

**Réponses commentées du QCM (état septembre 2025) du e-learnig de la FSVL pour pilotes de parapente, partie :**

# **AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DE VOL**

**Auteur principal : Jean Oberson**

Contributions et mises à jour : Thierry Vallotton (2025)

Contributions et relecture :

**<https://soaringmeteo.org/>**

**3<sup>ème</sup> édition** (alignée aux questions - numéro en bas de la question –  
du e-learning de la FSVL – état septembre 2025)

Version plus récente ? Consultez la page <https://soaringmeteo.org/docs.html>

## **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>9</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>14</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>22</i>
<i>Polaire des vitesses dans une masse d'air en mouvement.....</i>	<i>25</i>
<i>Equilibre des forces d'un planeur en virage, facteur de charge.....</i>	<i>27</i>

## Où trouver la question

Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page
1	4	11	6	21	7	31	7	41	5	51	13	61	14	71	12
2	4	12	6	22	7	32	5	42	12	52	13	62	12	72	14
3	4	13	6	23	5	33	8	43	12	53	14	63	12	73	16
4	4	14	5	24	7	34	8	44	12	54	10	64	12	74	15
5	5	15	7	25	7	35	8	45	12	55	10	65	12	75	15
6	5	16	7	26	7	36	8	46	12	56	10	66	25	76	17
7	6	17	7	27	7	37	8	47	11	57	22	67	25	77	17
8	6	18	7	28	7	38	8	48	11	58	14	68	12	78	17
9	6	19	7	29	7	39	8	49	12	59	22	69	13	79	17
10	6	20	7	30	7	40	8	50	10	60	14	70	13	80	17
Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page	Question	Page
81	17	91	17	101	18	111	21	121	20	131	24	141	27	151	28
82	17	92	17	102	18	112	21	122	20	132	24	142	27	152	27
83	16	93	17	103	18	113	21	123	20	133	24	143	27	Fin QCM (état 9.2025)	
84	15	94	18	104	18	114	22	124	20	134	24	144	27		
85	15	95	18	105	18	115	22	125	20	135	25	145	21		
86	17	96	10	106	18	116	22	126	20	136	25	146	21		
87	16	97	10	107	19	117	22	127	20	137	26	147	21		
88	16	98	21	108	19	118	22	128	20	138	21	148	21		
89	16	99	21	109	19	119	22	129	22	139	27	149	27		
90	17	100	15	110	19	120	19+20	130	24	140	26	150	28		

## 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 10kg ou de 16kg ou une vitesse de 35km/h, leur origine (centre de l'objet qui subit l'un de ces phénomènes physiques) 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 1cm sur papier = 10kg, un vecteur de 3cm correspondra donc à une force de 30kg.

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 30km/h par un vecteur V, s'appliquant sur l'objet X (centre de l'objet = X') se dirigeant au nord-ouest.

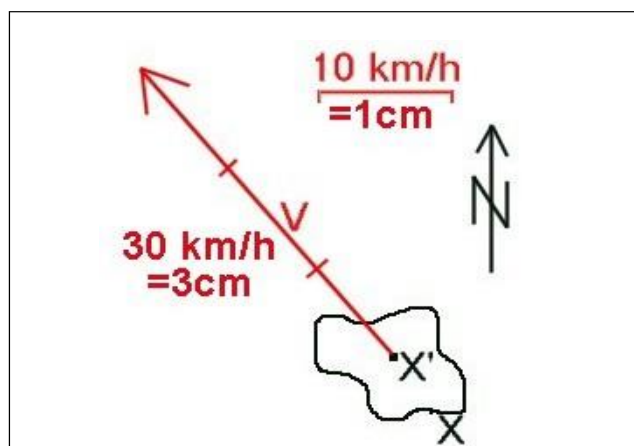


Figure A1 : exemple d'un vecteur  $V$  représentant une vitesse. Si 1cm correspond arbitrairement à 10km/h alors 3cm = 30km/h.  $V$  se dirige vers le NW et s'applique à l'objet  $X$  au point  $X'$ .

Lorsque 2 vecteurs  $V1$  et  $V2$  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.

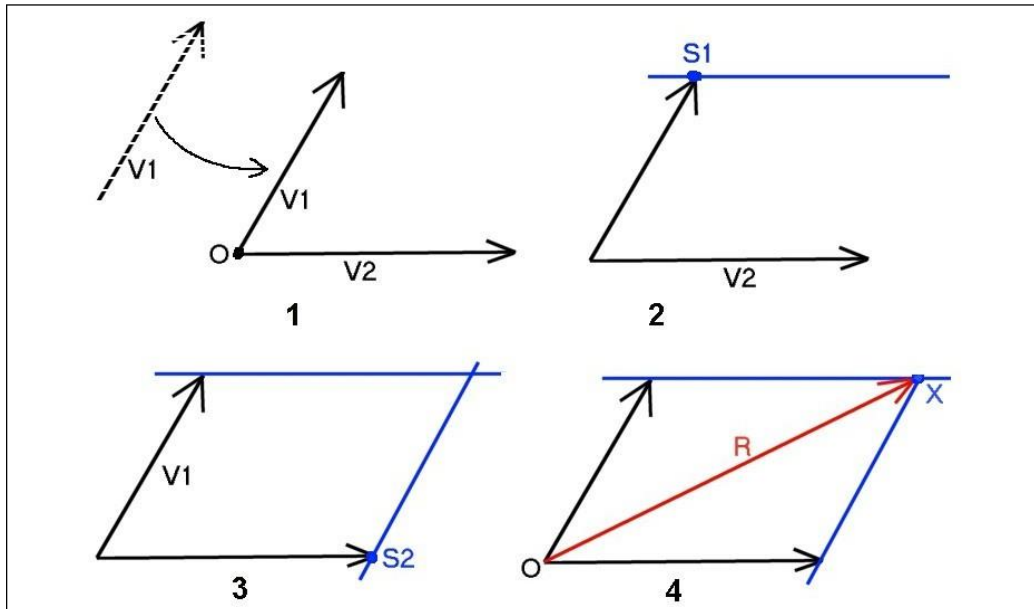


Figure A2 : (1) Glisser  $V1$  sans changer de direction, afin que les deux origines de  $V1$  et  $V2$  se confondent. (2) Tirer de  $S1$  une parallèle à  $V2$ . (3) Tirer de  $S2$  une parallèle à  $V1$ . (3) Le vecteur résultant  $R$  a pour origine  $O$  et pour fin l'intersection  $X$  des deux 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 **questions 1 à 5**, 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  $R4$ .

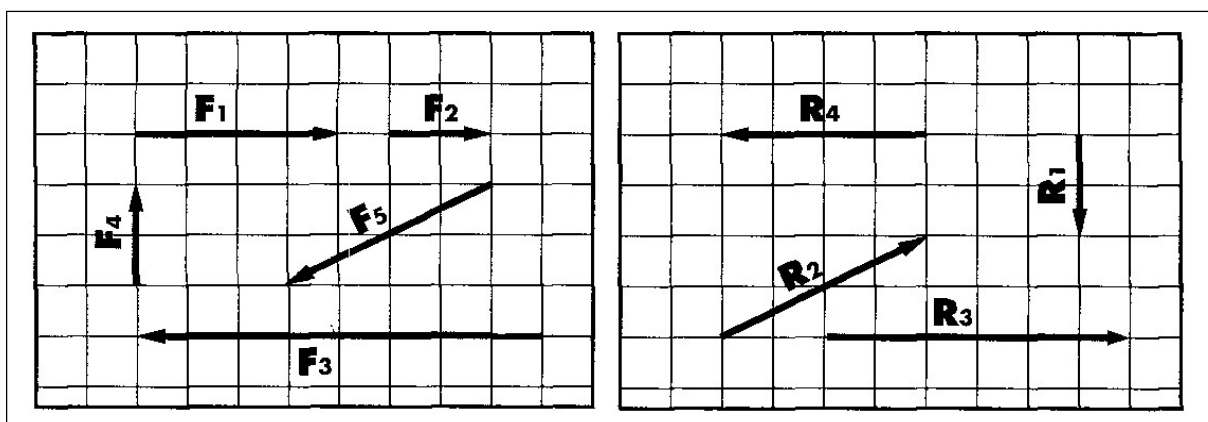


Figure A3 : graphique de base utilisé pour les questions 1 à 5 (aérodynamique) du QCM FSVL de l'examen théorique pour pilote de vol libre.

**Question 1.** Il faut additionner  $F_1$  et  $F_2$ . 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**.

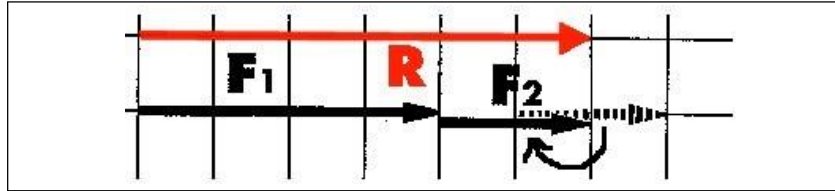


Figure A4 : addition de  $F_1$  et  $F_2$

**Question 2.** 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 **R4** de la figure **A3**.

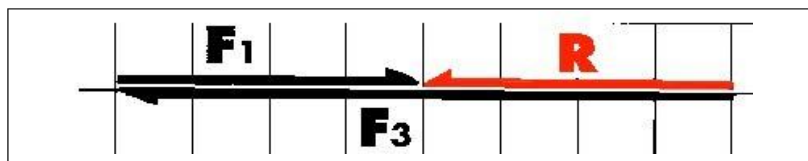


Figure A5 : addition de  $F_1$  et  $F_3$

**Question 3.** Il faut additionner  $F_1$  et  $F_4$ . Voir figure **A6**.  $R$  correspond donc à **R2** de la figure **A3**.

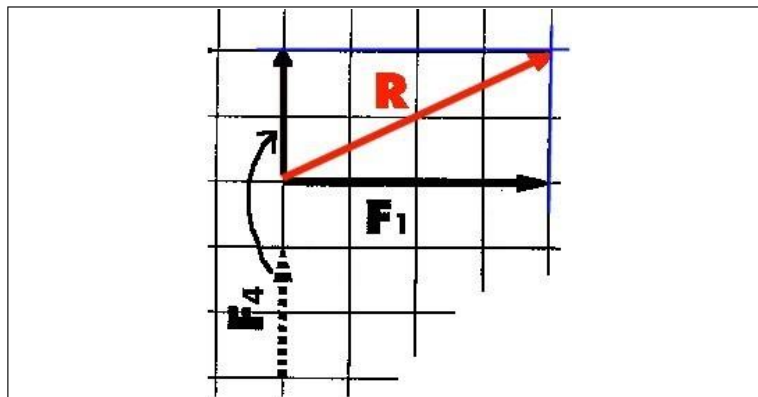


Figure A6 : addition de  $F_1$  et  $F_4$

**Question 4.** Il faut additionner  $F_1$  et  $F_5$ . Voir figure **A7**.  $R$  correspond donc à **R1** de la figure **A3**.

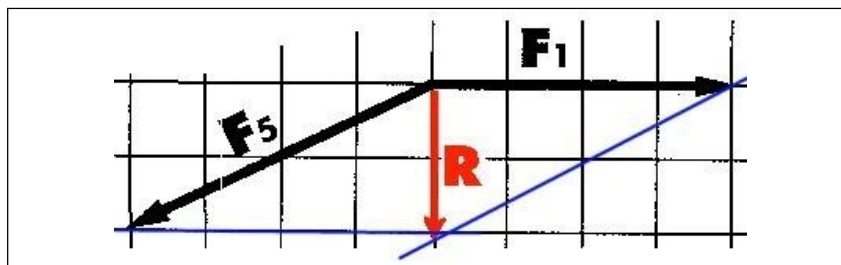


Figure A7 : addition de  $F_1$  et  $F_5$

**Question 5.** Il faut additionner  $F_4$  et  $F_5$ . Voir figure **A8**.  $R$  correspond donc à **R4** de la figure **A3**.

