

La voile nous porte, qui tient la voile ?

Olivier Caldara

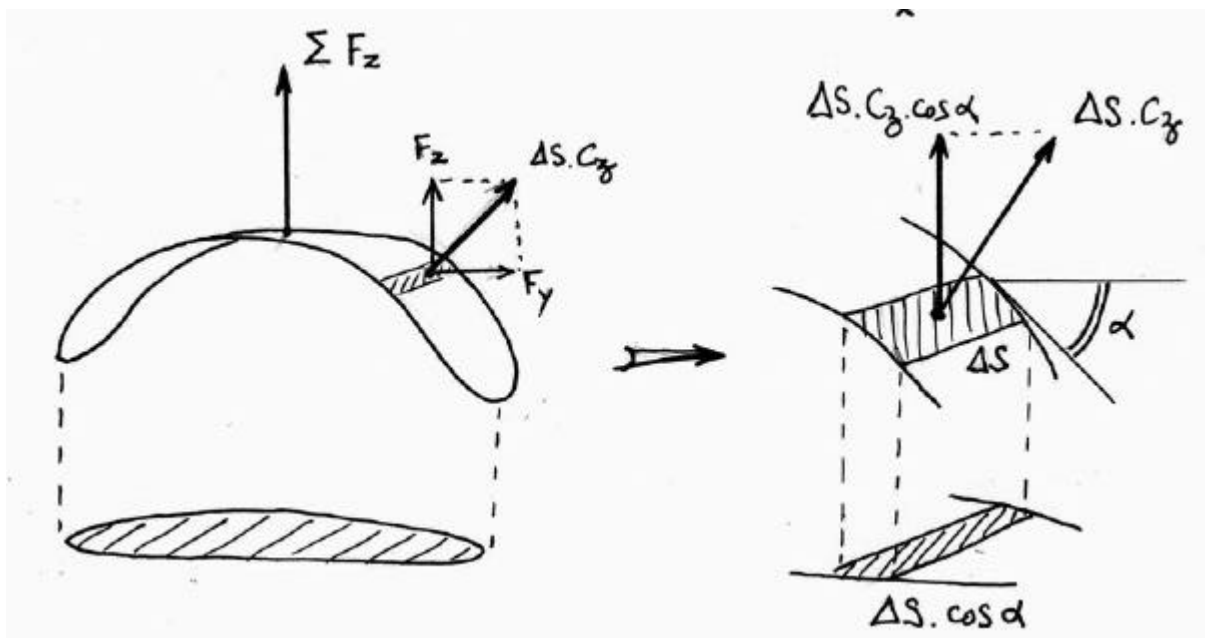
Bio Air Technologies

<http://www.bio-air-technologies.com>

oliv.calda@club-internet.fr

olivier.caldara@dassault-aviation.com

Parution Vol Libre n° 327 Octobre 2003



La voile nous porte, qui tient la voile ?

Sur un décollage de la région parisienne, lors d'une belle journée un peu trop calme, les parapentistes présents sur le site s'adonnent à leur occupation habituelle en ces occasions où les conditions sont insuffisantes : la discussion sur les avantages ou caractéristiques comparées de tel ou tel modèle de voile. En écoutant d'une oreille distraite, on pourrait surprendre l'échange suivant :

- moi je vole sous une « 24 », je suis donc plus chargé et j'ai un gain de vitesse par rapport aux autres voiles
- ah bon, ma voile fait 27 m², et malgré cette surface, elle est assez rapide alors que nous avons à peu près le même gabarit ...

Ce débat sur la réduction de surface pour augmenter la vitesse bras hauts est « à la mode », bien que cette augmentation de vitesse se paie nécessairement par une diminution des performances maximales atteignables, en taux de chute et en finesse (voir Vol Libre n° 323).

Poussant plus loin leur discussion, nos deux compères s'aperçoivent qu'ils parlent tout les deux du même modèle de voile, l'un utilisant la dénomination constructeur « 24 », représentant la surface projetée, et l'autre se référant à la surface réelle à plat de la voile, de 27 m² !

Cette petite anecdote, ou d'autres similaires, permettent de mettre l'accent sur les caractéristiques spéciales de nos voiles par rapport aux autres machines volantes :

- Pourquoi plusieurs surfaces sont définies pour le parapente ?
- quelle est leur signification, à quoi servent-elles ?
- comment sont elles définies, quelles sont les conséquences du rapport entre la surface projetée et la surface vraie sur les qualités de vol et les performances de nos voiles ?
- Quelle est la « bonne » surface à prendre en compte dans le cas de nos deux compères, lorsqu'on parle de vitesse de vol ?

