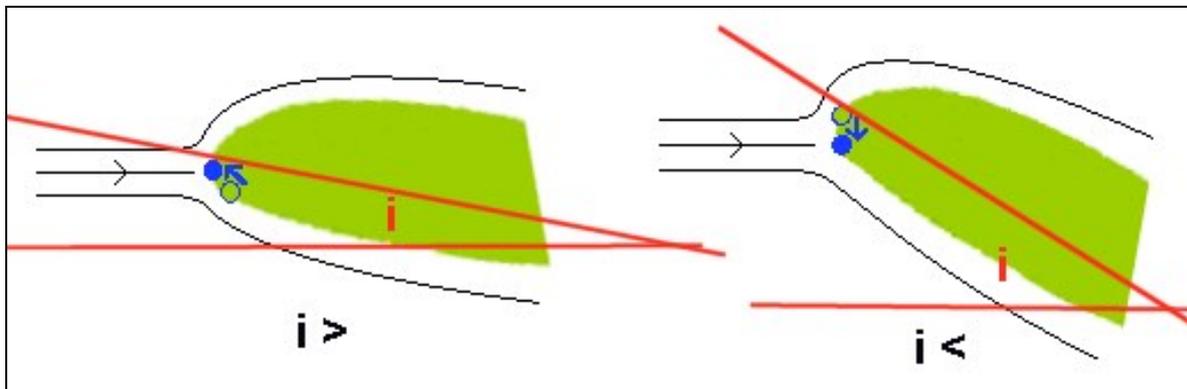


Figure A21 : Déplacement du point de stagnation en fonction de l'incidence. $i >$ = diminution et $i <$ = augmentation d'incidence.

Polaires des forces, incidence

La répartition des forces (portance et traînée) varie en fonction de l'incidence. Figure **A22**. **Questions 051-053.**

- 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.
- 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.

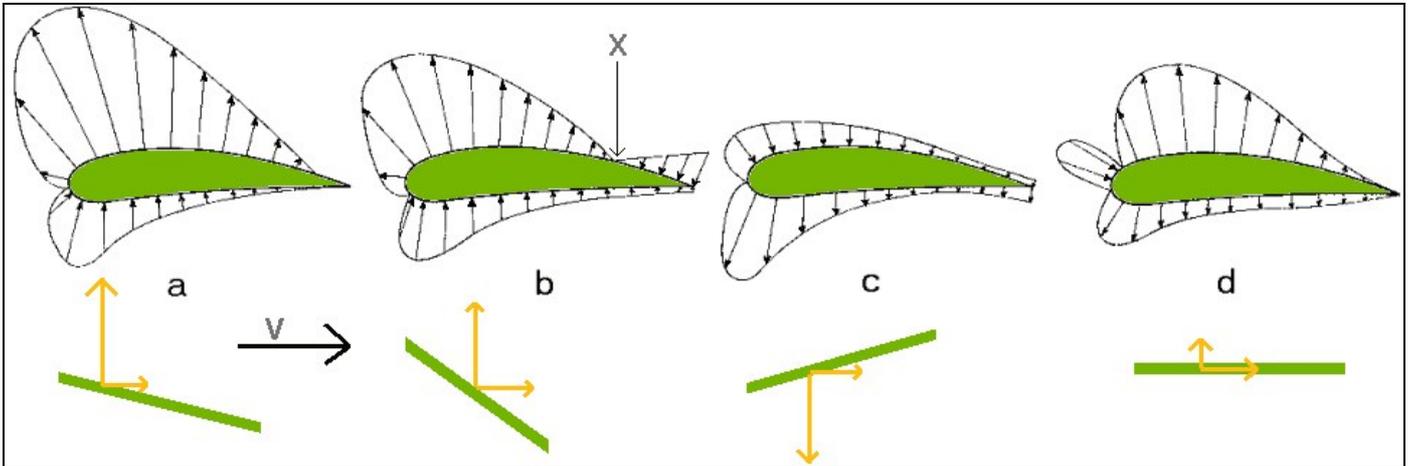


Figure A22 : Répartition des forces aérodynamiques autour d'un profil en fonction de l'incidence.

- 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.
- 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.

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**. Voir figure **A23**. Les valeurs sur le graphique ne sont que des ordres de grandeur donnés à titre indicatif et n'ont pas la prétention d'être parfaitement exactes.

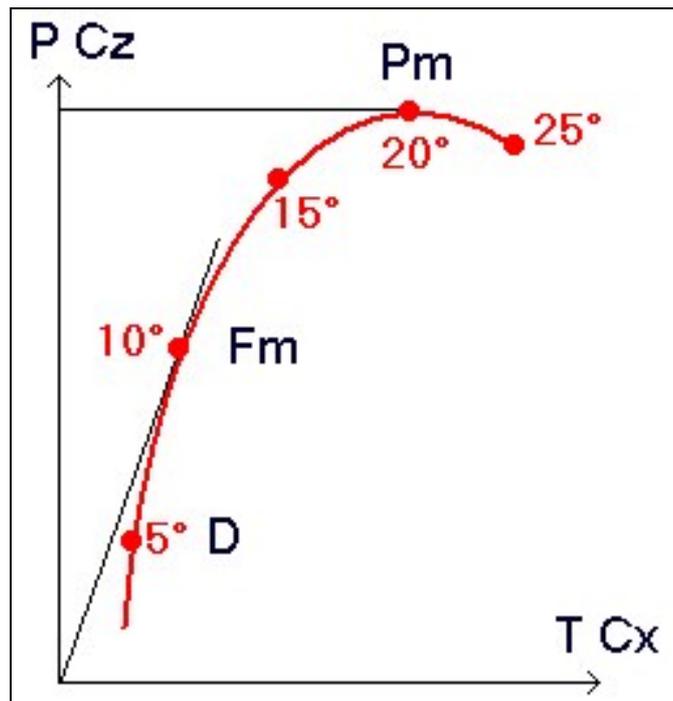


Figure A23 : Polaire des forces aérodynamiques. Les valeurs 5°, 10°, 15°, 20° et 25° représentent les diverses incidences en degré (ordre de grandeur).