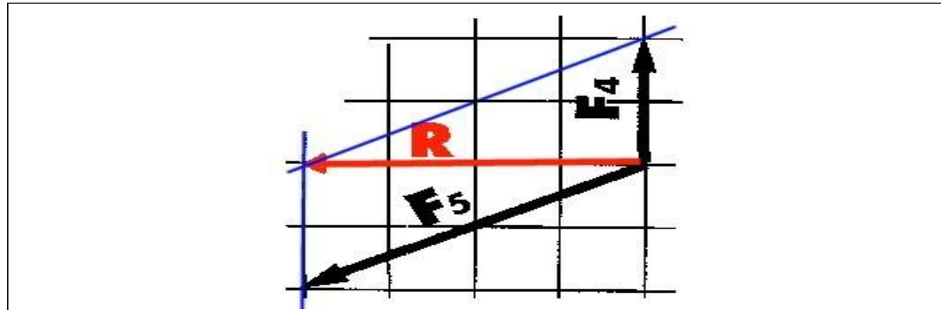


Figure A8 : addition de  $F_4$  et  $F_5$

**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).  $10\text{N} = \text{environ } 1\text{kg}$ .

Quatre facteurs influencent la traînée d'un objet :

- (1) La surface de l'objet exposée au vent **question 6**
- (2) la vitesse du vent/du flux **question 14**
- (3) la densité de l'air **question 23**
- (4) la forme du corps/de l'objet. **question 32**

Il n'y a pas d'autre facteur significatif. A noter cependant que **question 6** la surface exposée dépend évidemment de la grandeur de l'objet. Voir figure **A9**.

**Question 6-14-23-32-41** 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.

Pour la **question 41**, la réponse juste correspond aux « caractéristiques de la surface du corps » qui 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**.

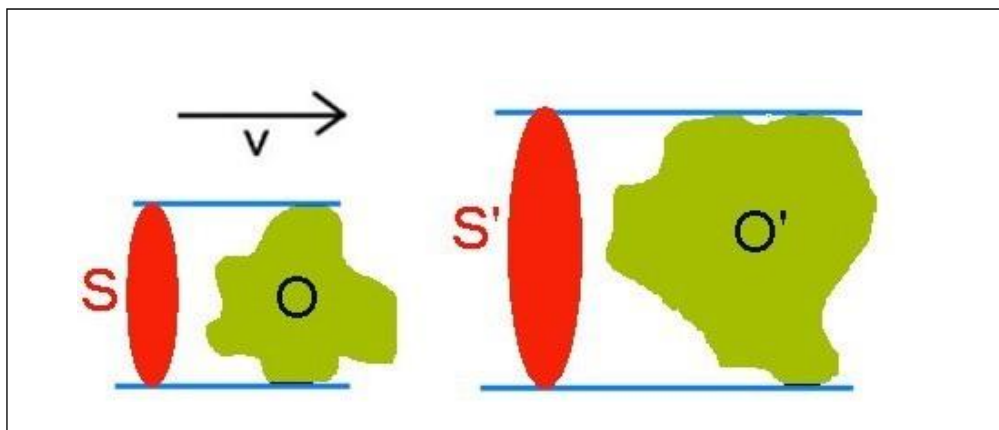


Figure A9 : La surface  $S$  de l'objet  $O$  exposé au vent  $V$  est plus petite que la surface  $S'$  de l'objet  $O'$  lui-même plus grand que  $O$ .

La relation entre traînée et surface est linéaire. **Question 7** Quand la surface double, la traînée double. **Question 8** Quand la surface quadruple, la traînée est multipliée par quatre. **Question 9** Quand la surface est divisée par deux, la traînée est divisée par deux. Voir figure **A10**. Autre exemple : 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 d'environ 300N (Newtons), elle sera **question 10** d'environ 600N. Le fait que la vitesse du vent est donnée à 30km/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. Exemples semblables : si la surface passe de  $2\text{m}^2$  à  $1\text{m}^2$  (diminue de moitié), de  $8\text{m}^2$  à  $2\text{m}^2$  (diminue d'un facteur 4) ou de  $0.5\text{m}^2$  à  $3\text{m}^2$  (augmente d'un facteur 6), la traînée passe respectivement **question 11** de 300N à 150N (diminue de moitié), **question 12** de 1200N à 300N (diminue d'un facteur 4) ou **question 13** de 150N à 900N (augmente d'un facteur 6).

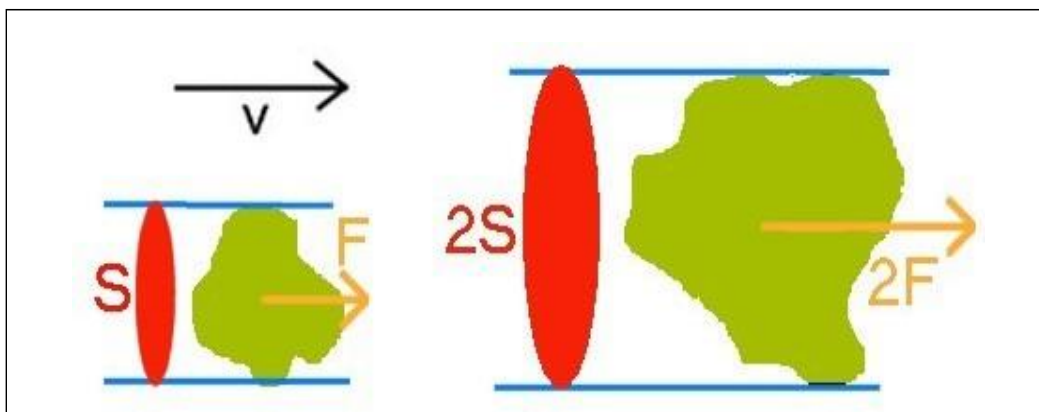


Figure A10 : Pour un vent  $V$  identique, si par exemple la surface d'un objet exposé à ce vent double alors la traînée  $F$  double aussi.



(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, **question 15** si la vitesse du vent (flux d'air) qui s'exerce sur l'objet augmente d'un facteur 2, la traînée est multipliée par 4 (2 au carré). **Question 16** Si cette vitesse triple, la traînée est multipliée par 9 (3 au carré). **Question 17** Si cette vitesse quadruple, la traînée est multipliée par 16 (4 au carré). **Question 18** Si cette vitesse est divisée de moitié, la traînée est divisée par 4 (2 au carré). Autre exemple plus concret : Si la vitesse du vent passe de 30km/h à 60km/h (la vitesse double), la traînée quadruple. Si celle-ci était de 300N (Newtons), **question 19** elle sera de 1200N. Le fait que la surface exposée au vent = 2m<sup>2</sup> et que tout se passe au niveau de la mer ne change rien au problème posé. Exemples semblables : Si la vitesse du vent passe de 30km/h à 90km/h (triple), de 80km/h à 40km/h (diminue de moitié) ou de 20km/h à 60km/h (triple), quel que soit la surface exposée au vent, la traînée passera respectivement **question 20** de 100N à 900 N (3 au carré), **question 21** de 1200N à 300N (2 au carré = 4 mais en division) ou **question 22** de 100N à 900N (3 au carré).

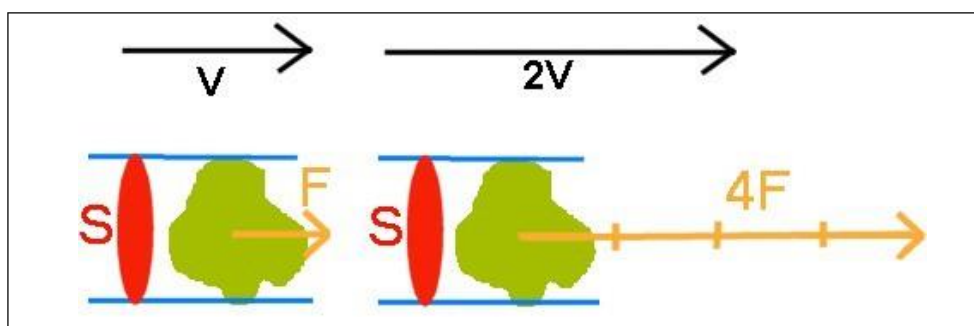


Figure A11 : Pour une surface identique, si par exemple la vitesse  $V$  du vent double alors la traînée  $F$  de l'objet soumis à ce vent quadruple.

(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**. **Question 24** Si la densité de l'air double, alors la traînée double. **Question 25** Si la densité de l'air est divisée par deux, la traînée est divisée par deux. 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), **question 26** la densité de l'air diminue donc sa traînée diminue.

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), **question 27** sa traînée diminue plus vite dans les basses couches qu'en haute altitude. Comme ordre de grandeur, à savoir par cœur pour l'examen, à 1100m, 2200m, 3300m et 4400m. d'altitude, la densité de l'air et donc la traînée d'un objet soumis à du vent de vitesse invariable, vaudra respectivement **question 31** 90% de la traînée au niveau de la mer, **question 30** 81% de la traînée au niveau de la mer, **question 29** 72% de la traînée au niveau de la mer, **question 28** 64 % de la traînée au niveau de la mer. Truc mnémotechnique : la somme doit évaluer 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.



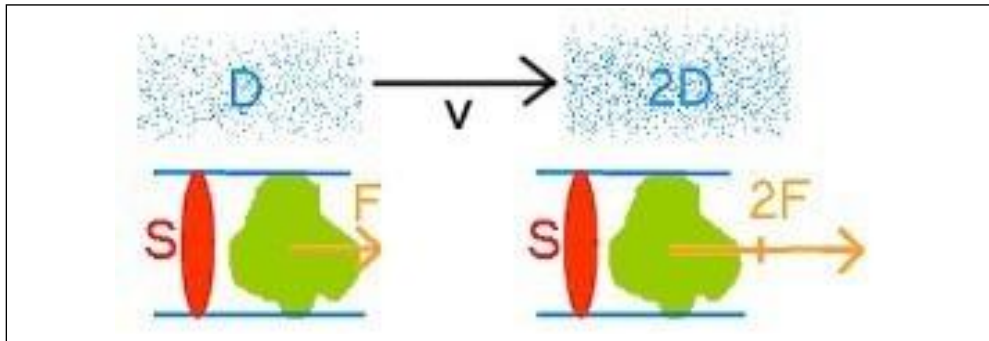


Figure A12 : Pour une surface et un vent  $V$  identiques, si par exemple la densité  $D$  de l'air double alors la traînée  $F$  de l'objet soumis à ce vent double aussi.

(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 **question 33** coefficient  $C_x$ . Par exemple, l'objet **a** de la figure A13 avec une surface plane perpendiculaire au flux d'air (vent) **question 39 réponse 1** a un  $C_x$  de 1. L'objet creux **b** de la figure **A13** offre une plus grande résistance au vent est a **question 40 réponse 2** un  $C_x$  supérieur de 1,3. L'objet « aérodynamique » **c** de la figure A13 a **question 37 réponse 3** un  $C_x$  très petit valant 0,08 tandis que l'objet **d** de la figure A13 a une forme aérodynamique favorable mais non optimale avec **question 38 réponse 4** un  $C_x$  valant 0,17.

Autres applications : Dans les mêmes conditions de vent et de surface, la traînée d'un objet avec un  $C_x$  de 1,3 génère, par rapport à un objet avec un  $C_x$  de 1 **question 34** une traînée environ 30% supérieure. Un corps d'un  $C_x$  de 0,33 génère, par rapport à un corps avec un  $C_x = 1$ , **question 35** environ 3x moins de traînée. Un corps d'un  $C_x$  de 0,05 génère, par rapport à un corps avec un  $C_x = 1$ , **question 36** environ 20 X moins de traînée.