Le parapente, une aile tridimensionnelle :

En effet, contrairement à la majorité des autres aéronefs à voilure fixe, planeurs, rigides, ou deltas par exemple, le parapente possède une aile fortement tridimensionnelle.

Cette particularité découle directement de la structure mécanique particulière de nos voiles, très différente de celle des ailes traditionnelles.

Sur une aile de planeur ou de rigide par exemple, la tenue des efforts aérodynamiques de portance le long de l'envergure est assurée par un ou plusieurs longerons. Ce longeron se comporte comme une poutre encastrée au centre de l'aile, et travaille majoritairement en flexion. La somme des efforts reportée au centre de l'aile, ou résultante aérodynamique, est égale à l'équilibre au poids de l'aéronef (figure 1).

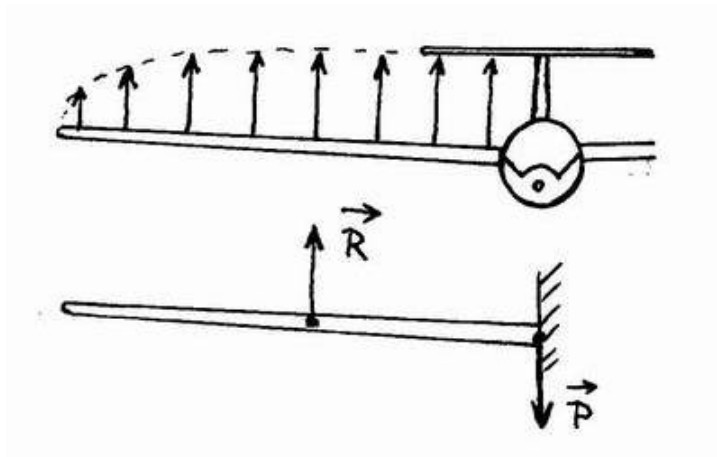
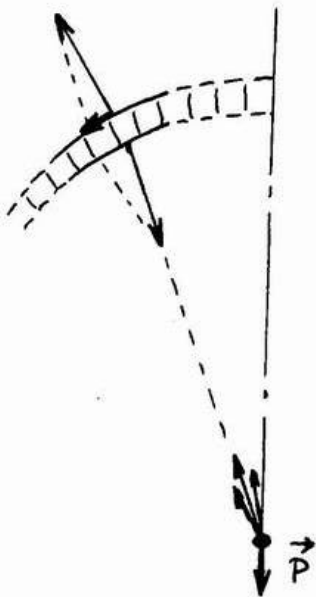


figure 1 : aile du planeur, longeron en flexion

Sur une aile de parapente, aucune partie rigide n'est susceptible de soutenir les efforts de portance en flexion pour les reporter au niveau du pilote. Seul un ensemble de suspentes, ne pouvant reprendre que des efforts de traction pure, est disponible pour le transfert des efforts. La décomposition des éléments de portance locaux au niveau de chaque point de suspension est représentée figure 2, en approximant dans un premier temps le parapente à une simple surface, et en supposant que la portance locale est toujours positive.



Cette décomposition et ses conséquences sur la structure dépendent principalement de la courbure moyenne de la voûte et de la position du pilote, point de convergence du faisceau de suspension, par rapport au centre de courbure moyen de la voûte. La résultante locale de tension du tissu, après projection de la portance locale le long de la suspente peut produire un effet variable selon la géométrie de l'ensemble voile-suspente-pilote.

figure 2 : parapente, suspension en tension

D'un point de vue général, plusieurs cas peuvent se présenter (figure 3) :

