Le vol à la voile

Vasilesco Karpen

LE VOL A LA VOILE [1].

Par M. VASILESCO KARPEN.

IV

Évaluation des puissances intervenant dans le vol à la voile [*équation* (6)]. — *La puissance empruntee au vent* a pour expression :

$$U = \frac{P}{g} \beta v' \cos\gamma - \frac{d}{dt} \frac{1}{2} \frac{P}{g} \beta^2. \tag{9}$$

(1) Voir ce vol., p. 101. Errata : Dans la première partie de cet article, p. 104, équation (6), il faut lire $-\frac{d\beta}{dt}$ au lieu de $+\frac{d\beta}{dt}$.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:019130030039901

On peut considérer, comme puissance captée, le premier terme de U seulement, et dire que cette puissance sert, en partie, pour la sustentation et la pénétration pertes comprises, et en partie pour accumuler de l'énergie, soit sous forme d'énergie potentielle gravifique Ph, soit sous forme de force vive $\frac{1}{2}\frac{P}{g}\beta^2$; la proportion entre ces deux sortes d'énergie étant déterminée par la variation de β, qui peut être telle que la hauteur reste constante, que l'oiseau vole dans un plan horizontal, et que la régulation du vol se fasse exclusivement par la variation de β, qui est elle-même produite par la variation de l'angle d'attaque i [équation (5)].

Lorsque T est suffisamment grand, ou lorsque β a la même valeur au commencement et au bout du temps T, la puissance moyenne a pour expression :

$$U_m = \frac{P}{gT}\int_0^T \beta v' \cos\gamma. \tag{10}$$

La puissance de sustentation et de pénétration en ligne droite est :

$$U_{ps} = \frac{P^2}{KS\beta} + K'S'\beta^3,$$

elle est rendue minimum par la vitesse relative :

$$\beta = \beta_1 = 15{,}2P^{\frac{1}{6}}.$$

qu'il faut adopter en vol plané pour descendre avec la moindre vitesse.

Mais dans le vol à la voile, la meilleure vitesse est la vitesse β_0, qui rend minimum l'accélération du vent nécessaire au vol (p. 107) :

$$v' = g\left[\frac{P}{KS\beta^2} + \frac{K'S'}{P}\beta^2\right].$$

Il est à remarquer qu'on peut faire varier largement β autour de β_0, avant que v' ou U_{ps}, augmentent sensiblement ; on s'en rend compte par le tableau suivant :

(11)

$\frac{\beta}{P^{\frac{1}{6}}} =$	10	15	18	20	22	25	30	m. par sec.
$v' =$	0,56	0,33	0,29	0,28	0,29	0,31	0,38	m. par sec².
$\frac{U_{ps}}{P^{\frac{7}{6}}} =$	0,61	0,51	0,53	0,58	0,66	0,80	1,17	kgm. par sec.

La perte de puissance dans les virages:

$$U_v = 0{,}06 \left[\frac{v' \sin\gamma}{\beta} + \frac{\beta}{\rho}\right]^2 \beta P^{\frac{4}{3}},$$

ne devient sensible que si ρ est petit, et alors $\frac{v' \sin\gamma}{\beta}$ devient négligeable.

Si l'oiseau doit tourner de l'angle α pendant le temps t_1, on a $\rho\alpha = \beta t_1$, et

$$(12) \qquad U_v = 0{,}06 \left[\frac{\alpha}{t_1}\right]^2 \beta P^{\frac{4}{3}},$$

pour une seconde de temps par 20° d'angle et pour $\beta = \beta_0$, on a $U_v = 0{,}15 \; P^{\frac{3}{2}}$. On voit que cette perte de puissance est petite par rapport à U_{ps}; elle n'a d'ailleurs lieu que dans les parties fortement courbées de la trajectoire.

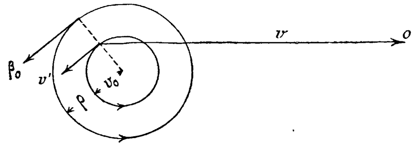

FIG. 4.

