



*UNIVERSITE DE PALERME*  
**FACULTE D'ETUDES D'INGENIEURS**

---

**Diplôme d'Etudes d'Ingénierie Aérospatiale**

**ETUDE EXPERIMENTALE DES  
PERFORMANCES DU PARAMOTEUR**

Mémoire de :  
**PASQUALE BIONDO**

Traduction de l'italien :  
**Eric Ripoll et Magali Ruet**

Rapporteur :  
**Prof. C. Grillo**

---

**ANNEE ACADEMIQUE 2006-2007**

## *Remerciements*

Je tiens à remercier Diego Cecchetto (Société Per Il Volo) pour avoir mis à ma disposition l'aile à profil autostable, et Matteo Orazi (Vittorazi Motors) pour m'avoir fourni les données concernant le moteur qu'il produit.

### **Note des traducteurs :**

Dans les équations, nous avons conservés les termes d'origine. En particulier :

$E$  = finesse

$sen$  = sinus

$C_D$  = coefficient de traînée

$C_L$  = coefficient de portance

Enfin, nous n'avons pas trouvé d'équivalent en français, et avons donc gardé l'expression mathématique des termes : "indice di quota" ( $= E \cdot \sqrt{C_L}$ ), et "indice di virata" ( $= E / \sqrt{C_L}$ )

## *Introduction*

Le paramoteur est certainement le plus léger et le plus adaptable des modes de propulsion du vol de loisir ou sportif. Ces caractéristiques justifient la grande diffusion de ce type d'appareil au cours des dernières années. Dans ce mémoire, nous avons voulu faire une étude expérimentale des performances du paramoteur, de façon à pouvoir effectuer une comparaison des différents modèles existants.

Dans ce but, sont ici examinés trois types d'ailes et deux types de groupe motopropulseurs, représentatifs des principales catégories du marché actuel.

Nous avons effectué les épreuves expérimentales, en vol pour les ailes, et au banc d'essai pour les groupes motopropulseurs et, après traitement des données obtenues, les performances des paramoteurs ont été calculées pour les diverses combinaisons possibles aile/groupe motopropulseur.

Finalement, une comparaison des résultats a été effectuée, pour mettre en évidence la combinaison optimum pour chaque type de performance.

La présente thèse s'articule selon le plan suivant :

Dans le premier chapitre, le paramoteur est décrit dans toutes ses composantes, en mettant en avant ses caractéristiques de stabilité. Dans le deuxième chapitre, sont rapportées les données expérimentales concernant les caractéristiques des ailes et des groupes motopropulseurs, et enfin, dans le troisième chapitre, sont calculées et confrontées les performances des paramoteurs.

## *Chapitre 1*

### **Le paramoteur**

#### **Introduction**

Le paramoteur naît à la fin des années 80, comme une évolution du parapente. Il est constitué d'un moteur à hélice propulsive qui, adjoint à une aile de parapente, permet de décoller à partir de terrains plats, libérant ainsi le pilote de l'obligation du décollage en pente.



**Figure 1** - *Paramoteur en vol*

C'est un type de loisir qui fait partie de la catégorie U.L.M (MTOW < 450 kg), et qui a connu ces dernières années un grand développement en tant que discipline sportive; ainsi divers championnats se sont mis en place (aussi bien sur le plan national qu'au niveau mondial) dans lesquels les pilotes s'affrontent au cours de plusieurs types d'épreuves constituées de manches de : navigation, économie et freestyle.



**Figure 2** - *Paramoteur au décollage pendant un championnat du monde*

Au départ, les ailes utilisées pour le vol motorisé étaient des modèles conçus pour le vol libre (non propulsé), et donc mis au point dans l'intention de réduire le taux de chute et d'augmenter la finesse.

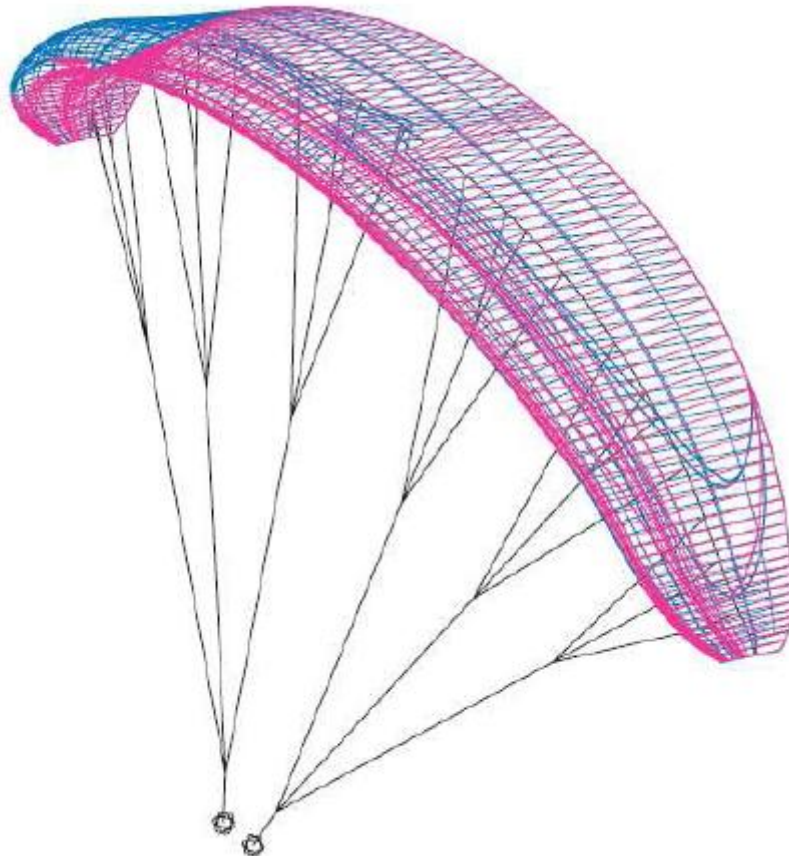
Ces dernières années, grâce à l'évolution continue du paramoteur, les concepteurs de certains fabricants ont réalisé des ailes spécifiques pour le vol motorisé avec, comme caractéristiques fondamentales : la facilité de gonflage au décollage, la stabilité en vol, et la maniabilité élevée en virage.

Par ailleurs, afin d'obtenir une vitesse de croisière plus élevée, la charge alaire est augmentée, ce qui exige une structure d'aile plus renforcée que celle d'un parapente, surtout au niveau des suspentes et des élévateurs (on passe d'une charge alaire d'environ 3,5 kg/m<sup>2</sup> en vol libre à plus de 5 kg/m<sup>2</sup> en vol motorisé).

Une philosophie différente est donc apparue, en ce qui concerne la conception des voiles destinée au paramoteur, par rapport à celles destinées au vol libre.

## 1.1 L'aile

L'aile est caractérisée par son profil particulier, dont la forme est déterminée par les faisceaux de suspentes qui proviennent des élevateurs. Le pilote va s'accrocher à ces élevateurs avec son harnais-sellette motorisé, étant ainsi relié à des points d'attaches distribués sur la totalité de la surface de la voile.



**Figure 1.1** – Représentation graphique d'une aile de parapente

Elle est formée de deux surfaces de tissu superposées, et reliées par des nervures perforées dans leur milieu. Le bord de fuite (c'est-à-dire la couture qui relie l'arrière des deux bandes de toile) est fermé, alors que le bord d'attaque présente des ouvertures (dites "entrées d'air") à travers lesquelles, dans les phases de décollage et pendant le vol, l'air pénètre en engendrant le "gonflage" de la voile, et le maintien de la pression à l'intérieur.

Les nervures ont pour fonction de maintenir extradors et intrados à une distance déterminée ; les trous présents dans celles-ci – en plus d'alléger la structure – servent à maintenir une pression uniforme à l'intérieur de l'aile, en permettant à l'air de rééquilibrer rapidement les éventuelles différences de pression qui peuvent apparaître aux différents endroits de la voile.

La partie de voile comprise entre deux lignes d'insertion des suspentes est appelée "caisson": celui-ci, à son tour, peut être subdivisé par une ou plusieurs nervures, en deux ou plusieurs intercaissons : en d'autres termes, le nombre de caissons détermine le nombre de lignes d'insertion des suspentes; peu de caissons (et donc peu de lignes d'insertion) signifient que chaque suspente est appelée à "porter" une charge relativement élevée, par contre beaucoup de caissons (beaucoup de lignes d'insertion) distribuent la charge de façon plus uniforme sur toute la superficie de l'aile.

Les extrémités de l'aile sont constituées de pièces de tissu dirigées vers le bas : les stabilisateurs.

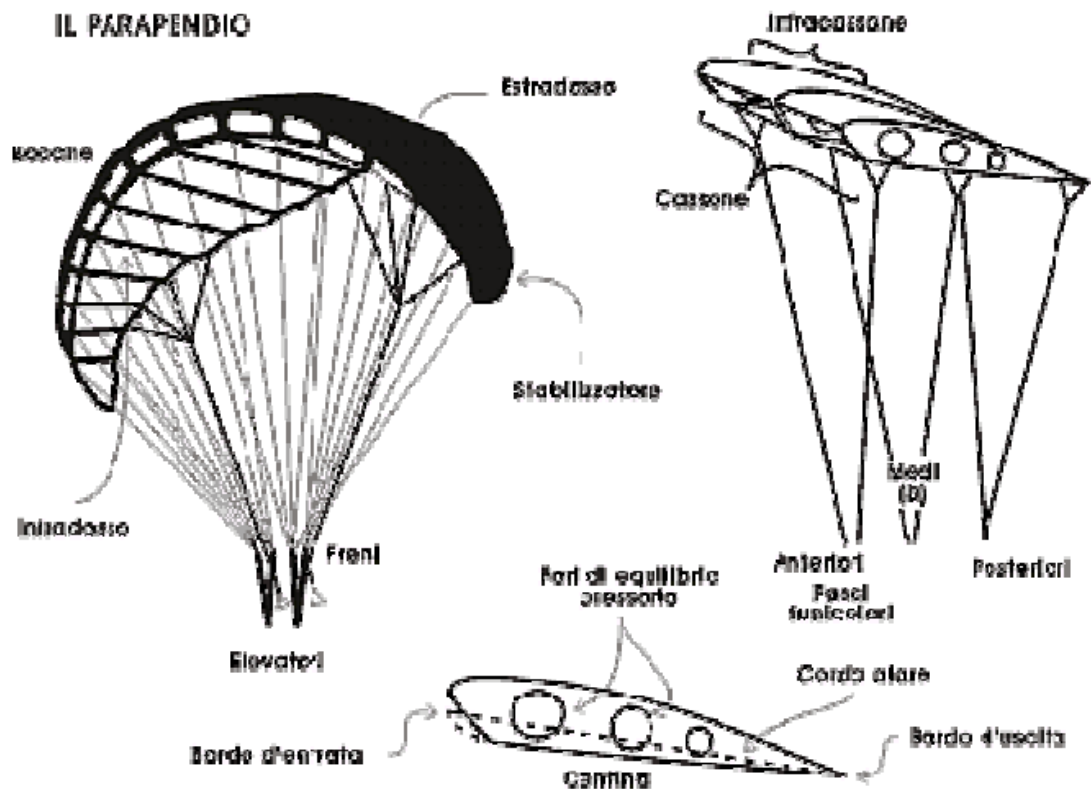


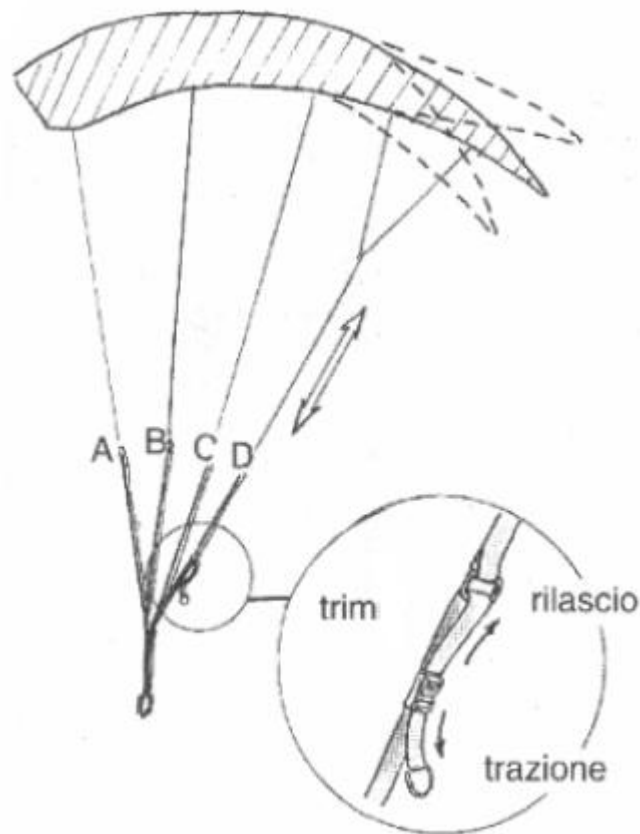
Figure des 1.2 – Les différentes parties du parapente et leurs dénominations respectives

Les suspentes s'insèrent dans la voile par des petits triangles de tissu, afin de mieux distribuer la charge et d'augmenter la résistance de l'insertion.

Toutes les suspentes d'une demi-aile se rejoignent, par des petits mousquetons à vis, à quatre sangles: les élévateurs avant (dits élévateurs A), les intermédiaires (B et C) et les arrières (D). Les élévateurs de chaque côté, à leur tour, sont réunis pour former un des deux points d'accroche du parapente à la sellette.

Les élévateurs arrières ont une petite poulie, à l'intérieur de laquelle glisse la drisse de commande terminée par une poignée. Du côté de la voile, cette drisse de commande, se divise en plusieurs drisses qui s'insèrent sur les côtés du bord de fuite de la demi-aile.

Certains modèles de parapentes sont dotés de trims (figure 1.3), qui permettent de modifier la longueur des élévateurs arrières, faisant ainsi varier la forme du profil et, donc, les caractéristiques aérodynamiques de l'aile.



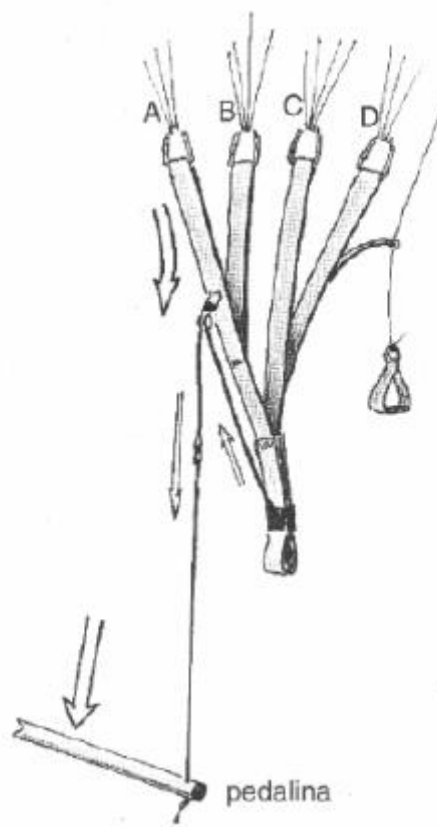
**Figure 1.3** – Action des trims



L'aile peut également être équipée d'un système de modification de l'incidence qui prend le nom d'accélérateur (figure 1.4) ; il est constitué de deux drisses qui, en passant au travers d'anneaux appropriés, présents sur la sellette, arrivent à un barreau de pied. Ces drisses sont prévues pour tractionner vers le bas (lorsque le pilote pousse sur le barreau) les élévateurs avant et/ou intermédiaires, souvent différenciellement: en général les élévateurs A sont sollicités à 100% de débattement, quand les élévateurs B le sont à 50%.

De cette manière, en actionnant l'accélérateur, on modifie la configuration de l'aile, et on réduit l'angle d'incidence.

Contrairement aux trims, l'accélérateur présente l'avantage de pouvoir être actionné et relâché rapidement.

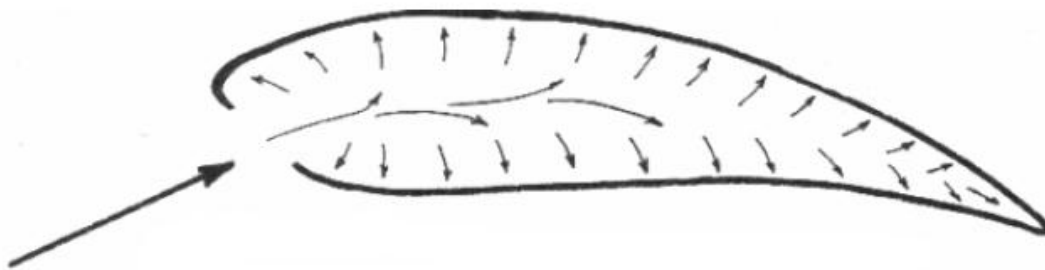


**Figure 1.4** – *L'accélérateur*

Pour conférer à la voile une forme apte à générer de la portance, divers facteurs interviennent, dans des mesures variables selon la conception de l'aile et les conditions de vol.

L'air qui arrive en bord d'attaque, transforme la pression dynamique – due à la vitesse relative – en pression statique (la surpression interne est de l'ordre de  $5 \text{ kg/m}^2$ ). À l'intérieur de la totalité de l'aile, la pression est rendue uniforme par les événements que présentent les cloisons.