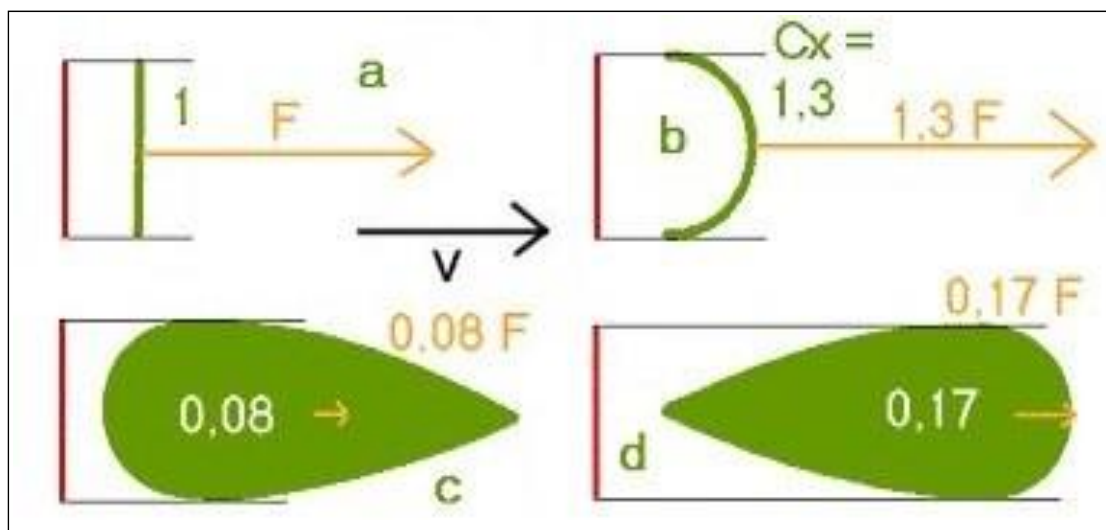


Figure A13 : Pour des surfaces et un vent  $V$  identiques, la traînée  $F$  varie en fonction de la forme de l'objet soumis au vent. Par exemple l'objet **b** à une traînée 1,3 X plus grande que celle de **a** et l'objet **c** a une traînée 0,08 X plus petite que celle de **a**.

### **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**.

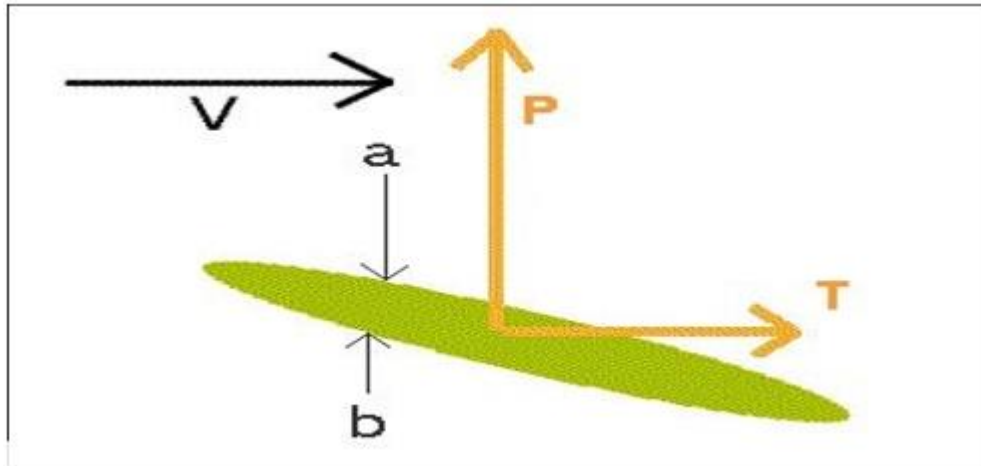


Figure A14 : Traînée  $T$  et portance  $P$  d'un objet plat soumis obliquement au vent  $V$ .  $a$  = extrados,  $b$  = intrados.

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.

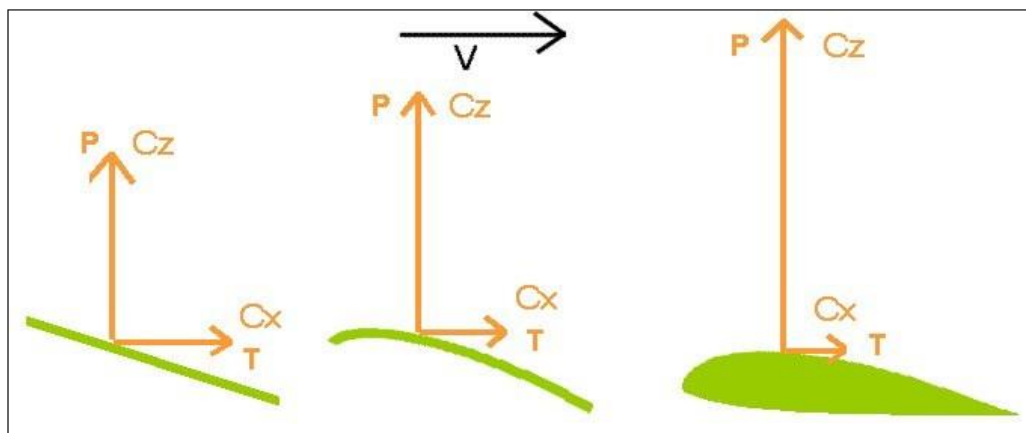


Figure A15 : Traînée  $T$  et portance  $P$ , ou respectivement  $C_x$  et  $C_z$ , d'un objet plat soumis obliquement au vent  $V$  : Plus le profil de l'objet ressemble à une aile aérodynamique et plus  $P$  ou  $C_z$  devient grand par rapport à  $T$  ou  $C_x$ .

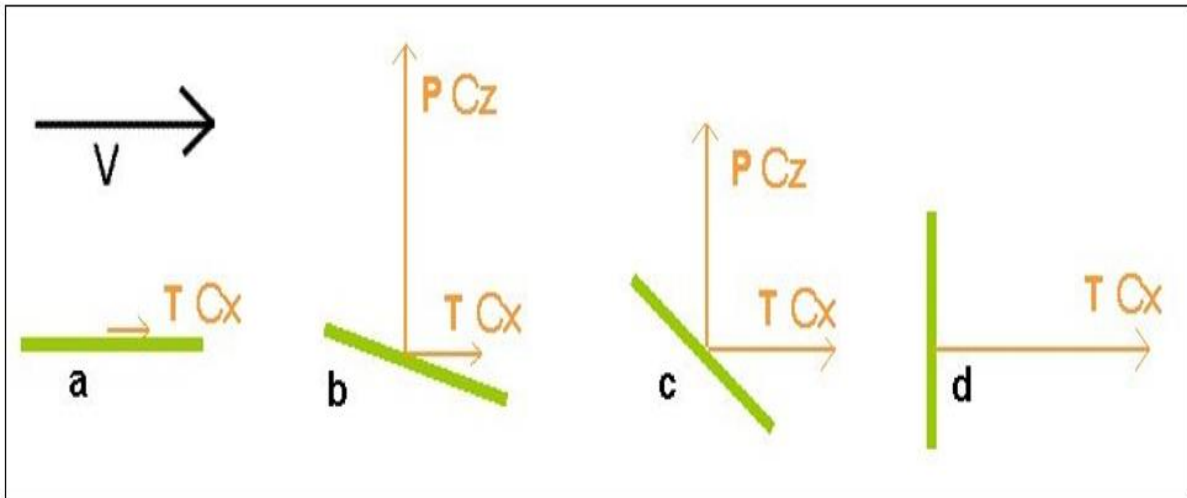


Figure A16 : Traînée  $T$  et portance  $P$ , ou respectivement  $C_x$  et  $C_z$ , d'un objet plat soumis obliquement au vent  $V$ , en fonction de l'incidence. a = incidence nulle :  $P$  nul et  $T$  très faible. b = incidence faible :  $P$  maximal et  $T$  faible. c = incidence moyenne :  $P$  moyen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

**Question 50** La portance dépend entre autres de l'angle d'incidence.

**Question 56.** La portance dépend des 4 facteurs suivants : Surface de l'aile, coefficient de portance, densité de l'air, vitesse d'écoulement de l'air.

**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. En vol, le vortex se produit **question 96** lorsqu'il y a une différence de pression entre l'intrados et l'extrados. 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 **question 97** derrière le bord de fuite que se trouvent les turbulences engendrées par un planeur.
- (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  $10^\circ$ , la répartition de la portance est donc **question 54** de  $2/3$  sur l'extrados et  $1/3$  sur l'intrados.
- (3) Il existe aussi une asymétrie de répartition de la portance d'avant en arrière.  
**Question 55** Les  $2/3$  de la portance se trouve sur le premier tiers (avant) de l'aile.

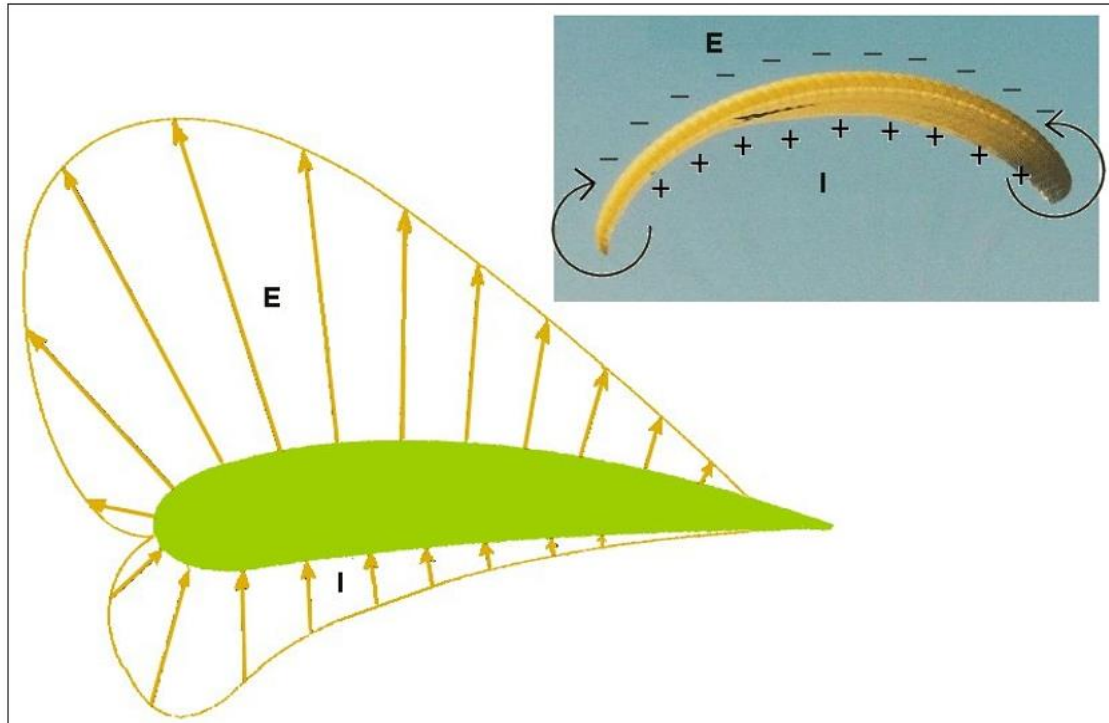


Figure A17 : Répartition des forces aérodynamiques autour d'un profil. E = extrados = aspiration. I = intrados = pression.

### **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 **question 48** relativement épais et asymétrique avec un extrados très bombé surtout sur le tiers antérieur de l'aile et un intrados peu bombé. Le profil est un des éléments importants qui définis les caractéristiques, notamment les performances, de vol d'une aile. **Question 47** Ainsi, le profil est choisi pour chaque aile en fonction des caractéristiques souhaitées.

