Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 111 (1985)
Heft: 18

Artikel: Le vol à propulsion musculaire
Autor: Bovey, Pacal / Petriccioli, François
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75652

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Le vol à propulsion musculaire

par Pascal Bovey, Lausanne, et François Petriccioli, Monthey

Toutes les civilisations ont nourri le rêve du vol humain ; c'est l'une des réussites les plus fantastiques de la nôtre que de l'avoir réalisé et donné à la vie quotidienne. Aussi étonnant que cela paraisse, cette banalisation du vol n'a pas tué le rêve. Mieux : les progrès de la technique l'ont rendu accessible à chacun, sous les formes les plus directes telles que le planeur de pente ou avion ultra-léger. La mise en œuvre des technologies les plus modernes a même rendu possible le vol à propulsion musculaire — le vol humain à l'état pur.
L'article qui suit retrace l'histoire millénaire de ce rêve pour arriver à cette constatation inattendue : le vol à propulsion musculaire se situe à la pointe de la technologie actuelle. C'est l'une des raisons pour lesquelles il a séduit des étudiants en génie civil, gagnés à leur tour par cette passion venue des âges.
Jean-Pierre Weibel

1. Préambule

Cette étude a été faite à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, dans le cadre du dernier semestre du département de génie civil. C'était l'un des sujets proposés dans le cadre des travaux «Homme-Technique-Environnement».
Les auteurs ont défini leur travail sur trois axes principaux:

- résumer l'historique du vol à propulsion musculaire, de l'Antiquité à nos jours;
- tenter de dégager les principes qui permettent d'assurer un vol musculaire efficace;
- démontrer les qualités des matériaux en fibres synthétiques, par quelques expériences simples, et analyser quelles pourraient être les applications optimales de ces matériaux pour le vol musculaire.

Il a été remarqué tout au long du travail que le vol à propulsion musculaire se caractérisait par son aspect sportif. Mais si c'est certes l'un des aspects importants, ce n'est pas le seul qu'il convient de relever.
La technique de construction des avions, qui n'est actuellement qu'une évolution des techniques de fabrication mises au point au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, aurait beaucoup à tirer de nouvelles techniques de construction, alliant légèreté et solidité.
Le développement du calcul des structures par ordinateur devra permettre de mettre en évidence les corrélations entre essais et calculs, et permettre d'économiser du temps et des vies humaines, dans la mise au point des prototypes.
Il apparaît donc qu'un tel travail n'est pas seulement une étude systématique des douces folies de quelques prédécesseurs mais consiste au contraire à mettre en évidence le fait que l'évolution des techniques permettra peut-être aux transports aériens de prendre un nouveau virage.

2. Aperçu historique de la Préhistoire à nos jours

Dès les premières légendes, l'air a été considéré comme l'un des quatre éléments fondamentaux de la vie, avec la terre, l'eau et le feu. Il tenait donc une place importante dans l'esprit de nos ancêtres. Cette situation est bien mise en évidence par le nombre très important de contes et légendes soulignant le caractère inaccessible de la troisième dimension. Dans notre culture occidentale, le plus célèbre mythe en ce domaine est celui des deux Grecs Dédale et Icare, qui s'évadèrent, à l'aide d'ailes confectionnées de plumes et de cire, du labyrinthe créé par Dédale pour le roi de Crète.
Beaucoup d'autres histoires semblables se sont perpétuées jusqu'à nos jours. Il faudra attendre jusqu'au début du XIXe siècle pour que les gens commencent à se rendre compte que ces légendes n'étaient qu'un agrégat de faits très peu vraisemblables.
La première civilisation a avoir apporté plus que des légendes à la conquête de l'air a été celle des Chinois, qui, dès la plus haute Antiquité, ont su utiliser la force du vent en réalisant des cerfs-volants, fabriqués tout d'abord dans un but récréatif, puis militaires. Les stratèges de l'empereur firent réaliser des cerfs-volants suffisamment grands pour soulever un homme, qui pouvait ainsi observer les mouvements de l'ennemi lors des batailles. Ces cerfs-volants étaient fabriqués en soie et en bambou, ce qui leur assurait solidité et légèreté. De vieux textes scientifiques racontent que plusieurs savants avaient entrepris des recherches et des essais dans le domaine des ailes battantes, mais nous manquons de renseignements pour conclure quant à l'éventuel succès de ces travaux.
Une seule personne a apporté les bases de la physique des vols à la culture scientifique du monde de la Renaissance. C'est l'Italien Léonard de Vinci. Il nous a laissé de nombreux écrits, qui témoignent d'une évolution sérieuse dans ce domaine. Dans les notes de ce savant génial, on a retrouvé les bases du parachute, de l'aile fixe, de l'aile battante et de la voilure tournante. La précision de certaines analyses peut laisser penser qu'il s'est livré au moins à des essais sur des modèles réduits.
Depuis Léonard de Vinci, les progrès se sont poursuivis très lentement, alternant le meilleur et le pire, avec des essais souvent tragiques, qui allaient de la jambe cassée à la mort de l'inventeur le plus malheureux.
On considère généralement la première ascension des frères Montgolfier comme la date qui marque le début de la conquête de l'air, mais il faut savoir que ce n'est pas la science de l'époque qui était la seule responsable de ce succès, mais c'est plutôt un amalgame de connaissances empiriques et un immense enthousiasme populaire qui assurèrent le succès de ces vols. Ainsi, pour ce premier vol, ce sont des observations sur le fait que la fumée montait au ciel, que la fumée était plus fournie et «montait» mieux si le combustible était légèrement humide, et c'est ainsi qu'ils envisagèrent d'enfermer dans une enveloppe les fumées produites par la combustion de foin humide.
Si cette première ascension fut un succès, on vit très rapidement se succéder les vols réussis, mais il faut relever que les découvertes qui allaient permettre d'expliquer correctement la physique de ces vols avaient déjà été faites:

- 1607: mise en évidence de la force ascensionnelle du vide par le père jésuite Francesco Lana (ce sous-produit du principe d'Archimède sera «redécouvert» par des physiciens français);
- 1766: découverte de l'hydrogène par le chimiste anglais Henry Cavendish; on appelait alors l'hydrogène «air inflammable»;
- 1782: premiers plans de ballons établis par les frères Montgolfier;

— 1783 : 4 juin, premier vol public d'un ballon à air chaud par les frères Montgolfier.

27 août, premier vol d'un ballon gonflé à l'hydrogène, réalisé par J. Charles et les frères Robert.

Octobre, premiers essais de vols avec un pilote, le marquis Pilâtre de Rozier.

21 novembre, premier vol libre avec un ballon gonflé à l'hydrogène et deux personnes à bord.

Les vols se succédèrent depuis lors rapidement, surtout en France. C'est dans ce pays que l'on a pu assister aux premières exhibitions aérostatiques, mais parfois le côté grotesque ou loufoque prenait le pas sur l'aspect sportif ou technique.