Ce phénomène est le seul qui intervient pendant la phase de gonflage, alors que durant le vol stabilisé, il ne fournit qu'une contribution au fonctionnement global. La pression donnée de l'air en bord d'attaque tend à augmenter en cas de fermeture, comme l'ont révélé les "difficultés" de réouverture qui pénalisent les ailes disposant de peu d'ouvertures, ou si ces dernières sont presque fermées.



**Figure 1.5** - *Pression interne de l'aile*

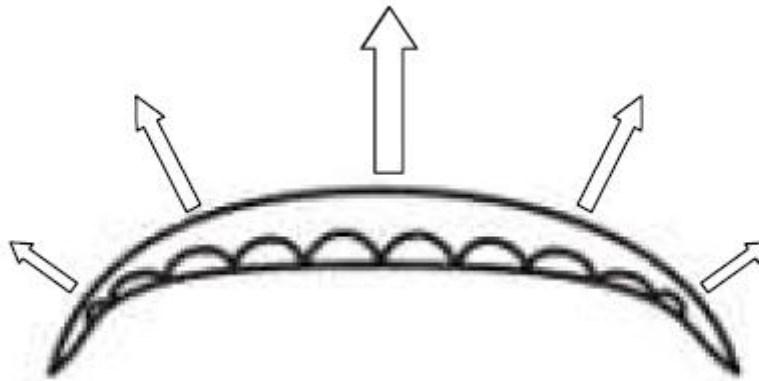
La force aérodynamique totale, qui apparaît lorsqu'un profil d'aile vole à des angles d'incidence compris entre celui de la vitesse maximum et celui du décrochage, offre pendant le vol, une très importante contribution au maintien de la forme de la voile.

Donc, les pressions qui maintiennent la voile dans une forme apte à générer la portance sont données : soit par l'air qui entre en bord d'attaque et transforme la pression dynamique en pression statique, soit par la force aérodynamique agissant sur la totalité de la surface.

Dans une aile "lobée", la force aérodynamique – étant toujours perpendiculaire au profil – se répartit "en étoile" (figure 1.6). Cette distribution comporte plusieurs avantages :

- aux extrémités de l'aile, la force aérodynamique présente une composante dirigée vers l'extérieur, qui contribue à créer et à maintenir une tension latérale dans la voile même;

- en cas de fermeture frontale centrale, les deux demi-ailes, plutôt que de se rejoindre au centre (comme elles le feraient sur une voile "plate"), tendent à favoriser la détente, et donc la réouverture de la voile;
- dans le cas, plus fréquent, d'une fermeture latérale, la charge se redistribue sur la partie de voile encore gonflée, ce qui garantit la sustentation tant que la voile ne s'est pas entièrement rouverte.



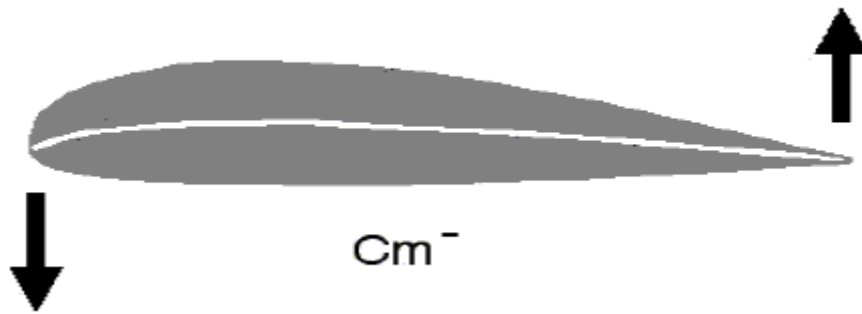
**Figure 1.6** - *Distribution de la force aérodynamique le long de l'envergure d'une aile lobée.*

### 1.1.1 La stabilité

La première différence – évidente – que l'on constate entre le parapente et les autres planeurs, est la distance considérable qui existe entre le barycentre de l'ensemble aile + pilote (qui se trouve un peu au-dessus du pilote), et le centre de pression, situé dans l'aile.

Cette caractéristique est la principale cause de l'autostabilité du système, que ce soit sur l'axe de tangage ou sur celui de roulis.

En ce qui concerne la stabilité en tangage, il faut préciser que les profils utilisés ont un coefficient de moment négatif (figure 1.7) – c'est-à-dire que le centre de pression se situe en arrière du foyer du profil – et qu'ils sont par conséquent instables.



**Figure 1.7** - Coefficient de moment du profil instable

Le profil du parapente, qui tendrait de lui-même à piquer en avant, est maintenu dans la bonne position par le faisceau de suspentes relié au corps du pilote, lequel, par sa masse, maintient l'équilibre de l'ensemble.

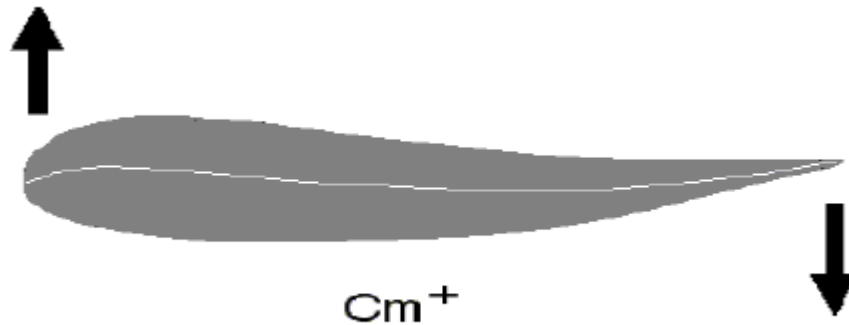
En ce qui concerne l'axe de lacet, le maintien de la stabilité directionnelle est confié aux surfaces latérales qui font fonction de stabilisateurs, et à la réaction du lobe de la voile à un éventuel flux d'air latéral. En effet, grâce au lobe, le vent relatif qui arrive latéralement (comme cela se produit, justement, pendant une embardée) atteint le bord d'attaque avec des angles d'incidence différents : ce qui induit des réactions différentes pour chaque demi-aile à la force aérodynamique totale, avec un effet "redressant" ; en fait, la composante latérale du vent relatif qui touche l'aile, fait diminuer l'angle d'incidence de l'aile interne à l'embardée, et augmenter celle de l'aile externe, ce qui fait que la traînée de celle-ci augmente, alors que celle de l'aile interne diminue, générant ainsi, un moment de redressement.

Participe également à la stabilité directionnelle, le déplacement, sur la corde du profil, du point d'application de la force aérodynamique ; en effet pour des profils avec coefficient de moment négatif, si l'angle d'incidence augmente, le point d'application des forces se déplace vers l'avant. En revanche, si l'angle d'incidence diminue, il recule par rapport au foyer. Donc, en cas d'embardée, les composantes des forces aérodynamiques dirigées transversalement sur les deux demi-ailes, se trouvent décalées par rapport à l'axe (en considérant l'axe transversal de l'aile), ce qui provoque un moment de forces, qui contribue à la stabilité directionnelle.

Enfin une contribution à la stabilité en roulis et en lacet provient du fait que les ailes sont légèrement en flèche.

Une nouveauté concernant le vol en paramoteur, est l'utilisation de profils autostables ou reflex, présentant une courbure positive en partie antérieure, et négative dans la partie arrière.

Le  $C_m$  total devient donc positif (figure 1.8). Dans les profils autostables, la portance apparaît presque exclusivement sur le premier tiers de la corde; en conséquence, le centre de pression est très avancé, et le poids est supporté par les lignes "A" et "B" (figure 1.9), qui doivent être convenablement renforcées.



**Figure 1.8** - Coefficient de moment du profil autostable.



**Figure 1.9** - Distribution des points d'attache du faisceau de suspentes sur l'aile.

La conception et le projet de l'aile reflex pour le vol en paramoteur débute en 1994. L'idée, conçue par Mike Campbell-Jones, a été développée pour le compte de la société Paramania. En 1996, les premières ailes ont été produites en deux tailles, 27 m<sup>2</sup> et 28 m<sup>2</sup> ; toutes les deux ont été certifiées en U.L.M. En 1997, l'aile reflex a été certifiée "Standard" par l'AFNOR (association française de normalisation).

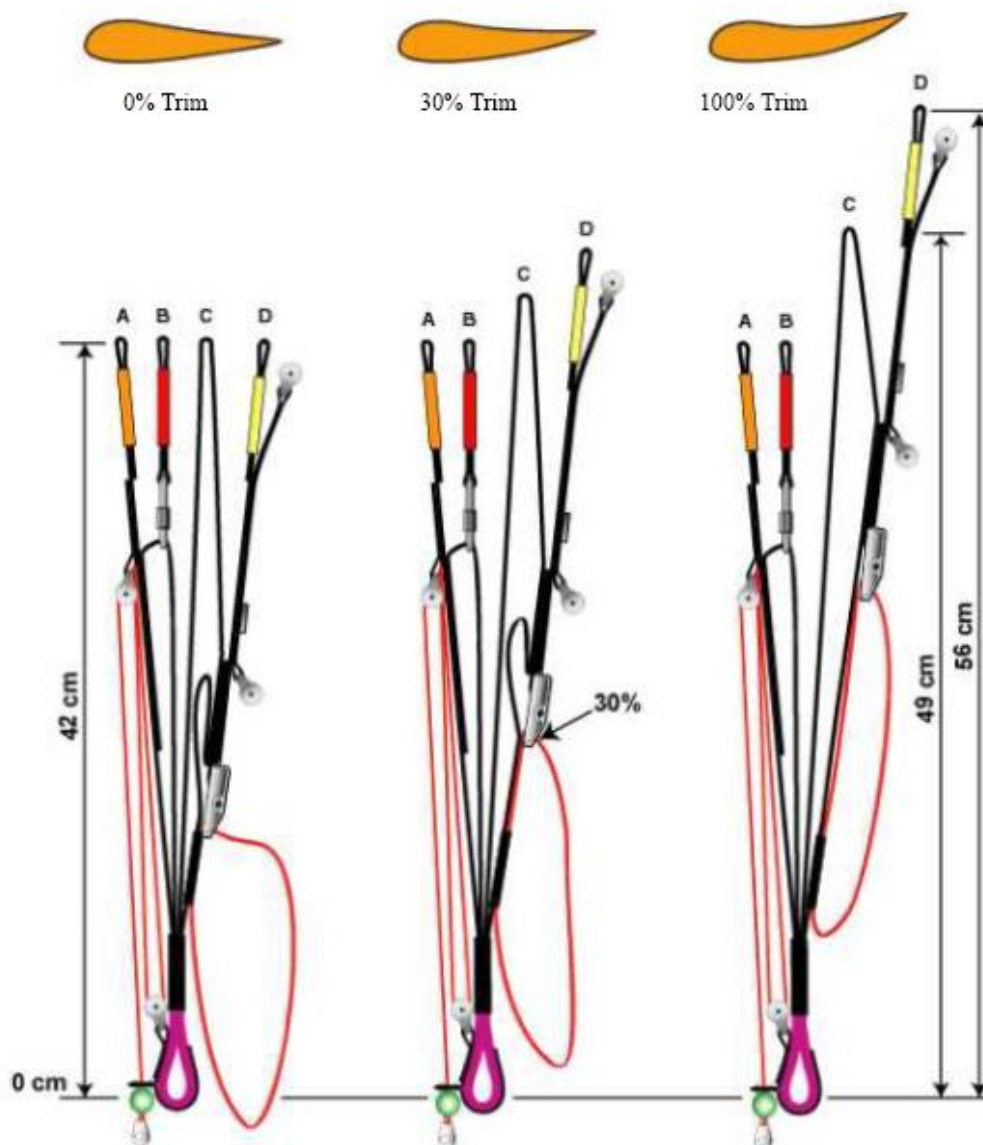
En même temps, la production a été déplacée en Pologne (*Dudek*).

Grâce aux succès dans les diverses compétitions, où elles se sont distinguées par leur stabilité, mais surtout par leur vitesse, les ailes reflex ont montré la validité de cette technologie.

Dans les ailes à profil autostable, on a un coefficient de moment positif, et l'aile n'est plus complètement dépendante de la charge alaire comme unique ressource de stabilité en tangage, mais dispose de sa propre stabilité intrinsèque.

En modifiant la position des trims, on change la courbure du profil (figure 1.10) et donc ses caractéristiques de stabilité; en outre, on change aussi la vitesse de l'aile, puisque varient en même temps la corde et la surface portante, avec les conséquences respectives d'une variation de la traînée induite (puisque l'allongement change) et d'une variation de la charge alaire.

Le pilote a donc la possibilité de modifier la géométrie du profil de façon à réduire la vitesse de l'aile dans les phases de décollage et d'atterrissage (en tractionnant les trims) et de l'augmenter pendant le vol de croisière (en relâchant les trims). Dans ce dernier cas, on aura également une meilleure stabilité.



**Figure 1.10** - La forme du profil varie en fonction de la position des trims.

### 1.1.2 Les matériels

Pour les voiles, sont utilisés des matériels synthétiques nombreux et sophistiqués (parmi lesquels nous citerons Mylar, Dacron et Trilam) : les tissus légers et poreux, typiques des premiers modèles dérivés des parachutes de saut, ont laissé la place à des toiles plus rigides à porosité beaucoup plus basse.

Le tissu, en outre, présente toujours une épaisse trame réticulée quadrangulaire, qui a la capacité de distribuer uniformément la charge, et d'empêcher la propagation des petites déchirures.

Le principal ennemi de la voile est le soleil, et plus précisément les radiations ultraviolettes (U.V.) qu'il émet. L'atteinte des U.V se caractérise, dans la phase initiale, par une perte de consistance et un "pâlisement" des couleurs ; un vieillissement excessif se traduit, en outre, par une augmentation de la porosité du tissu.

En ce qui concerne les suspentes, il s'agit, dans la plupart des cas, de drisses en Kevlar, en Dyneema ou en Vectran, protégées d'une gaine. Sur les premiers modèles, après quelques vols, les suspentes avaient tendance "à s'allonger", modifiant ainsi sensiblement les caractéristiques de l'aile; pour éviter ce phénomène, on effectue aujourd'hui un pré-étirement des suspentes.

Le diamètre des suspentes est un compromis entre la traînée aérodynamique et la résistance à la rupture. Dans quelques cas, comme dans celui des ailes de compétition pour le vol libre, on emploie des suspentes sans gaine de protection, afin de réduire le plus possible la résistance aérodynamique. Dans ce cas, la résistance à la rupture reste inchangée, mais les suspentes sont plus sujettes à l'usure.

La liaison de la sellette à l'aile se fait par des mousquetons, qui sont en général trapézoïdaux, en acier ou en aluminium.

Ceux-ci doivent pouvoir se fermer et se bloquer au moyen d'un embout à vis.

## 1.2 L'appareil propulsif

L'appareil propulsif est constitué d'un moteur et d'une hélice.

Le moteur est en général à deux temps (les moteurs à 4 temps sont peu diffusés à cause de leur poids), et peut être de différentes cylindrées, comprises entre 80 et 250 cm<sup>3</sup>, avec des puissances de 14 à 30 Cv; la poussée statique est comprise entre 40 et 80 Kg. Les caractéristiques qui leur sont demandées sont celles de n'importe quel moteur aéronautique, c'est-à-dire : légèreté, fiabilité et bonne puissance spécifique ( $T W_{moteur}$ ).

Le démarrage peut être manuel ou électrique; dans ce dernier cas, on a une augmentation du poids due à la présence de la batterie et du démarreur.

Les gaz sont gérés par une poignée que le pilote tient en main pendant le vol.

La transmission est à courroie ou à engrenages (pour les systèmes à embrayage).



**Figure 1.11** - Moteur de cylindrée 100 cm<sup>3</sup> avec transmission à engrenages.



Les hélices sont réalisées spécialement pour le paramoteur, et sont adaptées aux divers types de moteur. Elles sont à pas fixe (il existe quelques hélices en composite à pas réglable manuellement au sol, mais elles sont rares). Elles peuvent être bipales, tripales ou quadripales; leur diamètre varie en général, de 70 cm à 130 cm. Elles peuvent être réalisées en composite (figure 1.12) ou en bois (figure 1.13).



