

Xbis

SUR LES MOULINS A VENT A AXE VERTICAL

Par M. le D^r **Paul AMANS**

Tous les visiteurs de notre Exposition régionale ont été vivement intéressés par la Turbine aérienne de M. Lafond. Les moulins à vent à axe vertical étant à la fois rebelles aux calculs, et très peu connus du public, nous avons demandé au D^r Amans de vouloir bien nous faire un rapport sur cette question. Le D^r Amans s'est spécialisé de longue date dans les recherches expérimentales d'Aérodynamique, et beaucoup de ses idées sont passées, ou sont en train de passer dans la pratique.

Comme pales tournantes, il a surtout étudié les organes de propulsion, mais au début de la guerre et dans un but de défense nationale, il a aussi étudié les pales passives, à axe vertical. Son travail est peu connu et reste secret en grande partie ; nous croyons faire œuvre utile en lui donnant une plus grande publicité, du moins pour ce qui intéresse uniquement l'aérodynamique.

Nous sommes persuadés que les constructeurs y trouveront des indications précieuses comme méthode expérimentale, dispositions et formes de pales.

N. D. L. R.

Au début de 1915, j'ai présenté au Ministère de la Défense nationale un projet de Pare-balles dénommé *Boucliers gyroscopiques*. Rejeté une première fois en 1915, il a été représenté à une commission nouvelle et finalement adopté en 1916, du moins en principe (1). Il y a dans mon travail une partie relative aux moulins à vent à axe vertical ; en éliminant ce qui est spécial aux Pare-balles, il n'y a, je crois, aucun inconvénient à publier mes expériences anciennes (2) et plus récentes.

Les moulins à vent à axe vertical passent généralement pour avoir un très mauvais rendement. Cette question de rendement avait peu d'importance pour mes appareils, mais nous verrons

(1) Du moins pour l'aviation ; on ne jugeait pas opportunes mes applications à la guerre de tranchées, ni à l'artillerie. Il paraîtrait cependant que mon système est réservé aux chars d'assaut.

(2) J'ai fait une première communication à ce sujet à l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier en 1916.

ce qu'il faut entendre par rendement et ce qu'on est en droit d'espérer de pales bien faites. Nous étudierons successivement les pales à surface plane, courbe et cylindrique. Il est bien entendu que dans toutes mes expériences le plan sustenseur des aubes courbes et les génératrices des aubes cylindriques sont parallèles à l'axe de rotation.

Ailes planes

Prenons une paire de pales tournant autour d'un axe vertical projeté en O (fig. 1 ; V est un vent horizontal).

Le plan et la sphère jouent un grand rôle dans les théories mécaniques, je dirais même biologiques, leur place étant parfait-

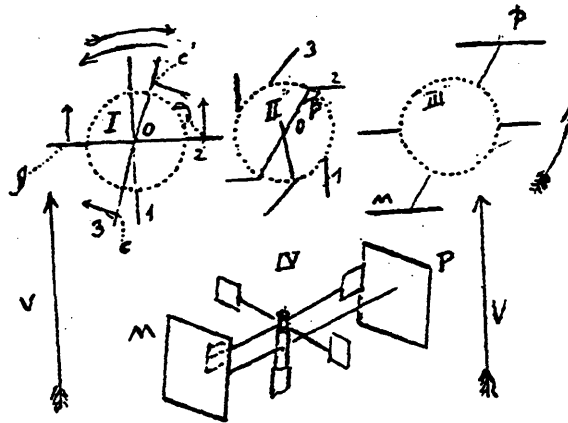


FIG. 1.