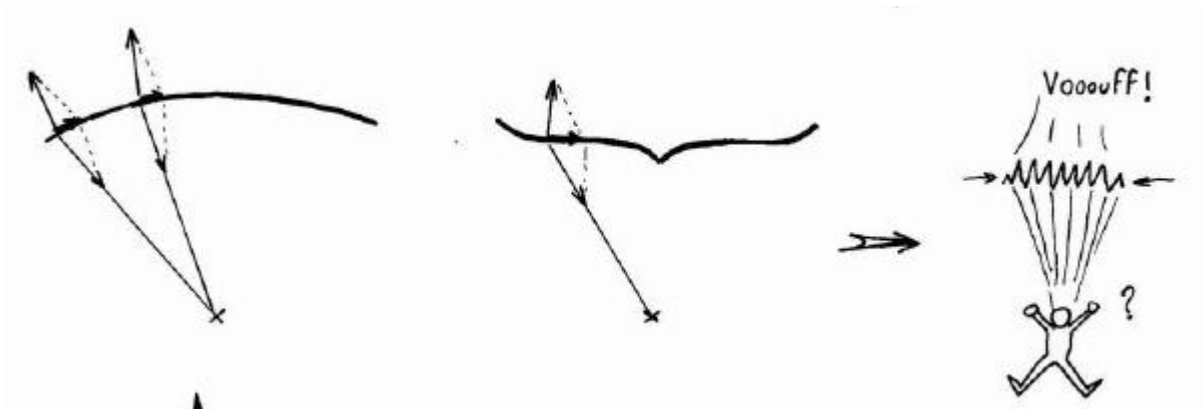
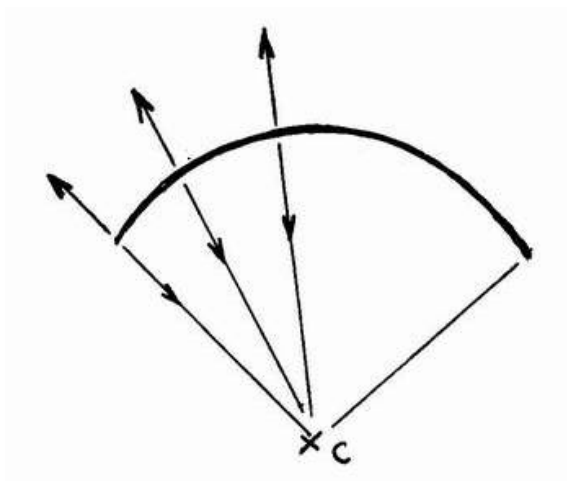


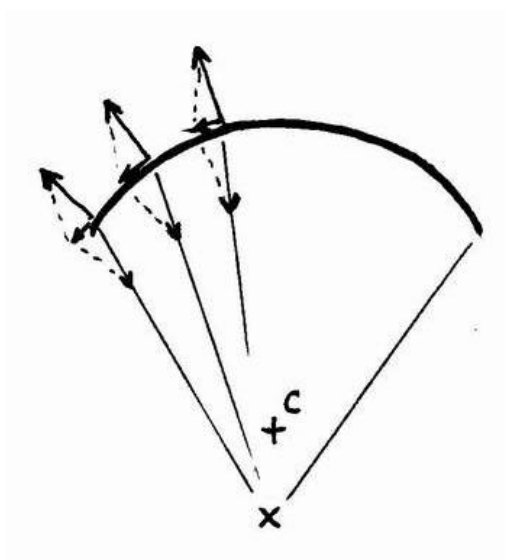
figure 3a : effondrement voûte trop plate

- 3a) la courbure moyenne de la voûte est faible, voire plate, voire inversée (les premières esquisses d'un des co-inventeurs de la Bionic étaient dans ce cas) ! le pilote est donc nécessairement au dessus du centre de courbure de la voûte, à moins d'avoir un suspentage très long ... Dans ce cas, les résultantes locales de tension du tissu tendent à replier la voile vers l'intérieur, et à effondrer la structure. Aucun parapente ne retient donc cette structure.



- 3b) la courbure de la voûte est telle que le centre de courbure et la position du pilote sont confondus. C'est le cas limite où les tensions transmises au tissu par les efforts de vol sont nulles. La structure du parapente ne tient que par la pression interne. Dans la pratique, les voiles n'utilisent pas cette solution car elle est trop limite.

figure 3b : cas limite voûte circulaire centrée



- 3c) le centre de courbure est plus bas que la position du pilote. c'est une structure classique qui permet une tension régulière de la voile.

figure 3c : cas général voûte décentrée

Pour des raisons impératives de tenue structurale, un parapente possède donc une courbure moyenne orientée vers le bas, dont le centre est en règle générale au dessus de la position pilote. Des adaptations locales peuvent être réalisées, comme par exemple sur la Bionic qui possède des winglets à courbure négative et un V central, grâce à la pression interne du parapente. Elles nécessitent une étude poussée de l'équilibre structural local.

Les conséquences de cette structure fortement tridimensionnelle sont multiples, sur le plan des performances et sur le plan de la sécurité.