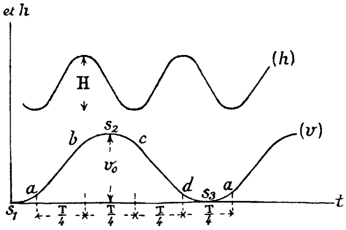

FIG. 5.

Perte d'énergie due à l'accélération verticale. — La hauteur h varie par rapport au temps, suivant une courbe (h) (*fig.* 5) qu'on peut assimiler à une sinusoïde; la perte entre deux sommets de cette courbe distants en hauteur de H et en temps de t_2 est:

$$(13) \qquad U_h = \frac{P^2}{KS\beta g^2} \int_0^{t_2} \left(\frac{d^2h}{dt^2}\right)^2 dt = 0{,}7 \; \frac{H^2}{\beta t_2^3} \; P^{\frac{4}{3}}.$$

L'oiseau peut toujours rendre cette perte négligeable en diminuant la variation de h par la variation de β.

Puissance probable des oiseaux. — La puissance que doit développer un oiseau rameur est — au rendement près — de l'ordre de celle dépensée dans le vol à la voile. D'après ce qu'il a été dit plus haut, cette puissance, pour un oiseau pesant P kilogrammes, doit être de $P^{\frac{7}{6}}$ kilogrammètres, soit par kilogramme de poids $P^{\frac{1}{6}}$ kilogrammètres ou 0,013 $P^{\frac{1}{6}}$ cheval-vapeur.

V

Exemples de vents permettant le vol à la voile. — a) *Vent périodique variable en grandeur et direction, pouvant être représenté par un vecteur dont la pointe O est fixe et dont l'autre extrémité parcourt, avec une vitesse v', un cercle horizontal de rayon v_0 (fig. 4).* C'est le vent parfait au point de vue du vol à la voile.

La trajectoire relative parcourue par l'oiseau avec la vitesse β_0 sera un cercle horizontal de rayon $\rho = v_0 \frac{\beta_0}{v'}$, la vitesse β_0 étant constamment parallèle à l'accélération v' du vent ($\gamma = 0$).

L'équation (8) donne, T étant la période du vent :

$$v' = 0{,}284 + 0{,}6P^{\frac{1}{3}} \frac{\beta_0^2}{\rho^2} = 0{,}284 + \frac{23{,}7}{T^2} P^{\frac{1}{3}},$$

et l'on a :

$$v_0 = \frac{v'T}{2\pi} = 0{,}045T + \frac{3{,}77}{T} P^{\frac{1}{3}},$$

$$\rho = \beta_0 \frac{T}{2\pi} = 3{,}2TP^{\frac{1}{6}}.$$

Pour $P = 1$, $T = 30$ sec., l'on doit avoir, pour assurer strictement le vol, $v' = 0{,}31$ m : sec.^{2} $v_0 = 1{,}48$ m : sec. $\rho = 96$ mètres.

b) *Vent horizontal de direction invariable et de vitesse périodiquement variable suivant la courbe a, b, c, d, a de la fig. 5.*

Le vent est supposé tout juste suffisant pour assurer le vol à la voile.

L'oiseau gardera une vitesse relative moyenne β_0 et manœuvrera de la façon suivante : Pendant que le vent augmente de a en b, l'oiseau volera *contre le vent* en gagnant une hauteur H et β augmentera de $\beta_0 - \Delta\beta$ à $\beta_0 + \Delta\beta$; de b en c il décrit un arc de cercle et descend de H pendant que β diminue à $\beta_0 - \Delta\beta$; de c en d il vole *dans le sens du vent* en remontant de H, β augmente à $\beta_0 + \Delta\beta$; enfin de d en a il décrit un arc de cercle, redescend de H, et β revient à $\beta_0 - \Delta\beta$.