**Figure 1.12** - Hélice tripale en composite



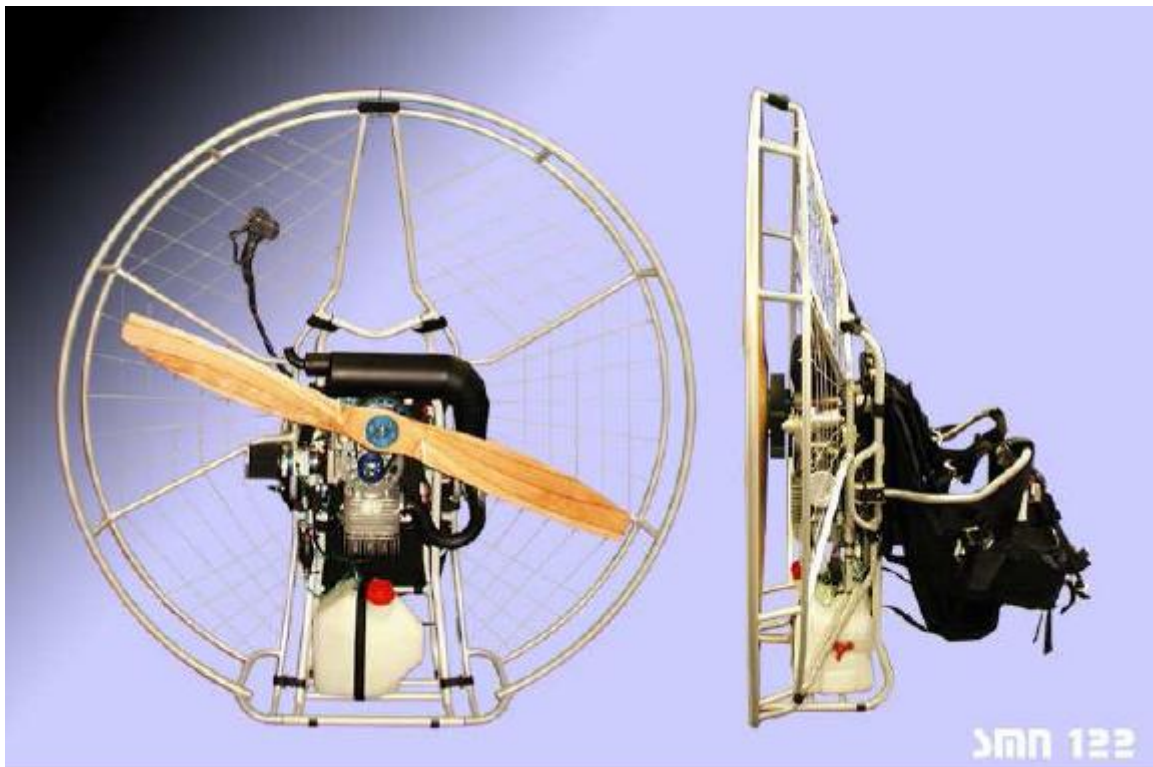
**Figure 1.13** - Hélice bipale en bois

Moteur et hélice sont montés sur un châssis, qui comprend la cage protectrice pour l'hélice, le réservoir de carburant, et une sellette pour le pilote.

Le système d'attache voile-sellette-châssis peut être fixe ou mobile, ce dernier rendant le pilotage plus sensible aux transferts de poids de la part du pilote, et transmettant plus les variations de pression subies par les deux demi-ailes.

Le poids du moteur monté sur châssis, complet avec accessoires, va de 19 à presque 40 Kg.

Le premier objectif des constructeurs est de réduire le poids du groupe motopropulseur au minimum possible, non seulement pour être plus léger en vol, mais surtout parce que le poids pénalise le pilote lors des manœuvres au sol.



**Figure 1.14** – *Groupe motopropulseur monté sur châssis*

### 1.3 Le pilotage du paramoteur

Le paramoteur se pilote en agissant sur les commandes, et en déplaçant le poids dans le harnais-selle. S'il veut faire un virage, le pilote devra déplacer son poids du côté où il veut tourner, et tirer sur la commande correspondante; l'intensité de l'action déterminera le rayon de virage. En actionnant une commande, la demi-aile interne ralentit, l'aile tend à tourner en lacet, et en même temps, s'incline au point que le ralentissement de la demi-aile détermine un ralentissement de la vitesse moyenne de la totalité de l'aile, alors que le pilote, à cause de son inertie, tend à poursuivre tout droit ; la "déviation" de trajectoire imposée au pilote engendre une force centrifuge.

En conservant simplement la même position de commande, la traînée plus importante de la demi-aile interne alimente la force centrifuge, et maintient le virage "coordonné".

Pour reprendre le vol rectiligne, on dispose les commandes symétriquement, afin de rétablir l'égalité des forces agissant sur les deux demi-ailes.

Si on veut monter, on augmente le nombre de tours du moteur en fonction de l'assiette de l'aile et du taux de montée que l'on veut obtenir.

L'accélération est obtenue au moyen d'une poignée que le pilote tient dans une main pendant toutes les phases de vol ; dans la partie fixe de la poignée se trouve les boutons de coupe-contact et de démarrage (si électrique) du moteur.



**Figure 1.15** – *Paramoteur en virage*

## Chapitre 2

# Étude expérimentale des performances du paramoteur

### Introduction

Pour l'étude des performances du paramoteur, nous examinerons deux types de groupes motopropulseurs, et trois types différents d'ailes.

Seront d'abord déterminées expérimentalement, les caractéristiques aérodynamiques des ailes et les données techniques des groupes motopropulseurs. Seront ensuite calculées les performances des diverses combinaisons aile - groupe motopropulseur.

La détermination des caractéristiques aérodynamiques des ailes consiste à trouver expérimentalement l'odogramme du mouvement et, à partir de celui-ci, à calculer les polaires.

En ce qui concerne l'appareil motopropulseur, par contre, seront recherchés les poussées et les consommations spécifiques aux différents régimes du moteur, et le rendement selon les vitesses de vol.

Pour déterminer l'odogramme des ailes, des tests ont été faits en vol plané avec le paramoteur.

Pour trouver les données concernant les composantes de vitesse horizontale et verticale du paramoteur en vol plané, ont été utilisés un GPS et variomètre (figure 2.1). Il a en outre, été nécessaire de voler dans des conditions atmosphériques particulières puisque, le parapente étant lent, les épreuves devaient être faites en conditions ambiantes idéales, caractérisées par  $V_x=V_z=0$  ou bien  $V_z=0$  et  $V_x$  constant, aussi bien en intensité qu'en direction, de façon à ne pas altérer les valeurs des vitesses relevées par les instruments.



Figure 2.1 – Compte-tours, variomètre, GPS

Afin d'obtenir de telles conditions, les vols de test ont été effectués peu avant l'aube. En effet, à cause du refroidissement nocturne du sol, la couche d'inversion thermique, au-dessus de laquelle il n'y a pas de mouvements verticaux de l'air dus à la convection, descend et sa pression augmente ; ce phénomène a été confirmé par le sensible accroissement de température remarqué en prenant de l'altitude juste après le décollage.

Il n'a pas cependant pas suffi de monter au-dessus de l'inversion pour trouver les bonnes conditions de test, puisqu'il y avait un gradient vertical de vent qui limitait l'altitude utilisable pour les épreuves, entre 1500 et 1000 mètres ; il n'y avait, en effet, que dans cette plage de 500 mètres que l'intensité du vent ne variait pas, et donc que les valeurs de la composante horizontale de vitesse indiquée par le GPS restaient constantes. Au dessus ou au dessous, la variation de la vitesse du vent causait des petites oscillations du système aile-pilote qui faisaient varier, outre la vitesse horizontale, la vitesse verticale indiquée par le variomètre (on remarque, en effet, que le parapente est le seul appareil volant où le pilote est distant de presque 8 mètres de l'aile, et donc les variations de vitesse de cette dernière créent un mouvement de pendule, dû à l'inertie de la masse du pilote).

D'autres vols de test ont été effectués sur la mer, afin de garantir l'absence de thermiques, en conditions de vent nul ou très faible ; de la même façon, il a été nécessaire de trouver une couche d'air dans laquelle on pouvait effectuer les épreuves avec la plus grande précision possible.

Pour déterminer la consommation spécifique et la poussée de l'appareil propulseur aux divers régimes du moteur, nous avons utilisé un banc d'épreuve construit exprès. Par contre, pour le rendement de l'appareil propulsif, nous avons effectués des tests en vol rectiligne uniforme horizontal.

Pendant ces tests, nous avons utilisé : un variomètre, un GPS et un compte-tours ; en outre, nous avons dû, comme dans les épreuves de vol plané, voler en l'absence de mouvements de l'air, verticaux ou horizontaux. Les épreuves de vol ont donc été faites sur la mer et en l'absence de vent.

## 2.1 Caractéristiques techniques des ailes et de l'appareil propulsif

Les trois différents types d'ailes choisis pour l'étude représentent trois catégories existant aujourd'hui sur le marché du vol en paramoteur, c'est-à-dire : aile pour le vol libre (représentative d'une catégorie d'ailes aux performances intermédiaires-supérieures), aile pour le paramoteur à profil instable, et aile pour le paramoteur à profil autostable.

Dans les tableaux qui suivent, sont rapportées les caractéristiques techniques des ailes examinées.

Surface	27,8 m <sup>2</sup>
Envergure	12,3 m
Allongement	5,4
Surface projetée	24,6 m <sup>2</sup>
Envergure projetée	10,2 m
Allongement projeté	4,2
Épaisseur	11 %
Matériau d'extrados	S9092-E85A 45 g/m <sup>2</sup>
Matériau d'intrados	S9017-E38A 40 g/m <sup>2</sup>
Poids de l'aile	7,1 kg
Schéma caissons	33/65
Schéma élévateurs	4 (3A/4B/3C/3D)
Diamètre suspentes	1,8/1,5/1,3/1,2 mm
Matériau suspentes	Dynema/Technora
Distance aile-pilote	7,77 m
Débattement accélérateur	20 cm
Débattement trims	14 cm
Charge alaire	5,24 kg/m <sup>2</sup>
Homologation	Paramoteur CEN Performance

**Tableau 2.1.1** - *Caractéristiques techniques de l'aile de paramoteur à profil autostable*

Surface	28 m <sup>2</sup>
Envergure	12,0 m
Allongement	5,1
Surface projetée	25,1 m <sup>2</sup>
Envergure projetée	9,6 m
Allongement projeté	4,2
Épaisseur	10 %
Matériau d'extrados	S9092-E38A 45 g/m <sup>2</sup>
Matériau d'intrados	S9017-E77A 40 g/m <sup>2</sup>
Poids de l'aile	6,4 kg
Schéma caissons	19/57
Schéma élévateurs	5 (2A+1A'/4B/3C/3D)
Diamètre suspentes	1,8/1,2/1,1 mm
Matériau suspentes	Superaramid/Dynema
Distance aile-pilote	7,20 m
Débattement accélérateur	15 cm
Débattement trims	11 cm
Charge alaire	5,11 kg/m <sup>2</sup>
Homologation	Paramoteur AFNOR Standard

**Tableau 2.1.2** - *Caractéristiques techniques de l'aile de paramoteur à profil instable*

Surface	27,6 m <sup>2</sup>
Envergure	12,9 m
Allongement	6,0
Surface projetée	24,4 m <sup>2</sup>
Envergure projetée	10,6 m
Allongement projeté	4,7
Épaisseur	12 %
Matériau d'extrados	Gelvenor 46 g/m <sup>2</sup>
Matériau d'intrados	Gelvenor 46 g/m <sup>2</sup>
Poids de l'aile	7,4 kg
Schéma caissons	39/43
Schéma élévateurs	4(3A/4B/1C/2D)
Diamètre suspentes	2,2/1,7/1,1/0,8mm
Matériau suspentes	SuperAramid/Dynema
Distance aile-pilote	7,90 m
Débattement accélérateur	18 cm
Débattement trims	-
Charge alaire	5,28 kg/m <sup>2</sup>
Homologation	Cross AFNOR Performance DHV2/GH

**Tableau 2.1.3** - *Caractéristiques techniques de l'aile de vol libre*



Les deux types de groupes motopropulseurs étudiés sont le *Vittorazi - Fly 100 Evo* et le *Simonini - Mini 2 Plus*.

Le premier est composé d'un moteur de cylindrée 100 cm<sup>3</sup> avec hélice en composite de diamètre 125 cm, et le deuxième d'un moteur de cylindrée 200 cm<sup>3</sup> avec hélice en bois de diamètre 130 cm. Dans le tableau qui suit, sont rapportées les caractéristiques techniques du *Vittorazi-Fly 100 Evo*.

Cycle	à 2 temps
Course	50 mm
Cylindrée	98,2 cm <sup>3</sup>
Puissance	18 Cv
Tours/minute	9500
Alésage	50 mm
Cylindre	Monocylindre en aluminium chromé
Piston	à 2 segments
Admission	à clapets – Boîte à air – carburateur Dell'Orto PHGB 21
Refroidissement	Air forcé par turbine de refroidissement et capot
Démarrage	Électrique et manuel
Embrayage	Centrifuge
Réducteur	Engrenage hélicoïdal à bain d'huile. Taux : 1/3,65
Allumage	Électronique CDI avec recharge de la batterie
Bougie	NGK BR9ES
Température de fonctionnement du cylindre	De 80°C à 95 °C
Échappement	Pot de détente fait main, avec silencieux
Sens de rotation	Horaire
Carburant	Essence sans plomb – Huile de synthèse 2,5 %
Poids	12 kg avec lanceur à main
Poids	12,5 kg avec démarreur électrique
Poids	13 kg avec lanceur à main et démarreur électrique

**Tableau 2.1.4** - *Caractéristiques techniques du Fly 100 Evo*

La figure 2.1.1 montre les caractéristiques de puissance et de couple du *Fly 100 Evo* fournies par le constructeur. Les valeurs rapportées sur le graphique ne tiennent pas compte des pertes dues à la transmission et à l'embrayage.

**Figure 2.1.1** - *Courbe de puissance (courbe inférieure)  
et de couple (courbe supérieure) du Fly 100 Evo*

Dans le tableau qui suit, sont rapportées les caractéristiques techniques du *Simonini - Mini 2 Plus*

Cylindrée	202 cm <sup>3</sup>
Alésage	66,4 mm
Course	58 mm
Taux de compression	10,5/1
Puissance	25 Cv
Régime maximum	7500
Admission	à clapets, carburateur "Dell'Orto PHBH 28"
Refroidissement	Air libre
Cylindre	Aluminium traité Nikasil
Échappement	à résonateur
Réduction	Courroie Poly-V
Allumage	Électronique
Lubrification	3 %, essence sans plomb
Sens de rotation	Antihoraire
Poids du moteur	13 kg
Poids du pot d'échappement	2,4 kg

**Tableau 2.1.5** - *Caractéristiques techniques du Mini 2 Plus*

Le graphique de la figure 2.1.2 a été fourni par le constructeur, et montre les caractéristiques de puissance et de couple des *Mini 2 Plus*, en fonction du nombre de tours/minute de ce dernier.

Les valeurs rapportées dans le graphique ne tiennent pas compte des pertes dues à la courroie de transmission.

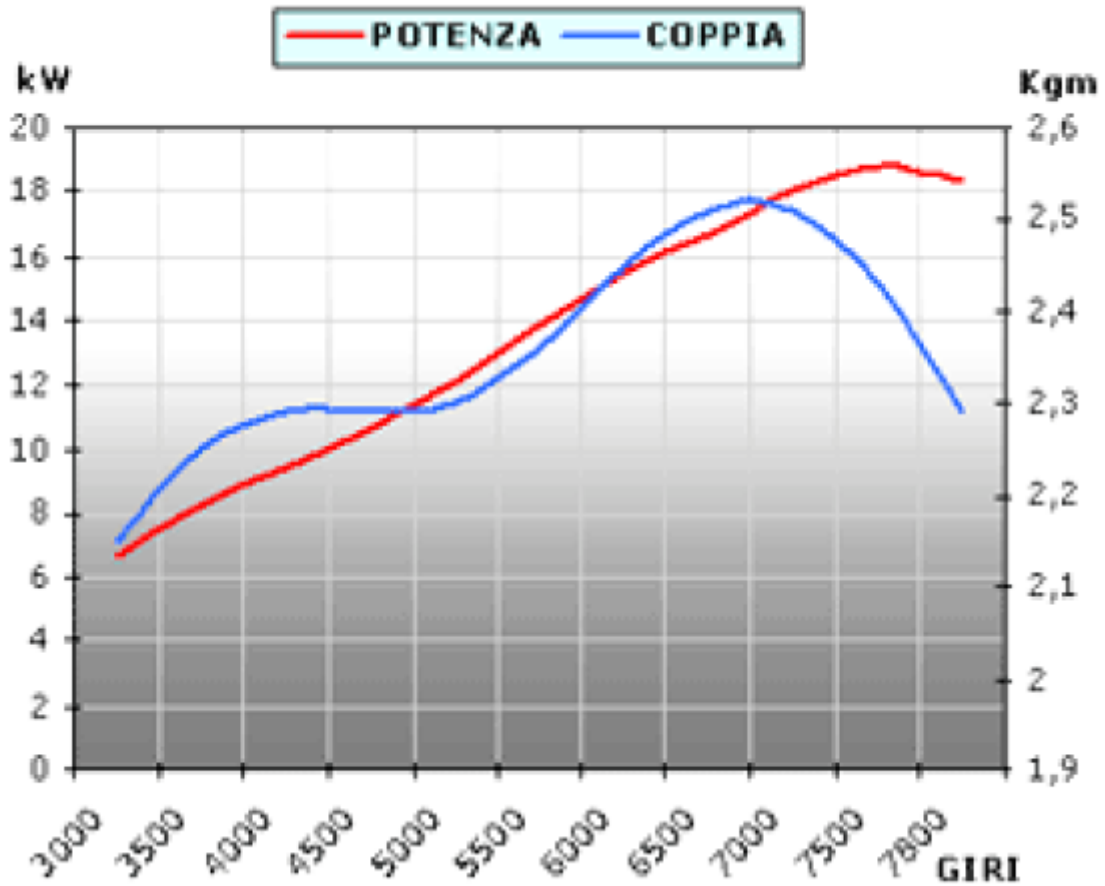


Figure 2.1.2 - Courbe de puissance et de couple du Mini 2 Plus

L'hélice en composite, produite par *Helix*, est bipale à pas fixe, avec un diamètre de 125 cm, et un angle de calage de 6°.

L'hélice en bois est bipale à pas fixe, pour un diamètre de 130 cm.