Le rapport entre la portance et la traînée d'une aile (profil) donnée dépend donc avant tout de l'incidence. **Question 061.** 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, 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. 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. **Questions 058 et 060.**

Géométrie d'une aile. Charge alaire

Envergure : écart (longueur) entre les deux extrémités latérales gauche et droite d'une aile. **Question 072.** Elle est exprimée en générale en m. On distingue l'envergure « à plat » (effective), mesurée sur une aile étalée au sol et une envergure projetée mesurée sur la projection au sol (ombre) de l'aile gonflée. Voir figure **A24**. L'envergure « à plat » est évidemment toujours plus grande que l'envergure projetée.

Surface : surface totale de l'aile. Elle est exprimée en générale en m². On distingue la surface « à plat » (effective), mesurée sur une aile étalée au sol et une surface projetée, mesurée sur la projection au sol (ombre) de l'aile gonflée. Voir figure **A24**. **Question 101.** 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.

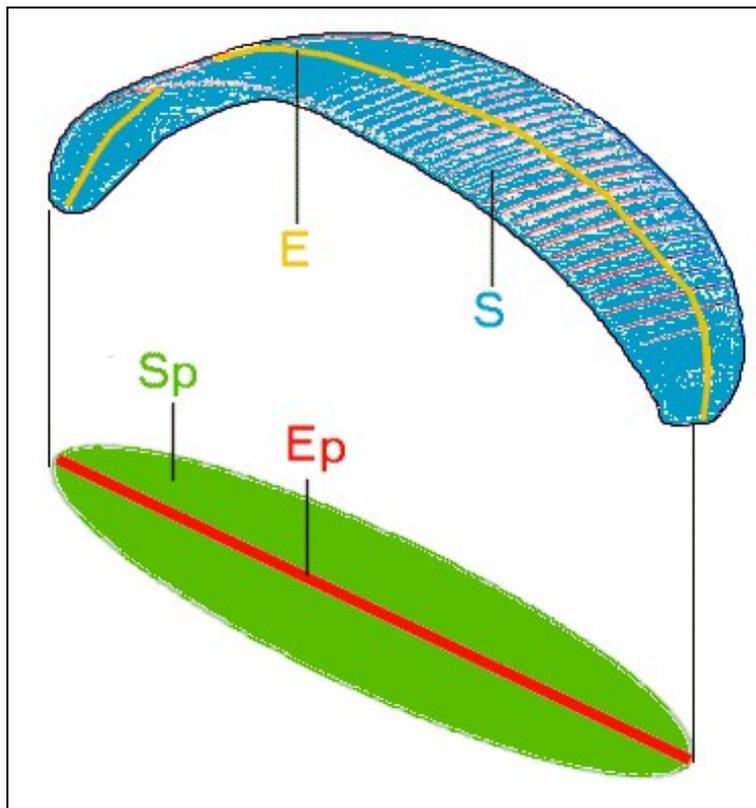


Figure A24 : Envergure et surface à plat et projetées. E = envergure à plat. S = surface à plat. Sp = surface projetée. Ep = envergure projetée.

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.

Réponses partielles aux **questions 085, 086, 089 et 090 :** **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**. Il s'agit d'un exemple typique pour parapente. **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**. Il s'agit d'un exemple typique pour aile delta.

Charge alaire : charge (poids) moyenne par unité de surface. **Question 075 et 076.** Elle est exprimée en générale en Kg / m². 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/m². Exemples de calcul (**Questions 085, 086, 089 et 090**) : Calculer la charge alaire d'une aile de 25 m². 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 m² = 95 kg+5kg / 25m² = 4 kg / m². Avec une charge minimale, la charge alaire = PTV min. / 25 m² = 70 kg+5kg / 25m² = 3 kg / m². Calculer la charge alaire d'une aile de 12,5 m². 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 m² = 90 kg+35kg / 12,5m² = 10 kg / m². Avec une charge minimale, la charge alaire = PTV min. / 25 m² = 65 kg+35kg / 12,5m² = 8 kg / m².

Profondeur moyenne : écart moyen (sur toute l'envergure) entre le bord d'attaque et le bord de fuite de l'aile. **Question 073.** Elle est exprimée en générale en m. Voir figure **A25**. Relation entre la surface **S**, la profondeur moyenne **p** et l'envergure **e** : **S = p x e** ou **p = S / e**

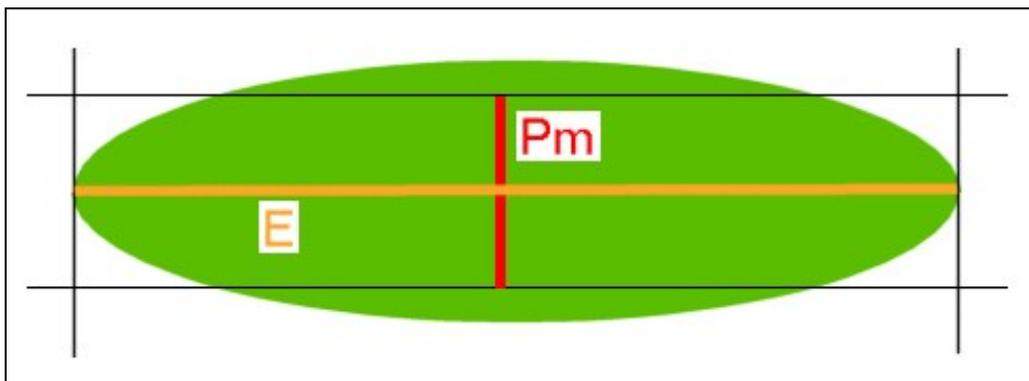


Figure A25 : Envergure E et profondeur moyenne Pm d'une aile.

Par exemple si une aile a une envergure de 10m et une surface de 25 m², la profondeur moyenne est égale à 25 m² / 10 m = 2,5 m. **Question 084.** 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. Autre exemple si une aile a une envergure de 10m et une surface de 12,5 m², la profondeur moyenne est égale à 12,5 m² / 10 m = 1,25 m. **Question 088.**

Vrillage de l'aile : Variation d'incidence entre les différentes sections de l'aile. Voir figure **A26**. **Question 074.** 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.