Les premiers aéronautes ressentirent tout de suite que ce n'était guère raisonnable de laisser leur ballon être le jouet du vent. Pour cette raison, ils proposèrent et essayèrent toutes sortes de moyens pour résoudre ce problème. Parmi les plus originaux, on a eu un remorquage par oiseaux, un assemblage de voiles, des rames, des ailes battantes. Mais il faudra attendre 1852, quand le Français Giffard parvint à installer une machine à vapeur pesant 159 kg et développant 3 ch, pour qu'on puisse considérer le problème comme résolu.

Si c'est l'énergie mécanique d'une machine à vapeur qui permit de vaincre la force du vent, l'énergie musculaire avait montré à cette occasion qu'elle aurait pu servir à s'élever au-dessus du sol. C'est un horloger suisse, Degen, établi à Vienne, qui en fit la démonstration.

La presse viennoise relata en 1809 que Degen parvint à voler avec un « engin » de son invention. Cet appareil était un ornithoptère que Degen accrochait sous un ballon gonflé à l'hydrogène (fig. 1). Le ballon avait pour rôle d'alléger des 75% aux 80% le poids du pilote et celui-ci pouvait ainsi s'élever et se mouvoir dans la direction de son choix à l'aide de ses ailes battantes.

Il apparaît, d'après la presse de l'époque, que Degen a réussi plusieurs vols à Vienne, mais quand il fit une tentative à Paris, ce fut un échec. Il répéta son essai un peu plus tard et ne « parvint qu'à parcourir à ras du sol » une distance de l'ordre de 300 à 500 mètres. Bien que Degen ait réussi son vol à l'aide de l'énergie musculaire, la foule, déçue par la présentation, manqua de lyncher le malheureux pilote. L'horloger suisse imputa son insuccès au fait que son ballon avait été gonflé avec de l'hydrogène mal fabriqué. Ce dernier contenait de la vapeur d'eau en suspension qui diminuait d'autant la force ascensionnelle de l'aérostat, d'où le vol peu réussi.

A la même époque, on commence à s'intéresser au vol des « plus lourds que l'air ». Les premiers essais consistèrent en des sauts effectués à partir de ballons avec les ancêtres des parachutes, puis en modifiant la forme ou la matière du parachute, on tentait de rester le plus longtemps possible en l'air, voire même de s'y déplacer. Très vite, on se rendit compte que l'adjonction d'ailes améliorait très nettement les performances.

Dès ce moment, la recherche sur le moyen de faire voler les plus lourds que l'air a suivi ce qu'on peut appeler plusieurs « filières ». On peut les classer de la manière suivante, qui est basée sur le type d'ailes (schéma 1).

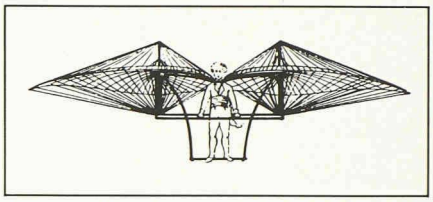


Fig. 1. — L'ornithoptère de Degen qui s'accrochait sous un ballon. A remarquer le haubannage compliqué des ailes.

Filière ornithoptère

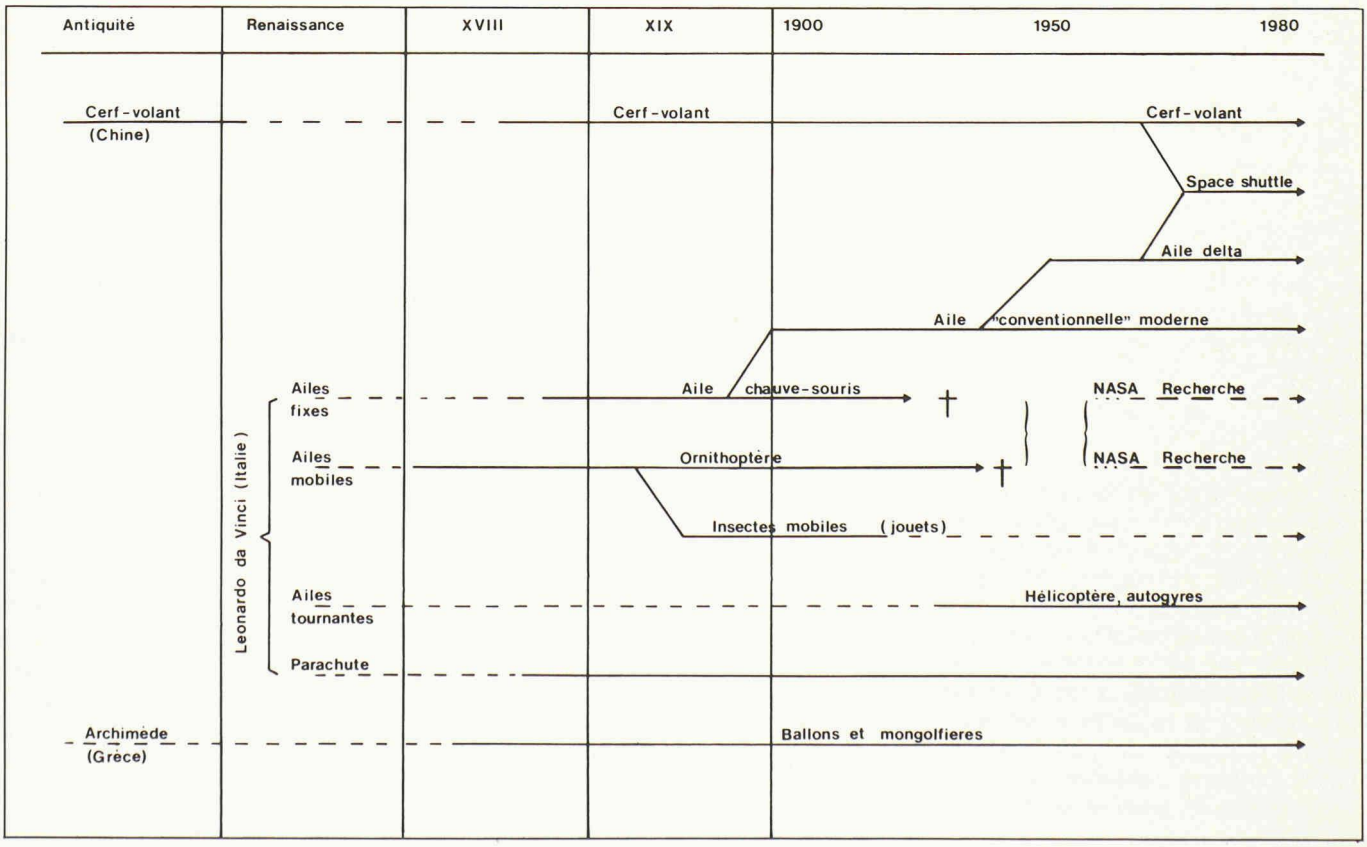
C'est la filière qui eut le plus grand succès au XIXe siècle, car il apparaissait intéressant aux inventeurs de combiner dans l'aile l'aspect sustentateur et le côté propulsif. On a donc une paire d'ailes articulées autour d'un axe, que le pilote fera mouvoir de haut en bas. L'idée, dans son principe, est extrêmement séduisante, car on cherche à imiter le vol des oiseaux. Malheureusement, il est très vite apparu que la très grande complexité du vol des oiseaux ne pouvait pas être copiée de manière satisfaisante par l'homme.