Voûte et performances :

Au niveau des performances, les parties inclinées de la surface portante génèrent une portance inclinée, dont seule la composante verticale se retrouve dans la RFA (figure 4). La composante horizontale est annulée par symétrie.

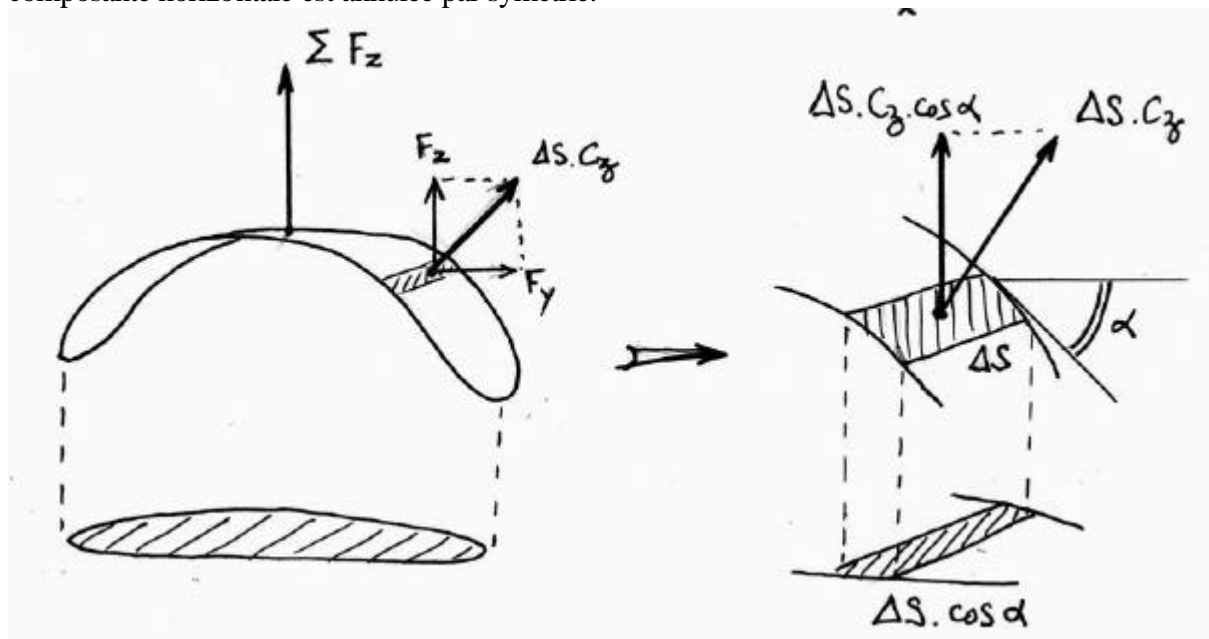


figure 4 : portance projetée = surface projetée x Cz

Dans le cas extrême d'un stabilo vertical, la portance générée par cette partie de l'aile ne provoque que de la traînée (elle sert quand même à quelque chose comme on le verra plus loin). L'ensemble de la surface développée ou « à plat » génère de la traînée de surface et de la traînée induite, mais seule une partie de la portance sert à maintenir en l'air le parapente. La figure 4 montre que pour un Cz local constant sur toute l'envergure, la somme des projections des composantes verticales locales de la portance ($(\Delta s \cdot Cz)_{proj}$) est équivalente à prendre en compte une projection verticale de la surface totale, qu'on appelle « surface projetée » :

$$\sum (\Delta s \cdot Cz)_{proj} = S_{proj} \cdot Cz$$

Il est pratique pour évaluer la courbure de la voûte d'une voile, de définir le coefficient d'aplatissement. Il est égal au pourcentage de réduction de la surface projetée par rapport à la surface développée :

$$\text{aplatissement}(\%) = \frac{S - S_{proj}}{S} \cdot 100$$

Plus l'aplatissement est faible, plus la voile est « plate ». La plage de variation moyenne d'aplatissement est de l'ordre de 10 à 15%. L'équation de portance à la vitesse d'équilibre est la suivante :

$$m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot V^2 \cdot \sqrt{(S_{proj} \cdot C_z)^2 + (S \cdot C_x)^2}$$

elle peut se simplifier lorsque la finesse est supérieure à 5 en une expression à 2% près :

$$m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot V^2 \cdot S_{proj} \cdot C_z$$

Ce qui donne en utilisant l'aplatissement l'équation suivante :

$$m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{r} \cdot V^2 \cdot S \cdot (1 - ap) \cdot C_z$$