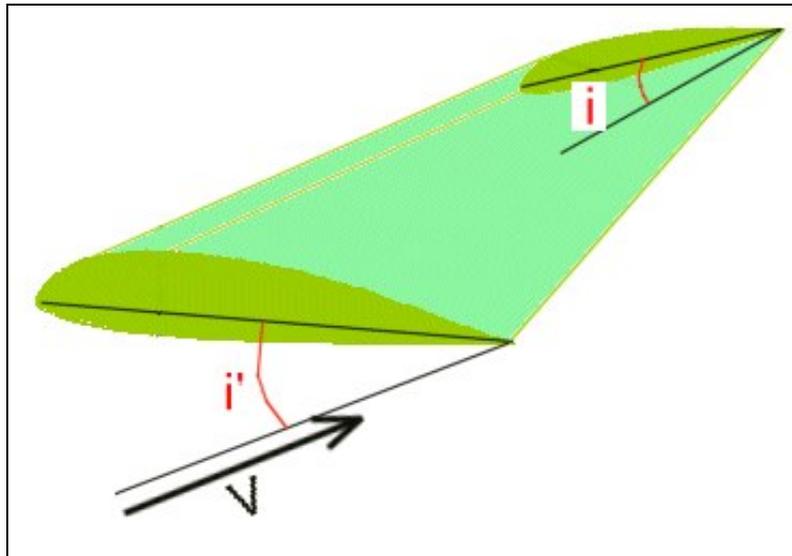


Figure A26 : vrillage d'une aile. $i' > i$

Allongement : rapport entre l'envergure et la profondeur moyenne, c.-à-d. l'envergure / la profondeur moyenne = e / p . **Question 077.**

Petits calculs :

$$e / p = e \times e / p \times e = \text{envergure au carré} / \text{surface}$$

En effet, le produit $p \times e$ (envergure x profondeur moyenne) n'est autre que la surface de l'aile. Voir figure **A25. Question 078.** 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. 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. Figure **A27. Questions 079 et 080.**

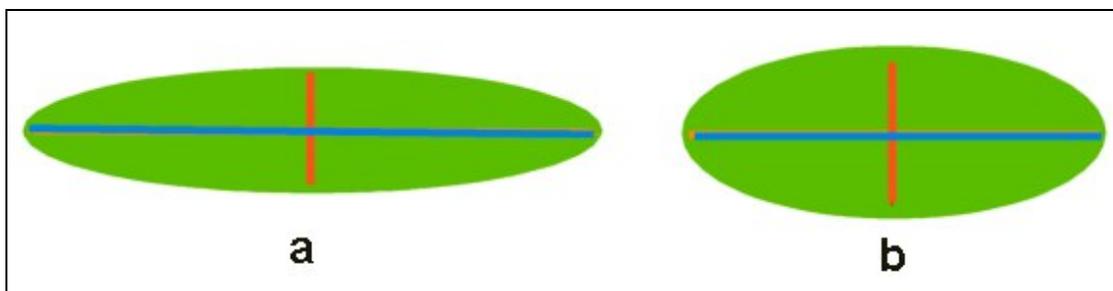


Figure A27 : a = grand et b = petit allongements.

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.

L'allongement courant d'un parapente actuel de série est de 5, celui d'une aile delta actuelle est de 8. **Questions 091 et 092.**

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. **Questions 081 et 082.**

Exemples de calcul. **Questions 083 et 087.**

Calcul de l'allongement d'une aile de 10 m. d'envergure et de 25 m² 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 = $10\text{m} \times 10\text{m} / 25\text{ m}^2 = 100 / 25 = 4$.

Calcul de l'allongement d'une aile de 10 m. d'envergure et de 12,5 m² de surface. Les valeurs de poids et de charge données dans l'énoncé ne servent bien sûr à rien.

Allongement = $10\text{m} \times 10\text{m} / 12,5\text{ m}^2 = 100 / 12,5 = 8$.

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

- a) Surface 32 m², envergure 8 m.
- b) Surface 25 m², envergure 10 m.
- c) Surface 20 m², envergure 10 m.
- d) Surface 24 m², envergure 12 m.

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

Questions 093 et 094. L'allongement le plus petit est facile à trouver, c'est **a** car la surface est la plus grande (32m²) 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) :

- a) Surface 16 m², envergure 12 m.
- b) Surface 20 m², envergure 10 m.
- c) Surface 12 m², envergure 12 m.
- d) Surface 12,5 m², envergure 10 m.

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

Questions 095 et 096. L'allongement le plus petit est facile à trouver, c'est **b** car la surface est la plus grande (20m²) 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**. 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. Cette dernière force s'appelle la **résultante des forces aérodynamiques** (=RFA). Voir

figure **A28. Questions 102 à 111.** La RFA peut être décomposée en **portance** (P), perpendiculaire à la trajectoire et dirigée vers le haut, et **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.