Filière aile fixe

Les ailes ne sont utilisées que pour servir de moyen de sustentation, la propulsion étant assurée par un autre dispositif (hélice, aile tournante, etc.). On peut classer ces ailes en deux familles :

— ailes « chauves-souris » : c'est l'aile qui est directement inspirée par la nature ; on cherche à imiter la struc-

SCHÉMA 1. — *Evolution des moyens de sustentation.*



ture de l'aile de la chauve-souris ou de l'oiseau. Une telle aile est délicate à réaliser et peu favorable du point de vue statique, car elle est insuffisamment rigide;

— ailes «modernes»: c'est la simplification de l'aile précédente; on a cherché à avoir une structure plus simple à assembler en retenant une structure en caisson, qui donnait une certaine standardisation et surtout une meilleure rigidité à l'aile, car la structure était ainsi hautement hyperstatique. C'est de ce type d'aile que découlent tous les types d'ailes utilisés couramment aujourd'hui.

Filière aile tournante

On fait tourner autour d'un axe vertical une voilure placée horizontalement. Cette filière qui réunit aussi le moyen de sustentation et le moyen propulsif n'a pas eu de développement très important, car le système d'entraînement de la voilure grève le poids total de l'engin.

On peut encore distinguer quelques autres filières, qui sont toujours en voie de développement, et qui n'ont pas encore eu de grande suite pour l'aviation d'aujourd'hui.

Filière cerf-volant

C'est la recherche de l'utilisation des couches d'air pour la sustentation. La combinaison de cette technologie avec celle de l'aile delta permet au «Spaceshuttle» de revenir de l'espace en un long vol plané.

Filière «insecte mobile»

Il s'agit d'une émanation de la filière ornithoptère; on cherche à imiter le vol des insectes au moyen de modèles artificiels, mais comme il s'agit de très modestes réalisations, on parvient à les faire voler sans trop de peine, car elles sont très légères. La source d'énergie n'est pas un homme, mais un élastique, un ressort, etc. Cette filière a fourni divers modèles de jouets d'enfants. Aujourd'hui, cette filière connaît un renouveau sous l'impulsion de la recherche militaire; ainsi la NASA étudie le vol de la libellule (passage du vol horizontal au vol stationnaire), et celui du hibou (le vol animal le plus silencieux). Les nouveaux moyens technologiques à disposition permettent d'espérer des résultats intéressants.

Dès la fin du XIXe siècle, on commença à enregistrer des expérimentations sérieuses dans le domaine des ailes fixes et mobiles. Par exemple, les frères Lilienthal expérimentèrent plusieurs types d'ailes sur des dizaines de vols planés (fig. 2); ils préparaient une aile à extrémité mobile, capable de s'élever par ses propres moyens, lorsque Otto Lilienthal s'est tué dans la chute de l'un de ses planeurs.

Les véritables débuts du vol à propulsion musculaire se situent au début du XXe siècle. Le principal moteur qui animait cette volonté de s'élever à la force des seuls muscles était l'intérêt sportif, soutenu par de nombreux prix offerts par de généreux mécènes et récompensant les progrès successifs.

Le premier de ces prix fut le Prix Peugeot. Il devait récompenser par une importante somme d'argent l'homme qui parviendrait le premier à parcourir au moins 10 mètres, dans les deux sens, avec un avion à propulsion musculaire. C'est le Français Poulain qui remporta le prix en 1912, avec son « aviette», en faisant un vol de 11 m 98, à la hauteur maximale de 1 m 50.

L'aviette, dont on verra de nombreux exemplaires à cette époque, est un vélo classique, auquel on a ajouté des ailes et une hélice. Il a en lui tous les éléments des futurs avions à énergie musculaire, mais aussi tous les problèmes: carénage, envergure, vol de longue durée, poids, rendement du pilote.

La Première Guerre mondiale marqua la fin de l'épopée des aviettes, et ce n'est qu'après le Traité de Versailles que se manifesta à nouveau de l'intérêt pour le vol musculaire. C'est essentiellement en Allemagne que l'on aura les développements les plus intéressants, car ce pays n'avait plus le droit de posséder une aviation de guerre. Cela eut comme conséquence un fantastique éveil de l'aviation sportive. Très vite, les planeurs se multiplièrent, ce qui assurait au gouvernement une formation de base bon marché et lui permettait de disposer de jeunes gens connaissant les bases du pilotage.

Dès cette époque, on commence à faire des progrès significatifs dans les domaines du vol à voile et du vol musculaire, car ce ne sont plus des amateurs qui se penchent sur le problème, mais des ingénieurs s'appuyant sur de solides connaissances.

En Allemagne, l'ingénieur König s'attelle dès 1919 à la question; il apportera des bases fiables pour l'avenir. Mais il ne pourra continuer ses recherches, ayant perdu toute sa fortune dans la crise monétaire qui ravagea l'économie du pays. Mais il a laissé à ses successeurs de très bons travaux sur la manière de construire en alliant la légèreté à la solidité maximale.

Fig. 2. — Otto Lilienthal en vol.

D'autres chercheurs poursuivirent leurs études, les premiers résultats significatifs ayant lieu dans le cadre du Prix du Polytechnicum de Frankfurt a.M., qui devait récompenser le premier vol musculaire sur une distance de 500 mètres. Ce prix ne fut pas gagné, mais le prototype réalisé par Haessler-Villinger parvint à voler sur la moitié de la distance et empocha la moitié du prix, vivement félicité par le maréchal Goering.

Dès cette époque, on commença à systématiser les études sur tous les aspects du vol à propulsion musculaire. On se penchera sur les problèmes suivants pour apporter des réponses très intéressantes:

— amélioration des matériaux, pour alléger et renforcer les structures;
— détermination du rendement ergonométrique du pilote;
— amélioration de la géométrie des prototypes, par essais et calculs;
— expérimentations d'autres moyens propulsifs (ailes tournantes, etc.).

Nous citerons quelques-unes des réalisations les plus intéressantes de l'entre-deux-guerres.

Projet Haessler-Villinger (Allemagne, 1933)

Il s'agit d'une structure de planeur que l'on a repensé en vue d'un gain de poids maximal. On l'a équipé d'une hélice propulsive. Il décolle seul ou à l'aide d'une catapulte. Il est assez rapidement apparu que son hélice était sous-dimensionnée, ce qui explique ses performances assez modestes. Son aérodynamisme était par contre très bien étudié et la traînée aussi réduite que possible. Il aurait dû avoir une descendance, le «h.4», qui ne fut jamais mené à terme.

Projet Bossi-Bonomi (Italie, 1936)

C'est un projet très semblable au précédent, il s'agit d'un planeur que l'on a allégé au maximum et que l'on a équipé de deux hélices tractives. Le prototype était trop lourd, car il devait satisfaire à la réglementation du vol à voile en vigueur en Italie. Malgré ce handicap, l'avion a fait des vols assez semblables à ceux du Haessler-Villinger, car ses deux hélices tractives intégrées au profil de l'aile lui assuraient un rendement supérieur (fig. 3).