- I. — Moulinet à une paire de pales planes, dont le plan passe par l'axe O. Examen des moments rotateurs dans les positions 1..., 2..., 3...; C, C' centres de poussée.
- II. — Pales planes excentriques.
- III. — Comme I, mais avec un masque-girouette s'orientant perpendiculairement au courant. V, direction du vent.
- IV. — Moulinet à 2 paires de pales planes avec masque-girouette MP.

tement justifiée dans l'ontogénèse et l'évolution des formes. En nous bornant aux moulins à vent, l'action de l'air sur les surfaces planes et sphéroïdales nous aide à mieux comprendre l'action sur des surfaces plus complexes. On peut, dans une

certaine mesure, utiliser les résultats des balances aérodynamiques, tout en faisant des réserves sur leur emploi dans le calcul infinitésimal.

Dans la position (2) normalement au courant, l'action aérienne sur chaque pale peut se représenter par une force appliquée à c centre de poussée. Les forces sont égales, parallèles, de même sens, et leurs points d'application à égale distance du centre de rotation (o) : le moulinet ne bouge pas (*). C'est une position d'équilibre stable ; car si nous examinons toute autre position (3 par ex.), nous avons $oc > oc'$, et les pales reviennent automatiquement à la position (2) (**).

La position (1) où les pales sont parallèles au vent est une position d'équilibre instable.

Dans le cas plus général (fig. II), où le plan des pales est excentrique, il y a de même une position d'équilibre stable, (lorsque les pales sont normales au vent), et une position d'équilibre instable, lorsqu'elles se masquent complètement dans le fil du vent (position 1). Lorsque les pales sont trop rapprochées, il y a, du moins au point fixe, des phénomènes d'aspiration sur la face opposée. L'action de l'air n'est à peu près égale sur 2 pales rectangulaires, que lorsque leur distance (c'est le cas habituel des moulins à vent) est plus de 3 fois égale à la largeur des pales.

Pour rendre pratiques de tels moulinets, il faut y ajouter un masque avec queue-girouette d'orientation, ou encore une paire de pales M P (fig. 1 III) symétriques par rapport au centre. La pale antérieure M masque la moitié du moulinet, et le vent n'exerçant son action que sur une moitié, le couple de rotation négatif est fortement diminué.

On reprochera justement à ce système de supprimer le premier avantage apparent du moulin : pas de queue encombrante ; l'absence de queue évite cet affolement, cette danse de Saint-Guy, cette recherche constante et maladroitement du fil du vent, d'autant plus maladroitement et souvent à contre-sens que la queue

(*) On peut cependant, dans certaines circonstances et conditions, observer des phénomènes d'auto-rotation, observés et soumis même au calcul par divers expérimentateurs. Leur étude sort du cadre de mon rapport.

(**) On sait que le centre de poussée va d'avant en arrière, au fur et à mesure qu'augmente l'incidence sur le vent.

a plus d'inertie. On supprimera donc la queue, mais on gardera le masque dans toutes applications où on sera plus fort que le vent, ou on imposera plus ou moins la constance du courant (*aéroplanes, automobiles*).

Le masque est utile dans tous les systèmes de moulins à axe vertical. Il peut même servir de critérium pour comparer les résistances sur les faces dorsale ou convexe et ventrale ou concave d'une pale courbe. Le progrès consiste, néanmoins, à supprimer non seulement la queue, mais le masque, et même toute espèce de distributeur d'air.

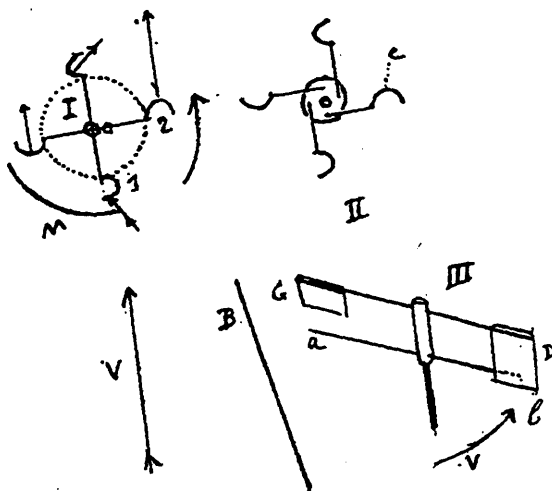


FIG. 2.