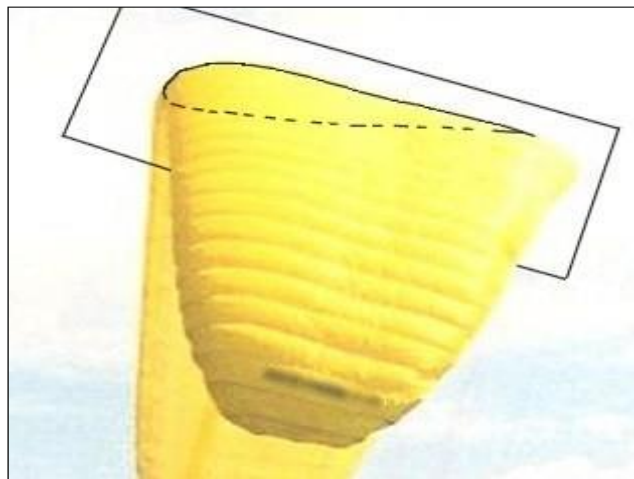


Figure A18 : Profil d'une aile. Segments et points géométriques remarquables d'un profil :

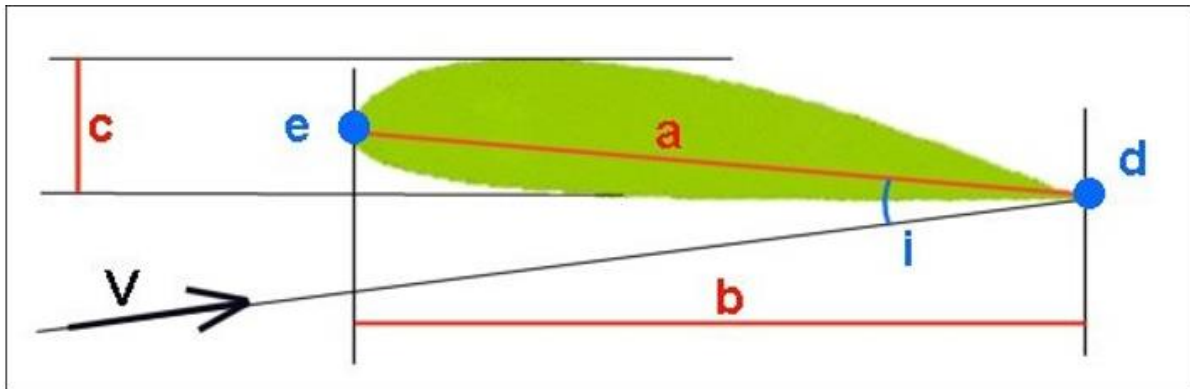


Figure A19 : Segments et points géométriques remarquables d'un profil.

- Segment **a** : corde médiane du profil, entre d et e (**question 42 réponse 2**)
- Segment **b** : profondeur du profil, presque comme a (**question 44 réponse 1**)
- Segment **c** : épaisseur du profil (**question 43 réponse 3**)
- Point **d** : bord de fuite (**question 46 réponse 3**)
- Point **e** : bord d'attaque (**question 45 réponse 2**)
- Angle **i** : incidence : Angle entre la corde de profil et la direction du flux d'air / vent relatif (**question 49**)

**Points aérodynamiques remarquable d'un profil :**

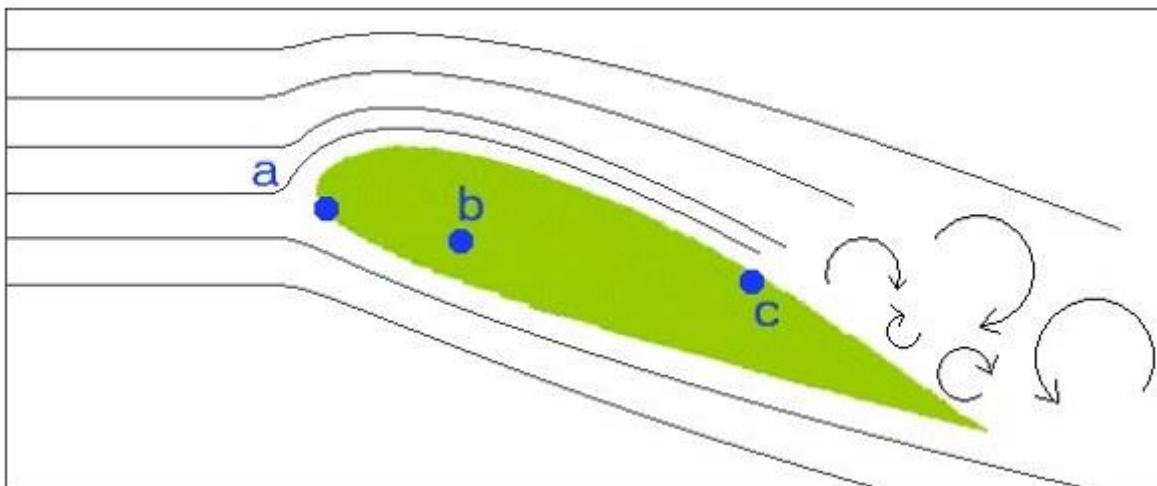


Figure A20 : Points aérodynamiques remarquable d'un profil

- **Question 62 réponse 1** Point de stagnation ou point d'arrêt **a**, point vers le bord d'attaque correspond **question 68** au point où le vent relatif se divise pour s'écouler sur l'extrados et l'intrados.
- **Question 63 réponse 3** Centre de poussée **b**, **question 71** le point d'application de la résultante des forces aérodynamiques (portance et traînée) sur la corde du profil.
- **Question 64 réponse 4** Point de décrochage/décollement **c**, **question 65** le point sur l'extrados au niveau duquel l'écoulement d'air se détache 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. Voir figure **A21**. Lorsque l'incidence déjà positive d'une aile, exposée à un flux d'air, augmente, **question 69** le point de stagnation/d'arrêt se déplace sur l'intrados en direction du bord arrière (bord de fuite). Inversement, lorsque l'incidence déjà positive d'une aile, exposée à un flux d'air, diminue, **question 70** le point de stagnation/d'arrêt se déplace toujours sur l'intrados en direction du nez du profil (bord d'attaque).

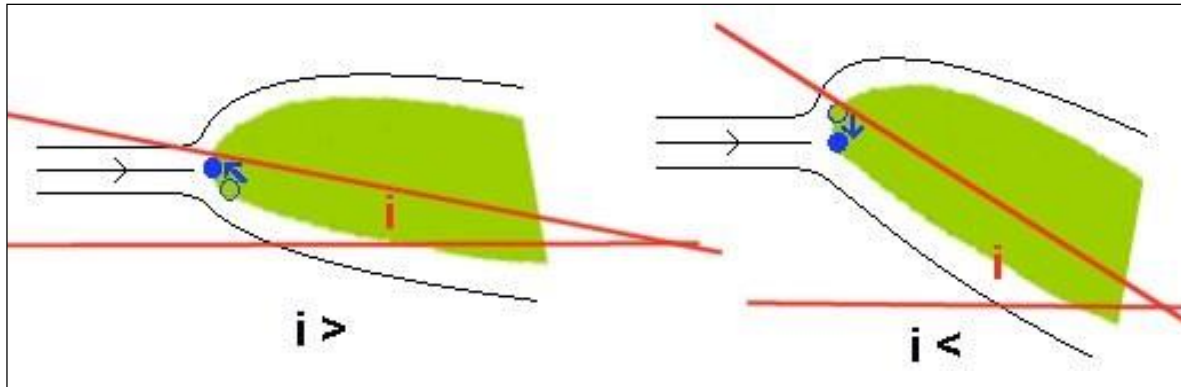


Figure A21 : Déplacement du point de stagnation en fonction de l'incidence.  $i >$  = diminution et  $i <$  = augmentation d'incidence.

### **Polaire des forces, incidence**

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

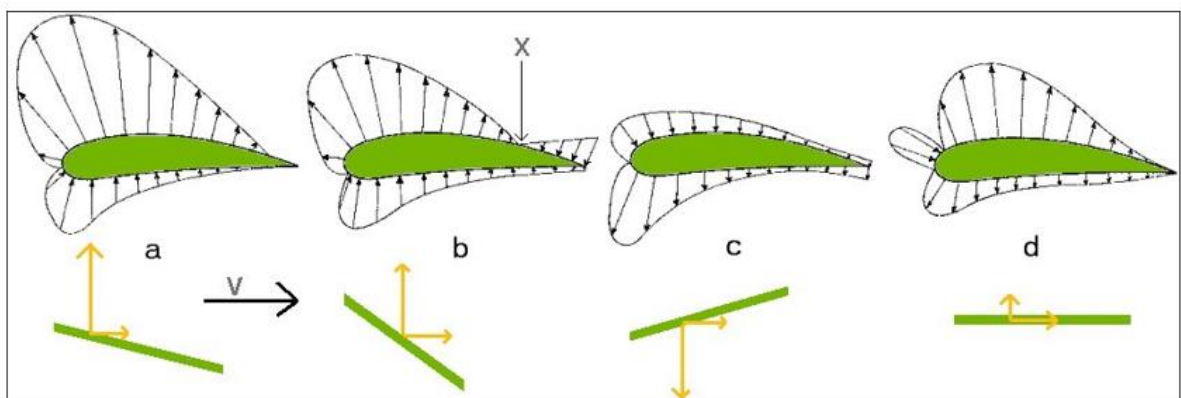


Figure A22 : Répartition des forces aérodynamiques autour d'un profil en fonction de l'incidence.

- 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.
- En **b** (**question 51 réponse 1**), 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.
- En **c** (**question 52 réponse 2**), 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 (question 53 réponse 4)**, 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 données à titre indicatif et n'ont pas la prétention d'être parfaitement exactes.

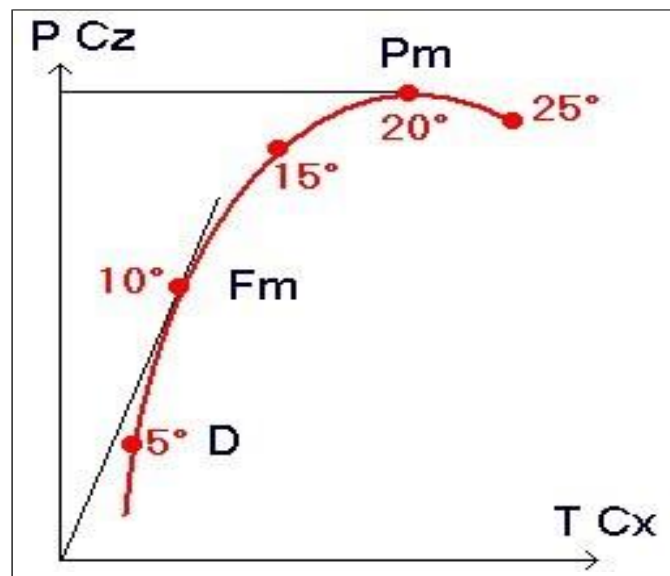


Figure A23 : Polaire des forces aérodynamiques. Les valeurs 5°, 10°, 15°, 20° et 25° représentent les diverses incidences en degré (ordre de grandeur).

Le rapport entre la portance et la traînée d'une aile (profil) donnée dépend donc avant tout **question 61** de l'angle d'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, 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 de 2°, **question 58** le coefficient  $C_z$  (coefficient de portance) de l'aile diminue alors que si l'incidence est augmentée de 2°, **question 60** le coefficient  $C_z$  de l'aile augmente.

### **Géométrie d'une aile. Charge alaire**

**Envergure** : **question 72** écart moyen (longueur) entre les extrémités droite et gauche de l'aile. 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  $m^2$ . 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**.



La surface « à plat » est plus grande que la surface projetée ou la surface projetée est **question 100** plus petite que la surface effective ou éventuellement identique.