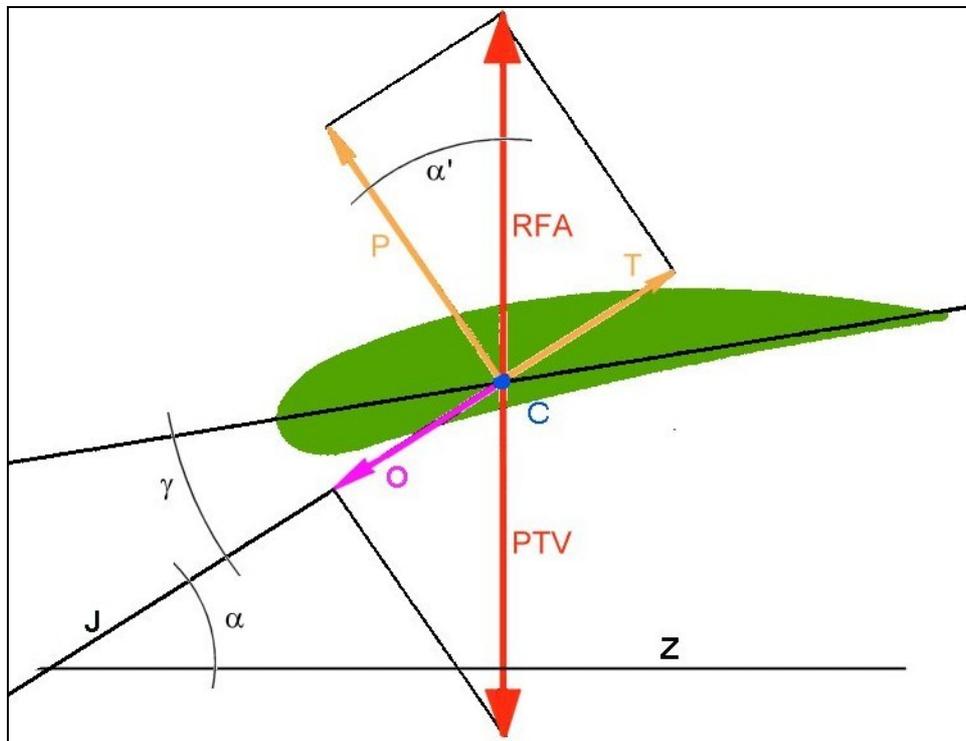


Figure A28 : Equilibre des forces d'un planeur en vol rectiligne uniforme. RFA = résultante des forces aérodynamiques. PTV = poids total en vol. P = portance. T = traînée. O = poussée. J = trajectoire (vent relatif). C = centre de poussée. Z = horizon. alpha = angle de plané. gamma = incidence.

Finesse d'une aile

La finesse d'une aile est une caractéristique importante pour évaluer ses performances. Plus elle est grande est plus le planeur est performant. C'est le rapport de la distance parcourue sur la hauteur perdue. L'ordre de grandeur de la finesse maximale d'un parapente actuel (2005) est d'environ 8-9 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. Voir figure **A29**.

1. Finesse = distance horizontale parcourue (D) / hauteur perdue (H). **Question 124.**
2. Puisque la distance horizontale parcourue et la hauteur perdue se réalise dans un même temps, la finesse = vitesse horizontale / taux de chute. **Question 123.**

3. Puisque les angles α et α' sont identiques, les triangles droits DH et PT' (où $T' = T$) sont semblables, autrement dit proportionnels. Par conséquent la finesse = $D/H = P/T$ (= Portance / traînée). **Question 121.**
4. Puisque que les coefficients C_x et C_z sont proportionnels à respectivement la traînée et la portance, lorsque les autres conditions sont identiques, la finesse = $P/T = C_z/C_x$. **Question 122.**

En résumé :

$$\text{Finesse} = D/H = \text{vitesse horizontale} / \text{taux de chute} = P/T = C_z/C_x$$

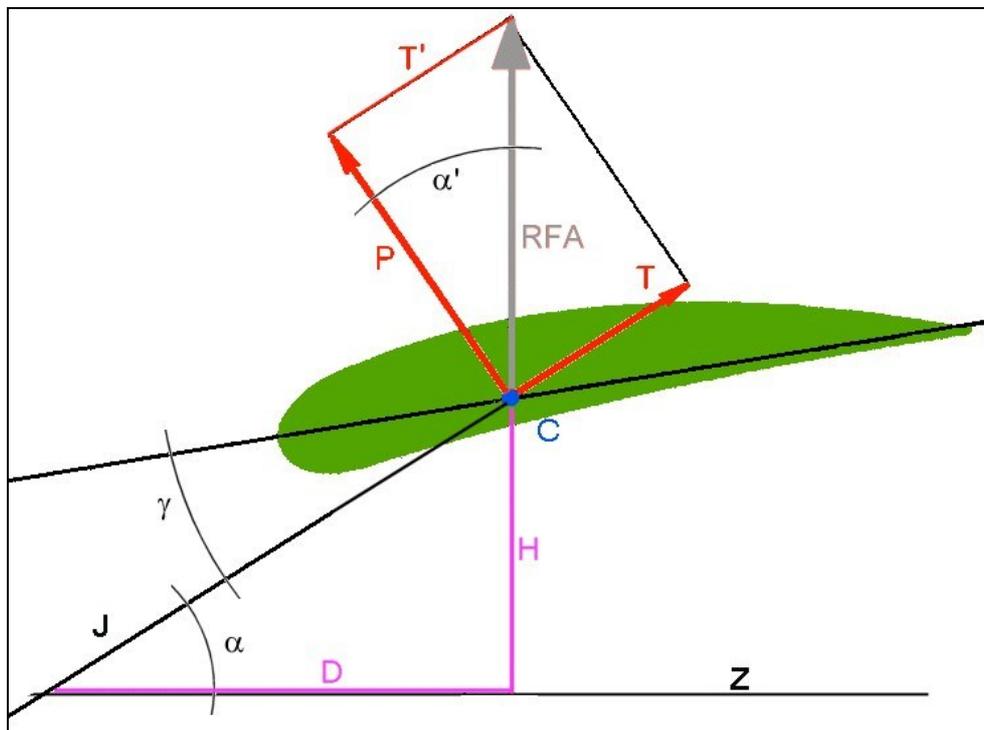


Figure A29 : calcul de la finesse.

Quelques calculs et exemples pratiques :

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 $D = \text{finesse} \times H = 8 \times 0,8 \text{ Km} = 6,4 \text{ Km}$. **Question 125.**

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 $D = \text{finesse} \times H = 12 \times 2,4 \text{ Km} = 28,8 \text{ Km}$. **Question 126.**

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 = $D/H = 5,4 \text{ Km} / 0,9 \text{ Km} = 6$. **Question 127.**

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 = $D/H = 7 \text{ Km} / 1,4 \text{ Km} = 5$. **Question 128.**

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. **Questions 129 et 130.**

Si la traînée d'un planeur diminue (voir figure 31 et 29), la portance se rapproche par rotation de la RFA, l'angle alpha' et donc alpha diminuent et la finesse ($P/T=D/H$) augmente. **Question 100.** Inversement, si la traînée augmente, la finesse diminue et l'angle de plané augmente. **Question 099.** 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. **Question 141.**

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 = vit. horiz. / taux chute donc taux chute = vit. Horiz. / finesse = $12 / 10 = 1,2$ m/s. **Question 148.**