De a en b et de c en d la direction du vol fait avec le vent l'angle γ. Les arcs de cercle sont ouverts de $(\pi - 2\gamma)$.

La courbe de la hauteur en fonction du temps est une courbe périodique (h) (*fig.* 5), de fréquence double de celle du vent.

Par cette manœuvre, l'oiseau profite tout aussi bien de la diminution du vent que de son augmentation, et les choses se passent comme si les parties descendantes de la courbe du vent étaient retournées vers le haut, c'est-à-dire comme si le vent augmentait toujours.

Écrivant que l'énergie empruntée au vent est égale à l'énergie dépensée, pendant T et pendant $\frac{T}{4}$, on obtient pour $P = 1$, $\beta_0 = 20$ m : sec., en utilisant les relations (9), (10), (12), (13) et le tableau (11) :

$$v_0 \cos\gamma = 0{,}15T + \frac{2.4}{T}(\pi - 2\gamma)^2 + 2{,}25\,\frac{H^2}{T^3},$$

$$H = 2v_0 \cos\gamma - 4\Delta\beta - 0{,}15T - 2{,}25\,\frac{H^2}{T^3}.$$

Lorsque T *est relativement grand*, l'oiseau trouve avantage à adopter $\gamma = 0$: ainsi pour $T = 40$ sec., on trouve $v_0 = 6{,}6$ m : sec., et

$$H = 7.2 - 4\Delta\beta,$$

le terme dû à l'accélération verticale égal à 0,002 étant négligeable.

Si l'on veut que la trajectoire soit horizontale ($H = 0$), il suffit de faire varier β entre 18.2 m : sec. et 21,8 m : sec. ($\Delta\beta = 1{,}8$).

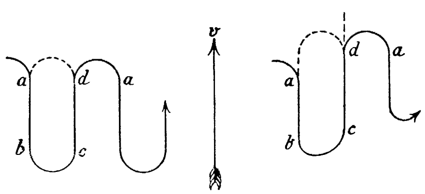

FIG. 6 et 7.

Les trajectoires horizontales relative et absolue sont représentées à l'échelle sur les *fig.* 6 et 7.

Si, au lieu de décrire les demi-cercles alternativement à droite et à gauche, l'oiseau les décrivait toujours à gauche, les trajectoires auraient les formes indiquées en pointillé.

Dans les deux cas, l'oiseau n'avance que momentanément contre le vent; il est en définitive emporté dans la direction du vent avec la vitesse moyenne de celui-ci; il ne pourrait avancer contre le vent que si l'accélération de celui-ci était supérieure à celle strictement nécessaire pour le vol.

Lorsque, au contraire, T *est petit,* l'oiseau trouve avantage à adopter un angle γ différent de zéro, pour diminuer la perte dans les virages; ainsi pour T = 6 sec., la plus petite valeur de v_0 correspond à $\gamma = \frac{\pi}{4}$, pour lequel on trouve $v_0 = 2{,}7$ m : sec., tandis que, pour $\gamma = 0$, on aurait $v_0 = 4{,}8$ m : sec.

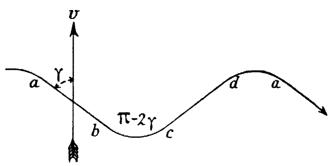

Fig. 8.

Pour que la trajectoire (*fig.* 8) reste horizontale il faut que $\Delta\beta$ soit égal à 0,8 m : sec. :

La plus petite valeur v_0 permettant le vol à la voile est d'environ 2,4 m : sec.; au-dessous de cette valeur, quel que soit T, le vol à la voile n'est plus possible.

c) *Essor d'un voilier par vent horizontal violent, mais de direction invariable et de vitesse uniforme v.* — L'oiseau dirige son axe dans un sens contraire au vent, ouvre les ailes et, adoptant l'angle d'attaque i correspondant à la vitesse relative initiale $\beta = v$ [équation (5)], s'élève et perd progressivement cette vitesse en modifiant en conséquence son angle d'attaque; arrivé au bout du temps T à une hauteur H avec la vitesse β_k, il commence à descendre et arrive à terre au bout du temps T'.