Projet Seehase (Allemagne, 1936)

Il s'agit d'une conception différente, qui s'inspire des planeurs «glisseurs». On n'a pas de fuselage, en vue d'un allégement maximal. Le poste de pilotage est accroché sous l'aile. On arrivera ainsi à avoir la charge alaire aussi faible que possible. Le prototype n'a pas donné satisfaction, mais les essais prometteurs des

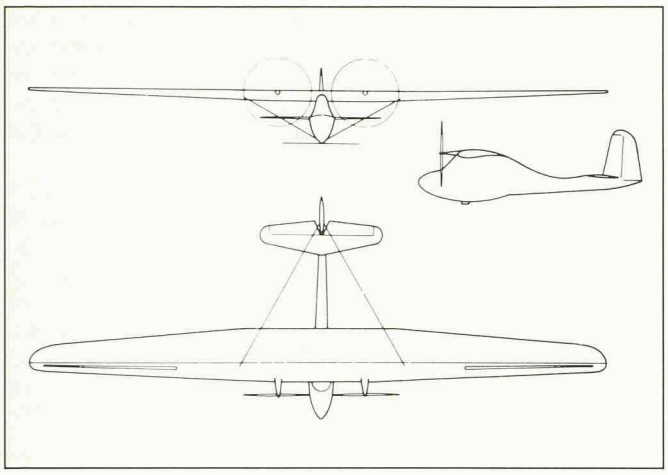


Fig. 3. — Trois vues du «Pedaliante» de Bossi-Bonomi.

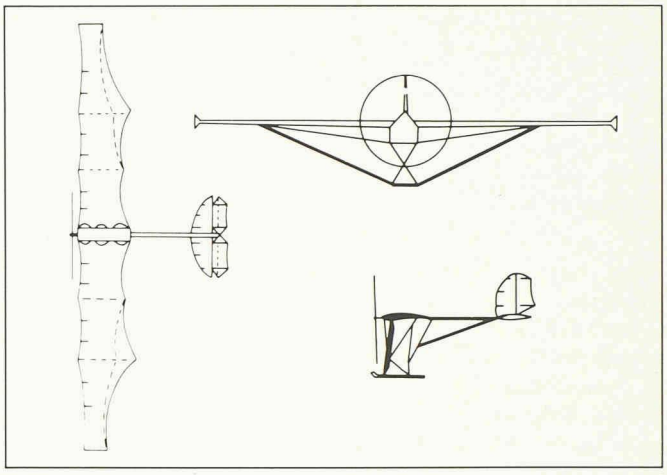


Fig. 4. — Prototype Seehase. On remarque la conception «arachnéenne» du fuselage.

divers composants mirent en évidence l'intérêt de la filière (fig. 4).

La Seconde Guerre mondiale allait à nouveau interrompre les travaux visant à améliorer les performances des avions «à pédales» — c'est ainsi que le grand public se mit à les nommer, en référence à leur moyen de transmission de l'énergie musculaire.

Le Prix Kremer, était destiné à récompenser le premier avion à propulsion musculaire qui parviendrait à effectuer un parcours en huit autour de deux piquets. Ce projet a séduit beaucoup de monde, attirant la participation de nombreuses équipes de chercheurs. On remarquera qu'après la guerre, les projets réussis ne sont l'œuvre que d'importantes équipes pluridisciplinaires, soutenues par de gros mécènes ou des universités.

Beaucoup de vols seront réussis ; on peut classer les avions protagonistes de ces vols en trois catégories principales :

Filière anglaise

C'est la continuation directe des projets de Haessler-Villinger et Bossi-Bonomi ; elle a connu l'essentiel de ses développements en Grande-Bretagne. Il s'agit dans tous les cas d'avions qui ont l'allure de planeurs, construits en balsa et en métal léger. On est donc resté très traditionnel (fig. 5 et 6).

La différence essentielle avec les projets de l'entre-deux-guerres se situe au niveau de la recherche précédant la réalisation du prototype. Pour le premier vol réalisé sur sol anglais, effectué par l'avion de la Southampton University, on avait préalablement calculé la taille de l'avion en fonction du rendement du pilote, testé l'aile en tunnel, et mis en évidence l'importance du nombre de Reynolds pour les vols à faible vitesse. On a ainsi pu déterminer quelles seraient les conditions optimales pour le vol.

Tous ces avions ont volé avec succès, mais aucun d'entre eux n'a réussi à remporter le Prix Kremer. On peut l'imputer au poids relativement élevé, conséquence de la construction de ces prototypes en matériaux traditionnels. De plus, les systèmes de transmission de l'effort musculaire étaient relativement lourds, afin d'assurer une rigidité favorable à l'ensemble. On aura aussi quelques «monstruosités», tel le «Toucan», avion à pédales avec deux pilotes en tandem ; on devait avoir ainsi le double d'énergie à disposition, mais pour avoir une charge alaire acceptable, on a dû adopter une envergure équivalant à celle d'un jet commercial d'une capacité de 180 places, ce qui rendait cet avion impossible à diriger.

Filière japonaise

Cette filière fait une recherche de compromis avec tout ce qu'il y a de favorable dans chaque prototype. On arrive ainsi à avoir des avions à structure très bizarre, mais volant bien. Cette recherche, qui vise à faire la synthèse des travaux menés à bien, utilise également tous les matériaux nouveaux, essentiellement les dérivés du plastique. Les avions ainsi calculés ont un très faible coefficient de traînée leur permettant de voler avec un minimum d'énergie (fig. 7).

Filière américaine

Cette filière a repris les principes développés par l'ingénieur Seehase. Les Universités américaines se sont attachées les premières à améliorer ces principes. Elles ont utilisé des matériaux modernes, ce qui leur a permis d'arriver à une charge alaire minimale, plus proche de celle des insectes artificiels que des planeurs. Plusieurs Universités américaines ont mené à chef des projets très intéressants, qui ont volé avec succès, mais c'est l'équipe du *Gossamer* qui parvint à remporter le Prix Kremer, avec ses Condor, Albatros et Penguin (fig. 8).

Le Condor et l'Albatros sont des filiations directes des réflexions de l'ingénieur Seehase. La différence entre les deux avions se situe dans les matériaux utilisés. Le Condor, l'avion le plus ancien et qui a remporté le Prix Kremer, est réalisé en matériaux traditionnels ; ainsi la structure primaire est en bois et en métal léger. L'Albatros, qui a traversé la Manche, est presque intégralement réalisé en matériaux modernes, par exemple la fibre de carbone, le Kevlar, etc.

Le Pelargos est un avion actuellement en cours de développement en Suisse. Il suit la même filière d'inspiration que le Condor et l'Albatros. Les différences essentielles se situent dans la propulsion et la configuration en canard des Américains,

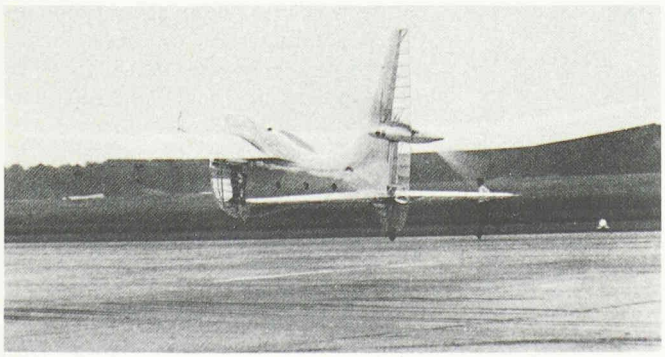


Fig. 5. — Le prototype Puffin I en vol. L'hélice propulsive est à l'arrière.