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 = distance horiz. / perte alti. Donc perte alti. = dist. horiz. / finesse = $1600 / 8 = 200$ m. **Question 149.**

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 = vit. horiz. / taux chute donc vit. horiz. = finesse x taux de chute = 9×1 m/s = **9 m/s. Question 150.**

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 = vit. horiz. / taux chute = $9 / 1,5 = 6$. **Question 151.**

Axes et stabilité de vol

Un planeur de pente peut présenter un mouvement rotatoire autour de 3 axes (figure A30) :

1. **Axe vertical** : le mouvement autour de cet axe s'appelle le **lacet**. C'est un mouvement d'avant - arrière des extrémités de l'aile. **Question 114.**
2. **Axe longitudinal** : le mouvement autour de cet axe s'appelle le **roulis**. C'est un mouvement latéral gauche- droit des extrémités de l'aile. **Question 112.**
3. **Axe transversal** : le mouvement autour de cet axe s'appelle le **tangage**. C'est un mouvement d'avant - arrière de l'ensemble de l'aile. **Question 113.**

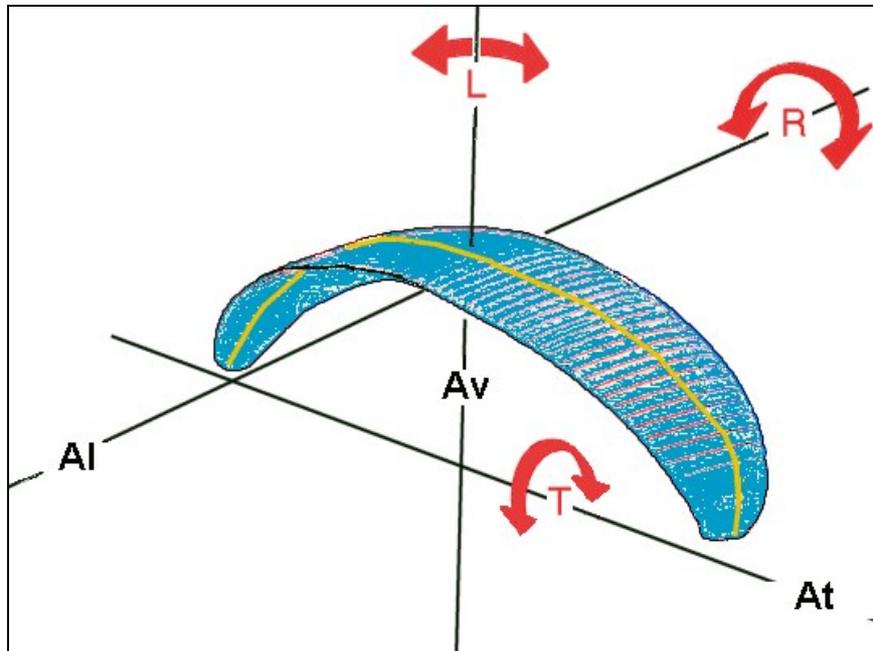


Figure A30 : Axes et mouvements en vol. Mouvement de lacet L autour de l'axe vertical Av. Mouvement de roulis R autour de l'axe longitudinal Al. Mouvement de tangage T autour de l'axe transversal At.

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, (**question 117**) 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. Autres exemples : (**questions 115 et 116**) Un planeur de pente qui, en vol rectiligne, augmente continuellement et spontanément sa vitesse, sans intervention du pilote, a des **qualités de vol instables**. 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**.

La stabilité d'un planeur peut être définie sur chacun des 3 axes de vol séparément. **Questions 118 à 120.** Un planeur de pente qui, sans intervention du pilote et en air calme, présente des mouvements de lacet, des changements d'incidence ou des mouvements de roulis n'est pas stable respectivement en direction (sur l'axe vertical), en profondeur (sur l'axe transversal) ou 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 tranquille (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

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. **Question 131.** Voir figure **A31**. 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. A 10-12°, le planeur vole à finesse maximale (Fmax), autrement dit le planeur pourra voler le plus loin. 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. **Question 057.** Inversement, lorsque l'incidence d'un planeur volant à finesse maximale est augmentée de 2°, la vitesse de vol diminue. **Question 059.**

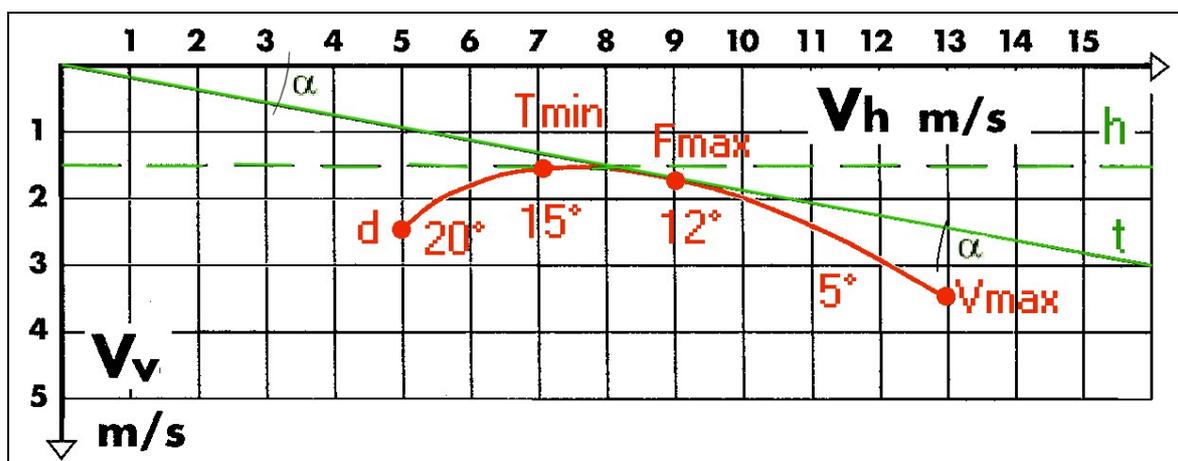


Figure A31 : polaire des vitesses. V_h = vitesse horizontale. V_v = vitesse verticale. t = tangente à la courbe passant par F_{max} = trajectoire à finesse max. h = tangente horizontale. α = angle de plané.