L'équation (6) multipliée par βdt et intégrée de o à T, donne pour P = 1 :

$$\frac{v^2 - \beta_k^2}{2g} = U_{ps}T + U_h + H.$$

U_{ps} et U_h ayant les valeurs moyennes pour β compris entre v et β_k. Pour $v = 20$ m : sec. et $\beta_k = 10$ m : sec., il vient :

$$15 = 0{,}6T + \frac{H^2}{T^3} + H.$$

Le maximum de la hauteur à laquelle peut s'élever l'oiseau est d'environ 11 mètres; il correspond à $T = 5$ sec.

Cet essor aurait été observé par Mouillard.

Les cas théoriques traités sous a), b) et c) me semblent encadrer assez bien les cas réels ; je dois toutefois faire remarquer qu'en réalité l'oiseau ne pourra pas maintenir constamment $\gamma = 0$; il faudrait pour cela lui supposer un sens spécial lui permettant non seulement de sentir la direction de la moindre variation du vent, mais de la *pressentir* pour se diriger en sens contraire de sa direction pendant même que la variation se produit. Autrement il y aura toujours un retard du mouvement de l'oiseau sur la variation du vent, ce qui fera que γ ne sera pas nul toutes les fois qu'il y aurait avantage à ce qu'il le fût. Les conclusions restent pourtant les mêmes, la marge que j'ai donnée à l'accélération du vent nécessaire au vol (30 à 50 cm : sec.^{2}) étant, en général, suffisante pour comprendre aussi l'effet de ce retard.

VI

Théories existantes. — Les théories émises sur le vol à la voile envisagent surtout le vent considéré plus haut sous b); la plus ancienne de toutes peut se résumer de la façon suivante : « L'oiseau volant contre le vent, monte en perdant de sa vitesse absolue pendant que le vent augmente, puis, lorsque le vent diminue, l'oiseau descend en rattrapant la vitesse perdue. Au bout d'une période, β et h reviennent, ainsi que la vitesse du vent, à leurs valeurs initiales. »

Par exemple dans le cas de la *fig.* 5, la vitesse serait $\beta + \Delta\beta$ dans la région $b - c$; et $\beta - \Delta\beta$ dans la région $d - a$; avec une moyenne β.

Telle est la théorie dite des *montagnes russes*, imaginée par Langley et reçue par divers auteurs. Elle est inacceptable, car l'énergie empruntée au vent pendant une période :

$$\frac{P}{g}\int_0^T(\beta \cos\gamma dv - \beta d\beta) = \frac{P}{g}\int_0^T \beta \cos\gamma dv,$$

est nulle, $\cos\gamma$ étant égal à 1 de s_1 en s_2 et à -1 de s_2 en s_3.

Pour que l'énergie empruntée au vent soit positive au bout d'une période, sans que l'oiseau change la direction de son vol, il faut que la moyenne de β soit plus grande *pendant* que le vent augmente que *pendant* que le vent diminue. Il en résulte que, pendant que le vent reste stationnaire, la vitesse relative doit forcément varier : de b en c elle diminuera de $2\Delta\beta$, l'oiseau gagnant de la hauteur ; de d en a elle augmentera de $2\Delta\beta$ l'oiseau descendant. Dans ces conditions, l'énergie empruntée au vent pendant une période est :

$$\frac{P}{g} \times v_0 \times 2\Delta\beta.$$

Elle est bien plus petite (dans le rapport de $\Delta\beta$ à β_0) que dans le cas où l'oiseau change la direction du vol suivant l'accélération du vent. D'un autre côté l'énergie dépensée est plus grande à cause de la perte considérable due à l'accélération verticale qui est inévitable.

D'ailleurs, la manœuvre, indiquée par cette théorie ainsi modifiée, inférieure au point de vue quantitatif, n'est guère acceptable physiologiquement.