De même, l'équation de la finesse est la suivante :

$$f = (1 - ap) \cdot \frac{C_z}{C_x}$$

A partir de ces deux équations, on peut tirer les premières conclusions suivantes, en supposant dans un premier temps que le changement d'aplatissement n'agit que sur la voile elle-même :

- toutes choses égales par ailleurs, une diminution de 5% par exemple de l'aplatissement (passage d'une aile "standard" 15% à une aile "compét" 10%) pour une aile donnée provoque une diminution de 2.5% de la vitesse de vol, soit 1 km/h environ pour une vitesse de vol de 36 km/h
- pour rétablir la vitesse de vol initiale, avec la même diminution de 5% de l'aplatissement, il est nécessaire de diminuer le C_z de la même proportion, soit 5%.
- en première approximation, et au même C_z , la finesse d'un parapente est diminuée de la valeur de l'aplatissement par rapport à la même aile d'aplatissement nul. Une aile de 8.5 de finesse et de 15% d'aplatissement ferait donc 10 de finesse à aplatissement nul.
- de ce qui précède, on peut déduire qu'1% d'aplatissement correspond à un gain de finesse d'environ 1/10^{ème} sur nos parapentes, à C_z constant.

Il est à noter que si le C_z n'est pas constant en envergure, ces équations ne sont plus tout à fait valables. Ainsi, à voûte donnée, si le C_z est plus élevé au centre qu'aux extrémités, la portance équivalente sera plus élevée et l'aile plus perfo, et si le C_z est plus faible au centre, elle sera moins élevée et l'aile moins perfo (figure 5).

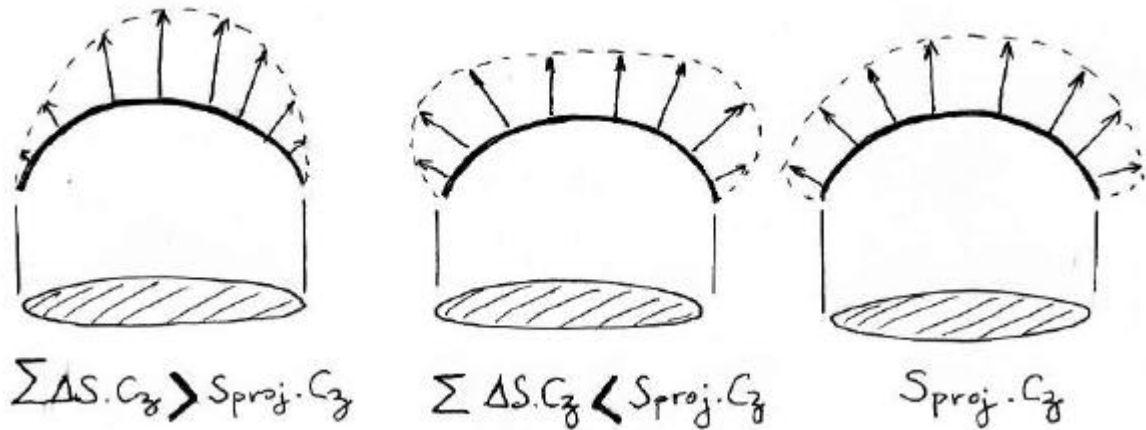


figure 5 : cas C_z non constant en envergure

En conclusion, plus la voûte est plate et en considérant le seul effet sur la voile, plus l'aile est performante a priori, de 0.1 point de finesse environ par % d'aplatissement à C_z constant.

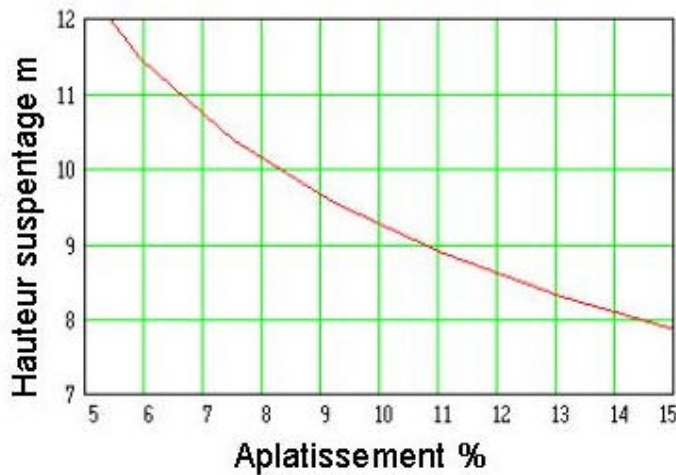
Cependant, le gain réel en performances doit tenir compte d'autres facteurs pour être évalué. Dans un premier temps, si le C_z est diminué pour conserver la même vitesse bras hauts, l'effet sur les performances est un peu plus compliqué à calculer puisque le C_x varie lui aussi à cause de la traînée induite (voir étude de la surface Vol Libre n° 323). De même, un aplatissement élevé nécessite un suspentage plus long pour les raisons structurales expliquées plus haut, donc une augmentation de traînée. Il est intéressant d'évaluer le gain réel d'une variation de l'aplatissement en tenant compte de cette augmentation de traînée de suspentage, pour une vitesse bras hauts constante :