En figure 2.1.3, sont rapportées les caractéristiques de poussée et de puissance de l'hélice en composite, en fonction du nombre de tours de cette dernière.

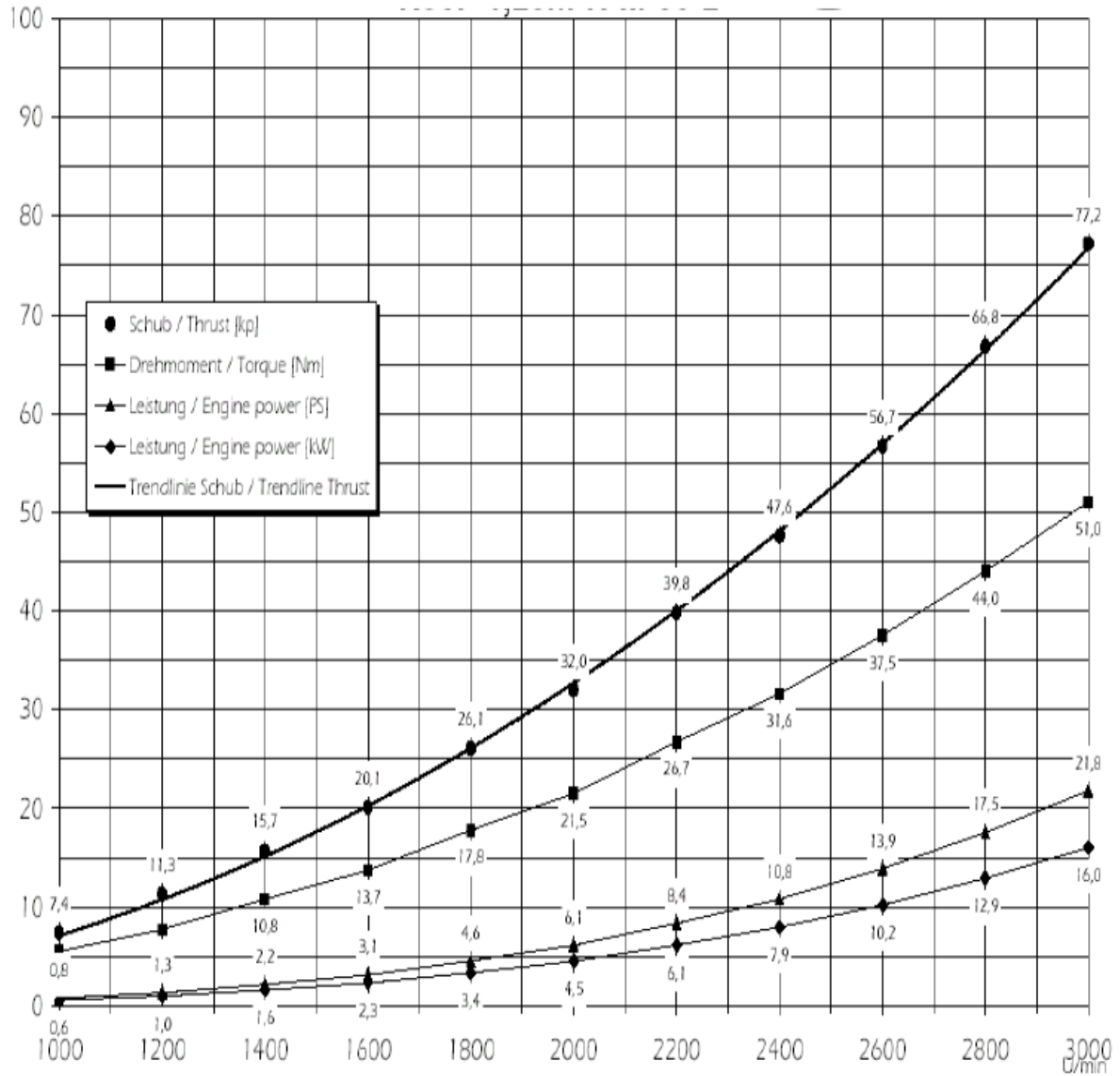


Figure 2.1.3 - Courbes caractéristiques de l'hélice en composite

Pour l'hélice du *Simonini*, les données n'ont pas été fournies.

## 2.2 Description du banc d'épreuve

La structure du banc d'épreuve, réalisée en fer, est constituée d'une base ancrée au sol et de deux supports à l'intérieur desquels couissent deux tiges d'aluminium. Le moteur est fixé au banc par quatre points, deux de ceux-ci (ceux d'en haut) coïncident avec l'axe de poussée de l'hélice et relient le cadre aux deux barres d'aluminium qui couissent à l'intérieur des deux glissières. La partie mobile est reliée à un dynamomètre, sur lequel on peut lire la valeur de la poussée fournie par le groupe motopropulseur.

Les deux autres points d'attache se trouvent à la base du banc et soutiennent le poids de l'appareil propulsif.

La liaison est faite de façon à laisser une certaine liberté de mouvement le long de l'axe de poussée, pour ne pas altérer la valeur de cette dernière.

Le régime du moteur est lu sur le compte-tours digital fixé au banc.

Partie intégrante du banc d'épreuve, un bidon supplémentaire est utilisé pour les épreuves de consommation. Il est positionné au-dessus du carburateur, afin que le carburant arrive par gravité. Une fois que l'appareil propulseur (moteur + hélice) est fixé au banc d'épreuve, l'aiguille du dynamomètre est mise sur le zéro du disque gradué, et le compte-tours est relié à la bobine du moteur ; puis, avec la poignée de gaz, nous portons le moteur au nombre de tours désirés, et nous lisons la valeur de la poussée sur le dynamomètre.



Figures 2.2.a, 2.2b - Photo du banc d'épreuve

## 2.3 Détermination expérimentale de l'odogramme et des polaires des ailes

Les odogrammes des trois ailes ont été déterminés en volant aux diverses allures et en notant à chaque fois la valeur de la vitesse horizontale donnée par le GPS, et celle de la vitesse verticale donnée par le variomètre.

Les épreuves ont été effectuées en prenant en compte la vitesse horizontale de l'air et celle lue sur le GPS, pour obtenir la vitesse effective de l'appareil.

La vitesse verticale lue sur le variomètre, en revanche, est considérée comme exacte, puisque le vol de test a été effectué en absence de mouvements verticaux de l'air.

Pour les deux ailes de paramoteur, pourvues de trims, nous avons déterminés trois odogrammes correspondant aux trois différentes configurations du profil, puisqu'en variant la position des trims, la forme de ce dernier change, et donc sa polaire.

Les trois configurations correspondent aux positions des trims suivantes : entièrement tractionnés, tractionnés à mi-course, et enfin totalement relâchés.

Pour chacune de ces configurations, l'aile a été mise aux diverses incidences, depuis celle du décrochage jusqu'à celle de l'incidence minimale de vol, qui dans le cas du parapente, correspond à la limite au-delà de laquelle la perte de pression interne provoque la fermeture de l'aile.

Pour chaque incidence de vol, nous avons obtenu un couple de valeurs de vitesse (horizontale et verticale), que nous rapportons sur le diagramme ( $V_x$ ,  $V_z$ ), réalisant ainsi l'odogramme relatif à chaque configuration de trim de l'aile.

L'aile de vol libre étant dépourvue de trim, n'a qu'une configuration, et il n'y a qu'un odogramme à trouver.

Les odogrammes des trois ailes sont rapportées par les figures 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3 (“■” représentant les valeurs trouvées expérimentalement), où  $V_z$  est exprimé en m/s et  $V_x$  en Km/h.

Connaissant l'odogramme – et donc les vitesses horizontales et verticales relatives à un angle déterminé d'incidence – et connaissant les valeurs de la charge alaire et de la densité de l'air, on peut déterminer les coefficients de portance ( $C_L$ ) et de traînée ( $C_D$ ) suivant la relation:

$$W \cos \gamma = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad ; \quad - W \sin \gamma = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (2.1)$$

$$\text{d'où} \quad \cos \gamma = \frac{V_x}{V} \quad ; \quad \text{sen} \gamma = \frac{V_z}{V} \quad (2.2)$$

$$\text{ce qui nous donne :} \quad W \cdot V_x = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_L \quad ; \quad W \cdot V_z = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_D \quad (2.3)$$

$$\text{dont on tire :} \quad C_L = \frac{2V_x W}{\rho V^3 S} \quad ; \quad C_D = \frac{2V_z W}{\rho V^3 S} \quad (2.4)$$

La valeur de  $C_D$  prend en compte la traînée de la sellette motorisé qui va augmenter le  $C_{D0}$  dans l'équation de la polaire parabolique symétrique :

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi \lambda_e} \quad (2.5)$$

Connaissant les coefficients de portance et de traînée, correspondants aux divers angles d'incidence pour chaque position des trims de l'aile, on peut construire les polaires respectives (figures 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6), et calculer les valeurs de la finesse, de  $E \cdot \sqrt{C_L}$  et de  $E / \sqrt{C_L}$  correspondant aux diverses configurations de vol au moyen de :

$$\text{Finesse } (E) = \frac{C_L}{C_D} \quad E \cdot \sqrt{C_L} = \frac{C_L^{\frac{3}{2}}}{C_D}$$

$$\frac{E}{\sqrt{C_L}} = \frac{C_L^{\frac{1}{2}}}{C_D}$$

Ces valeurs sont rapportées dans les tableaux 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3.



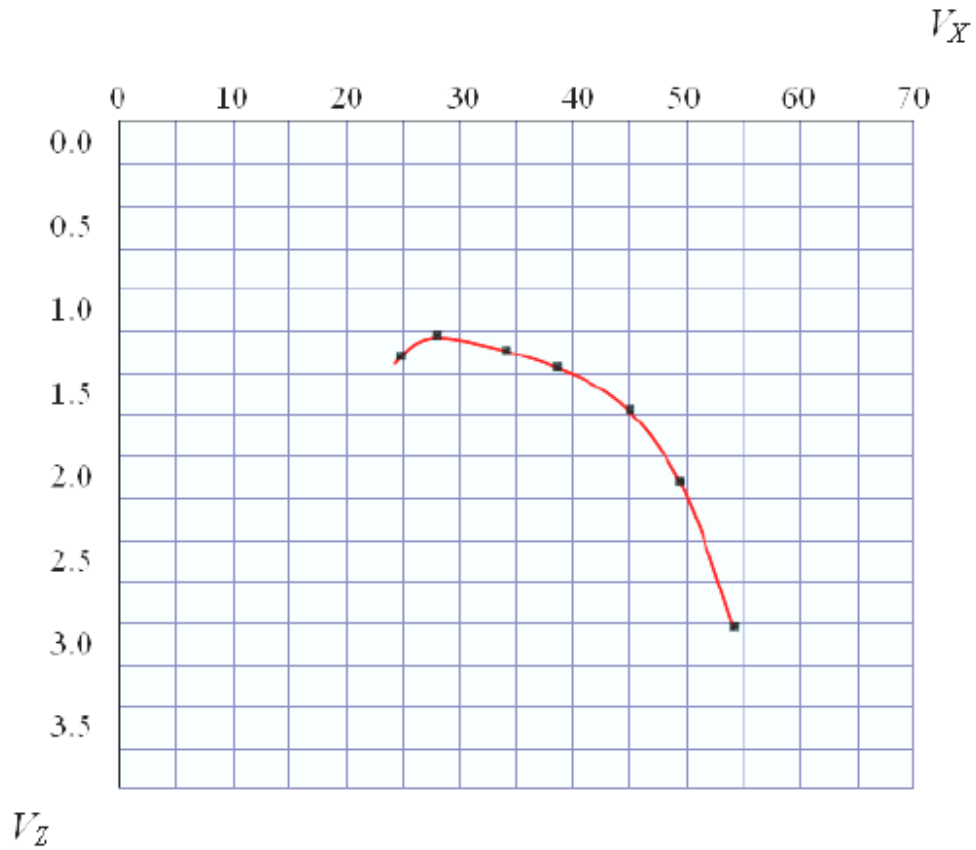


Figure 2.3.1.a - Odogramme de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims tractionnés à fond.

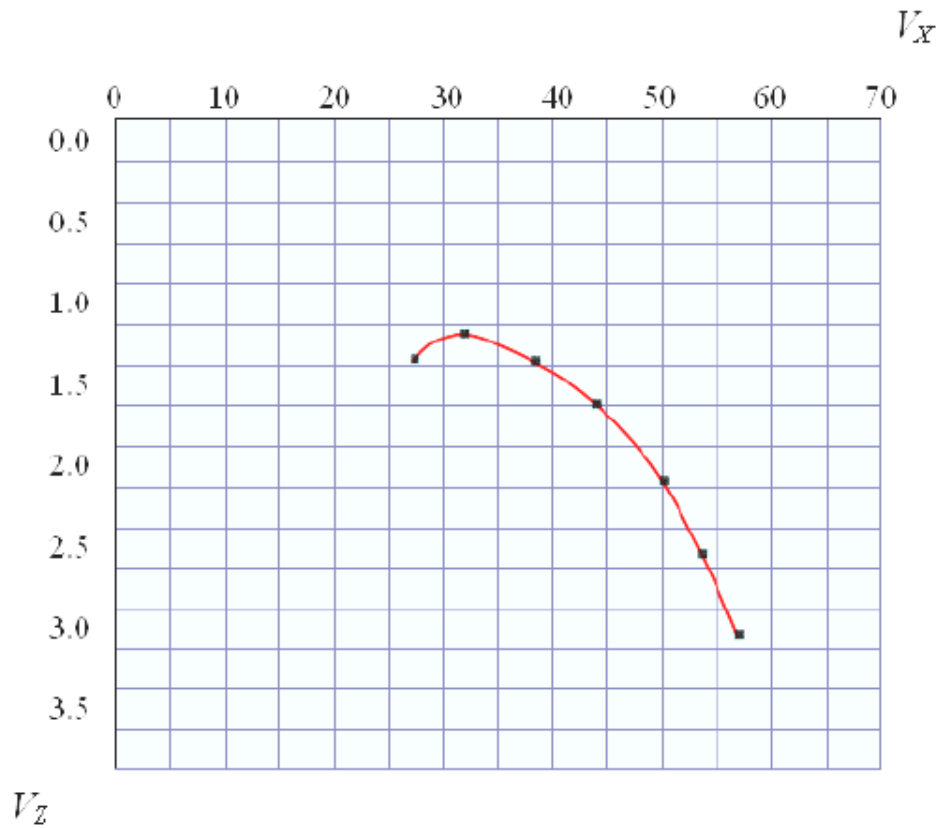
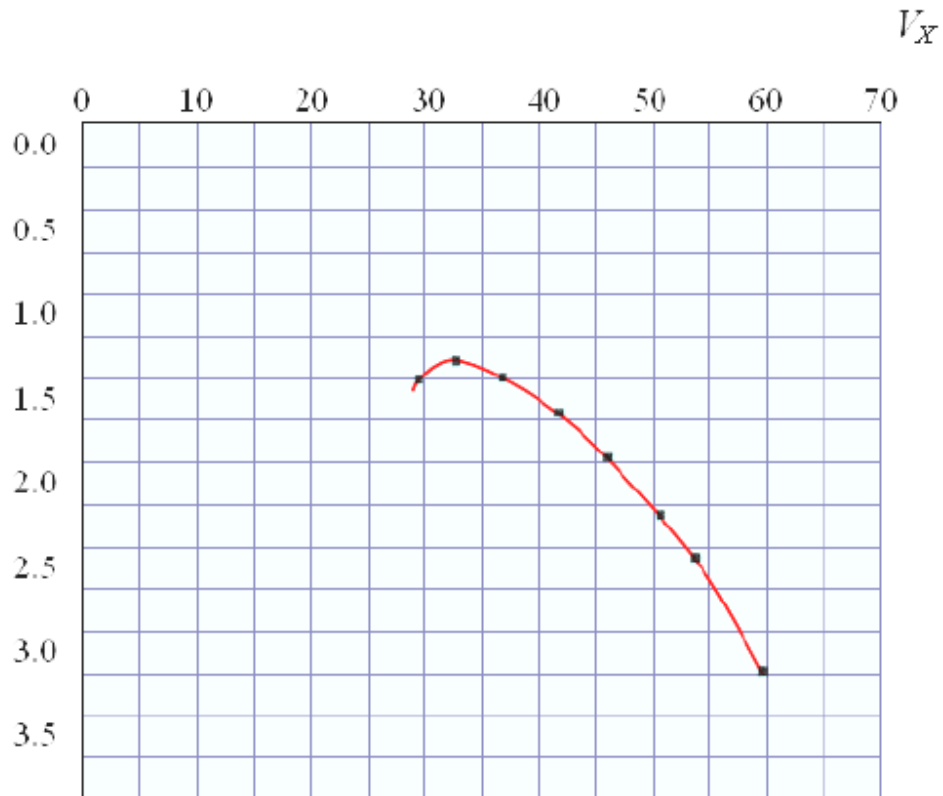
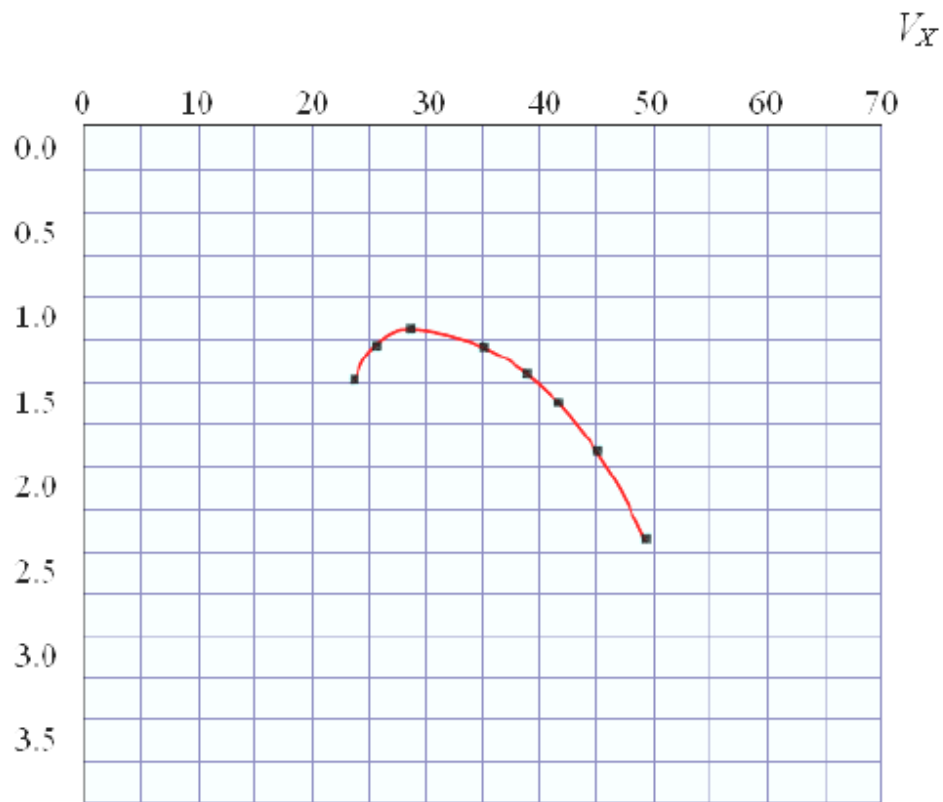