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

1. Vitesse à taux de chute minimale (Tmin). 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 Tmin = environ 7-8 m/s avec un taux de chute = 1,5 m/s.
2. Vitesse à finesse maximale (Fmax). 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 Fmax = 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 voit bien qu'aucune autre droite passant par la courbe et l'origine xy ne peut présenter un meilleur angle de plané alpha.

3. 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 $13/3.5=3.7$
4. 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.

Nous pouvons maintenant répondre aux **questions 132 à 139**. Toutes ces questions se basent sur un même graphique. Voir figure **A32**. 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.

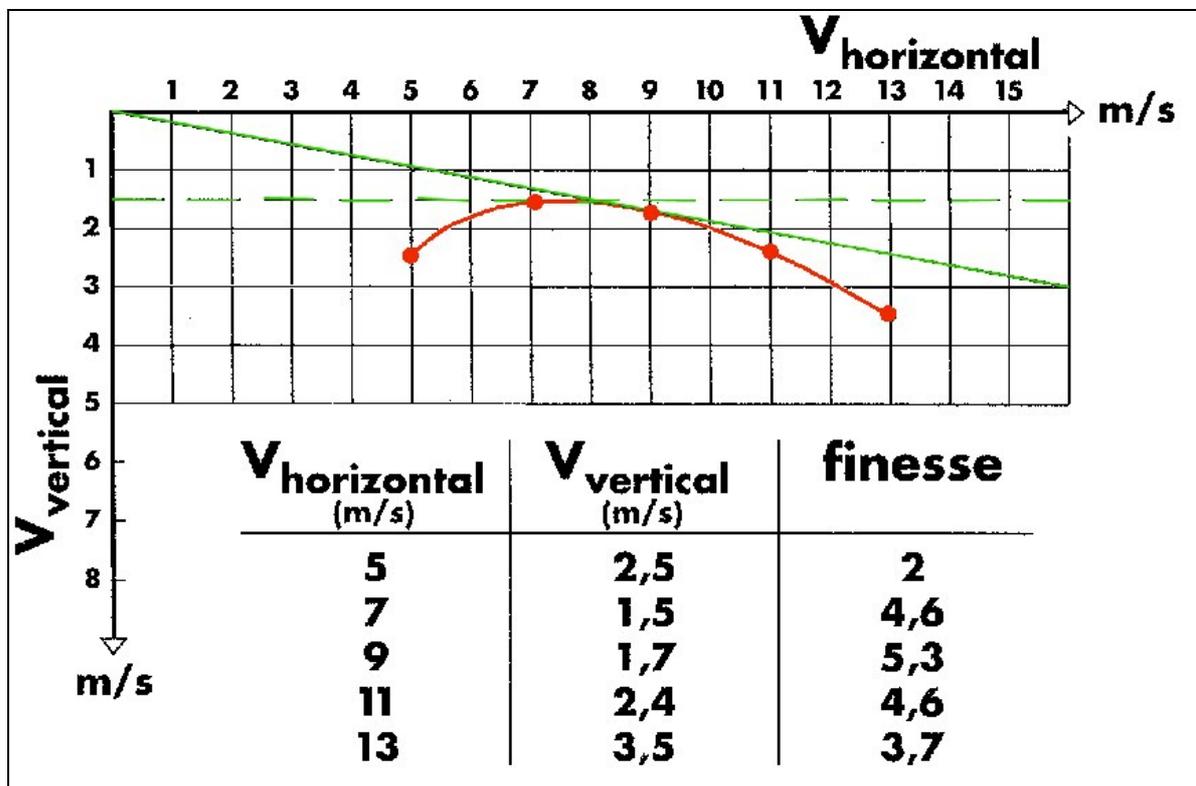


Figure A32 : graphique de base pour les questions 132 à 139 (aérodynamique) du QCM FSVL de l'examen théorique pour pilote de vol libre.

Question 132 : 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).

Question 133 : Quelle est la meilleure finesse ? Dans la colonne « finesse » du tableau, on trouve la finesse maximale. Elle est de 5.3.

Question 134 : Quelle est la vitesse de vol correspondant au taux de chute le plus faible ? Dans la colonne « Vvertical » (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).

Question 135 : Quelle est la finesse à la vitesse du taux de chute minimum ? Dans la colonne « Vvertical » (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.

Question 136 : Quelle est la vitesse de vol minimale ? Dans la colonne « Vhorizontal » (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).

Question 137 : Quelle est la finesse à la vitesse de vol minimale ? Dans la colonne « Vhorizontal » (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 « Vhorizontal » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur maximale. Elle est de 13 m/s environ (48 km/h).

Question 139 : Quelle est la finesse à la vitesse maximale ? Dans la colonne « Vhorizontal » (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.

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. Voir fig. A33.

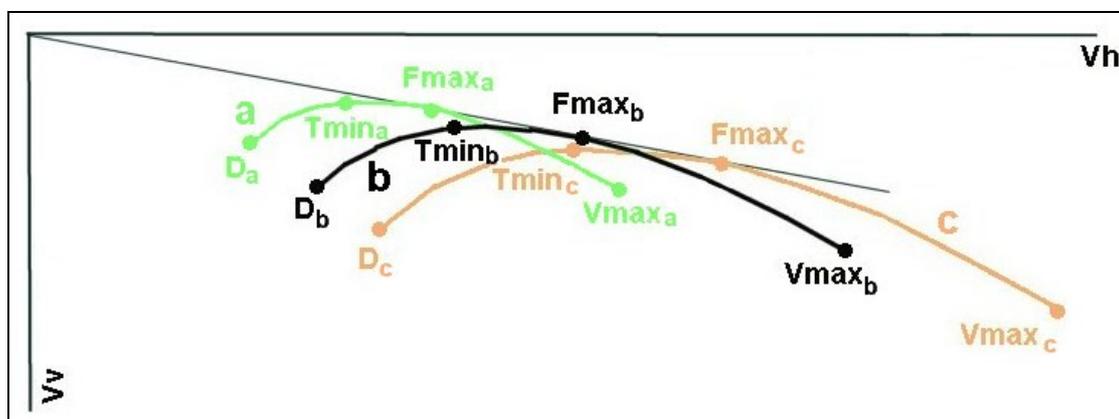


Figure A33 : influence de la charge alaire sur les vitesses et la polaire d'un planeur, a = faible charge alaire, c = forte charge alaire et b = charge alaire moyenne.