hypothèses :

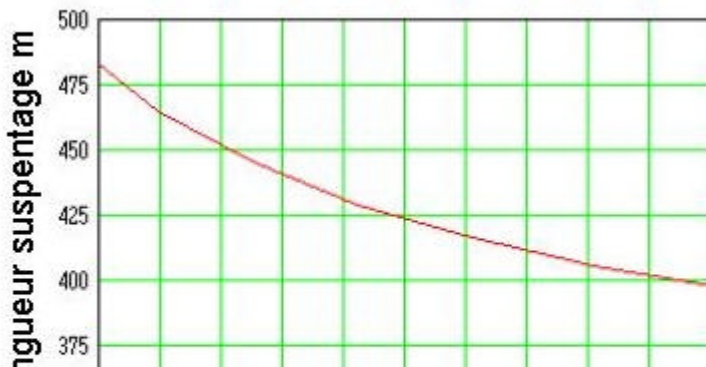
- allongement 6
- surface à plat = 29 m²
- loi de corde elliptique
- voûte circulaire
- C_x profil = 0.012
- Traînée pilote = 0.4 m²
- aplatissement initial 15%, variation jusqu'à 5%
- longueur suspentage initial 400 m

par hypothèse, on fait varier la hauteur de suspentage afin que le pilote soit placé 2 m environ sous le centre de la voûte pour conserver la tension structurale de l'aile. On choisit de plus de conserver constant le suspentage haut (2/3 de la longueur totale de suspentes) et de ne faire varier que le suspentage bas. La longueur totale de suspentes varie donc rapidement avec l'aplatissement, qui éloigne le centre de voûte.

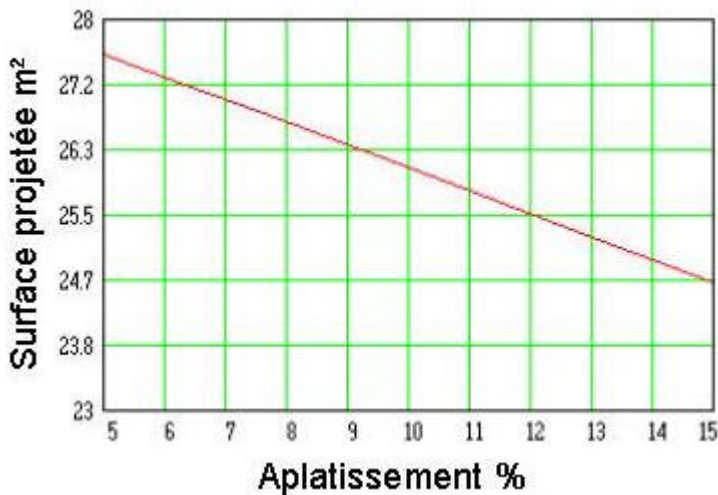
Quelques résultats sur les performances sont donnés figures 6 à 10 :