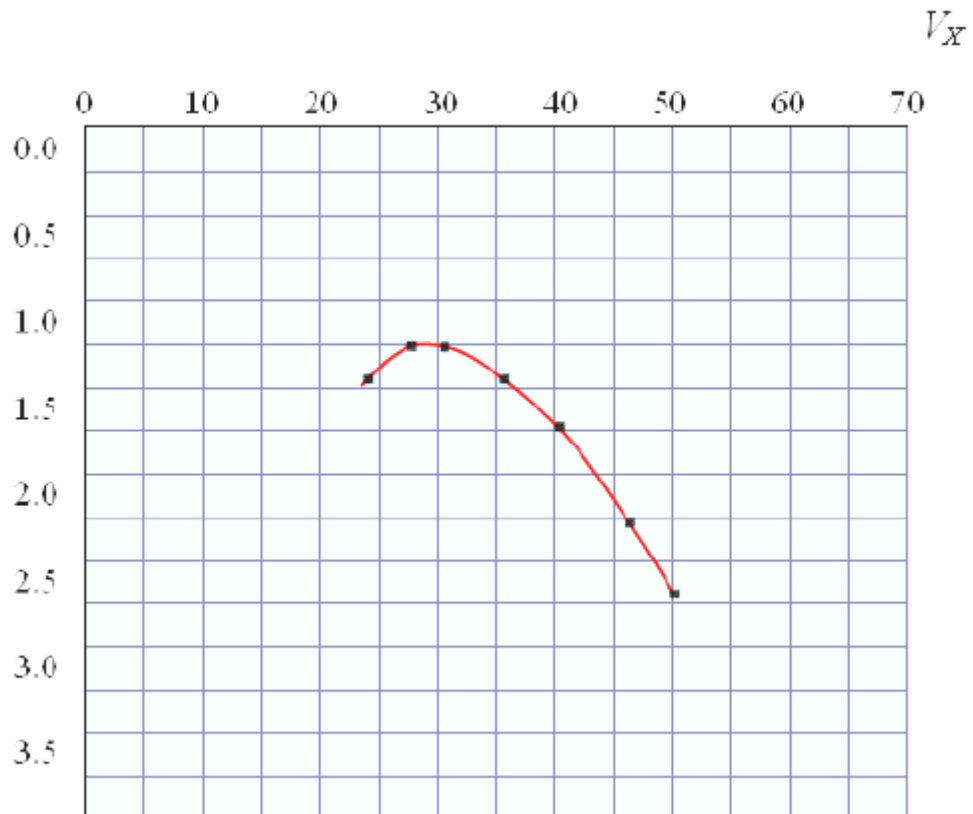
Figure 2.3.1.b - Odogramme de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims à mi-course



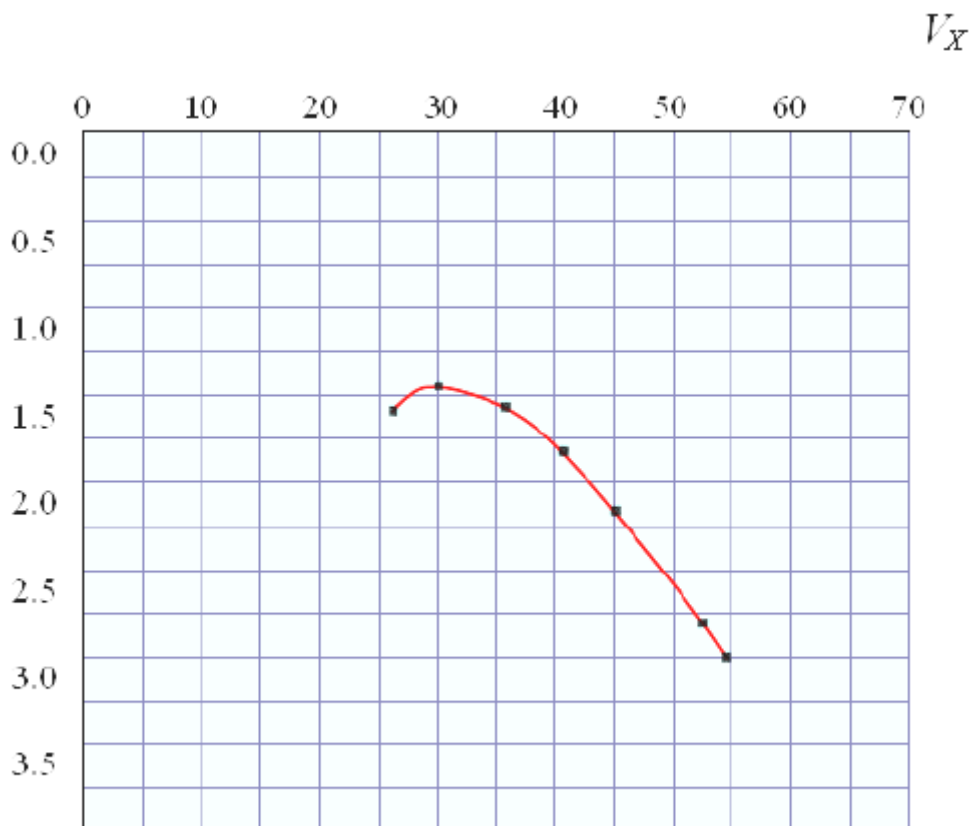
$V_Z$   
**Figure 2.3.1.c** – Odogramme de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims relâchés.



$V_Z$   
**Figure 2.3.2.a** – Odogramme et polaire de l'aile de paramoteur à profil instable, trims tractionnés à fond



**Figure 2.3.2.b** – Odogramme de l'aile de paramoteur à profil instable, trims à mi-course



**Figure 2.3.2.c** – Odogramme de l'aile de paramoteur à profil instable, trims relâchés.

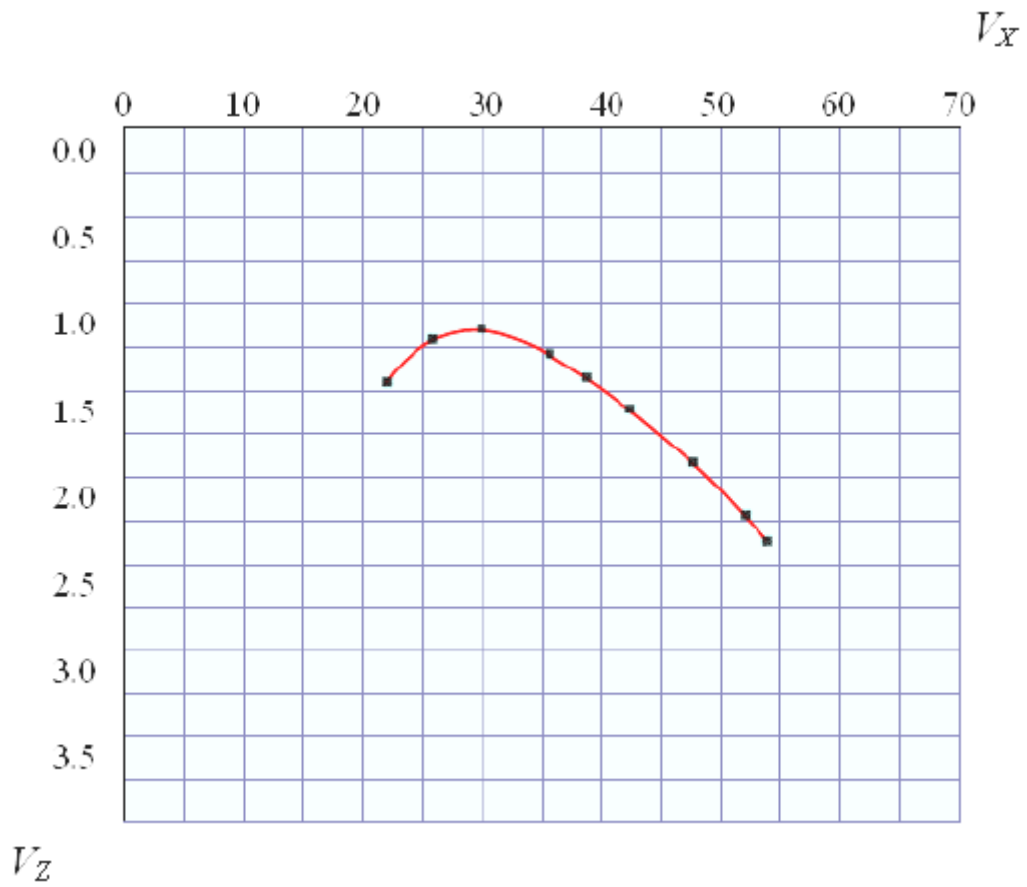
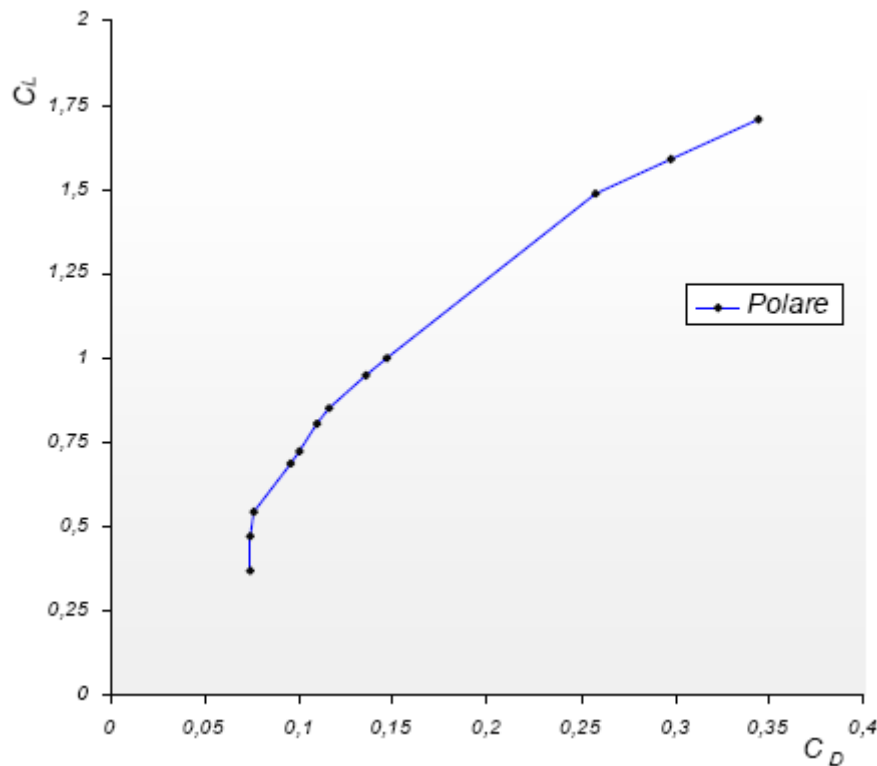


Figure 2.3.3 - Odogramme de l'aile de vol libre.

$V(km/h)$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$\frac{E}{\sqrt{C_L}}$
25,5	0,3441	1,7071	4,9603	6,4810	3,7963
26,5	0,2974	1,5914	5,3497	6,7488	4,2407
27,4	0,2576	1,4862	5,7692	7,0334	4,7322
33,5	0,1469	1,0008	6,8122	6,8151	6,8093
34,3	0,1358	0,9505	6,9958	6,8207	7,1755
36,3	0,1164	0,8499	7,2992	6,7293	7,9174
37,3	0,1096	0,8048	7,3412	6,5862	8,1828
39,4	0,1002	0,7237	7,2222	6,1443	8,4891
40,4	0,0959	0,6877	7,1684	5,9448	8,6438
45,4	0,0760	0,5432	7,1428	5,2649	9,6906
48,6	0,0746	0,4738	6,3492	4,3707	9,2233
54,9	0,0740	0,3688	4,9814	3,0252	8,2026

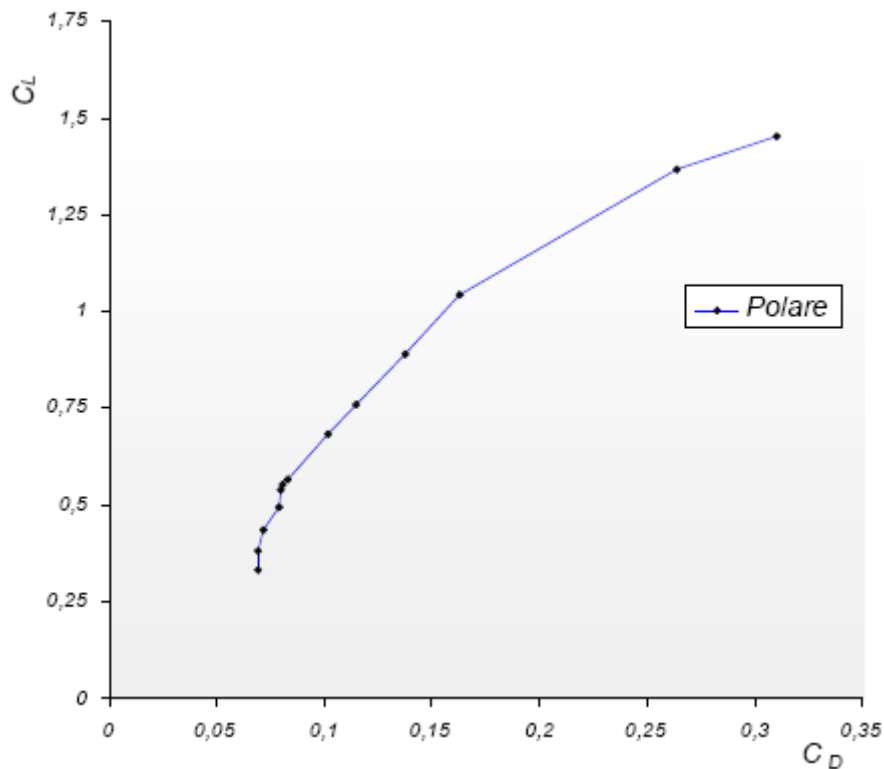
**Tableau 2.3.1.a** – Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ , et  $E/\sqrt{C_L}$ , en fonction de la vitesse de l'aile paramoteur à profil autostable, trims entièrement tractionnés



**Figure 2.3.4.a** - Polaire de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims tractionnés à fond

$V(km/h)$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$E / \sqrt{C_L}$
27,6	0,3100	1,4534	4,6875	5,6511	3,8881
28,5	0,2637	1,3677	5,1851	6,0640	4,4336
32,7	0,1625	1,0458	6,4348	6,5907	6,2922
35,4	0,1377	0,8925	6,4814	6,1234	6,8604
38,4	0,1149	0,7581	6,5972	5,7442	7,5768
40,4	0,1017	0,6851	6,7340	5,5739	8,1354
44,5	0,0834	0,5665	6,7901	5,1108	9,0212
45	0,0807	0,5542	6,8672	5,1126	9,2241
45,5	0,0801	0,5414	6,7567	4,9718	9,1823
47,6	0,0786	0,4938	6,2767	4,4108	8,9318
50,7	0,0720	0,4350	6,0386	3,9830	9,1551
53,8	0,0691	0,3844	5,5555	3,4444	8,9605
57,7	0,0689	0,3331	4,8290	2,7873	8,3662