Théorie du vent louvoyant [1]. — Suivant cette théorie qui serait applicable surtout dans le cas d'un vent rapidement variable : « La vitesse absolue V conserve une direction générale normale à la direction du vent variable. L'oiseau maintient son axe dans une direction normale au vent et, recevant le vent tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, oscille sous son influence, comme une balle par deux raquettes et décrit une trajectoire en crochets, en orientant ses ailes de façon à provoquer une composante, de la réaction du vent, parallèle à la direction générale du mouvement. »

On peut prouver, sans entrer dans les détails d'ailleurs ingénieux de cette théorie, qu'elle est insuffisante pour expliquer le vol à la voile. Soient (*fig.* 9) :

$$v = \frac{v_0}{2} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

la vitesse du vent, B et A les composantes de V suivant la direction du vent et suivant une direction normale.

La vitesse A est oscillatoire, de même période que v, et son maximum, qui a lieu au moment où elle devient égale à v, est en retard de t_1 sur le maximum de v, on doit donc avoir :

$$A = \frac{v_0}{2} \cos \frac{2\pi}{T} t_1 \sin \frac{2\pi}{T} (t - t_1).$$

---

(1) Voir Alexandre Sée : *Les lois expérimentales de l'aviation.*

L'énergie empruntée au vent est :

$$W = \frac{P}{g}\int_0^T \beta dv \cos\gamma = \frac{P}{g}\int_0^T (v - A)\,dv = \frac{\pi v_0^2}{8}\sin\frac{4\pi}{T}t_1,$$

car

$$\cos\gamma = \frac{v - A}{\beta}.$$

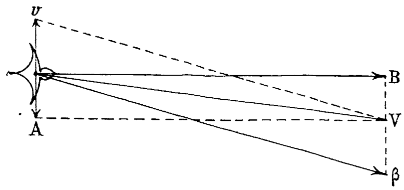

FIG. 9.

Cette énergie dépend du retard t_1, elle peut être nulle ; je supposerai, au contraire, que l'oiseau, loin de jouer le rôle passif que lui attribue cette théorie, s'arrange pour capter le maximum d'énergie, ce qui a lieu pour :

$$t_1 = \frac{T}{8}.$$

$$W_{max.} = \frac{\pi v_0^2}{8}\frac{P}{g}.$$

D'un autre côté, je réduirai les dépenses à celles minima nécessaires pour la sustentation et la pénétration :

$$W'_{min.} = 0{,}51 P^{\frac{7}{6}} T \quad \text{(tableau 11)}.$$

En réalité, les dépenses sont beaucoup plus considérables, car cette théorie ne suppose pas l'attaque de front ; je néglige d'ailleurs l'influence de la variabilité de β, ainsi que les pertes dues aux courbes et à l'accélération verticale.

Pour que le vol soit possible, il faut que :

$$W_{max.} = W'_{min.} \qquad \text{ou} \qquad \frac{2v_0}{T} = \frac{25}{v_0} P^{\frac{1}{6}}.$$

Cette dernière formule montre que, malgré les hypothèses aussi favorables que peu justifiées admises, pour que le vol à la voile suivant cette théorie fût possible, il faudrait des vents d'accélération moyenne $\frac{2v_0}{T}$ invraisemblable.

VII

Le vol à la voile peut aussi être pratiqué par *vent constant par rapport au temps, mais variable d'un point à l'autre de l'espace.*

On pourra encore appeler accélération totale du vent le vecteur :

$$v' = \left[\frac{dv}{dt}\right].$$

$[dv]$ étant la variation géométrique du vent entre les positions de l'oiseau au commencement et à la fin du temps dt. Dans ce cas c'est l'oiseau lui-même qui, par le choix de sa trajectoire, crée, pour ainsi dire, l'accélération du vent nécessaire au vol.

L'accélération ainsi définie joue, au point de vue du vol à la voile, le même rôle que l'accélération vraie du vent.