- I. — Moulinets à ailes hémisphériques; le point diamétral passe par l'axe. M, masque; B, vanne.
- II. — Le plan diamétral est excentrique.
- III. — Ailes planes libres de tourner autour d'un axe horizontal; *a, b*, tige butoir.

Ailes mobiles. — Un autre moyen de faire tourner des ailes planes sans masque, ni girouette, consiste à rendre les pales mobiles autour d'un axe horizontal (fig. 2 III), et à limiter leur mouvement par une tige butoir *a b*. Sous la poussée du vent, l'aile droite par exemple vient buter contre la tige et reçoit un choc orthogonal, tandis que l'aile gauche est soulevée, recule,

et reçoit un choc oblique beaucoup moins fort. J'ai construit divers moulinets sur ce principe, les rendant de plus en plus dociles aux courants d'air, d'autant plus dociles que l'inertie des pales était plus faible, et la vitesse de rotation moins élevée.

Si on veut perfectionner un tel système, il faut renoncer aux pales rigides, supprimer le butoir, et imiter les réactions élastiques des pales animales. C'est l'objet de mes recherches actuelles.

Ailes courbes

J'ai étudié des surfaces courbes ayant chacune son bras support, ou bien réparties sur des moyeux de diverses formes (cylindriques, coniques, paraboliques, etc.). Je m'occuperai seulement du premier type.

Ailes sphériques. — L'anémomètre Robinson à ailes hémisphériques est le type le plus connu de ce genre de moulinet. Un caractère commun à toutes les ailes courbes (plans-convexes ou concaves-convexes) est de produire une *rotation toujours de même sens, face convexe en avant*. On sait depuis longtemps que la résistance sur la face concave est plus grande que sur la face convexe.

En opérant sur une hémisphère en celluloïde de 77^{mm} de diamètre, je trouve que la résistance sur la face convexe est 2,5 fois moindre que sur la concave. En 1835, à l'École de Metz, Didion avait trouvé 2,51 pour des calottes moins profondes, où la flèche variait entre le 1/3 et le 1/4 du diamètre.

Ce rapport est modifié par le plus ou moins de poli de la surface, par le rapport de la surface au volume d'air reçu. Il diminue avec le diamètre.

Un défaut du moulinet Robinson est qu'à 0° d'incidence, on a une résistance négative, c'est-à-dire dirigée en sens contraire de la rotation. Les premiers constructeurs d'anémomètres ignoraient ce fait, sans quoi ils auraient adopté des calottes dissymétriques, dans le genre des ovoïdales.

Compteurs de tours. — Pour étudier l'action de l'air sur des pales tournantes, je les ai montées sur l'arbre d'un compteur de tours (fig. 3). Pour un même compteur, et un même vent,

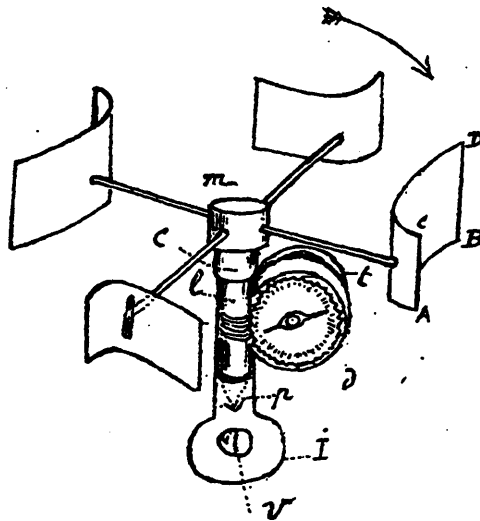


FIG. 3.