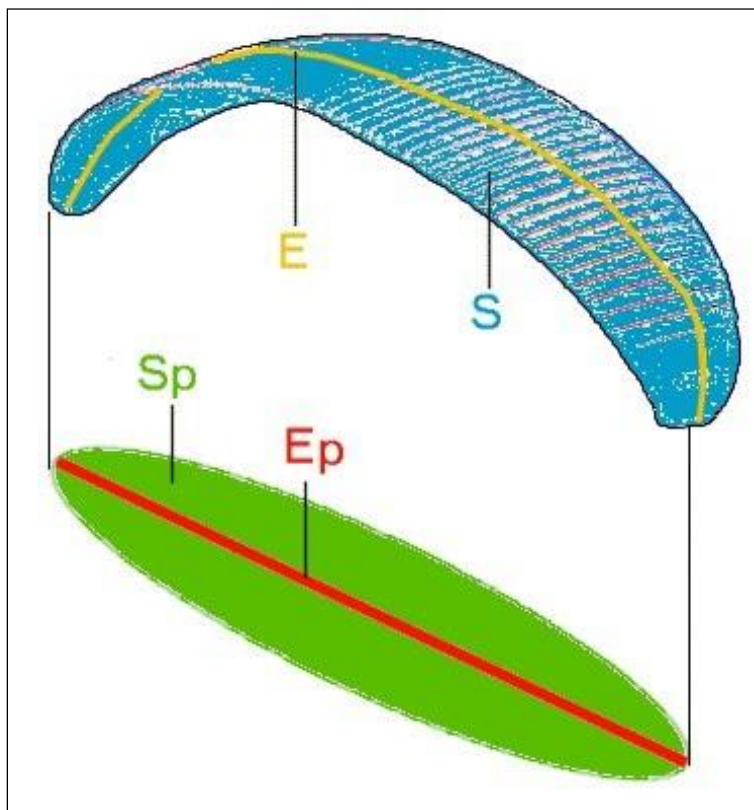


Figure A24 : Envergure et surface à plat et projetées. E = envergure à plat. S = surface à plat. Sp = surface projetée. Ep = envergure projetée.

**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 95kg = 5kg + 95kg = 100kg. PTV minimal d'une aile de 5 kg avec une charge minimale de 70kg = 5kg + 70kg = 75kg. 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 = 125kg. PTV minimal d'une aile de 35 kg avec une charge minimale de 65kg = 35kg + 65kg = 100kg. Il s'agit d'un exemple typique pour aile delta.

**Charge alaire :** **question 74** rapport entre le poids en vol et la surface de totale de l'aile. Elle est exprimée en générale en kg / m<sup>2</sup>. On obtient la charge alaire **question 75** en divisant le PTV par la surface (en général projetée). Pour les parapentes, la charge alaire habituelle est située entre 2,5 et 4kg/m<sup>2</sup>.

Exemples de calcul :

**Question 84** Calculer la charge alaire d'une aile de 25 m<sup>2</sup>, charge max. 95kg, charge min. 70kg, poids de l'aile 5kg. Il s'agit typiquement d'un parapente. Avec une charge maximale, la charge alaire = PTV max. / 25 m<sup>2</sup> = 100kg (95+5)/25m<sup>2</sup> = 4kg/m<sup>2</sup>.

**Question 85** Avec une charge minimale, la charge alaire = PTV min. / 25m<sup>2</sup> = 75kg (70+5)/25m<sup>2</sup> = 3kg/m<sup>2</sup>.

**Question 88** Calculer la charge alaire d'une aile de 12,5m<sup>2</sup>. Charge max. 90kg. Charge min. 65kg. Poids de l'aile 35kg. Il s'agit typiquement d'une aile delta.  
 Avec une charge maximale, la charge alaire = PTV max. / 25m<sup>2</sup> = 120kg (90+35)/12,5m<sup>2</sup> = 10kg/m<sup>2</sup>.

**Question 89** Avec une charge minimale, la charge alaire = PTV min. / 25m<sup>2</sup> = 100kg (65+35)/12,5m<sup>2</sup> = 8kg/m<sup>2</sup>.

Profondeur moyenne : **question 73** 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. Voir figure **A25**.  
 Relation entre la surface **S**, la profondeur moyenne **p** et l'envergure **e** : **S = p x e** ou **p = S / e**

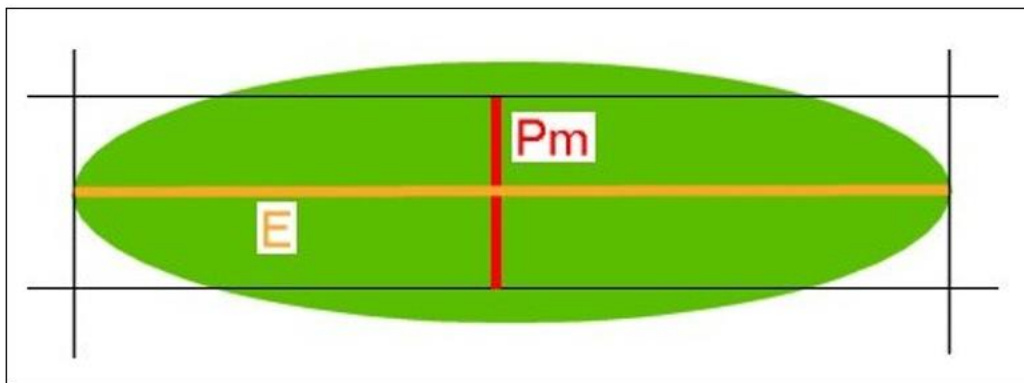


Figure A25 : Envergure E et profondeur moyenne Pm d'une aile.

Par exemple si une aile a une envergure de 10m et une surface de 25 m<sup>2</sup>, **question 83** la profondeur moyenne est égale à 25 m<sup>2</sup> / 10 m = 2,5m. 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. **Question 87** Autre exemple 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 m<sup>2</sup>/10 m = 1,25m.

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

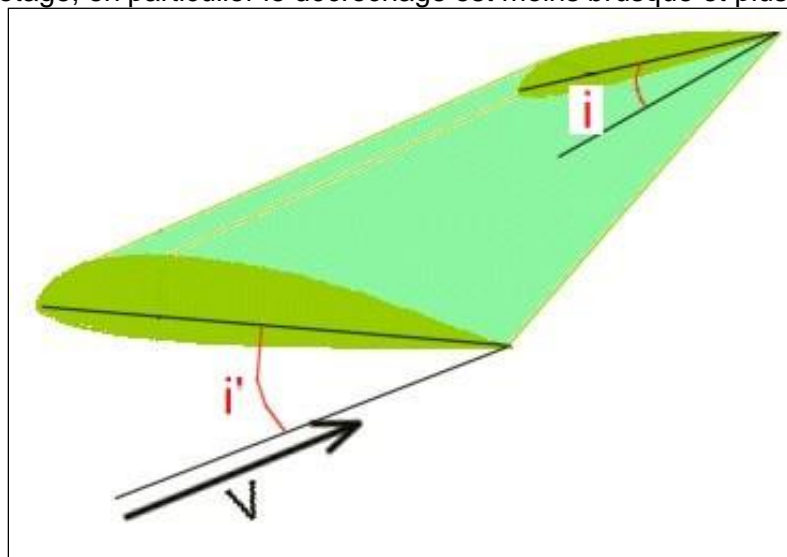


Figure A26 : vrillage d'une aile.  $i' > i$

Allongement : **question 76** rapport entre l'envergure et la profondeur moyenne de l'aile, c.-

à-d. l'envergure / la profondeur moyenne =  $e / p$ .

Petits calculs :  $e / p = e \times e / p \times e =$  envergure au carré / surface

En effet, le produit  $p \times e$  (envergure x profondeur moyenne) n'est autre que la surface de l'aile. Voir figure **A25**. Cette dernière formule **question 77**  $e^2/\text{surface}$  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 **question 78** une grande envergure et une petite profondeur moyenne, inversement les ailes à faible allongement ont donc **question 79** une petite envergure et une grande profondeur moyenne. Figure **A27**.

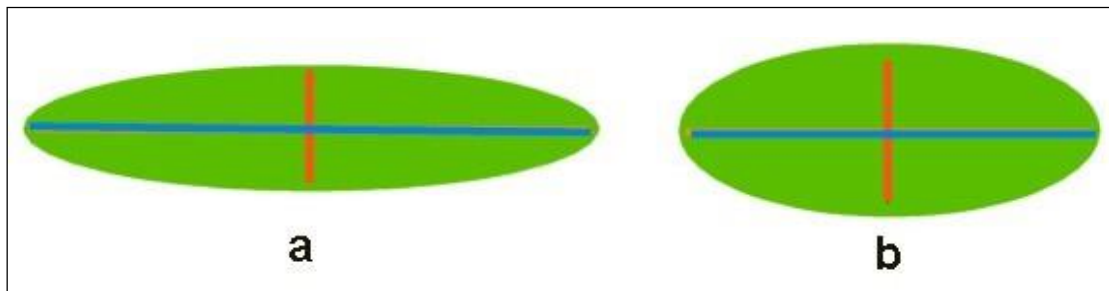


Figure A27 : a = grand et b = petit allongements.

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 **question 90** de 5-6, celui d'une aile delta actuelle est **question 91** de 7.

Une aile d'allongement = 5 aura donc **question 80** une envergure 5 fois plus grande que sa profondeur moyenne ou **question 81** une profondeur moyenne de l'aile 5 fois plus petite que son envergure.

Exemples de calcul :

Calcul de l'allongement d'une aile de 10m 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.

**Question 82** Allongement =  $10\text{m} \times 10\text{m} / 25\text{ m}^2 = 100 / 25 = 4$

Calcul de l'allongement d'une aile de 10m. 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.

**Question 86** 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 (parapente) :

- a) Surface 32m<sup>2</sup>, envergure 8m (allongement =  $8 \times 8 / 32 = 64 / 32 = 2$ ) **question 93**
- b) Surface 25m<sup>2</sup>, envergure 10m. (allongement =  $10 \times 10 / 25 = 100 / 25 = 4$ )
- c) Surface 20m<sup>2</sup>, envergure 10m. (allongement =  $10 \times 10 / 20 = 100 / 20 = 5$ )
- d) Surface 24m<sup>2</sup>, envergure 12m. (allongement =  $12 \times 12 / 24 = 144 / 24 = 6$ ) **question 92**

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 ( $32\text{m}^2$ ) et l'envergure la plus petite (8m). Pour l'allongement le plus grand, c'est à première vue possiblement c ou plutôt **d** car les surfaces sont les plus petites et les envergures les plus grandes.

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

- a) Surface  $16\text{m}^2$ , envergure 12m (allongement =  $12 \times 12 / 16 = 144 / 16 = 9$ )
- b) Surface  $20\text{m}^2$ , envergure 10m (allongement =  $10 \times 10 / 20 = 100 / 20 = 5$ ) **question 95**
- c) Surface  $12\text{m}^2$ , envergure 12m (allongement =  $12 \times 12 / 12 = 144 / 12 = 12$ ) **question 94**
- d) Surface  $12,5\text{m}^2$ , envergure 10m (allongement =  $10 \times 10 / 12,5 = 100 / 12,5 = 8$ )

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 ( $20\text{m}^2$ ) et l'envergure la plus petite (10m). Pour l'allongement le plus grand, c'est première vue possiblement soit d ou plutôt c car les surfaces sont les plus petites et les envergures les plus grandes.

### **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. **Question 102, cf. figure A28** 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 **question 104 la résultante des forces aérodynamiques (=RFA)**. Voir figure **A28**.

La RFA peut être décomposée **question 101** 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. Dans les situations de vol plané stable, vol trimmé et vol accéléré, **question 103** la résultante aérodynamique reste la même. Toujours en vol plané stable, **question 105** la traînée agit perpendiculairement à la portance. **Question 106** La portance et la traînée sont donc les composantes de la résultante aérodynamique et la seconde agit dans le sens de l'écoulement de l'air.

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.