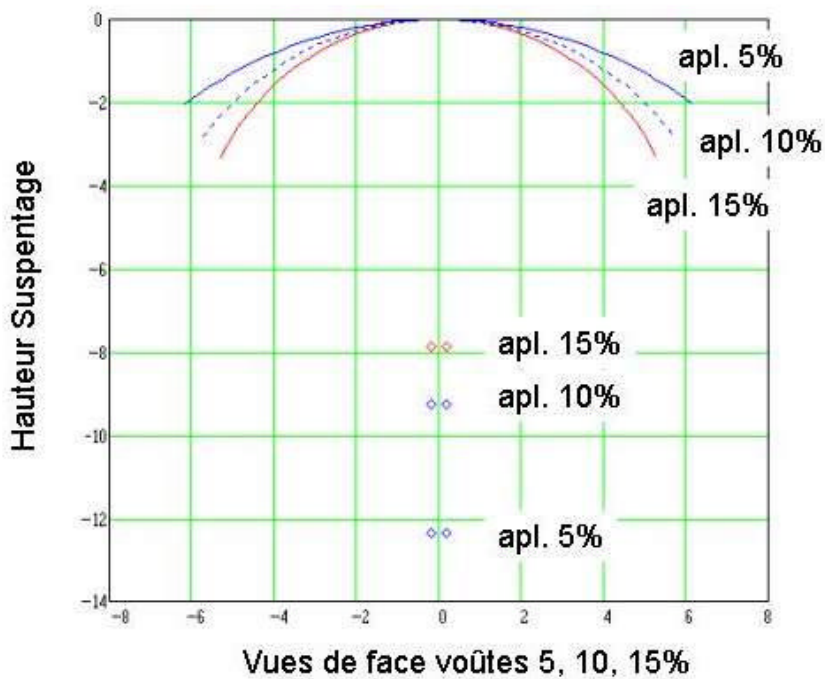
- La figure 6 représente la variation de hauteur de suspentage pour un aplatissement de 5 à 15%. On remarque que l'aplatissement de 5% semble complètement déraisonnable. On constatera plus loin qu'il ne donne pas les gains escomptés, à cause de l'augmentation de traînée de suspentage



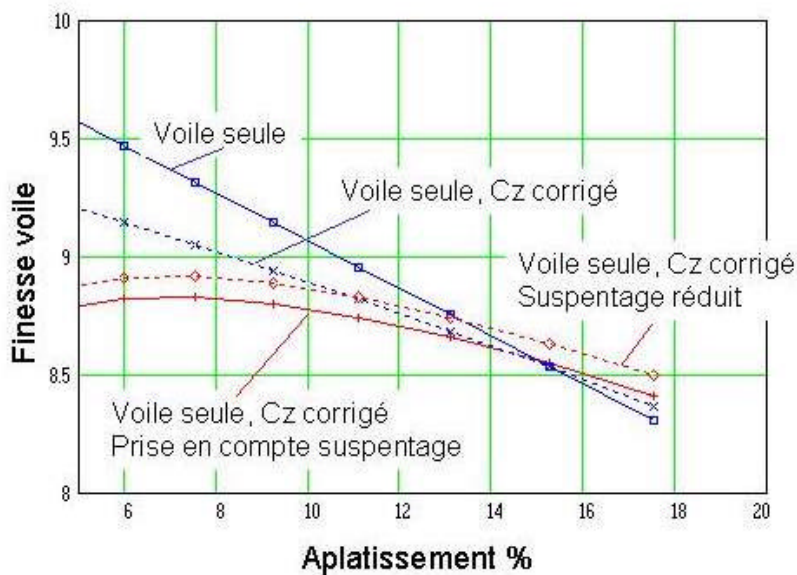
- La figure 7 représente la variation de longueur totale de suspentage pour la même variation d'aplatissement.



- La figure 8 représente la variation de surface projetée pour la même variation d'aplatissement



- La figure 9 représente en vue de face les voûtes obtenues pour 5, 10 et 15 % d'aplatissement, ainsi que les positions respectives du pilote. On vérifie que la voûte à 5 % d'aplatissement donne un parapente trop "extrême".



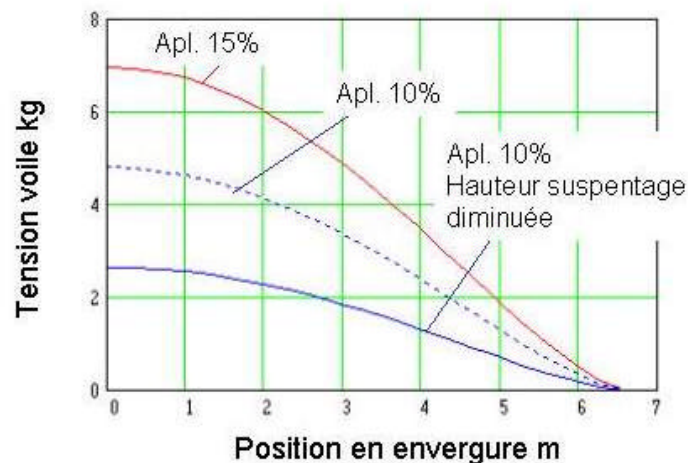
- Enfin, la figure 10 montre la comparaison des performances en fonction de l'aplatissement pour plusieurs hypothèses de définition :