4 ailes cylindriques griffoides montées sur un compteur de tours ; *m*, moyen ; *l*, arbre du compteur ; *p*, pointeau ; *d*, cadran ; *t*, timbre ; *i*, pied du compteur.

le frottement des paliers varie avec le poids du moulinet ; mes moulinets ont sensiblement même poids, si bien que le nombre de tours peut servir de criterium, pour comparer des moulinets de même diamètre, mais de formes différentes. Si, toutes choses égales d'ailleurs, un moulinet tourne à vide plus vite qu'un autre, il est à présumer qu'en plein travail industriel, il donnera aussi plus de puissance. On mesure cette puissance et on la compare généralement à la *surface balayée*. Pour les moulins hollandais ou américains, on appelle surface balayée, la surface $\frac{\pi D^2}{4}$; pour les moulins à axe vertical, on adopte le rectangle DH (H étant la dimension verticale maximum).

Dans une première série d'expériences (diamètre du moulinet = 22 centimètres ; diamètre des ailes = 5 centimètres) avec

un Robinson à 4 ailes, j'obtiens, pour le nombre de tours à la seconde :

Sans masque ni barrage.....	3 tours par seconde
Sans masque, avec barrage.....	2,6
Avec masque.....	6
Avec masque et barrage.....	6,5

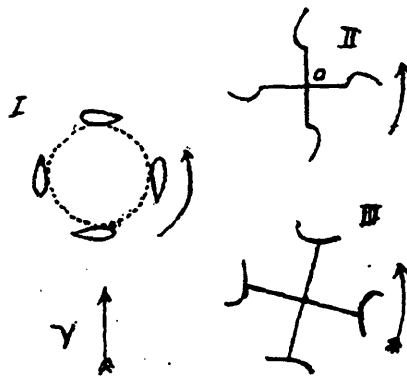


FIG. 4.

- I. — Ovoïdes tournants.
- II. — Ailes hémi-ovoïdales : le plan de base passe par l'axe de rotation.
- III. — Id. mais le plan de base est excentrique.

Le barrage est formé d'une planche verticale placée obliquement sur le courant ; c'est une sorte de vanne qui force une plus grande quantité d'air à agir sur le moulin. Son action varie avec sa forme, sa surface, son inclinaison sur le courant ; elle ne produit une augmentation de tours que combinée avec le masque, ou avec d'autres vannes, et, dans ce dernier cas, nous avons ce qu'on appelle un *distributeur*.

L'étude des distributeurs sort du cadre de mon mémoire, mais celle des masques est utile aux applications pour automobiles et aéroplanes.

Le masque est cylindrique. Je n'obtiens le chiffre de 6 tours qu'à condition de masquer un peu plus de la moitié du moulin ; j'évite ainsi le couple antagoniste signalé plus haut, à l'incidence de 0°.

Ailes hémi-ovoïdales. — Je remplace les hémisphères par des hémi-ovoïdes, de même surface diamétrale. J'ai placé le gros bout en dedans (1). Lorsqu'on opère sans masque, on a une légère supériorité de vitesse avec l'hémi-ovoïde.

Il a un autre avantage : il donne moins d'usure sur les paliers que l'hémisphérique. J'observe du moins une trainée moins grande avec la balance.

Rapport de la vitesse de rotation à celle du vent. — A trois tours, elle est 45 o/o de celle du vent ; à 6 tours avec masque elle est 90 o/o.

Rappelons que dans les moulins hollandais tournant à vide, la vitesse de l'extrémité de l'aile est quadruple de celle du vent ; en plein travail, le rendement maximum a lieu pour $v = 2,66 V$ (Smeaton).

Dans l'hélice active, zooptère à 2 pales, tournant au point fixe, j'ai trouvé que la vitesse maximum du courant engendré est la moitié de la vitesse distale. On a voulu parfois adapter une pale d'hélice aux moulins à vent, mais les phénomènes ne sont pas réversibles. J'ai montré jadis qu'à périmètre et diamètre égaux, les incidences optima des profils étaient différentes, suivant que la pale était active ou passive.

Ailes cylindriques

Pour une même surface balayée, on peut avoir un nombre plus ou moins grand d'ailes ; la puissance croît avec le nombre d'ailes, à condition, toutefois, qu'elles ne masquent pas l'une, l'autre. Ainsi sur mon moulinet de 22 cm., je ne tourne pas plus vite avec 8 pales qu'avec 4, mais quel est le rapport exact des puissances ? Je ne l'ai pas encore mesuré.