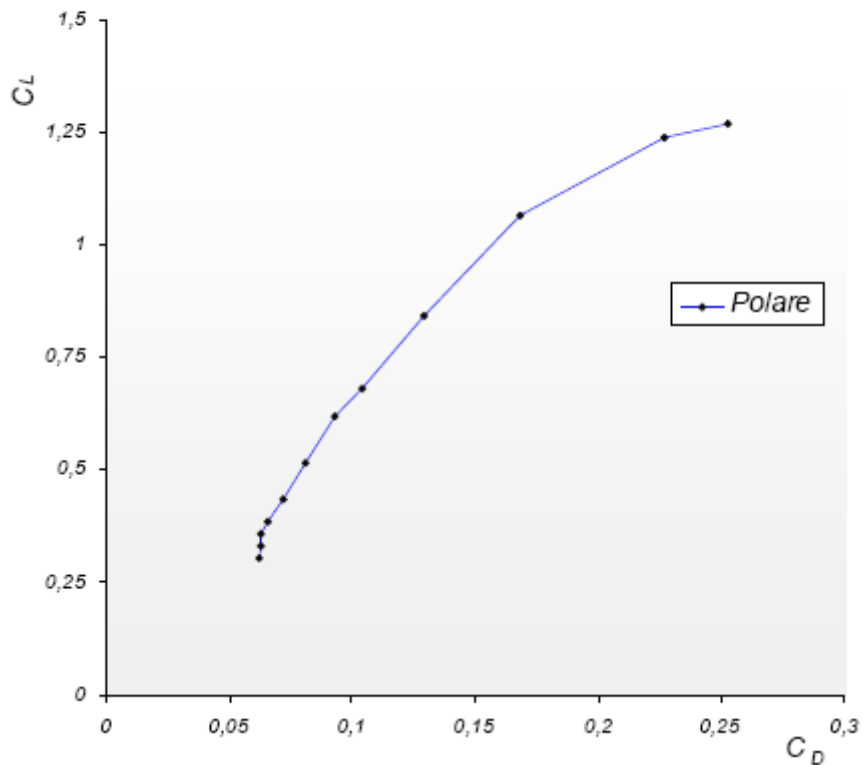
**Tableau 2.3.1.b** -Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ ,  $E / \sqrt{C_L}$ , en fonction de la vitesse de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims à mi-course



**Figure 2.3.4.b** - Polaire de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims à mi-course

$V(\text{km/h})$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$\frac{E}{\sqrt{C_L}}$
29,5	0,2524	1,2708	5,0347	5,6758	4,4660
30	0,2267	1,2387	5,4629	6,0803	4,9083
32,4	0,1679	1,0662	6,3492	6,5560	6,1488
36,4	0,1291	0,8441	6,5359	6,0051	7,1136
40,5	0,1038	0,6804	6,5522	5,4050	7,9429
42,5	0,0931	0,6210	6,6666	5,2537	8,4596
46,5	0,0807	0,5162	6,3888	4,5902	8,8922
50,7	0,0720	0,4350	6,0386	3,9830	9,1551
53,7	0,0656	0,3864	5,8888	3,6605	9,4735
55,8	0,0631	0,3575	5,6584	3,3835	9,4628
58	0,0626	0,3306	5,2777	3,0348	9,1782
60	0,0621	0,3049	4,7619	2,5859	8,7686

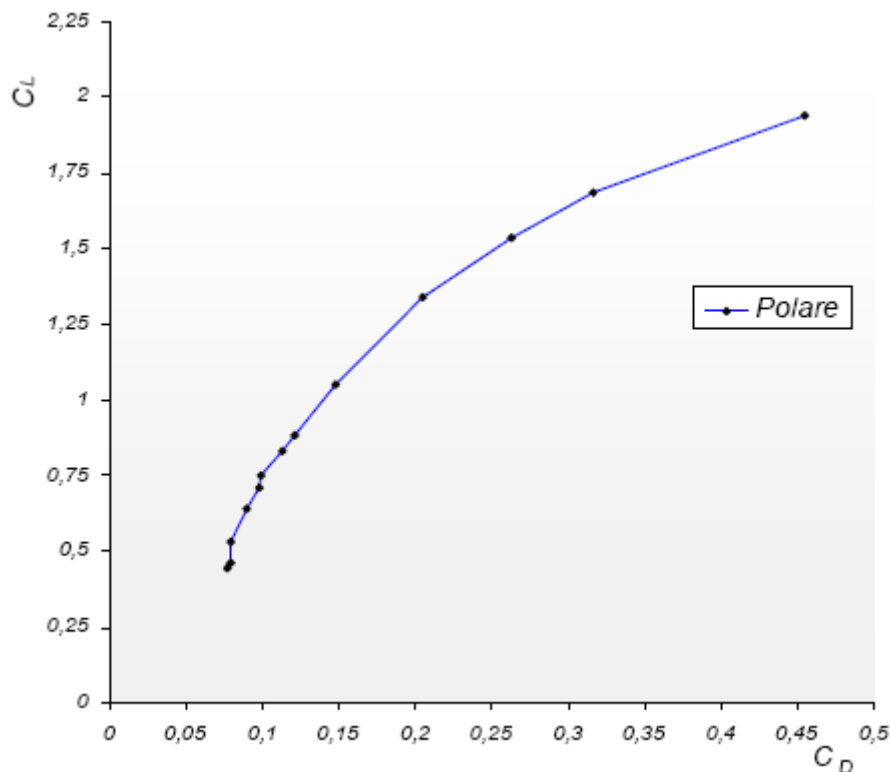
**Tableau 2.3.1.c** - Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ , et  $E / \sqrt{C_L}$ , en fonction de la vitesse de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims relâchés



**Figure 2.3.4.c** - Polaire de l'aile de paramoteur à profil autostable, trims relâchés

$V(km/h)$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$E/\sqrt{C_L}$
23,5	0,4545	1,9362	4,2592	5,9267	3,0609
25,4	0,3157	1,6867	5,3418	6,9377	4,1130
26,6	0,2629	1,5369	5,8444	7,2455	4,7142
28,5	0,2044	1,3390	6,5509	7,5805	5,6611
32,2	0,1480	1,0527	7,1111	7,2961	6,9307
35,2	0,1205	0,8813	7,3099	6,8626	7,7863
36,2	0,1125	0,8336	7,4074	6,7634	8,1127
38,2	0,0993	0,7489	7,5396	6,5249	8,7122
39,3	0,0982	0,7093	7,2222	6,0828	8,5750
41,3	0,0900	0,6413	7,1180	5,7002	8,8884
45,4	0,0795	0,5306	6,7567	4,9221	9,2752
48,6	0,0785	0,4610	5,7971	3,9364	8,5372
49,6	0,0766	0,4422	5,7674	3,8355	8,6724

**Tableau 2.3.2.a** - Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ , et  $E/\sqrt{C_L}$ , en fonction de la vitesse de l'aile de paramoteur à profil instable, trims tractionnés à fond

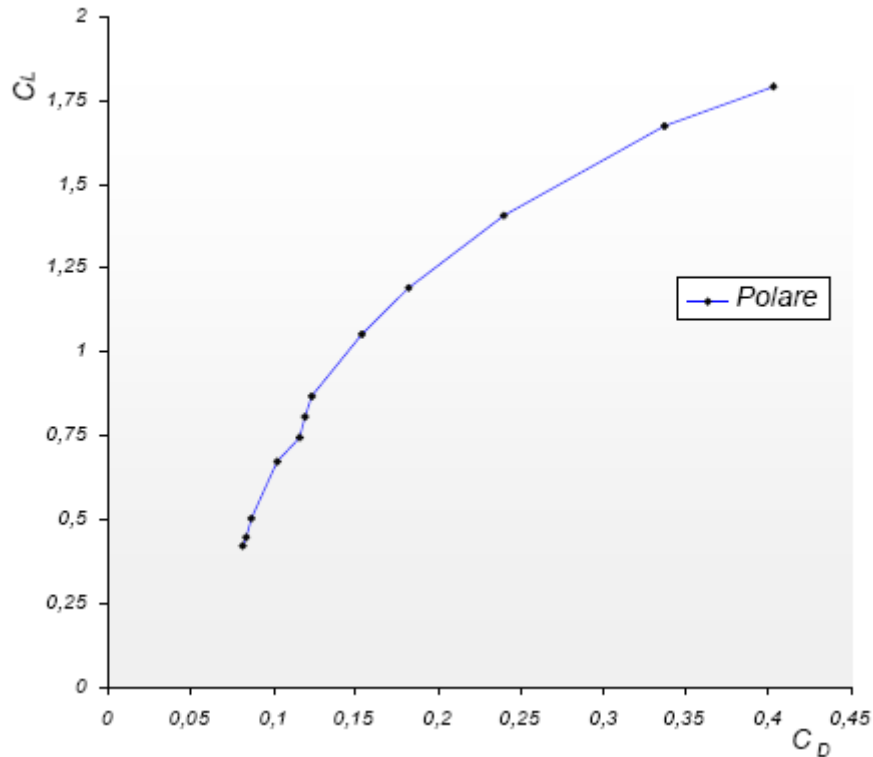


**Figure 2.3.5.a** - Polaire de l'aile de paramoteur à profil instable, trims tractionnés à fond



$V(km/h)$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$E/\sqrt{C_L}$
24,5	0,4026	1,7896	4,4444	5,9457	3,3222
25,4	0,3373	1,6731	4,9603	6,4162	3,8347
27,8	0,2393	1,4063	5,8760	6,9685	4,9548
30,3	0,1816	1,1917	6,5616	7,1630	6,0107
32,3	0,1535	1,0502	6,8376	7,0072	6,6721
35,6	0,1234	0,8643	7,0039	6,5115	7,5336
36,8	0,1193	0,8066	6,7592	6,0706	7,5259
38,4	0,1158	0,7414	6,3973	5,5085	7,4294
40,4	0,1025	0,6701	6,2359	5,3505	7,9840
46,6	0,0864	0,5021	5,8080	4,1157	8,1963
49,2	0,0832	0,4485	5,3888	3,6092	8,0460
50,8	0,0816	0,4200	5,1440	3,3337	7,9372

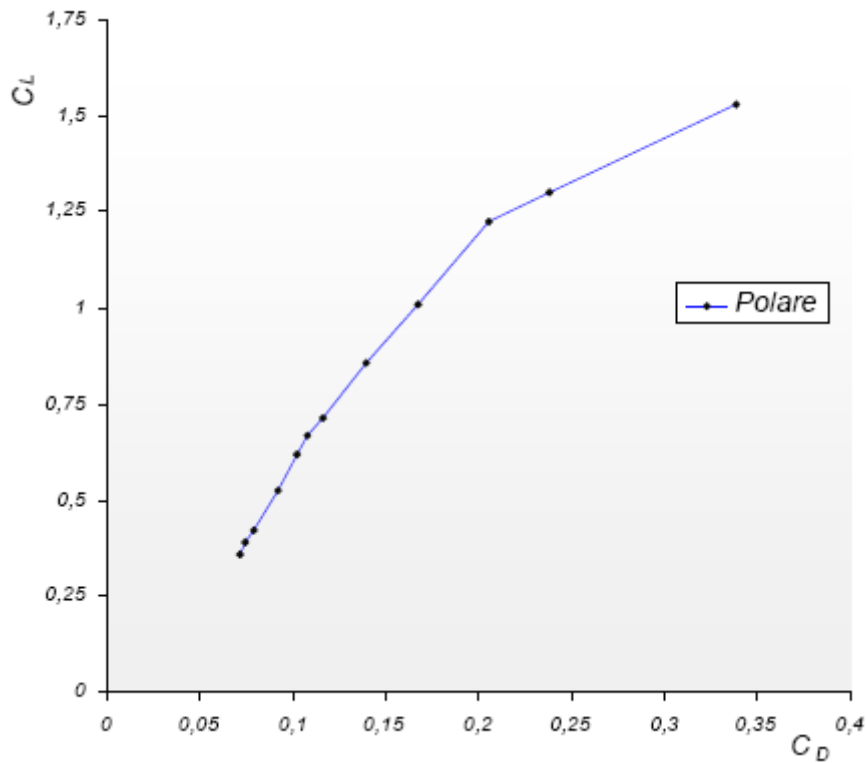
**Tableau 2.3.2.b** - Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ , et  $E/\sqrt{C_L}$ , en fonction de la vitesse de l'aile de paramoteur à profil instable, trims à mi-course



**Figure 2.3.5.b** - Polaire de l'aile de paramoteur à profil instable, trims à mi-course

$V(km/h)$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$E/\sqrt{C_L}$
26,6	0,3385	1,5283	4,5138	5,5802	3,6512
28,9	0,2382	1,3007	5,4597	6,2268	4,7872
29,8	0,2059	1,2232	5,9380	6,5674	5,3689
32,9	0,1676	1,0089	6,0185	6,0453	5,9918
35,7	0,1397	0,8564	6,1284	5,6715	6,6221
39,1	0,1160	0,7127	6,1428	5,1859	7,2763
40,4	0,1081	0,6673	6,1728	5,0428	7,5561
42	0,1025	0,6189	6,0354	4,7481	7,6717
45,6	0,0921	0,5236	5,6818	4,1117	7,8514
50,7	0,0789	0,4216	5,3418	3,4688	8,2261
52,8	0,0740	0,3891	5,2525	3,2768	8,4194
55	0,0714	0,3576	5,0092	2,9959	8,3755

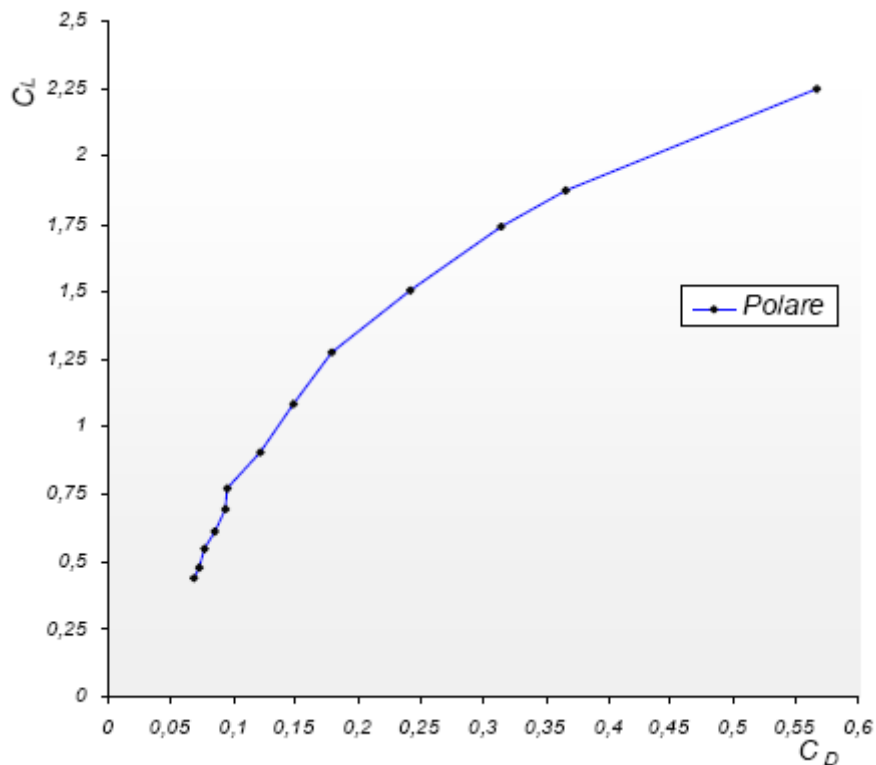
**Tableau 2.3.2.c** -Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ , et  $E/\sqrt{C_L}$  en fonction de la vitesse de l'aile de paramoteur à profil instable, trims relâchés



**Figure 2.3.5.c** - Polaire de l'aile de paramoteur à profil instable, trims relâchés

$V(km/h)$	$C_D$	$C_L$	$E$	$E \cdot \sqrt{C_L}$	$\frac{E}{\sqrt{C_L}}$
22,1	0,5660	2,2538	3,9814	5,9773	2,6520
24,4	0,3655	1,8746	5,1282	7,0214	3,7454
25,4	0,3135	1,7418	5,5555	7,3320	4,2094
27,3	0,2413	1,5082	6,25	7,6755	5,0892
29,8	0,1788	1,2743	7,1256	8,0440	6,3120
32,3	0,1476	1,0849	7,3461	7,6517	7,0528
35,3	0,1213	0,9077	7,4786	7,1253	7,8493
38,3	0,0952	0,7731	8,1196	7,1396	8,9341
40,4	0,0937	0,6946	7,4074	6,1737	9,1875
42,9	0,0858	0,6141	7,1548	5,6071	9,2298
45,4	0,0766	0,5477	7,1428	5,2864	9,6511
48,5	0,0719	0,4793	6,6666	4,6157	9,6787
50,6	0,0682	0,4408	6,4599	4,2891	9,7293
52,6	0,0634	0,4074	6,4197	4,0976	10,0578
54	0,0624	0,3914	6,2647	3,9197	10,0126

**Tableau 2.3.3** -Finesse,  $E \cdot \sqrt{C_L}$ , et  $E/\sqrt{C_L}$ , en fonction de la vitesse de l'aile de vol libre



**Figure 2.3.6** - Polaire de l'aile de vol libre

En analysant les odogrammes et les polaires trouvées expérimentalement, on observe que les vitesses de vol  $V$  vont de 22 km/h (vitesse minimum de sustentation de l'aile de vol libre) à 60 Km/h (vitesse maximale de l'aile de paramoteur à profil autostable) et que les  $V_Z$  varient de 1.15 m/s (configuration qui optimise  $E \cdot \sqrt{C_L}$  de l'aile de vol libre) à 3.5 m/s (configuration qui donne la vitesse maximale de l'aile de paramoteur à profil autostable).