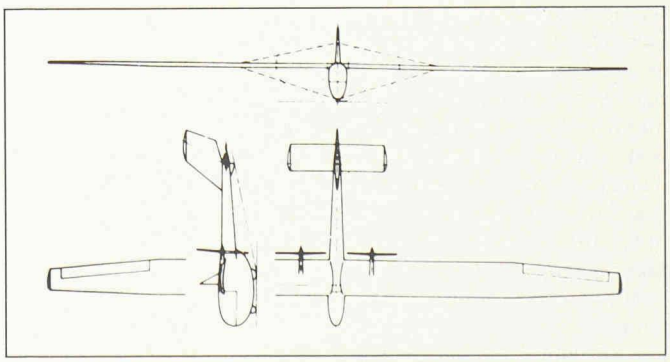


Fig. 6. — Projet de l'université d'Ottawa. On remarque la filiation avec le projet Bossi-Bonomi de l'avant-guerre.

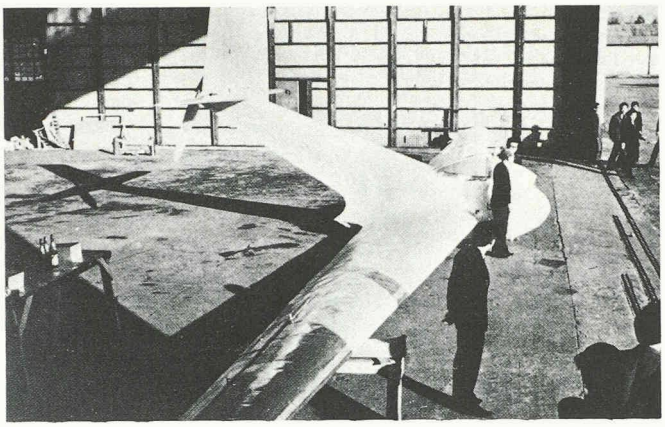


Fig. 7. — Le Linnet, avion à propulsion musculaire conçu par les japonais.

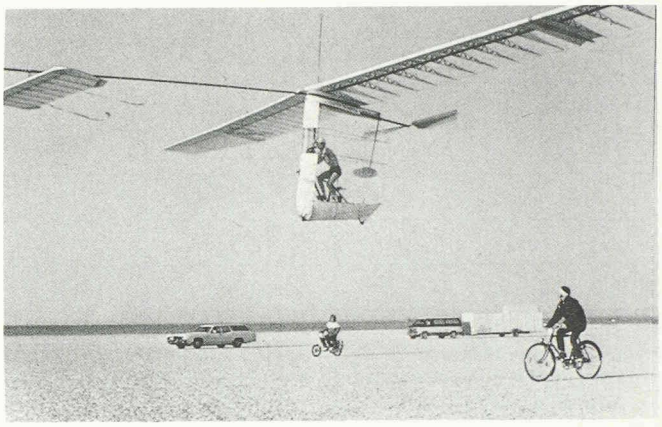


Fig. 8. — Le Gossamer Albatros, qui a traversé la Manche. On remarque la conception «canard» de l'appareil.

alors que l'avion suisse est de configuration très classique (fig. 9). Le Pelargos a déjà volé avec succès, mais ses performances ne sont pas comparables avec celles des prototypes américains. Néanmoins, comme cet avion n'en est qu'au stade des premiers développements, il nous est apparu très intéressant de faire quelques comparaisons entre ces trois avions.

3. Comparaison entre les Gossamer Condor et Albatros et le Pelargos II

Comparons le prototype de M. Horlacher, le Pelargos II, et deux appareils accomplis, le Gossamer Condor (gagnant du Prix Kremer en 1977) et le Gossamer Albatros (qui a effectué la première traversée de la Manche en 1979). Les trois procèdent du même souci de légèreté: construction très légère, surface alaire et envergure importantes, haubanage des plans fixes de la voilure. Néanmoins il y a une nette différence d'architecture entre ces avions:

- les Gossamer sont du type canard sans surfaces verticales;
- le Pelargos présente l'architecture classique d'un avion.

Le tableau 1 présente les divers matériaux utilisés pour la réalisation des parties principales de l'appareil.
Le tableau 2 donne les dimensions principales des trois appareils.
On constate à la lecture de ces chiffres que le Pelargos est un peu plus long que ses deux concurrents, qu'il est 45% plus lourd que le Condor pour la même surface alaire et 84% plus lourd que l'Albatros pour une surface alaire supérieure de 44%. (N.B. Les valeurs relatives sont déterminées par rapport à la plus petite valeur.) Il a en outre le même allongement[1].
Nous allons maintenant évaluer la puissance nécessaire au vol N avec la formule de McCready [1][2]. Cette formule est très simpliste. Elle fournit néanmoins des valeurs susceptibles d'être comparées.

Les variables en sont le poids total de l'appareil et la surface alaire.

$$N = W \cdot \frac{w}{3} \quad (\text{kg ms}^{-1})$$

$$\text{et } w = \sqrt{\frac{W}{A}}$$

$$\text{soit } N = \sqrt{\frac{W^3}{9A}} \quad (\text{kg ms}^{-1})$$

où W est le poids total
A est la surface alaire

$$N = \frac{1}{75} \sqrt{\frac{W^3}{9A}} \quad (\text{CV})$$

Les résultats de ce calcul sont réunis dans le tableau 3. Nous avons admis que le pilote pèse 70 kg.

TABLEAU 1. — *Matériaux utilisés pour la construction de trois avions à propulsion musculaire.*

	Condor	Albatros	Pelargos II
Longeron d'aile	Aluminium d'aviation	Stratifié de carbone	Sandwich de Kevlar et de carbone
Nervures d'aile	Balsa	Polystyrène expansé renforcé au Kevlar	Stratifié de carbone et assemblages de sandwichs Kevlar, nid d'abeilles
Haubans	Acier	Acier	Acier
Câbles de commande	Acier	Kevlar	Acier
Bord d'attaque et bord de fuite	Polystyrène expansé	Polystyrène expansé	Feuille de plastique extra mince raidie par des nervures