Une qualité précieuse des moulins à axe vertical est la faculté d'augmenter la surface balayée en augmentant un quelconque des facteurs HD ; on augmente H par exemple, si on dispose de peu de place dans le sens horizontal. Dans les moulins à axe

(1) Il serait intéressant d'étudier avec le gros bout en dehors.

horizontal, nous avons une seule variable D , et par suite plus d'encombrement horizontal.

L'augmentation de H cadre mieux avec l'emploi de pales cylindriques ; c'est ce qui m'a poussé à expérimenter des pales cylindriques.

La fig. 5 montre la directrice choisie : c'est une sorte de ligne parabolique, à courbure croissante de l'avant jusqu'au quart antérieur, diminuant ensuite graduellement jusqu'à l'arrière. C'est une modification de la méridienne ovoïdale. J'ai été conduit à cette modification par l'étude des profils de l'aile voilière. On pourrait aussi comparer cette courbe à celle des griffes distales (Lucane, Perdrix, etc.). La flèche SK est le quart environ de la corde AB ; le rapport $\frac{AK}{AB} = 18 \%$.

La fig. 3 montre un moulinet à 4 ailes cylindriques, ayant pour section droite une telle ligne comme directrice. Les génératrices sont des droites parallèles à l'axe, limitées en haut et en bas par deux sections droites. Cette dernière condition n'est pas indispensable ; je m'y suis conformé pour débiter, me réservant plus tard de découper sur de tels cylindres des ailes à contours spéciaux.

Etant donnée la forme de la directrice, et le diamètre maximum disponible, quelles dimensions donnerons-nous à AB pour 4 ou 8 ailes, et surtout quelle position par rapport au centre du moulinet ? Faut-il tourner la concavité en dehors (c'est le cas de la fig. 3) ou en dedans ? Avant les tâtonnements inévitables, j'ai eu l'espoir d'aller plus vite et plus sûrement en mesurant au préalable les résistances et les centres de poussée dans une rivière aérienne homogène (1).

La fig. 5 montre ces résistances en grandeur et direction, lorsqu'on souffle sur l'aile de 0° à 360° . Elles se divisent immédiatement à l'œil en deux groupes, un groupe antérieur dirigé de bas en haut, correspondant aux chocs aériens sur la face ventrale, et un groupe postérieur dirigé en sens contraire, correspondant aux chocs sur la face dorsale. Je conviens encore

(1) C'est la méthode dite du *Tunnel*, des laboratoires d'aérodynamique, avec cette différence toutefois, que j'opère généralement sans tunnel, grâce à un déplaceur spécial d'air. Dans le cylindre étudié $H = D = 10$ cm.