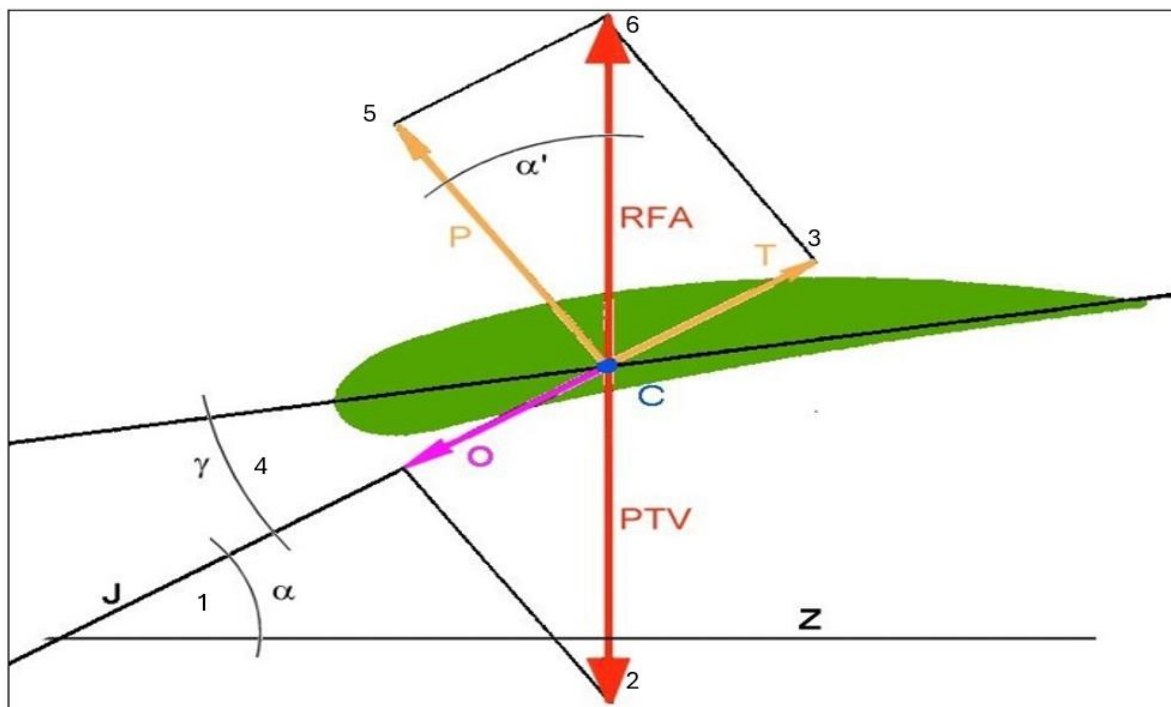


Figure A28 : Equilibre des forces d'un planeur en vol rectiligne uniforme. RFA = résultante des forces aérodynamiques. PTV = poids total en vol. P = portance. T = traînée. O = poussée. J = trajectoire (vent relatif). C = centre de poussée. Z = horizon. alpha = angle de plané. gamma = incidence. Figure utile pour la compréhension des **questions 102+104+105+106**

**Question 107** Les chiffres 1 et 3 indiquent l'angle de plané et la traînée

**Question 108** Les chiffres 5 et 3 indiquent la portance et la traînée

**Question 109** Les chiffres 1 et 2 indiquent l'angle de plané et le poids total

**Question 110** Les chiffres 6 et 4 indiquent la résultante aérodynamique et l'angle d'incidence

### Finesse d'une aile

La finesse d'une aile est une caractéristique importante pour évaluer ses performances. La finesse indique le rapport entre **question 120** la portance et la traînée. 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 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).
2. Puisque la distance horizontale parcourue et la hauteur perdue se réalise dans un même temps, la finesse = vitesse horizontale / taux de chute.
3. Puisque les angles alpha et alpha' 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).



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, **question 121** la finesse =  $P/T = C_z/C_x$ .

En résumé : Finesse =  $D/H$  = vitesse horizontale / taux de chute = **question 120**  $P/T = C_z/C_x$ . La finesse indique le rapport **question 122** entre la vitesse horizontale et la vitesse verticale donc entre **question 123** la distance horizontale et la différence d'altitude.

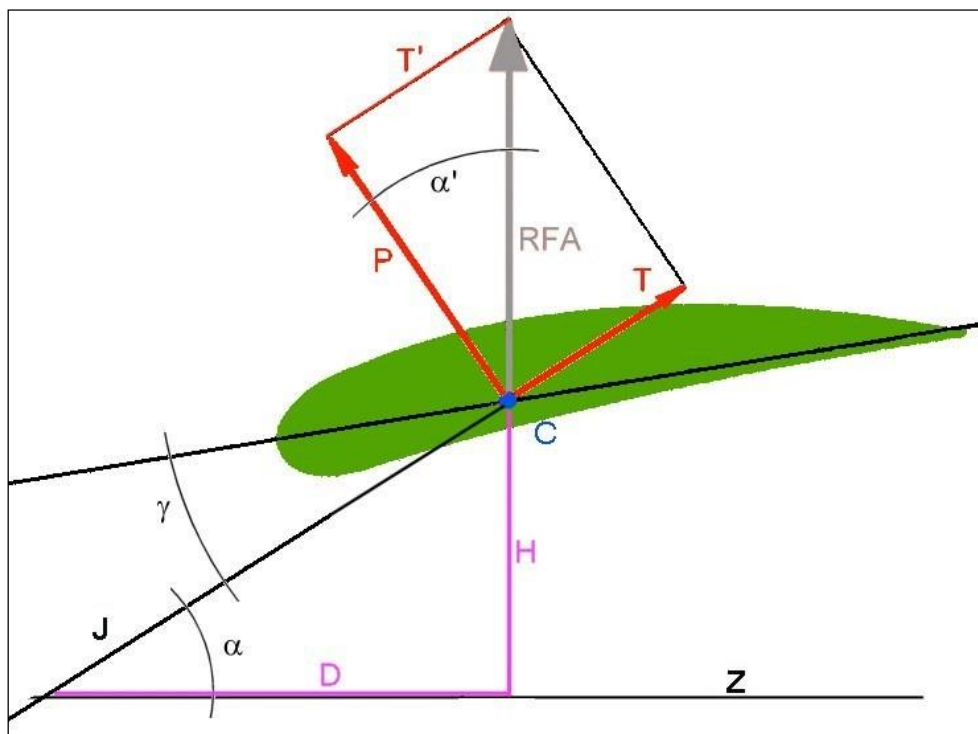


Figure A29 : calcul de la finesse.

### Quelques calculs et exemples pratiques :

Un planeur de pente d'une finesse 8 vole à 800m au-dessus du sol. Quelle est la plus grande distance qu'il peut parcourir en air calme ?  $H = 800\text{m}$ . et  $D$  est l'inconnue. Finesse =  $D/H$  ou  $D = \text{finesse} \times H = 8 \times 0,8 \text{ km} =$  **question 124** 6,4 km.

Un planeur de pente d'une finesse 12 vole à 2'400m au-dessus du sol. Quelle est la distance la plus grande qu'il peut parcourir en air calme ?  $H = 2400\text{m}$ . et  $D$  est l'inconnue. Finesse =  $D/H$  ou  $D = \text{finesse} \times H = 12 \times 2,4\text{km} =$  **question 125** 28,8km.

Un planeur de pente a parcouru avec 900m d'altitude en air calme la distance (la plus grande possible) de 5,4km. Quelle est sa finesse ?  $H = 900 \text{ m}$ . et  $D = 5,4\text{K}$ m. Finesse =  $D/H = 5,4\text{km} / 0,9\text{km} = 6$ .

Un planeur de pente a parcouru avec 1'400m d'altitude en air calme la distance la plus grande possible de 7km. Quelle est sa finesse?  $H = 1400\text{m}$ . et  $D = 7\text{km}$ . Finesse =  $D/H = 7\text{km} / 1,4\text{km} =$  **question 126** = 5.

Si la finesse augmente (par exemple  $H$  diminue et/ou  $D$  augmente) **question 127** l'angle alpha (angle de plané) diminue. Inversement, si l'angle alpha augmente (par exemple  $D$  diminue et/ou  $H$  augmente), **question 128** la finesse diminue.

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  $\alpha$  (angle de plané) diminuent et **question 99** la finesse ( $P/T=D/H$ ) augmente. Inversement, si la traînée augmente, la finesse diminue et **question 98** l'angle de plané augmente.

Si le planeur X a une finesse de 10 et le planeur Y une finesse de 5 alors **question 138** X peut parcourir une distance horizontale double à celle de Y pour une perte d'altitude identique.

Un planeur de pente vole avec une finesse 10 en air calme à une vitesse horizontal (sol) de 43km/h (env. 12m/s). Quel est son taux de chute ? Finesse = vitesse. horizontale. / taux chute donc taux chute = vitesse horizontale. / finesse =  $12 / 10 =$  **question 145** 1,2 m/s.

Un planeur de pente vole avec une finesse 8. S'il parcourt en air calme une distance de 1'600m, quelle est sa perte d'altitude ? Finesse = distance horizontale. / perte altitude donc perte altitude. = distance. Horizontale. / finesse =  $1600 / 8$  **question 146** = 200 m.

Un planeur de pente vole avec une finesse de 9 en air calme et avec un taux de chute de 1m/s. Quelle est sa vitesse ? Finesse = vitesse horizontale. / taux chute donc vitesse horizontale= finesse x taux de chute =  $9 \times 1\text{m/s}$  **question 147** = 9m/s (32.4km/h).

Un planeur de pente vole en air calme à une vitesse de 32,4km/h (9m/s) avec un taux de chute de 1,5m/s. Quelle est sa finesse? Finesse = vitesse horizontale / taux chute =  $9 / 1,5$ . **question 148** = 6

### Axes et stabilité de vol

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

1. Axe longitudinal : le mouvement autour de cet axe s'appelle **question 111** le roulis. C'est un mouvement latéral gauche- droit des extrémités de l'aile.
2. Axe transversal : le mouvement autour de cet axe s'appelle **question 112** le tangage. C'est un mouvement d'avant - arrière de l'ensemble de l'aile.
3. Axe vertical : le mouvement autour de cet axe s'appelle **question 113** le lacet. C'est un mouvement d'avant - arrière des extrémités de l'aile. .

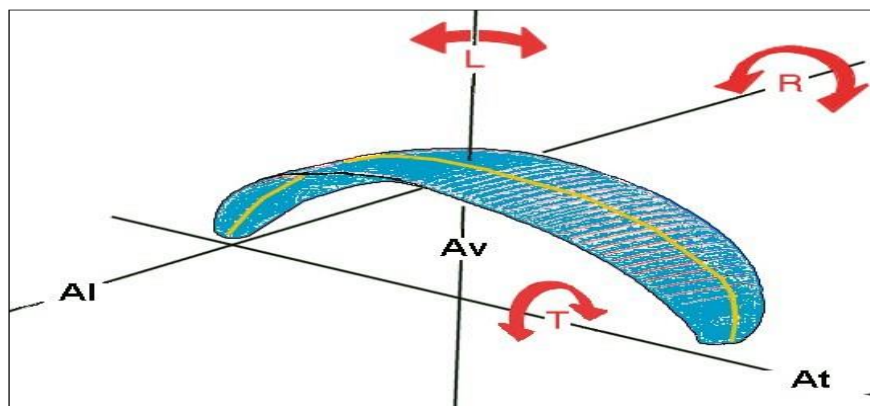


Figure A30 : Axes et mouvements en vol. Mouvement de lacet L autour de l'axe vertical Av. Mouvement de roulis R autour de l'axe longitudinal Al. Mouvement de tangage T autour de l'axe transversal At.



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 **question 116** des qualités de vol stables. Par exemple, 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 : Un planeur de pente qui, en vol rectiligne, augmente continuellement et spontanément sa vitesse, sans intervention du pilote, a **question 114** 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 **question 115** des qualités de vol indifférentes.

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, part en lacet, **question 117** n'est pas stable en direction (sur l'axe vertical).
- Un planeur de pente dont l'incidence diminue, sans intervention du pilote et en air calme, **question 118** n'est pas stable sur l'axe de tangage.
- Un planeur de pente qui, sans intervention du pilote et en air calme, oscille sans cesse autour de l'axe longitudinal **question 119** n'est pas stable sur l'axe de roulis.