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. La vitesse de décrochage obéit aux mêmes règles : elle diminue, respectivement augmente avec la diminution respectivement l'augmentation de la charge alaire. **Questions 066 et 067.**

Polaire des vitesses dans une masse d'air en mouvement

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 (figure **A34**), 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. Voir figure **A34**. 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).

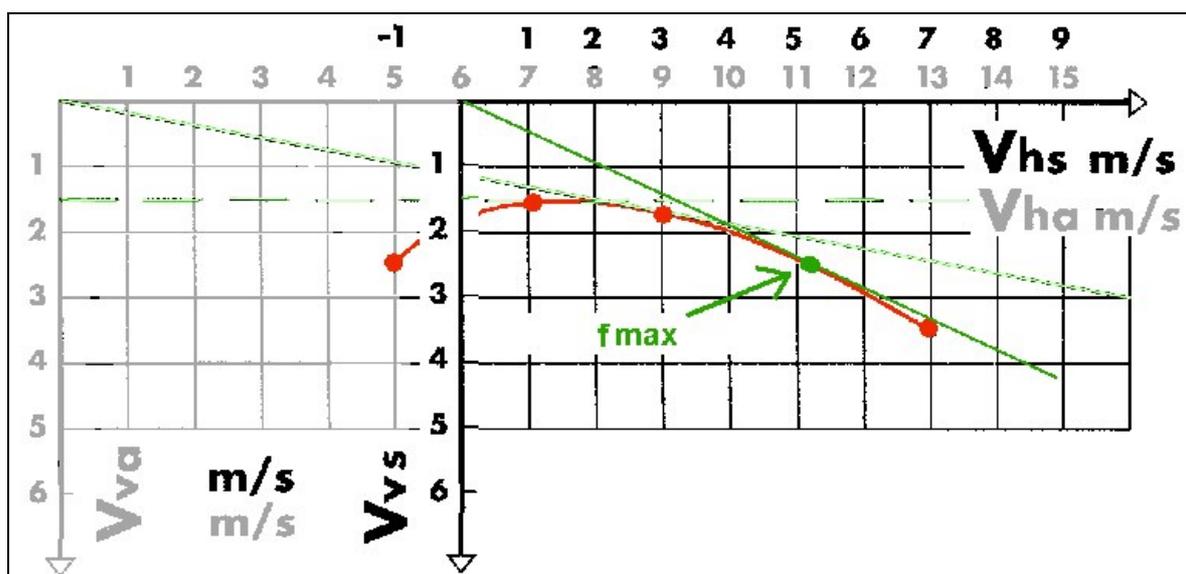


Figure A34 : Polaire des vitesses avec un vent de face de 6 m/s. V_{hs} = vitesse horizontale par rapport au sol. V_{ha} = vitesse horizontale par rapport à l'air. V_{vs} = V_{va} = vitesse verticale (taux de chute) par rapport au sol et par rapport à l'air. F_{max} = finesse maximale.

Pour voler à finesse maximale face au vent, il faut accélérer son aile. Sur la figure **A34**, 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. **Question 143.** 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. Voir figure **A35**. 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. 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. **Question 142.** Par contre, 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 se soit en air calme, en air ascendant ou en air descendant. **Question 152.**

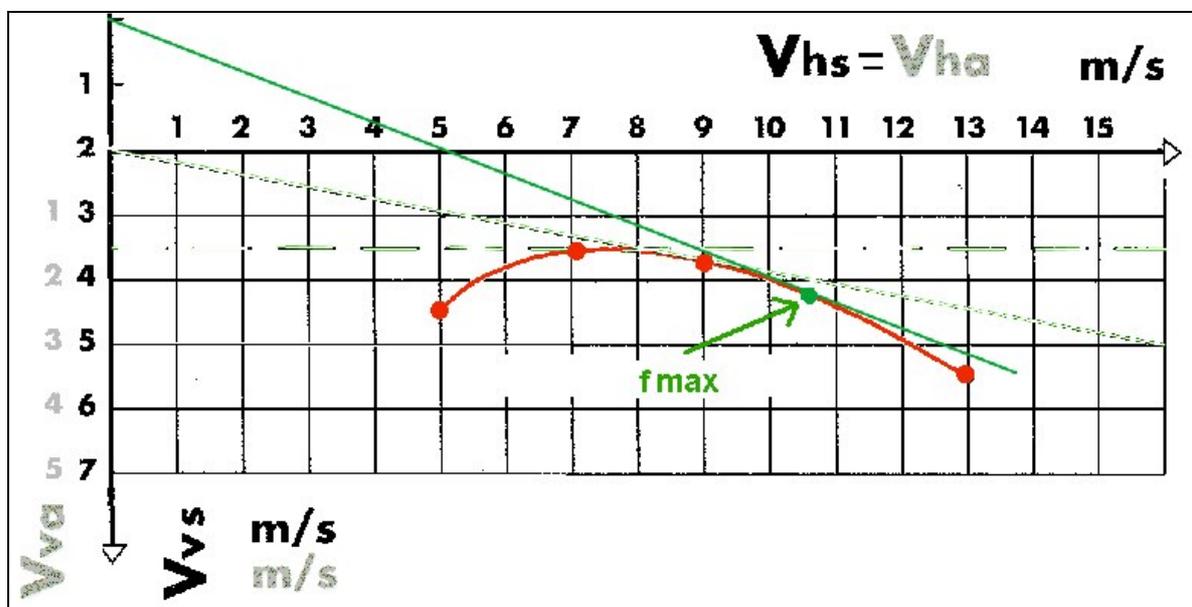


Figure A35 : Polaire des vitesses avec un vent descendant de 2 m/s. V_{vs} = vitesse verticale par rapport au sol. V_{va} = vitesse verticale par rapport à l'air. $V_{hs} = V_{ha}$ = vitesse horizontale par rapport au sol et par rapport à l'air. F_{max} = finesse maximale.