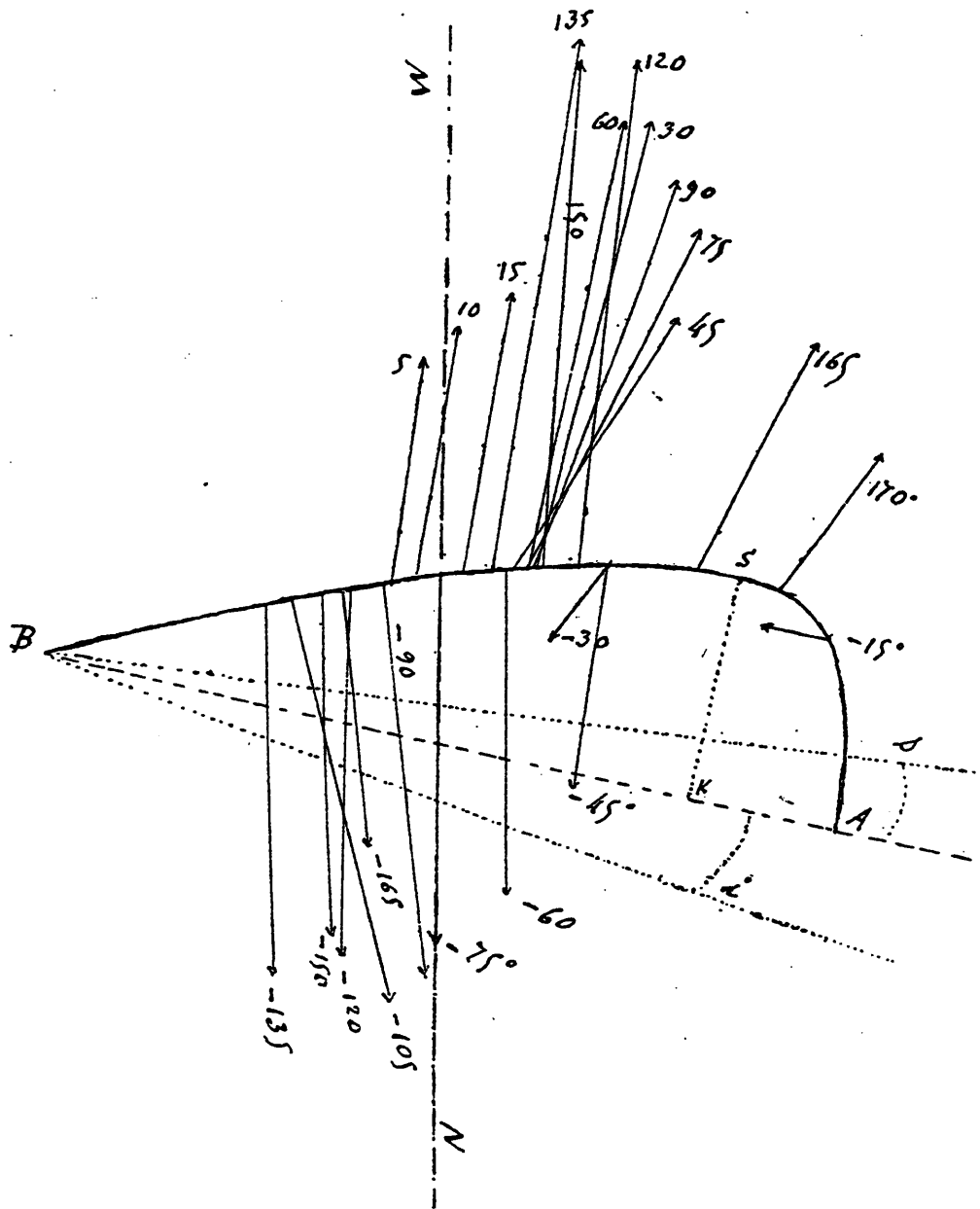


FIG. 5.

Epure des résistances sur une aile cylindrique à griffe, en grandeur et direction.
 Le centre de rotation est sur M N, ligne de la résistance pour une incidence de -75° . Il est choisi du côté M. L'angle sBA est une incidence négative ; A B i une incidence positive.

A 0° et 180° . l'équilibre est instable.

d'appeler *incidences positives* les angles de AB avec le vent dans le premier cas, et *incidences négatives* dans le 2^e cas.

Si une paire de pales de ce genre était destinée à tourner autour d'un axe parallèle aux génératrices, et si on avait en pleine rotation des résultantes comparables à celles mesurées au point fixe, où faudrait-il placer cet axe pour avoir le maximum de tours à la seconde ?

Sûrement pas sur la ligne A B (cas du Robinson classique); car pour une position quelconque de l'une des pales, sa symétrique donnerait une force de sens contraire; cependant la position du centre de rotation à gauche de B serait moins mauvaise qu'à droite, parce que le groupe positif, le plus fort, aurait en même temps un plus grand bras de levier.