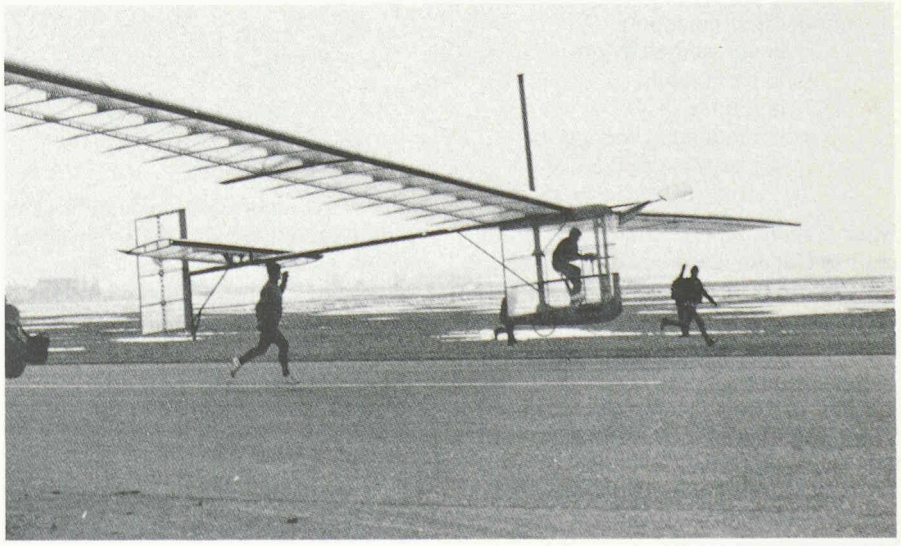


Fig. 9. — Le Pelargos II, prototype suisse d'avion à propulsion musculaire.

[1] Allongement $= \frac{b^2}{F} = \frac{\text{Envergure}^2}{\text{Surface alaire}}$

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

TABLEAU 2. — *Dimensions principales de trois avions à propulsion musculaire.*

	Condor	Albatros	Pelargos II
Poids [kg]	31,8	25	46
Envergure [m]	29,3	28,6	27
Surface alaire [m²]	66,3	46,5	67
Aspect ratio	12,8	17,6	10,9
Longueur [m]	~ 9,75	~ 9,75	~ 11,55
Surface des empennages horizontaux [m²]	8,3	~ 5,7	~ 6,72
Surface des empennages verticaux [m²]	—	—	~ 3,36
Diamètre de l'hélice [m]	~ 3,66	~ 3,96	~ 3,70
Hauteur de la cabine [m]	~ 2,75	~ 2,75	~ 1,80
Surface de la cabine [m²]	7,9	~ 5,90	~ 3,96

N. B. : Les dimensions précédées du signe ~ ont été obtenues par mesures sur les plans de M. Horlacher et sur les figures de la référence (1) ; leur précision est donc assez modeste.

TABLEAU 3. — *Puissance nécessaire au décollage pour un pilote de 70 kg.*

	Condor	Albatros	Pelargos II
W [kg]	101,8	95	116
A [m²]	66,3	46,5	67
τ [ch]	0,56	0,60	0,68

On voit qu'il faut au Pelargos II 22% de puissance en plus qu'au Condor et 13% en plus qu'à l'Albatros. Ces chiffres sont sujets à caution, car ils ne tiennent pas compte des performances aérodynamiques de l'appareil. Ils mettent néanmoins en évidence l'importance du rapport poids/surface alaire.

Nous disposons d'une autre formule pour calculer la puissance nécessaire. Elle nous est donnée par J. C. Wimpenny [2] et elle nous permet de tenir compte des qualités aérodynamiques de l'appareil.

$$N = \frac{W \cdot w}{(P/T) \cdot \eta}$$

où W est le poids total
w la vitesse de l'avion
P la portance
T la traînée
η le rendement mécanique (ici supposé égal à 0,8)

Nous n'avons pu effectuer le calcul que pour le Condor, car nous ne possédions pas les données aérodynamiques des autres appareils. Lors des contacts pris avec M. Horlacher, il nous est apparu que l'on s'était surtout préoccupé de l'aérodynamique des ailes et non de celle de l'appareil. Nous voulons donc mettre en évidence l'importance de la traînée du fuselage sur la puissance nécessaire au vol. En exprimant la puissance en fonction de la traînée du fuselage C_{xf} nous obtenons

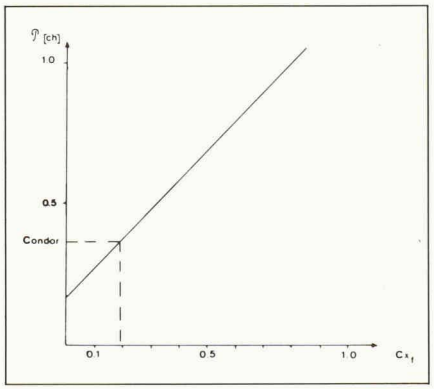


Fig. 10. — Puissance nécessaire au vol en fonction du C_x du fuselage C_{xf} pour le Condor.

$$N = a + b\, C_{xf} \text{ (kg m/s)}$$

où

$$a = \frac{W\, w}{P\, \eta}\ (T_{\text{voilure}})$$

$$b = \frac{W\, w}{P\, \eta}\ \frac{1}{2}\, P\, A f^{\check{}}\, w^2$$

Nous avons reporté cette équation dans la figure 10 pour les données aérodynamiques du Condor.

On constate que pour une diminution de 50% du C_{xf} on a une diminution de 36% de la puissance nécessaire au vol !

4. Quelques problèmes relatifs au vol à propulsion musculaire

L'objet de ce paragraphe est la mise en relief de quelques problèmes inhérents à la réalisation d'avions à propulsion musculaire. Il appartient aux futurs constructeurs d'y trouver une solution. Nous ne ferons que les énoncer et les commenter brièvement.

4.1 *L'aérodynamique du vol à une vitesse inférieure à 5 m/s*

L'avion à propulsion musculaire vole à une vitesse située au-dessous de 5 m/s (18 km/h). Ce domaine de l'aérodynamique est relativement peu exploré. On ne possède pas encore de loi décrivant bien les phénomènes de stabilité. En effet, dans les équations de traînée et de portance, le fait que le carré de la vitesse soit petit engendre pour P et T une dépendance plus grande (plus grande variation relative) par rapport à la masse volumique et à la viscosité de l'air ainsi que leurs variations. La faible masse des appareils et leurs grandes dimensions ne font qu'accentuer le problème. A ce propos, McCready, Lissaman [2] définissent un facteur d'échelle : la masse relative. Il s'agit du rapport de la masse du véhicule à la masse du cube d'air qui le contient. Différentes valeurs sont données dans le tableau 4.

On est porté à penser que l'avion à propulsion musculaire a plutôt tendance à se comporter comme un insecte, un très grand insecte, donc très sensible aux variations locales de la masse volumique et de la viscosité de l'air.

4.2 *Rendement du pilote*

Toute la géométrie et les qualités aérodynamiques sont définies de manière à minimiser la puissance nécessaire au décollage et au vol. En effet les mécanismes biologiques de production d'énergie ne permettent pas à l'homme de fournir une puissance continue de plus d'un demi-cheval. A ce sujet on peut consulter la figure 11 qui reproduit le diagramme de la puissance disponible en fonction de la durée de l'effort pour trois types de sports.