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. **Question 129** 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. 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°, **question 57** la vitesse de vol augmente. Inversement, **question 59** lorsque l'incidence d'un planeur volant à finesse maximale est augmentée de 2°, la vitesse de vol diminue.

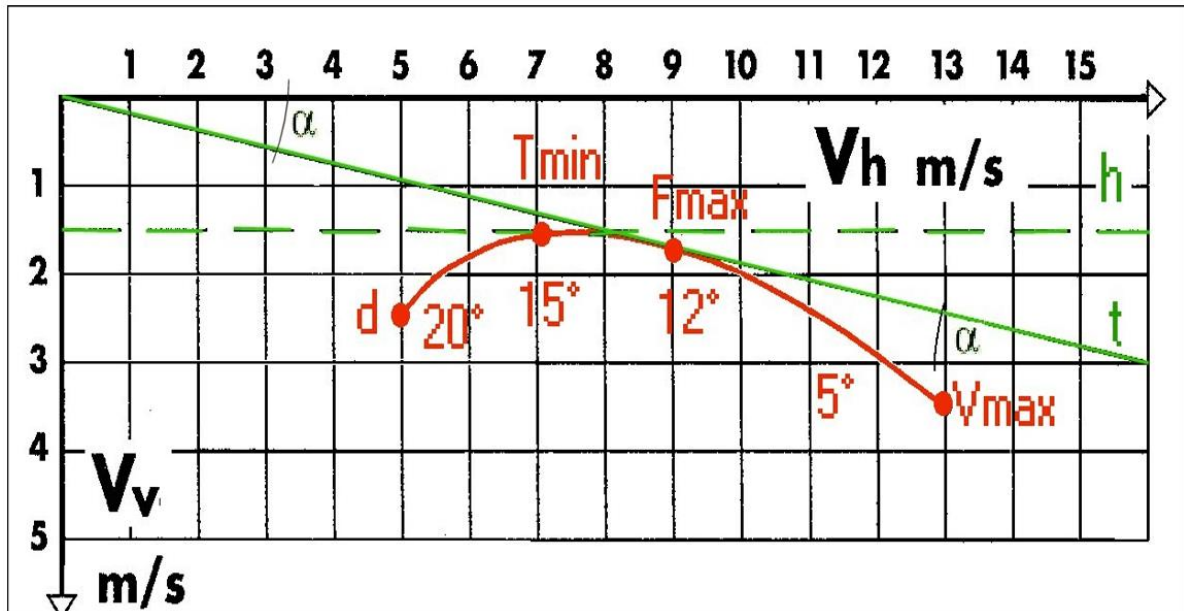


Figure A31 : polaire des vitesses.  $V_h$  = vitesse horizontale.  $V_v$  = vitesse verticale.  $t$  = tangente à la courbe passant par  $F_{max}$  = trajectoire à finesse max.  $h$  = tangente horizontale.  $\alpha$  = angle de plané.

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

1. 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 5m/s.
2. 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 7-8m/s avec un taux de chute = 1,5m/s.
3. 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 9m/s avec un taux de chute = 1,7m/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  $\alpha$ .
4. 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 13m/s avec un taux de chute = 3,5m/s. La finesse est donc égale à  $13/3.5=3.7$

Nous pouvons maintenant répondre aux questions. 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.

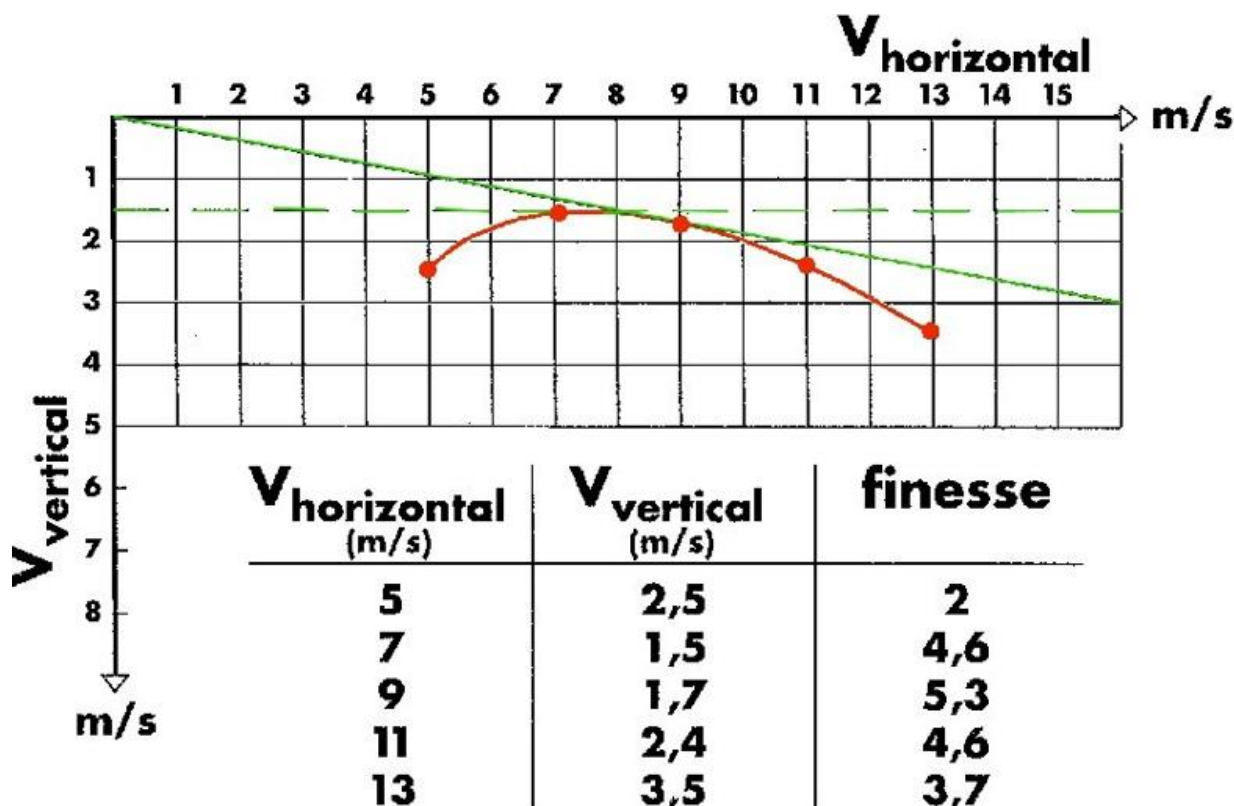


Figure A32 : graphique de base pour les questions QCM FSVL de l'examen théorique pour pilote de parapente

**Question 130** : 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 9m/s (33km/h). Dans le QCM, cette valeur n'étant pas présente, on va chercher la plus proche qui est 9,2m/s (33km/h).

**Question 131** : Quelle est la meilleure finesse du planeur de pente ? Dans la colonne « finesse » du tableau, on trouve la finesse maximale. Elle est de 5.3.

**Question 132** : Quelle est la vitesse de vol correspondant au taux de chute minimum ? Dans la colonne « Vvertical » (c.-à-d. vitesse verticale = taux de chute) du tableau, on trouve la valeur minimale. Elle est de 1,5m/s. Sur la même ligne, on va chercher, dans la colonne de la vitesse horizontale, la valeur de la vitesse de vol correspondante qui est d'environ 7m/s (26km/h), Dans le QCM, cette valeur n'étant pas présente, on va chercher la plus proche qui est 7,2m/s (26km/h).

**Question 133** : 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. Sur la même ligne, on va chercher, dans la colonne « finesse », la valeur correspondante qui est de 4,6.

**Question 134** : 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 5m/s. Il s'agit de la vitesse en dessous de laquelle l'aile décroche. La vitesse de vol minimale pratique est donc légèrement supérieure, par exemple 5,6m/s (20km/h).

**Question 135** : Quelle est la finesse du planeur de pente lorsqu'il vole à sa vitesse minimale ? Dans la colonne « Vhorizontal » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur minimale. Elle est de 5m/s. Sur la même ligne, on va chercher, dans la colonne « finesse », la valeur correspondante qui est de 2,0.

**Question 136** Quelle est la finesse du planeur de pente lorsqu'il vole à sa vitesse maximale ? Dans la colonne « Vhorizontal » (c.-à-d. la vitesse de vol) du tableau, on trouve la valeur maximale. Elle est de 13m/s environ (48km/h). Sur la même ligne, 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**.

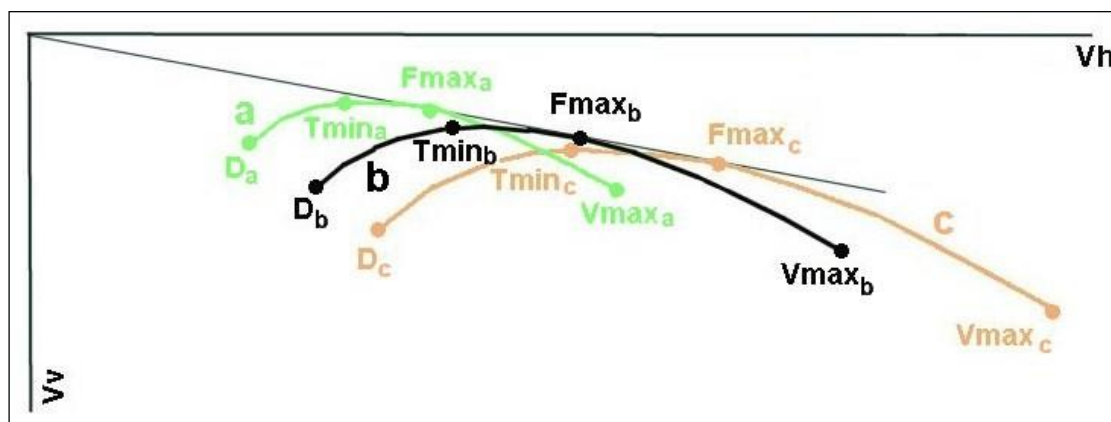


Figure A33 : influence de la charge alaire sur les vitesses et la polaire d'un planeur, a = faible charge alaire, c = forte charge alaire et b = charge alaire moyenne.

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. Ainsi, à charge maximale **question 66** le décrochage se produit à une vitesse plus élevée qu'à charge minimale, tandis qu'à charge minimale **question 67**, le décrochage se produit à une vitesse plus faible qu'à charge maximale.

### **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 6m/s. Toute la plage de vitesse de vol (horizontal) par rapport au sol est diminuée de 6m/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 6m/s. Voir figure **A34**. Avec une vitesse propre dans la masse d'air de 7m/s, la vitesse de vol par rapport au sol sera de 1m/s. Avec une vitesse propre de 10m/s, on aura 4m/s par rapport au sol. A vitesse de vol (horizontal) minimale (près du décrochage), à 5m/s par rapport à la masse d'air, l'aile recule de 1m/s par rapport au sol (-1m/s).