Si, pour simplifier, on néglige les pertes U_v et U_h, et si l'on suppose β presque constant et le vent vertical nul, l'équation (6) devient :

$$\frac{P}{g} v' \cos\gamma = \frac{P^2}{ks\beta^2} + k's'\beta^2 + \frac{P}{\beta}\frac{dh}{dt}. \tag{14}$$

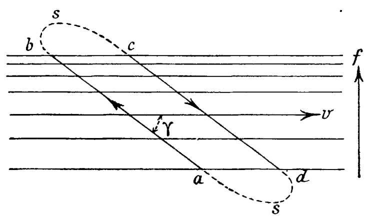

FIG. 10.

Je me bornerai à examiner les deux cas suivants:

1° *Vent dont la vitesse, ayant partout la même direction, est constante suivant un plan vertical parallèle au vent et augmente uniformément de v'_1 m : sec. par mètre de distance, mesurée suivant la flèche horizontale f (fig. 10) normale au vent.*

L'oiseau dirigera sa vitesse relative β de façon à faire constamment un même angle γ avec v ; l'oiseau volera dans le sens contraire au vent a-b, s'il se dirige du côté où le vent augmente, et dans le sens du vent c — d, s'il se dirige du côté où le vent diminue.

Si l'on remplace v' par sa valeur $\beta v'_1$ sin γ, l'équation précédente devient :

$$v'_1 = \frac{2g}{\sin 2\gamma}\left[\frac{P}{KS\beta^2} + \frac{K'S'\beta^2}{P}\right]\frac{1}{\beta}.$$

La plus petite valeur de v'_1 permettant le vol à la voile est :

$$v'_1 = \frac{0{,}025}{P^{\frac{1}{6}}} \text{ mètre-seconde,}$$

elle correspond à :

$$\gamma = \frac{\pi}{4} \qquad \text{et à} \qquad \beta = 26P^{\frac{1}{6}} \text{ mètre-seconde.}$$

Le vol à la voile est donc possible, pour un oiseau pesant 1 *kilogramme, si la variation de la vitesse du vent entre deux plans verticaux distants d'un mètre est supérieur à* 25 *millimètres par seconde.*

Si l'oiseau doit exécuter d'autres évolutions, par exemple, parcourir le trajet a, b, s, c, d, s, a, la variation du vent doit être plus grande, pour que l'oiseau puisse accumuler en hauteur ou en force vive, l'énergie nécessaire pour parcourir les arcs s.

2° *Vent dont la vitesse, constante dans un même plan horizontal, varie en grandeur et direction, suivant une verticale.*

Pour tirer parti d'un tel vent, l'oiseau doit forcément varier sa hauteur. Soit v'_2 m : sec., le vecteur représentant en grandeur et direction la variation géométrique du vent par mètre de hauteur.

$$v' = v'_2 \frac{dh}{dt} = v'_2 h'.$$

La projection horizontale de la trajectoire optimum se détermine comme dans le cas de l'accélération vraie du vent, en prenant $\gamma = 0$.

L'équation (14) devient :

$$v'_2 = \frac{g}{h'}\left[\frac{P}{KS\beta^2} + \frac{K'S'}{P}\beta^2\right] + \frac{g}{\beta}.$$

Le minimum de v'_2 est d'environ $0{,}3P^{-\frac{1}{6}}$ mètre-seconde, mais il correspond à de trop grandes vitesses h' et β ; pour $\beta = 30P^{\frac{1}{6}}$ et $h' = 6P^{\frac{1}{6}}$, l'on a $v'_2 = 0,4P^{-\frac{1}{6}}$ mètre-seconde.

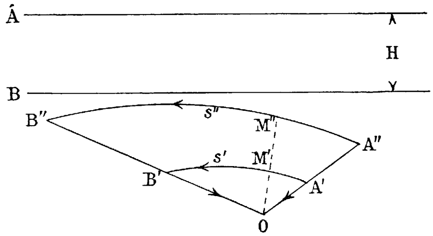

Fig. 11.