On remarque, en outre, que : la finesse ( $E$ ) présente des valeurs qui vont de 3.98 à 8.12, correspondant, respectivement, à la vitesse minimum de sustentation et à celle de plus grande finesse de l'aile de vol libre;  $E \cdot \sqrt{C_L}$  varie de 2,58 (configuration qui maximise la vitesse de l'aile de paramoteur à profil autostable) à 8 (configuration qui optimise  $E \cdot \sqrt{C_L}$  de l'aile de vol libre); et  $E / \sqrt{C_L}$  varie de 2,65 à 10,05 correspondant, respectivement, à la plus petite et à plus grande vitesse de l'aile de vol libre.

## 2.4 Détermination expérimentale des caractéristiques de l'appareil propulsif

La détermination des caractéristiques de l'appareil propulsif consiste à trouver, par des épreuves au banc, la consommation spécifique et la poussée, en fonction du nombre de tours du moteur; et à trouver, en faisant des tests en vol, le rendement de l'appareil propulsif en fonction de la vitesse.

Une fois fixé le groupe motopropulseur au banc d'épreuve, la poignée de gaz permet d'obtenir le nombre de tours/minute désiré; on lit alors la valeur de la poussée indiquée par le dynamomètre, et on chronomètre le temps nécessaire pour consommer une quantité déterminée de mélange ; enfin, en faisant une simple règle de trois, on obtient la consommation horaire en fonction du nombre de tours/minute du moteur, en rapport avec une valeur de poussée.

La consommation spécifique est le rapport entre consommation et puissance au banc, en fonction d'un nombre de tours déterminé.

Pour déterminer le rendement de l'appareil propulsif, qui tient compte du rendement de l'hélice et des transmissions (engrenages et embrayage pour *Fly 100 Evo*, courroie pour le *Mini 2 Plus*), des tests en vol ont été faits à différents angles d'incidence, de celui du décrochage à celui de vitesse maximum. Pour chacun d'eux, le paramoteur a été mis en vol rectiligne uniforme horizontal; ont alors été relevés : le nombre de tours du moteur sur le compte-tours digital et la vitesse indiquée par le GPS, laquelle correspond à celle du vent relatif, puisque le vol a été effectué en conditions météorologiques caractérisées par l'absence de mouvements horizontaux et verticaux de l'air.

Vu que  $V_z = 0$ , la puissance disponible coïncide avec la puissance nécessaire, et donc on peut déduire le rendement propulsif ( $\eta_T$ ) de l'équation suivante:

$$W_m \cdot \eta_T = D \cdot V \quad (2.6)$$

$$\eta_T = \frac{D \cdot V}{W_m} \quad (2.7)$$

D'où la puissance  $W_m$  est issue du graphique qui présente la puissance du moteur en fonction du nombre de tours, et  $D$  est tiré des coefficients de traînée ( $C_D$ ) de l'aile correspondant aux diverses vitesses  $V$ , et aux diverses configurations.

En outre, connaissant les caractéristiques techniques de l'hélice en composite, issues du graphique de la figure 2.1.3, et ayant trouvé expérimentalement la puissance  $W_n$  aux diverses vitesses de vol, il est possible de trouver le rendement de l'hélice en fonction de la vitesse en tenant compte de la relation :

$$\eta_{elica} = \frac{T \cdot V}{C \cdot \omega} \quad (2.8)$$

Le *Fly 100 Evo* est livré d'origine avec un carburateur *Walbro*, qui a été remplacé par un *Dell'Orto PHBG 21*. Cette modification effectuée sur le moteur employé pour les tests, a réduit les consommations, et a rendu la carburation moins sensible aux variations atmosphériques.

Dans le tableau ci-dessous, sont rapportées les valeurs de consommation et de poussée aux différents régimes du *Fly 100 Evo*, auquel – comme nous l'avons indiqué précédemment – a été couplée une hélice en composite de diamètre 125 cm.

Régime moteur	Consommation (l/h)	Poussée (kg)
5000	1	15
6000	1,4	22
7000	2,8	31
7500	3,5	35
8000	3,9	41
8500	4,9	46
9500	5,8	54

**Tableau 2.4.1** - Consommation et poussée du *Fly 100 Evo*

Lorsqu'ont été effectuées les épreuves au banc pour trouver la consommation et la poussée en fonction du nombre de tours, nous avons les conditions suivantes :

pression : 977 hPa

altitude : 327 m

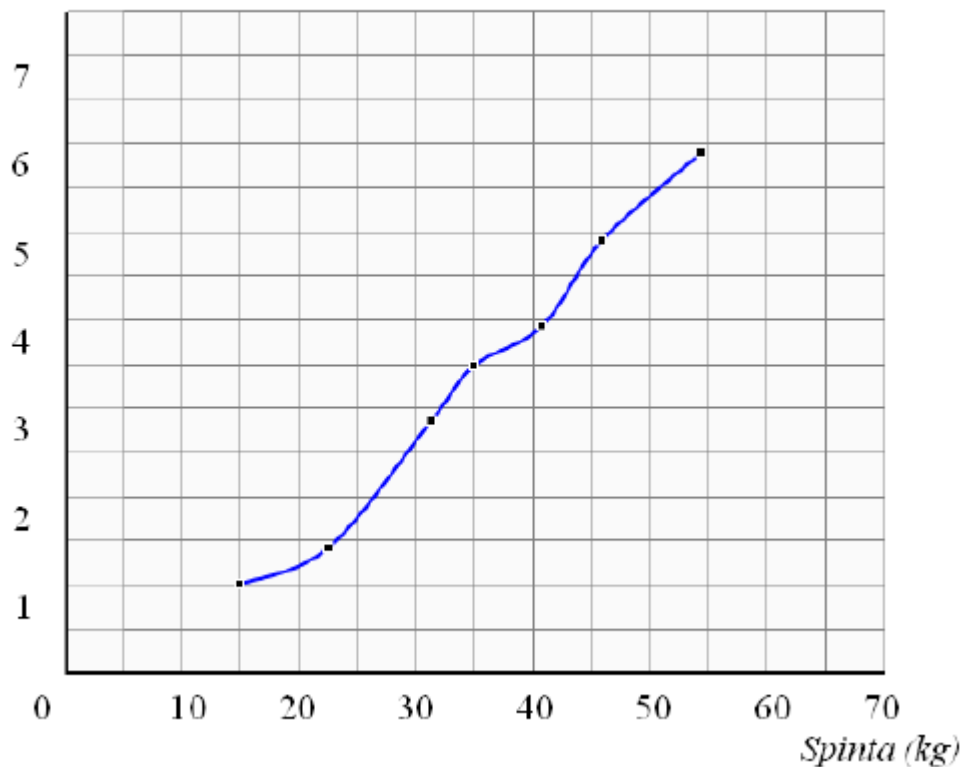
température : 27°C

humidité : 45 %

Il est possible de vérifier la précision de la lecture de la poussée sur le dynamomètre pendant l'épreuve au banc ; en effet, puisque nous connaissons le rapport de réduction qui est de 1/3,65, en connaissant les tours/minute du moteur, on peut déduire ceux de l'hélice et donc, vérifier si les valeurs de poussée fournies par le graphique de la figure 2.1.3, coïncident avec celles trouvées lors de l'épreuve à banco (tableau 2.4.1).

La figure 2.4.1 montre les consommations horaires en fonction de la poussée, exprimée en kg, du *Fly 100 Evo*.

*Consumo (l/h)*



**Figure 2.4.1** - Courbe des consommations du *Fly 100 Evo*

Le *Mini 2 Plus* a été fourni d'origine avec un carburateur *Walbro (wb 37)*, ce dernier a été remplacé par un carburateur *Dell'Orto PHBH 28*.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de consommation et de poussée aux différents régimes du *Mini 2 Plus* auquel – comme nous l'avons indiqué précédemment – a été couplée une hélice en bois de diamètre 130 cm.

Régime moteur	Consommation (l/h)	Poussée (kg)
4000	2,2	24
4500	3	30
5000	3,9	38
5500	4,8	48
6000	5,8	58
6500	7	67

**Tableau 2.4.2** - Consommation et poussée du *Mini 2 Plus*

Lorsqu'ont été effectuées les épreuves au banc pour trouver la consommation et la poussée en fonction du nombre de tours, nous avons les conditions suivantes :

pression : 977 hPa

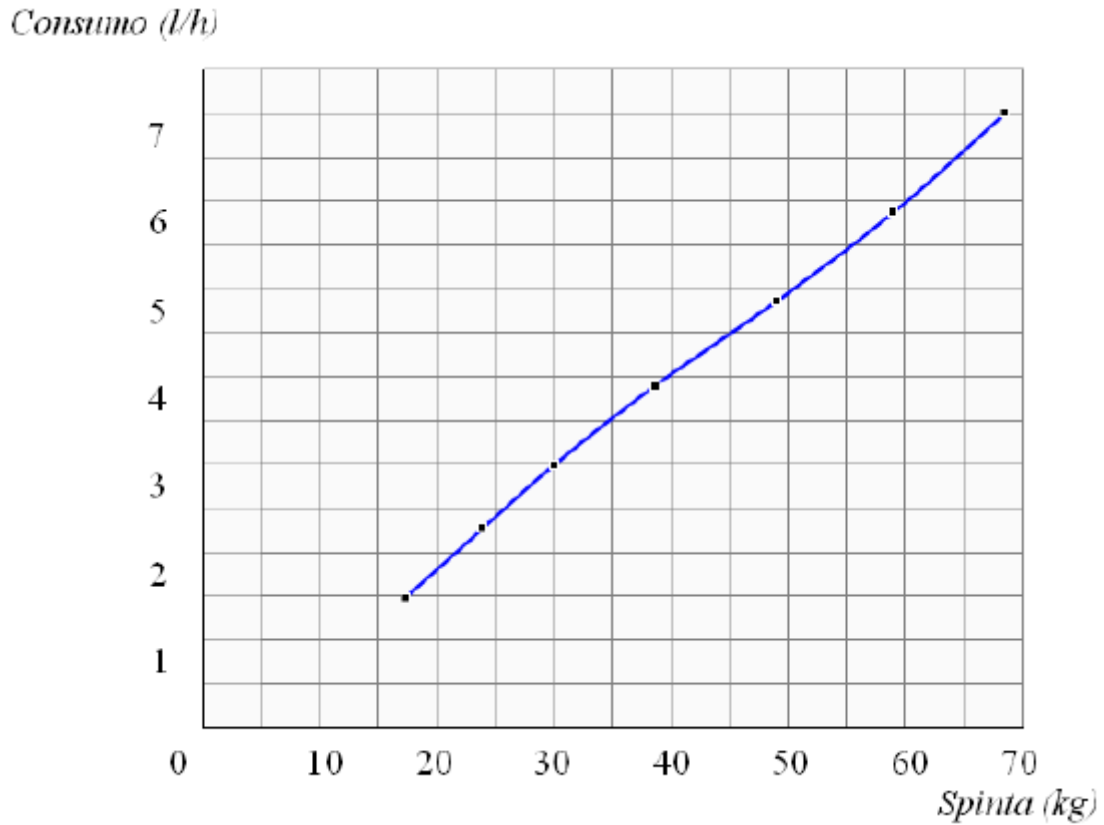
altitude : 327 m

température : 26°C

humidité : 48%

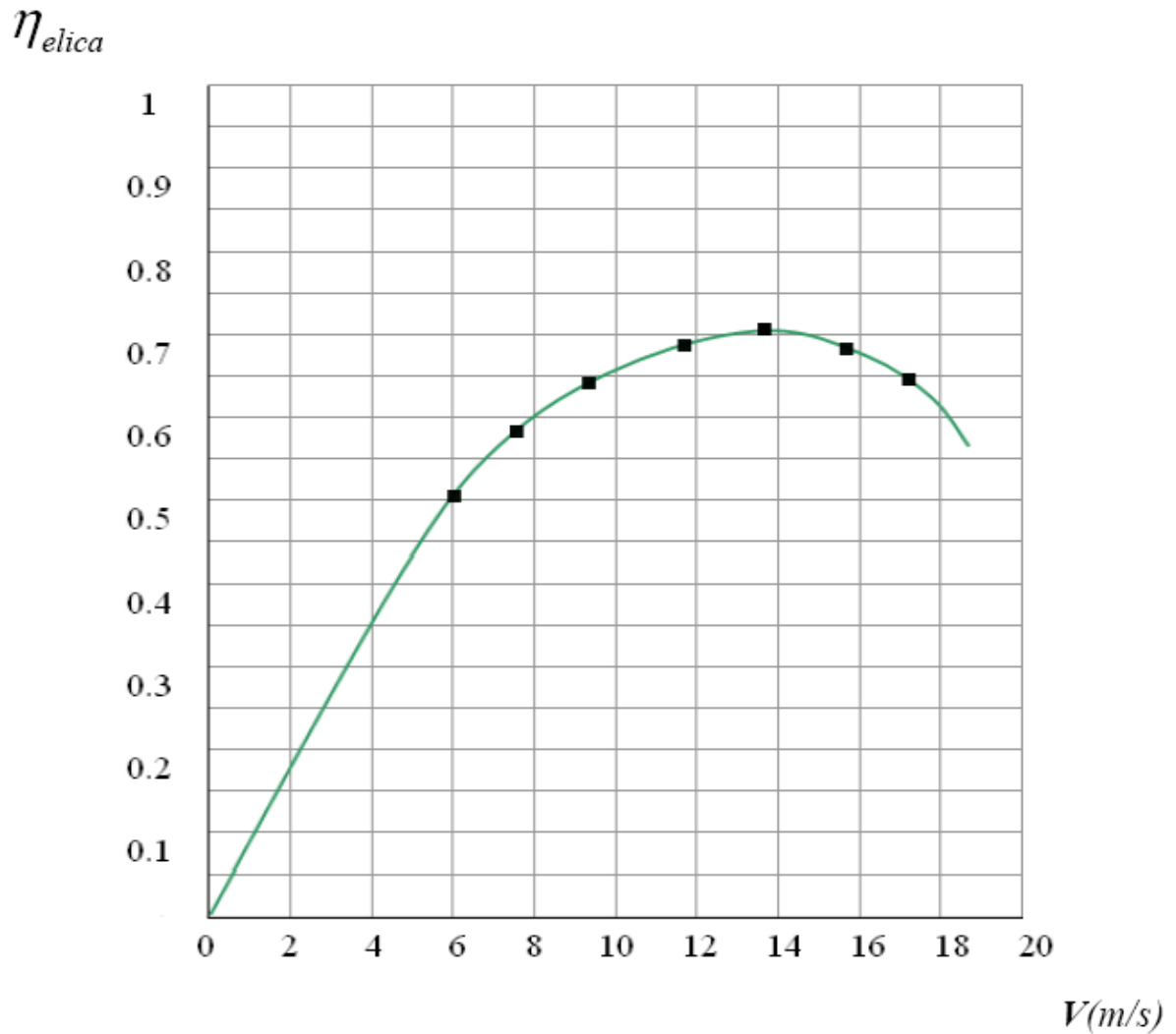


La figure 2.4.2 présente les consommations horaires en fonction de la poussée, exprimée en kg, du *Mini 2 Plus*.



**Figure 2.4.2** - Courbe de consommation du *Mini 2 Plus*

La figure 2.4.3 montre comment varie le rendement de l'hélice en composite de diamètre 125 cm, en fonction de la vitesse de vol.



**Figure 2.4.3** - Rendement de l'hélice en fonction de la vitesse

En examinant les données expérimentales obtenues lors des épreuves au banc, on observe que la poussée maximale du *Mini 2 Plus* est de 67 kg à 6500 tours/minute, alors que celle du *Fly 100 Evo* est de 54 kg à 9500 tours/minute.

En outre, en confrontant les graphiques des consommations en fonction de la poussée (figures 2.4.1, et 2.4.2), on remarque que pour des valeurs de poussée inférieures à 43 kg, la consommation du *Fly 100 Evo* est inférieure à celle du *Mini 2 Plus*; par contre pour des poussées supérieures à cette valeur, la consommation du *Mini 2 Plus* est plus basse de celle du *Fly 100 Evo*.

Enfin, en analysant le graphique de figure 2.4.3 on observe que le rendement de l'hélice a sa valeur maximale de 0.71, pour une vitesse de vol 13.7 m/s.

## Chapitre 3

### Les performances du paramoteur

#### Introduction

À partir des caractéristiques des ailes et de l'appareil propulsif, nous avons calculé les performances du paramoteur.

Nous avons donc trouvé  $V_{MS}$ ,  $V_{MAX\ of}$ ,  $V_{Z\ min}$  et  $V_{Z\ max}$ , et en particulier, en utilisant les formules de Breguet : l'autonomie horaire (endurance) et l'autonomie kilométrique (rayon d'action) des divers systèmes aile - appareil propulsif.

Ce qui nous permet de confronter les résultats obtenus, pour trouver quel est l'assemblage qui fournit les meilleures performances.

#### 3,1 Comparaison des performances des paramoteurs

La vitesse maximale de vol rectiligne horizontal ( $V_{max\ of}$ ) des paramoteurs est liée aux caractéristiques de l'aile, et ne dépend pas de l'appareil propulsif, car la puissance  $W_n$  correspondant à la plus grande vitesse possible pour l'aile, est inférieure à la plus grande valeur de puissance  $W_d$  qui peut être fourni du système propulsif.