On pourrait se demander, à la vue de cette courbe, s'il ne serait pas judicieux de renoncer à faire décoller les avions à propulsion musculaire par leurs propres moyens. Le décollage est le moment du vol qui requiert le plus d'énergie : il faut en effet accélérer l'appareil jusqu'à la vitesse de décollage, puis lui fournir l'énergie nécessaire pour son élévation dans les airs ; lorsque l'appareil se trouve très près du sol, l'effet de sol demande encore un surcroît de puissance. La voie du décollage assisté, tel que l'ont pratiqué avant la Deuxième Guerre mondiale Bonomi et Haessler-Villinger, devrait être poursuivie si l'on envisage l'avenir sportif du vol à propulsion musculaire.

4.3 *Rendement mécanique de l'appareil de propulsion*

L'appareil propulsif mécanique d'un avion à propulsion musculaire se compose d'un pédalier, d'une chaîne, de pignons, d'un axe de roulement et d'une

TABLEAU 4. — *Masse relative de quelques objets volants.*

Véhicule	Masse relative
Boeing 707	0,86
Aigle marin	0,24
Planeur (Standard cirrus)	0,077
Libellule	0,0033
Cossamer Condor	0,0031

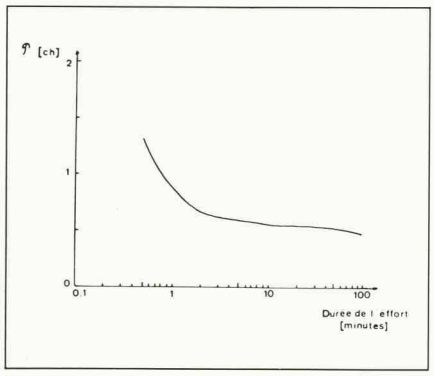


Fig. 11. — Courbe puissance = f (durée de l'effort) pour l'homme.

hélice. L'hélice mérite un soin particulier lors de son calcul et de sa conception. En effet elle tourne très lentement et de ce fait se différencie des hélices des avions. Elle devrait donc faire l'objet d'une étude aérodynamique approfondie. Mais il est un domaine où l'on peut gagner facilement quelques pour-cent de rendement : c'est l'architecture générale de l'avion. Il s'agit de concevoir un appareil où l'hélice se trouve le plus près possible du pédalier et où la transmission est la plus directe possible. Il faut mettre un soin particulier à éviter toute déviation de l'effort et par conséquent éviter toutes pièces tournantes autres que le pédalier et l'hélice, raccourcir la chaîne pour éviter les pertes d'énergie par déformation, vibration et «flottement» de la chaîne et construire un axe d'hélice le plus court possible. La puissance nécessaire dépend fortement du rendement mécanique de l'appareil de propulsion. On calcule, pour les données du Condor et en utilisant la formule proposée par J. C. Wimpenny [2] la courbe de la figure 12.

On voit que l'on peut gagner beaucoup par quelques astuces de construction. A cet égard, une transmission telle que celle du Mufti d'Haessler-Villinger (l'hélice est au sommet d'un empennage vertical au-dessus du pilote) nous semble bien meilleure que celle du Pelargos II par exemple.

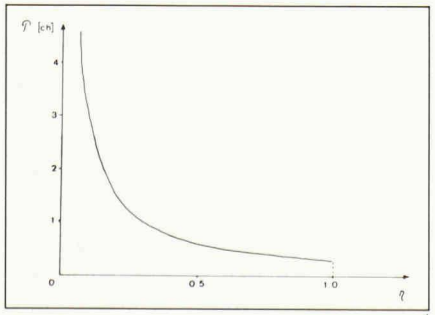


Fig. 12. — Puissance en fonction du rendement mécanique.

4.4 *Choix des matériaux*

La recherche de la légèreté a conduit les constructeurs d'avions à propulsion musculaire à utiliser de plus en plus de matériaux composites tels que le Kevlar et la fibre de carbone, caractérisés par une haute résistance et un faible poids volumique. Le tableau 5 établit la comparaison entre divers matériaux de construction.

Les très grandes valeurs des résistances du Kevlar et de la fibre de carbone données dans le tableau 5 pourraient conduire à une utilisation erronée de la matière. Ces résistances sont en fait celle du filament de base. Celui-ci est ensuite filé puis tissé. Les qualités rhéologiques de ces matériaux dépendent donc du pourcentage de vide laissé par le filage et le tissage de fil, vide occupé par la résine lors de la mise en forme de ces matériaux. En plus d'excellentes qualités rhéologiques, on a avec l'emploi de ces matériaux une maîtrise totale de l'anisotropie ; rien n'est plus facile que d'orienter les fibres dans la direction de l'effort et de faire varier la quantité et la qualité des fibres selon leur direction.

Nous avons effectué un essai de charge sur un morceau du longeron de l'aile (fig. 13). Le tube formant le longeron est composé d'un cœur en nid d'abeilles et de deux peaux de Kevlar en tissu du type 120. La principale qualité de ce tube est sa légèreté.

Trois essais avec une précharge de 2 kg ont servi à caler le système. Nous avons obtenu les résultats suivants :

- essai n° 1 : 4,60 mm de flèche pour une charge de 10 kg ;
- essai n° 2 : 5,96 mm de flèche pour une charge de 15 kg ;
- essai n° 3 : 6,45 mm de flèche pour une charge de 16 kg.

Nous avons aussi mesuré les flèches lors de la décharge de la poutre. Le cycle charge-décharge marque une faible hystérèse et une flèche résiduelle quasi négligeable, sauf pour le premier essai. Mais cette flèche résiduelle importante (0,62 mm) est certainement due au calage du dispositif d'essai. Par contre un comportement non linéaire commence à apparaître dès que la charge atteint 10 kg.

Au vu des modules d'élasticité et des résistances à la traction de la fibre de Kevlar et de la fibre de carbone, le longeron nous paraît trop souple. En effet le problème déterminant dans la construction d'un avion à propulsion musculaire n'est pas la résistance de la structure, mais sa *rigidité*.

Dans le cas du Pelargos II, il nous semble que dans son souci de légèreté, le constructeur ait économisé la matière au mauvais endroit. En effet, la trop grande souplesse de l'aile, à la flexion comme à la torsion, influe néfastement sur les qualités de vol de l'appareil, en particulier sur sa manœuvrabilité.

De plus, le choix du matériau constituant les deux peaux ne nous paraît pas judicieux. Il eût été préférable de choisir une toile de fibres de graphite à tissage anisotrope — le module d'élasticité de la fibre de graphite (E = 345000 à 415000 N/mm²) est environ le triple de celui du Kevlar (E = 131000 N/mm²).

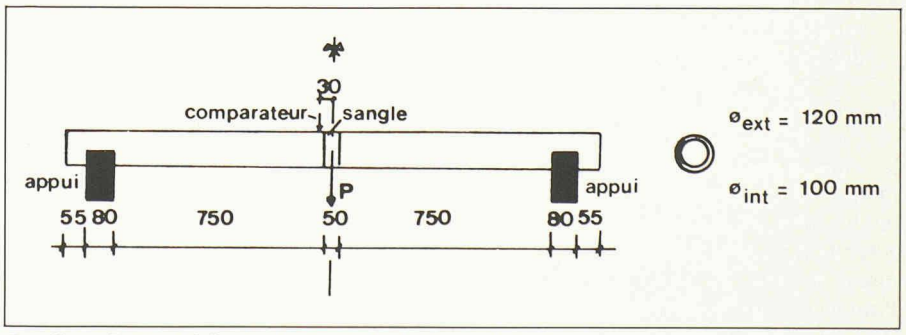


Fig. 13. — Dispositif d'essai de charge du longeron de l'aile.