A titre d'exemple, considérons deux plans horizontaux A et B (*fig.* 11). Soient OA′ et OB′ les vitesses du vent au-dessus de A et au-dessous de B, et supposons qu'entre A et B la vitesse varie uniformément suivant l'arc A′B′ de longueur s'. Le vol sera possible si :

$$v'_2 = \frac{s'}{H} > 0,4P^{-\frac{1}{6}} \text{ mètre-seconde.}$$

La trajectoire horizontale sera une courbe s'' telle que :

$$\frac{(OM') \text{ m.}}{(OM'') \text{ m.-sec.}} = \frac{\beta}{v'}.$$

Les vitesses OA′ et OB′ étant égales et à angle droit, si s'' est un quart de cercle et si H = 20 mètres, le vol sera possible si OA′ > 5,1 m : sec.

Ainsi : *Deux couches de vent horizontales, superposées et distantes de* 20 *mètres, de vitesses égales à* 5,1 *m : sec. et de directions rectangulaires permettent à un oiseau d'un kilogramme d'aller indéfiniment d'une couche à l'autre sans dépense de travail.*

La durée de la descente pourrait atteindre cinq minutes.

J'ai eu l'occasion de voir pratiquer ce genre de vol par une hirondelle, qui profitait de couches d'air de vitesses différentes dues à l'obstacle opposé au vent par une grande bâtisse.

(Dans les *fig.* 10 et 11, chacun des éléments des courbes *a*, *b*, *s*, *c*, *d*, *s*, et A′M′B′, constitue la trajectoire relative seulement au moment où l'oiseau s'y trouve).

VIII

L'invention des moteurs légers a diminué l'intérêt pratique du vol à la voile; il est néanmoins naturel de se demander si l'homme pourrait le pratiquer.

La formule : $4S = P^{\frac{2}{3}}$ exprime que les voiliers sont des solides géométriquement semblables.

La nature s'est trouvée dans l'impossibilité de créer des voiliers dépassant 10 kilogrammes; la raison en est que des ailes semblables ne sont pas également résistantes aux efforts qu'elles ont à supporter. Le module de résistance de la section d'une aile est proportionnel au carré de l'épaisseur, c'est-à-dire à $P^{\frac{2}{3}}$; tandis que le moment de flexion qui tend à la briser est proportionnel à $\frac{P}{S}$ et au carré des dimensions linéaires, c'est-à-dire en tout à P. Les ailes sont donc relativement d'autant plus faibles que l'oiseau est plus lourd.

Grâce à des matériaux plus résistants et à certains artifices, l'homme possède les moyens de construire des appareils volants dépassant 500 kilogrammes et satisfaisant largement à la formule ci-dessus; les aéroplanes en sont la preuve.

D'un autre côté on a vu que l'accélération du vent nécessaire au vol à la voile, indépendante du poids, est proportionnelle à $\sqrt{\frac{K'S'}{KS}}$; je pense que sinon par le choix du fuselage et du profil de l'aile, du moins par la diminution du rapport $\frac{S'}{S}$, l'homme pourrait dépasser l'oiseau à ce point de vue. Il ne lui serait inférieur qu'au point de vue de l'utilisation du vent ascendant et des pertes dues aux virages et à l'accélération verticale.

Ainsi l'homme peut créer l'organe du vol semblable à celui des meilleurs voiliers. Pourrait-il s'en servir ?

Les plus grosses difficultés semblent devoir être les suivantes :

Il lui faudrait d'abord un indicateur sensible lui montrant à chaque instant la direction de la variation du vent, et les moyens de diriger son vol en sens contraire de cette variation. Ce n'est pas inconcevable.

Ensuite il lui faudrait disposer des moyens nécessaires pour garder l'angle d'attaque aux environs de:

$$i = \frac{P}{KS\beta_0^2} = \frac{1}{69},$$

c'est-à-dire aux environs de *un degré*. Ce n'est pas non plus inconcevable.