- La courbe bleue continue est représentative d'une évaluation de la finesse ne tenant compte que des variations sur la voile comme présenté plus haut en première approximation, sans prise en compte d'une variation de C_z pour la conservation de la vitesse bras haut, et sans prise en compte de la variation de longueur de suspentage. On vérifie le gain approximatif de 0.1 point de finesse par % d'aplatissement.
- La courbe bleue pointillée est représentative d'une évaluation tenant compte de la diminution de C_z nécessaire à la conservation de vitesse bras hauts, sans prise en compte de la variation de longueur de suspentage. Le gain obtenu est plus faible de 30 %.
- La courbe rouge est représentative d'une évaluation tenant aussi compte de la variation de longueur de suspentage. On constate que le gain de finesse diminue fortement. Il n'est que de 0.25 points pour une diminution de l'aplatissement de 15 à 10 %, soit la moitié de l'approximation initiale. On constate par ailleurs qu'une diminution plus importante de l'aplatissement est inutile puisque la finesse évolue peu en dessous de 10 %, et que la tendance devient inverse, à cause de l'augmentation de la traînée de suspentage.
- Enfin, la courbe rouge en pointillé montre une évolution des performances que l'on peut obtenir en changeant les hypothèses de départ concernant le suspentage : diminution de la longueur totale (suspentage plus clairsemé), ou diminution de la hauteur pilote (1 m en dessous du centre de courbure dans ce cas, au lieu de 2 m). Le gain présenté de 0.1 point de finesse environ se fait au détriment de la sécurité (suspentage favorisant les cravattes) ou des capacités en virage (mise en roulis plus faible, instabilité spirale)

Sur la question des performances, le gain représenté par la réduction de l'aplatissement de 15 à 10 % semble donc très marginal, de l'ordre de 0.25 points de finesse pour une aile donnée, toutes choses étant égales par ailleurs et en tenant compte d'une augmentation de la longueur de suspentage. Outre les concessions nécessaires à la sécurité et à la manœuvrabilité si l'on veut augmenter ce gain, l'analyse présentée ci-après montre les conséquences apportées sur la tenue de la voile.

Voûte et tenue de la voile :

En reprenant les données précédentes sur la définition du point de vol et de la géométrie de la voile en fonction de l'aplatissement, on peut évaluer l'évolution de la composante transverse des efforts sur la demi-voûte en fonction de l'envergure, pour plusieurs cas. La figure 11 montre cette évolution pour la voile d'aplatissement 15 % (courbe rouge), celle d'aplatissement 10 % (courbe bleue pointillée), et celle d'aplatissement 10 % à hauteur de suspentage réduite (courbe bleue). Cette composante transverse est représentative de la tension apportée par la portance sur la voile, donc de la tenue de celle-ci. Elle est représentée en kg sur les courbes.



Ces courbes montrent que plus une voile est aplatie, moins elle est "béton" (diminution de 30% de la tension entre 15% et 10% d'aplatissement), et que la réduction de hauteur de suspentage agit encore plus sur la tension (diminution supplémentaire de 50% pour la hauteur de suspentage réduite).

Au final, cette réduction de tension agit directement sur la tenue en turbulences de la voile, et donc au premier plan sur la sécurité.

Enfin, on peut remarquer que si la charge alaire est un bon indice pour juger du caractère de tension d'une voile, et que si la diminution de surface favorise a priori cette tension, la géométrie de la voile et la position du pilote sont tout aussi importantes.

Le jeu en vaut-il la chandelle ?

Au vu de ce qui précède, la quête de l'aplatissement sur les parapentes semble donc très peu profitable compte tenu des inconvénients potentiels sur la sécurité et les qualités de vol. A moins d'être un extra-terrestre du pilotage pour palier les défauts apportés en maniabilité et en tenue en turbulence, aucun parapentiste lambda n'a d'intérêt à rechercher l'aplatissement maximum pour le choix d'un modèle de voile, pour bénéficier d'un avantage de 0.2 à 0.3 points sur 8.5 de finesse. Seuls les compétiteurs sont a priori susceptibles d'assumer une telle prise de risque pour un si maigre avantage.

Olivier Caldara
Bio Air Technologies
 3 résidence de la source
 78440 Issou
 France

Tél: 01 30 93 59 12 ou 01 47 11 38 52 ou 06 12 21 47 23
 Fax : 01 47 11 57 42
 E-mail: oliv.calda@club-internet.fr
olivier.caldara@dassault-aviation.com