TABLEAU 5. — *Comparaison de divers matériaux de construction.*

Matériau	Béton	Fe 360	Fe 510	Kevlar	Carbone	Sapin	Al 7075 T6
Résistance à la traction [N/mm²]	4	360	510	2950	2750	80	630
Poids volumique $x\ 10^{-5}$ [N/mm³]	2,3	8	8	1,45	1,75	0,55	2,8

Nous avons effectué un calcul simple négligeant l'effet des haubans. Soit une poutre encastrée à une extrémité, ayant pour portée la demi-envergure et pour section celle du longeron, nous en avons calculé la flèche pour deux cas différents:

a) une peau en carbone isotrope de 0,23 mm d'épaisseur, une peau en toile de Kevlar du type 120;
b) deux toiles de fibres de graphite avec 39 fibres dans le sens longitudinal et 8 fibres dans le sens transversal.

Nous avons obtenu:

a) une flèche de 24,69 m pour un poids total de l'appareil de 46 kg;
b) une flèche de 2,91 m pour un poids total de l'appareil de 50,65 kg.

Les valeurs de ces flèches n'ont aucune signification en soi. Ce qui est intéressant c'est le gain de rigidité en regard de l'augmentation de poids de l'avion, de 88% pour une augmentation de poids de 10%. Dans ce calcul, nous n'avons pas tenu compte de la diminution de poids due à la disparition d'un certain nombre de haubans rendus inutiles par l'augmentation de la rigidité du longeron. Des calculs plus sérieux devraient être entrepris pour optimiser le rapport qualités de vol-poids de l'appareil.

5. Conclusion

Le vol à propulsion musculaire n'a pas suivi la même évolution que le reste de l'aviation. Cela est dû au fait que les moyens mis à disposition n'ont évolué que très lentement. Ce n'est qu'après la guerre que des équipes pluridisciplinaires, soutenues financièrement par de grandes universités ou fondations, purent mener à bien les premières recherches, en poursuivant les travaux et essais qui avaient été entrepris en Allemagne et en Italie pendant l'entre-deux-guerres.

Mais seul l'apport de matériaux nouveaux, tels la fibre de carbone ou le Kevlar, qui remplacèrent la toile et le balsa, a permis au vol à propulsion musculaire de réaliser des exploits, telle la traversée de la Manche.

Ces matériaux nouveaux, utilisés de manière performante, grâce aux plus récents développements du calcul des structures et de la mécanique des matériaux, rendent réalisable le vol d'avions à propulsion musculaire, et surtout permettront le développement de toutes sortes de constructions qui allieront légèreté, rigidité et sécurité.

Bibliographie

[1] MORTON GROSSER: *Gossamer Odyssey.* Houghton Mifflin Company, Boston, 1981.
[2] *Man Powered Flight, the Channel Crossing and the Future,* Third Man Powered Aircraft Groupe Symposium, 6 February 1979. The Royal Aeronautical Society, 4 Hamilton Place, London W1VOB.
[3] REAY D. A.: *The History of Man Powered Flight,* Pergamon Press, Oxford, 1977.
[4] SCHULZE H.-G., STIASNY W.: *Flug durch Muskelkraft.* Verlag Fritz Knapp, Frankfurt am Main, 1936.

Adresse des auteurs:
Pascal Bovey, ing. EPFL
Vermont 20
1006 Lausanne
François Petriccioli, ing. EPFL
Av. de l'Europe 97
1870 Monthey

Protection du tracé des voies navigables

Réponse de la SVIA à une consultation

Le 21 décembre 1984, le Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie s'adressait aux organismes concernés, dont la SIA, pour obtenir leur avis sur l'opportunité des mesures de protection des voies navigables et sur la forme des mesures légales et réglementaires.
La SVIA, Société vaudoise des ingénieurs et architectes, a constitué une commission dont les conclusions font l'objet du présent article.

La commission de consultation de la SVIA était constituée de MM. Philippe Blanc, ing. civil, Frank Dolci, arch., Rémy Jaquier, ing. génie rural/géomètre, Jean-Daniel Marchand, ing. civil, Francis-Luc Perret, ing. civil, et Bernard Saugy, ing. civil.

1. Intérêt pour la Suisse du développement des voies navigables

Les voies navigables présentent un intérêt pour le transport des pondéreux dont les combustibles solides et liquides, les matériaux de construction, les minerais, les ferrailles et les céréales constituent actuellement près de 95% des marchandises transportées.

Pour ce qui concerne la Suisse, importatrice de produits de base et exportatrice de produits finis à haute valeur ajoutée, l'intérêt d'une voie navigable ne se justifie a priori que pour faciliter les importations de marchandises, accessoirement pour les exportations ou comme attrait pour le tourisme et les loisirs.

Le rôle des voies navigables pour les transports intérieurs peut être considéré comme négligeable en raison de la taille limitée du pays et de la grande dissémination des centres de transformation (industrie, aménagements énergétiques) et de distribution. La voie d'eau ne se prête pas, économiquement, au transport de petites quantités sur de petites distances. Seuls peuvent parfois s'avérer intéressants les transports de matériaux de construction ou de déchets, notamment sur les lacs ou sur les portions navigables de fleuves ou de rivières.

En l'absence d'études actualisées sur l'intérêt pour la Suisse du développement des voies navigables, la commission s'est basée, dans son approche, sur des études antérieures (étude Battelle 1969, message du Conseil Fédéral 1971, rapport CGST, étude Baumgartner 1977) et sur les données récentes fournies par la statistique suisse des transports (voir annexe en fin d'article).

1.1 *Intérêt économique*

L'intérêt économique pour la Suisse d'un développement des voies navigables est directement lié à l'évolution des importations de marchandises et, pour ce qui concerne le Rhin, à la capacité des ports de transbordement de Bâle et à celle des infrastructures routières et ferroviaires nécessaires au transport des marchandises en Suisse. A ce sujet, deux réflexions méritent d'être formulées:

a) Le volume futur des marchandises parvenant en Suisse par le Rhin, lié à la croissance économique de la Suisse, ne devrait pas atteindre la limite de capacité des ports de Bâle avant la fin du siècle.
b) Une part importante du transport fluvial de produits pétroliers (actuellement 50% du transport total) pourrait parvenir en Suisse par oléoduc, allégeant ainsi les ports de Bâle, déchargeant les voies routières et ferroviaires et limitant les risques de pollution.

Il convient également de se préoccuper des développements économiques régionaux induits par la présence d'une voie navigable. Ces développements peuvent concerner aussi bien l'industrie que le commerce, sans oublier le tourisme:

L'importance de l'industrie en Suisse a tendance à diminuer. Actuellement, seul 38% de la population active suisse travaille dans le secteur industriel (Allemagne: 42%; Japon: 35%; Grande-Bre-