Question 140. A quelle vitesse de vol le planeur de pente avec une polaire de la figure **A32** 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.

Question 144 et 145. 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 ? Quelle est la finesse si la vitesse de vol est maintenue ? La vitesse horizontale ne change pas (10 m/s) mais le taux de chute devient $1 + 1 = 2$ m/s. 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.

Question 146 et 147. 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'extérieur du virage. Voir figure **A36**. **Question 155.**

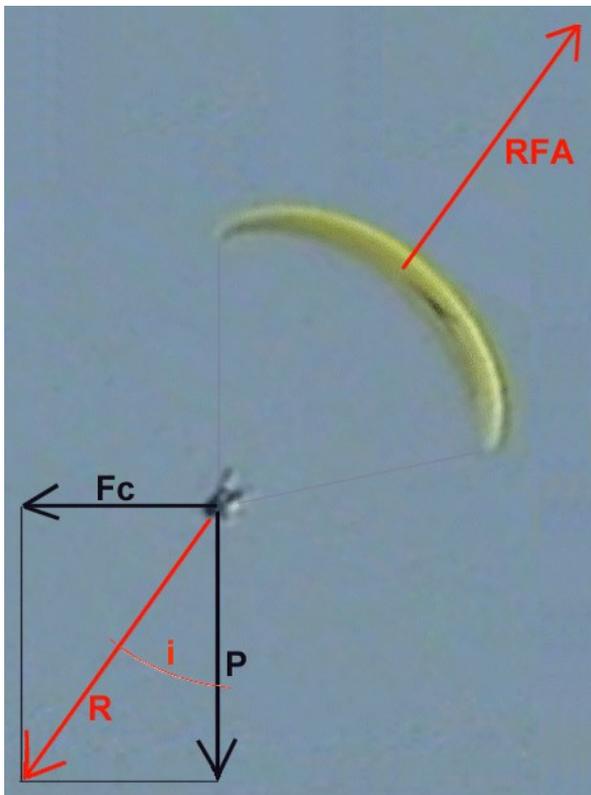


Figure A36 : Equilibre des forces d'un planeur en virage. RFA = résultante des forces aérodynamiques. i = angle d'inclinaison de l'aile. Fc = force centrifuge. P = PTV en vol rectiligne. R = PTV en virage.

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. 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. **Question 153.**

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. **Question 154.**

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). Figure **A35**. Plus le virage est serré, plus F_c 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. 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. On peut maintenant répondre à la **question 156**. 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 **A37** ci-dessous 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. 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 !

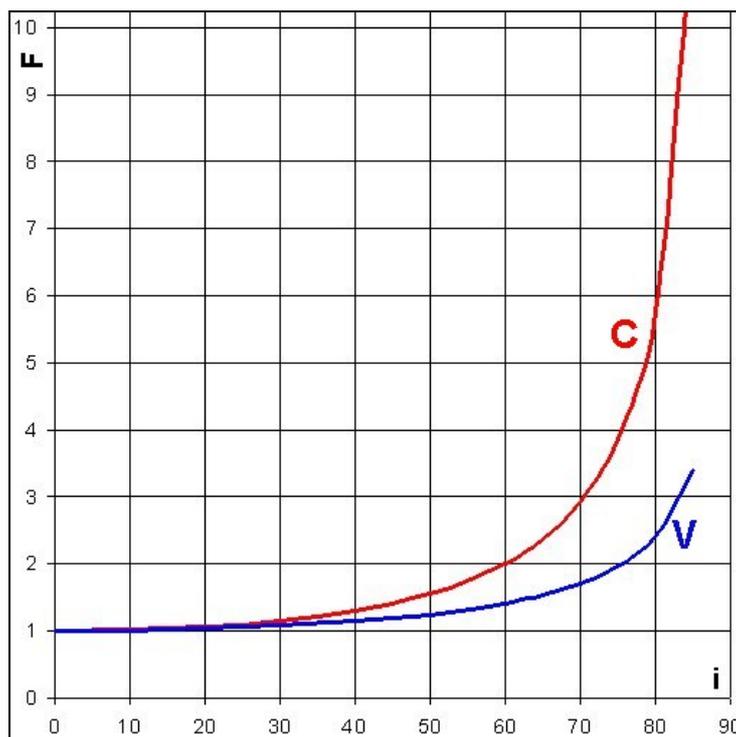


Figure A37 : F = facteurs de charge (C) et d'augmentation des vitesses (V) en fonction de l'angle d'inclinaison i (en °) du virage.

Chers amis libéristes et futurs libéristes,

Cet imprimé (2^{ème} édition) est soumis à la loi sur la protection des droits d'auteur. Après réflexion et pour de nombreuses raisons que je n'exposerais pas ici, j'ai cependant décidé de le distribuer gratuitement, pour une utilisation individuelle et privée, via mon site Internet sous forme de fichier PDF. Vous pouvez donc télécharger ce fichier puis l'imprimer réellement sur papier (mais ceci ne sera malheureusement pas forcément gratuit, vu le prix du papier et les coûts de votre imprimante).

Néanmoins je n'autorise pas l'utilisation commerciale de cet imprimé (par exemple publication d'un extrait dans un journal ou la vente de copies dans une école) ni la modification (notamment des en-têtes) ou l'appropriation intellectuelle par un tiers d'une quelconque partie de celui-ci.

Il y a en tout 5 unités recouvrant chacune les 5 branches d'examen théorique (QCM) de la FSVL :

Aérodynamique et mécanique de vol

Météorologie

Législation

Matériel

Pratique de vol

Adresse de téléchargement : www.soaringmeteo.com

En échange de la gratuité, SVP, je vous prie de ne pas hésiter à m'indiquer par email (voir mon site Web) une faute de langage, une question oubliée ou une phrase peu claire qui m'auraient échappé afin que les autres futurs pilotes bénéficient d'un support de préparation aux examens théoriques le meilleur possible.

*Bonnes chances pour vos examens. Merci de votre compréhension et votre collaboration.
Bons vols et soyez prudents.*

Jean Oberson, mars 2005.