La vitesse minimale de sustentation ( $V_{ms}$ ) et la vitesse maximale de vol rectiligne ( $V_{max\ of}$ ) ont été trouvées expérimentalement et correspondent, respectivement, aux valeurs inférieure et supérieure des vitesses rapportées dans les tableaux 2.3.1, 2.3.2, et 2.3.3.

Le plus fort taux de montée ( $V_{Z\ max}$ ) des diverses combinaisons aile - appareil propulsif peut être calculé ainsi :

$$V_z = \frac{W_d - W_n}{W} \quad (3.1)$$

Les valeurs du taux de descente le plus faible ( $V_{Z\ min}$ ), par contre, ont déjà été trouvées expérimentalement.

Dans le tableau suivant sont rapportées les valeurs absolues de  $V_{Z\ min}$  et  $V_{Z\ max}$  pour les différentes combinaisons aile - appareil propulsif.

<i>Appareil propulsif- aile</i>	<i>Configuration des trims</i>	<i>Vz min (m/s)</i>	<i>Vz max (m/s)</i>
Fly 100 Evo - aile de paramoteur à profil autostable	Trims tractionnés à fond	1,29	1,5
	Trims à mi-course	1,39	1,1
	Trims relâchés	1,41	0,9
Fly 100 Evo - aile de paramoteur à profil instable	Trims tractionnés à fond	1,19	1,7
	Trims à mi-course	1,27	1,5
	Trims relâchés	1,37	1,1
Fly 100 Evo - aile de vol libre		1,15	1,9
Mini 2 Plus - aile de paramoteur à profil autostable	Trims tractionnés à fond	1,29	2
	Trims à mi-course	1,39	1,7
	Trims relâchés	1,41	1,5
Mini 2 Plus - aile de paramoteur à profil instable	Trims tractionnés à fond	1,19	2,3
	Trims à mi-course	1,27	2
	Trims relâchés	1,37	1,7
Mini 2 Plus - aile de vol libre		1,15	2,5

**Tableau 3.1** -  $V_{Z\ min}$  et  $V_{Z\ max}$  des combinaisons aile - appareil propulsif

Pour trouver l'autonomie horaire du paramoteur on peut appliquer la formule de Breguet :

$$\int_{W_0}^{W_0-W_c} dt = - \int_{W_0}^{W_0-W_c} \frac{\eta_T \cdot E}{c} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c_L \cdot S}{2 \cdot W}} \cdot \frac{dW}{W} \quad (3.2)$$

qui, dans l'hypothèse que  $\frac{\eta_T}{c}$  reste constant, donne:

$$t = \frac{\eta_T}{c} \cdot E \sqrt{C_L} \cdot \sqrt{2\rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{W_0}{S}}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{W_c}{W_0}}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

où :

$c$  : consommation spécifique  $\left( \frac{kg}{kg \cdot m/s} \right)$

$W_0$  : poids de l'appareil au décollage

$W_c$ : poids du carburant

Pour déterminer l'autonomie horaire, on considère que la capacité du réservoir du paramoteur est de 10 litres, ce qui correspond à 7.2 kg de carburant.

En substituant les valeurs relatives aux caractéristiques des systèmes propulsifs et des ailes dans la formule de Breguet qui donne l'autonomie horaire, on obtient les résultats présentés par les tableaux 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, et 3.7.

Fly 100 Evo - aile de paramoteur à profil autostable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>
25,5	3h 31' 41"	27,6	3h 15' 35"	29,5	3h 16' 12"
27,4	3h 54' 35"	32,7	3h 51' 29"	32,4	3h 33' 20"
34,3	3h 47' 10"	38,4	3h 34' 37"	36,4	3h 22' 14"
37,3	3h 34' 31"	47,6	2h 51' 35"	42,5	3h 07' 26"
40,4	3h 22' 20"	50,7	2h 44' 16"	50,7	2h 45' 07"
45,4	3h 07' 33"	57,7	1h 52' 36"	53,7	2h 32' 46"
54,9	2h 01' 04"			60	1h 44' 40"

**Tableau 3.2** - Autonomie horaire du Fly 100 Evo avec l'aile à profil autostable

Fly 100 Evo - aile de paramoteur à profil instable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>
23,5	3h 16' 32"	24,5	3h 16' 03"	26,6	3h 13' 27"
28,5	4h 12' 36"	30,3	3h 54' 07"	29,8	3h 21' 46"
32,2	3h 59' 50"	32,3	3h 52' 08"	35,7	3h 16' 13"
38,2	3h 36' 16"	35,6	3h 33' 13"	40,4	3h 00' 47"
41,3	3h 16' 47"	40,4	3h 09' 03"	45,6	2h 45' 59"
45,4	2h 58' 52"	46,6	2h 46' 16"	52,8	2h 10' 05"
49,6	2h 39' 07"	50,8	2h 12' 52"	55	1h 59' 33"

**Tableau 3.3** - Autonomie horaire du Fly 100 Evo avec l'aile de paramoteur à profil instable

Fly 100 Evo – aile de vol libre	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>
22,1	3h 19' 34"
29,8	4h 29' 17"
32,3	4h 13' 22"
42,9	3h 16' 32"
48,5	2h 54' 53"
54	2h 44' 08"

**Tableau 3.4** - Autonomie horaire du Fly 100 Evo avec l'aile de vol libre

Mini 2 Plus - aile de paramoteur à profil autostable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>
25,5	3h 05' 47"	27,6	2h 57' 15"	29,5	2h 57' 28"
27,4	3h 19' 15"	32,7	3h 17' 27"	32,4	3h 07' 38"
34,3	3h 14' 36"	38,4	3h 00' 00"	36,4	3h 01' 52"
37,3	3h 08' 17"	47,6	2h 41' 13"	42,5	2h 54' 12"
40,4	3h 02' 19"	50,7	2h 30' 35"	50,7	2h 32' 25"
45,4	2h 54' 06"	57,7	1h 56' 46"	53,7	2h 21' 49"
54,9	2h 03' 33"			60	1h 48' 48"

**Tableau 3.5** - Autonomie horaire du Mini 2 Plus avec l'aile à profil autostable



Mini 2 Plus - aile de paramoteur à profil instable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>
23,5	2h 55' 22"	24,5	2h 55' 38"	26,6	2h 53' 59"
28,5	3h 26' 50"	30,3	3h 17' 19"	29,8	2h 59' 51"
32,2	3h 19' 57"	32,3	3h 16' 27"	35,7	2h 57' 29"
38,2	3h 07' 46"	35,6	3h 07' 55"	40,4	2h 48' 52"
41,3	2h 58' 00"	40,4	2h 53' 52"	45,6	2h 34' 46"
45,4	2h 49' 00"	46,6	2h 35' 02"	52,8	2h 06' 06"
49,6	2h 27' 25"	50,8	2h 06' 43"	55	2h 01' 45"

**Tableau 3.6** - Autonomie horaire du Mini 2 Plus avec l'aile de paramoteur à profil instable

Mini 2 Plus– aile de vol libre	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie horaire (t)</i>
22,1	2h 57' 30"
29,8	4h 00' 13"
32,3	3h 43' 59"
42,9	3h 14' 05"
48,5	3h 00' 30"
54	2h 40' 14"

**Tableau 3.7** - Autonomie horaire du Mini 2 Plus avec l'aile de vol libre

Pour trouver l'autonomie kilométrique du paramoteur on peut appliquer la formule :

$$\int_{W_0}^{W_0-W_c} ds = - \int_{W_0}^{W_0-W_c} \frac{\eta_T \cdot E}{c} \cdot \frac{dW}{W} \quad (3.4)$$

En considérant que les termes  $\eta_T$ ,  $E$ ,  $c$  sont variables, et en considérant qu'a été calculée l'autonomie horaire en fonction des vitesses de vol pour les diverses possibilités aile - appareil propulsif, plutôt que le calcul intégral (3.4) nous avons choisi de déterminer l'autonomie kilométrique comme produit des vitesses par les autonomies horaires liées aux différentes allures des différentes configurations de l'aile.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, et 3.13.

Fly 100 Evo - aile de paramoteur à profil autostable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)	<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)	<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)
25,5	89,9	27,6	90	29,5	96,4
27,4	107,1	32,7	126,1	32,4	115,2
34,3	129,8	38,4	137,3	36,4	122,6
37,3	133,3	47,6	136,1	42,5	132,7
40,4	136,2	50,7	138,8	50,7	139,5
45,4	141,5	57,7	108,2	53,7	136,7
54,9	110,7			60	104,6

**Tableau 3.8** - Autonomie kilométrique du Fly 100 Evo avec l'aile à profil autostable

Fly 100 Evo - aile de paramoteur à profil instable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V</i> <i>(km/h)</i>	<i>Autonomie</i> <i>kilométrique(km)</i>	<i>V</i> <i>(km/h)</i>	<i>Autonomie</i> <i>kilométrique(km)</i>	<i>V</i> <i>(km/h)</i>	<i>Autonomie</i> <i>kilométrique(km)</i>
23,5	76,9	24,5	80,1	26,6	85,7
28,5	119,9	30,3	118,2	29,8	100,2
32,2	128,7	32,3	99,6	35,7	116,7
38,2	137,6	35,6	126,5	40,4	121,7
41,3	135,4	40,4	127,2	45,6	126,1
45,4	135,3	46,6	129,1	52,8	114,4
49,6	131,5	50,8	112,4	55	109,5

**Tableau 3.9** - Autonomie kilométrique du Fly 100 Evo avec l'aile de paramoteur à profil instable

Fly 100 Evo – aile de vol libre	
<i>V</i> <i>(km/h)</i>	<i>Autonomie</i> <i>kilométrique (km)</i>
22,1	73,5
29,8	133,7
32,3	136,3
42,9	140,5
48,5	141,3
54	147,3

**Tableau 3.10** - Autonomie kilométrique du Fly 100 Evo avec l'aile de vol libre

Mini 2 Plus - aile de paramoteur à profil autostable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)	<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)	<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)
25,5	76,8	27,6	81,5	29,5	87,2
27,4	90,9	32,7	107,6	32,4	101,3
34,3	111,2	38,4	115,2	36,4	110,3
37,3	117,0	47,6	127,8	42,5	123,3
40,4	122,7	50,7	127,2	50,7	128,7
45,4	131,5	57,7	112,2	53,7	126,9
54,9	113,1			60	108,8

**Tableau 3.11** - Autonomie kilométrique du Mini 2 Plus avec l'aile à profil autostable

Mini 2 Plus - aile de paramoteur à profil instable					
Trims tractionnés à fond		Trims à mi-course		Trims relâchés	
<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)	<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)	<i>V</i> (km/h)	<i>Autonomie</i> kilométrique(km)
23,5	68,6	24,5	71,7	26,6	77,1
28,5	98,2	30,3	99,6	29,8	89,3
32,2	107,3	32,3	105,7	35,7	105,6
38,2	119,5	35,6	111,4	40,4	113,7
41,3	122,5	40,4	117,0	45,6	117,6
45,4	127,4	46,6	120,4	52,8	110,9
49,6	121,8	50,8	107,2	55	111,6

**Tableau 3.12** - Autonomie kilométrique des Mini 2 Plus avec l'aile de paramoteur à profil instable

Mini 2 Plus – aile de vol libre	
<i>V (km/h)</i>	<i>Autonomie kilométrique (km)</i>
22,1	65,3
29,8	119,3
32,3	120,5
42,9	138,7
48,5	145,2
54	143,1

**Tableau 3.13** - *Autonomie kilométrique du Mini 2 Plus avec l'aile de vol libre*

La vitesse minimale de sustentation ( $V_{ms}$ ) varie des 22 km/h de l'aile de vol libre aux 25 km/h de celle de paramoteur à profil autostable.

Les tableaux montrent que la vitesse maximale de vol rectiligne ( $V_{max\ of}$ ) présente des valeurs compris entre 54 et 60 km/h correspondant, respectivement, à l'aile de vol libre et à celle de paramoteur à profil autostable, indépendamment de l'appareil propulsif utilisé.

En ce qui concerne  $V_z$ , le taux de montée passe de 0.9 m/s avec le *Fly 100 Evo* utilisé avec l'aile de paramoteur à profil autostable dans la configuration de vitesse maximale...

... aux 2.5 m/s du *Mini 2 Plus* utilisé avec l'aile de vol libre dans la configuration qui maximise  $E \cdot \sqrt{C_L}$ .

Les taux de chute sont ceux trouvés expérimentalement en vol plané, et ont été déjà discutés dans le chapitre précédent.

En analysant les résultats du calcul expérimental des performances des divers paramoteurs, on observe que le *Mini 2 Plus* avec l'aile à profil autostable, et à vitesse maximale, présente l'autonomie horaire la plus faible (1h 48 ' 48 "). L'autonomie maximale étant obtenue avec le *Fly 100 Evo* et l'aile de vol libre, à l'allure qui  $E \cdot \sqrt{C_L}$  (4h 29 ' 17 ").

En combinant le *Mini 2 Plus* avec l'aile de vol libre, à l'allure correspondant à la vitesse minimale de sustentation, on obtient le minimum de l'autonomie kilométrique (65 km). La combinaison qui maximise la distance franchissable est *Fly 100 Evo* - aile de vol libre à l'allure de vitesse maximale.

Pour avoir un cadre d'ensemble des performances des paramoteurs concernés par cette étude, nous avons rapportés dans le tableau 3.14, les plus grandes valeurs obtenues pour les performances considérées.

Pour les paramoteurs constitués d'ailes qui ont la possibilité de faire varier la forme du profil par l'utilisation de trims, sont rapportées dans le tableau les meilleures performances réalisables.

Appareil propulsif - aile	$V_{ms}$ (km/h)	$V_{max\ of}$ (km/h)	$V_{Z\ min}$ (m/s)	$V_{Z\ max}$ (m/s)	Autonomie horaire maximale	Autonomie kilométrique maximale
Fly 100 Evo – aile de paramoteur à profil autostable	25	60	1,29	1,5	3h 54' 35"	141
Mini 2 Plus – aile de paramoteur à profil autostable	25	60	1,29	2	3h 19' 15"	131
Fly 100 Evo – aile de paramoteur à profil instable	23	55	1,19	1,7	4h 12' 36"	137
Mini 2 Plus – aile de paramoteur à profil instable	23	55	1,19	2,3	3h 26' 50"	127
Fly 100 Evo – aile de vol libre	22	54	1,15	1,9	4h 29' 17"	147
Mini 2 Plus – aile de vol libre	22	54	1,15	2,5	4h 00' 13"	145

**Tableau 3.14** – Performances des diverses combinaisons aile - appareil propulsif

---

## *Conclusions*

Comme nous l'avons déjà dit, un des principaux aspects qui différencient un paramoteur d'un autre est certainement celui des performances.

Notre étude a permis d'obtenir un cadre général complet des performances de trois ailes, dont : une prévue pour des vols de loisir, une autre prévue principalement pour les compétitions et enfin celle de vol libre, et de deux appareils propulsifs: le Fly 100 Evo utilisé aussi bien pour les vols de loisir que pour les compétitions et le Mini 2 Plus employé pour les vols de loisir.

De la comparaison des performances des diverses combinaisons aile - appareil propulsif, on arrive aux conclusions suivantes: le paramoteur constitué de l'aile de vol libre et du Fly 100 Evo présente les consommations les plus basses, aussi bien en ce qui concerne le temps de vol que la distance franchissable; d'autre part, si on applique à l'aile de vol libre le Mini 2 Plus, nous obtenons le plus fort taux de montée; alors qu'avec l'aile de paramoteur à profil autostable on a la plus grande vitesse d'avancement, et si à cette aile, à l'allure de plus grande vitesse, nous appliquons le Mini 2 Plus plutôt que le Fly 100 Evo, nous optimisons les performances, aussi bien pour l'autonomie horaire, que pour la distance franchissable.



## *Bibliographie*

1. A. Lausetti - F. Filippi – *Elementi di meccanica del volo* – Levrotto & Bella – Torino – 1984
2. C. Casarosa – *Meccanica del volo* – Edizioni Plus – Pisa University Press
3. D. Porta - F. Baccara – *Il Parapendio* – De Vecchi Editore – Milano – 1997
4. A. De Rosa – *Manuale di volo libero*
5. Paramania Powergliders – [www.flyparamania.com](http://www.flyparamania.com)
6. I profili autostabili – [www.paramotore.org](http://www.paramotore.org)
7. Vittorazi Motors – [www.vittorazi.it](http://www.vittorazi.it)
8. Simonini – [www.simonini-flying.c](http://www.simonini-flying.c)

---

# *Table des matières*

Introduction .....	II
1 Le paramoteur	
Introduction .....	1
1.1 L'aile .....	3
1.1.1 La stabilité .....	8
1.1.2 Les matériels .....	12
1.2 L'appareil propulsif .....	13
1.3 Le pilotage du paramoteur.....	16
2 Étude expérimentale des performances du paramoteur	
Introduction .....	17
2.1 Caractéristiques techniques des ailes et de l'appareil propulsif.....	19
2.2 Description du banc d'épreuve .....	27
2.3 Détermination expérimentale de l'odogramme et des polaires des ailes.....	28
2.4 Détermination expérimentale des caractéristiques de l'appareil propulsif.....	42
3- Les performances du paramoteur	
Introduction .....	49
3.1 Comparaison des performances des paramoteurs .....	49
Conclusions .....	61
Bibliographie .....	62