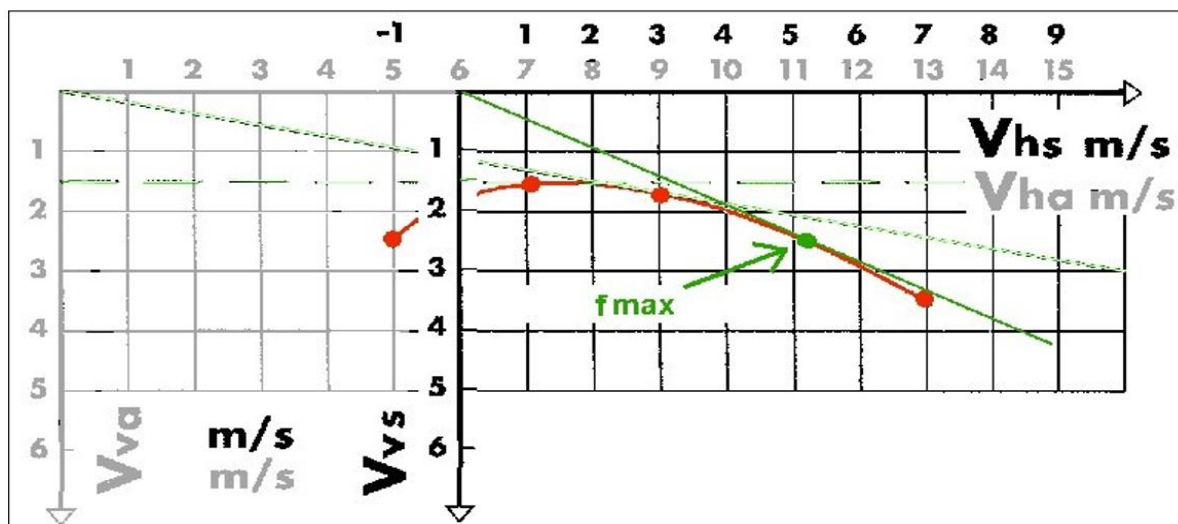


Figure A34 : Polaire des vitesses avec un vent de face de 6m/s.  $V_{hs}$  = vitesse horizontale par rapport au sol.  $V_{ha}$  = vitesse horizontale par rapport à l'air.  $V_{vs}$  =  $V_{va}$  = vitesse verticale (taux de chute) par rapport au sol et par rapport à l'air.  $f_{max}$  = finesse maximale.

Pour voler à finesse maximale face au vent, on comprend, selon le tableau ci-dessus, **question 140** qu'il faut voler plus vite que la vitesse de la finesse maximale en air calme. Il faut donc 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 11m/s dans la masse d'air ou de 5m/s par rapport au sol. C'est à cette vitesse que la finesse est maximale pour notre planeur face à un vent de 6m/s. La finesse vaut alors environ  $5/2.5 = 2$  seulement. Dans le QCM, le vent de face est de 8m/s, la tangente à cette polaire venant cette fois encore d'une nouvelle origine, on comprend que le point de contact avec la polaire sera légèrement plus à droite donc plus rapide encore que les 11m/s. Au final, la vitesse étant légèrement supérieure à 11m/s, la seule réponse possible est **question 137** de voler à sa vitesse maximale. Plus précisément, à quelle vitesse de vol le planeur de pente avec une polaire de la figure **A32** doit-il voler avec un vent de face de 8m/s (29km/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 8m/s sur l'axe des vitesses horizontales touche la polaire à une vitesse horizontale de 13m/s (ou  $13-8 = 5$ m/s par rapport au sol). On peut vérifier par calcul : si l'aile vole à 11m/s (ou 3m/s par rapport au sol) sa finesse sol sera de  $3 / 2.4 = 1,25$ . Si l'aile vole à 13m/s (ou 5m/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 13m/s de vitesses horizontales par rapport à l'air (vent relatif) ou à 3 et 5m/s de vitesses horizontales par rapport au sol.

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 2m/s. Voir figure **A35**. Cela revient au même que de déplacer toute la polaire vers le bas de 2m/s ou de remonter l'origine des axes de 2m/s. Pour obtenir la finesse maximale (tirer la tangente à la polaire depuis la nouvelle origine des axes), il faut à nouveau **question 139** voler plus vite qu'à finesse maximale en air calme. Par contre, si l'on vole à une incidence donnée (par exemple au taux de chute minimal), **question 149** la vitesse de vol (sous-entendu horizontale) ne varie pas que ce soit en air calme, en air ascendant ou en air descendant.

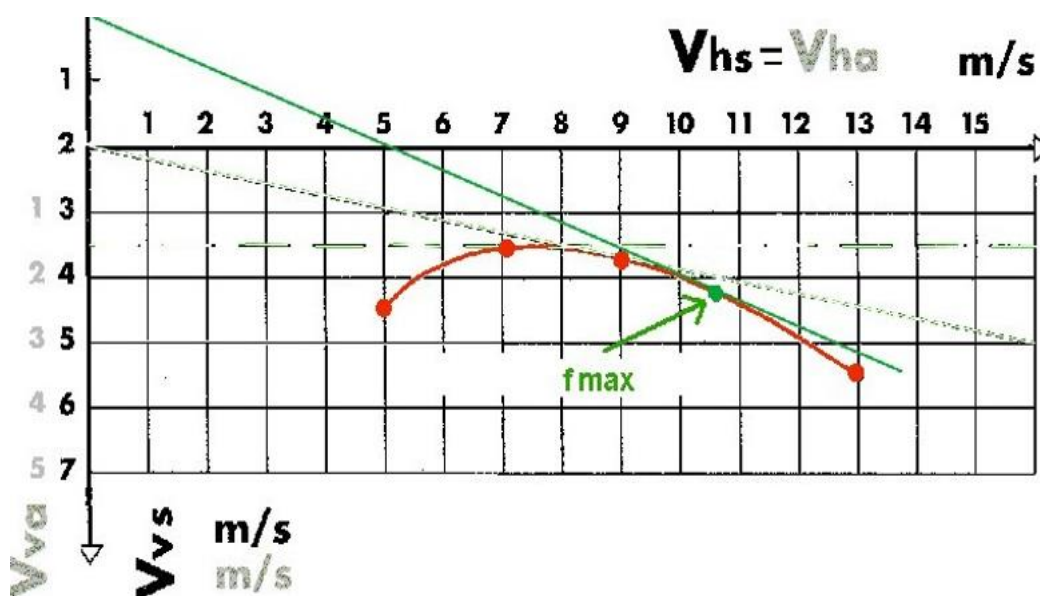


Figure A35 : Polaire des vitesses avec un vent descendant de 2m/s.  $V_s$  = vitesse verticale par rapport au sol.  $V_{va}$  = vitesse verticale par rapport à l'air.  $V_{hs} = V_{ha}$  = vitesse horizontale par rapport au sol et par rapport à l'air.  $F_{max}$  = finesse maximale.

Un libériste vole à une vitesse de 36km/h (10m/s) et à un taux de chute de 1m/s. Il atteint une zone de courant descendant de 1m/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 ? **question 141** La vitesse horizontale ne change pas (10m/s=36km/h) 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  $10/1 = 10$ . **Question 142** La finesse passe donc de 10 à 5.

Un planeur de pente vole à une vitesse de 54km/h (15m/s) et avec un taux de chute de 2m/s. Sur sa trajectoire de vol souffle un vent de face de 18km/h (5m/s). Quels sont son taux de chute et sa vitesse (horizontale) et quelle est sa finesse par rapport au sol ? **Question 143** Le taux de chute ne change pas (2m/s). La vitesse de vol est diminuée de 5m/s, elle devient  $15-5 = 10$ m/s (36km/h). **Question 144** 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 ( $F_c$ ), dirigée vers l'extérieure du virage. Voir figure **A36**.

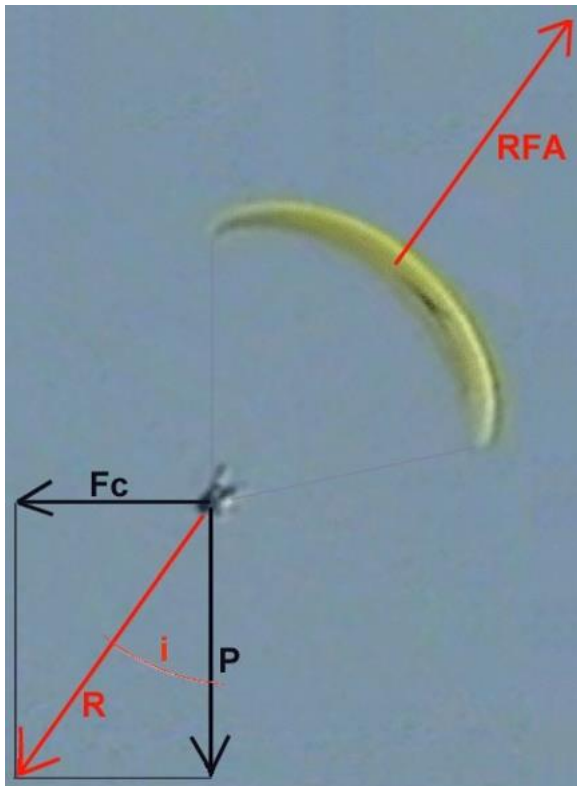


Figure A36 : Equilibre des forces d'un planeur en virage. RFA = résultante des forces aérodynamiques.  $i$  = angle d'inclinaison de l'aile.  $F_c$  = force centrifuge.  $P$  = PTV en vol rectiligne.  $R$  = PTV en virage.

Puisque  $P$  (vertical et dirigé vers le bas) et  $F_c$  (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  $F_c$  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  $P$ . Le terme facteur de charge désigne **question 150** la charge effective du planeur de pente en vol divisée par son poids total au sol.

Le facteur de charge se mesure en G. Si  $P = 100\text{kg}$  et que  $R = 250\text{kg}$ , le facteur de charge =  $250 / 100$  **question 151** = 2,5G.

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 152**. 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 décroche en ligne droite à 20km/h, on peut décrocher dans un tel virage à 28km/h. A 70° on subit théoriquement 3 G et à 80° 6 G !

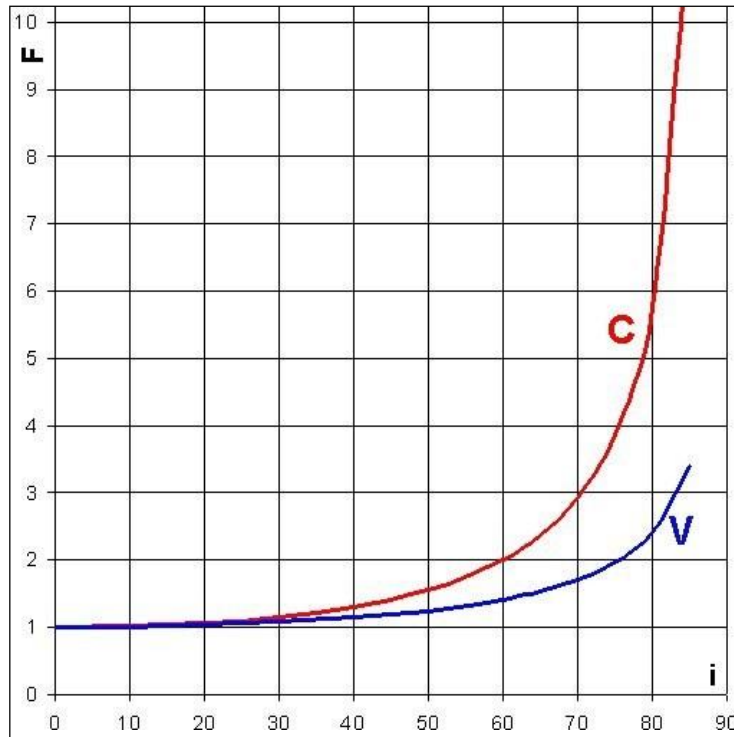


Figure A37 :  $F$  = facteurs de charge ( $C$ ) et d'augmentation des vitesses ( $V$ ) en fonction de l'angle d'inclinaison  $i$  (en °) du virage.

*Chers amis libéristes et futurs libéristes,*

*Cet imprimé (3<sup>ème</sup> 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.*

*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*

*Téléchargement de la dernière version : <https://soaringmeteo.org/docs.html>*

*En échange de la gratuité, SVP, je vous prie de ne pas hésiter à m'indiquer par email ( [equipe@soaringmeteo.org](mailto:equipe@soaringmeteo.org) & [soaringmeteo.org@gmail.com](mailto:soaringmeteo.org@gmail.com) ) 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.*

*Auteur principal : Jean Oberson, mars 2005  
Contribution et mise à jour : Thierry Vallotton, septembre 2025  
Contribution et relecture :*