Si on veut avoir une somme maximum de moments rotateurs positifs, il faut placer le centre de rotation sur une ligne intermédiaire aux deux groupes. Celle qui passe par la ligne de poussée — 73° m'a paru la plus convenable. Soit o le point de cette ligne où passe l'axe de rotation. Le moment de chaque force est le produit de cette force par la perpendiculaire oh sur la ligne de cette force. Je marque du signe — les moments qui agissent en sens contraire de la rotation.

On pourrait prendre ces moments comme ordonnées et les angles d'incidence comme abscisses. La somme algébrique des aires représenterait l'intégrale des moments rotateurs d'une paire d'ails ainsi conformées. On voit ainsi immédiatement à l'œil par le rapport des surfaces le rapport des moments positifs et négatifs (1); il est difficile d'évaluer ce rapport, puisque nous ignorons les directions réelles des courants d'air dans l'intérieur du moulinet. Les intervalles des ailes constituent des sortes de trous par où passe le vent; ce vent est peu dévié de sa direction primitive, ainsi que le montrent de petites girouettes placées à l'arrière du moulinet; il est donc assez rationnel de supposer que si l'aile sous le vent présente sa concavité de 10° par exemple à 90°, sa symétrie présente la convexité de — 170° à — 90°, et d'après l'épure, nous avons des couples rotateurs de même sens.

Cette action semble *paradoxe*, si on la compare à celle d'un moulinet à pales planes, où les couples sont de sens opposé.

(1) J'ai supprimé le tableau des moments, pour ne pas alourdir mon rapport.

L'expérience a pleinement confirmé cette supposition. Nous avons vu que par l'emploi du masque unilatéral nous arrivions à doubler le nombre de tours; avec les quatre pales griffoïdes, nous augmentons seulement de 10 o/o la vitesse de rotation, ce qui prouve bien un rapport incomparablement plus faible de moments négatifs. En me servant du masque, je supprime des moments négatifs comme ceux de -60° à 0° , mais aussi quelques moments positifs. Si ces moments étaient égaux, le nombre de tours serait le même avec ou sans masque; en réalité les moments positifs supprimés sont un peu inférieurs aux moments négatifs.

A superficie d'ailes égale, on ne saurait dire qu'un tel moulinet tourne plus vite que celui des héli-ovoïdes, mais le *nombre de tours augmente régulièrement avec la surface; la pale cylindrique est plus facile à caser en hauteur* et cette qualité est précieuse pour le constructeur (*).

A la fin de ma première communication (in *Bull. de l'Ac.* 1916) je me proposais l'étude des points suivants :

1° Influence du creux $\left(\text{rapport } \frac{SK}{AB} \right)$, des angles d'entrée et de sortie du profil ;

2° Au lieu d'ailes minces d'épaisseur uniforme, imiter les sections de profil des Zooptères, minces à l'arrière, à *gros bout avant*;

3° Essayer un bord antérieur AC (fig. 3) courbe, et non rectiligne ;

4° Faire varier le rapport $\frac{AB}{AC}$. Le faire très petit et augmenter le nombre des ailettes à la façon des moulins américains, de sorte que notre moulinet serait formé d'une sorte de cylindre percé de fentes verticales, d'une sorte de *jalousie cylindrique* dont les lamelles seraient non planes, mais courbes.

Quelques années plus tard, cette jalousie a été réalisée par M. Lafond, constructeur à St-Etienne avec ces différences toutefois que sa pale a une épaisseur et courbure uniforme (arcs de cercle) et qu'elle tourne sa concavité en dedans et non en dehors. Avec la griffoïde, il vaut mieux tourner la concavité en dehors.

(*) Il faut en outre remarquer que la rotation des Hémisphériques et Hémiovoïdes est discontinue, avec accélérations positives et négatives, tandis que ma cylindrique tourne d'un mouvement presque uniforme.

Un autre dispositif sur lequel insiste M. Lafond est le suivant. La jalousie ou turbine aérienne a un bien meilleur rendement lorsqu'elle est fermée en haut et en bas. Le double fond empêche une aspiration nuisible dans le centre du moulinet. Une telle aspiration ne se produit pas avec un moulinet à 4 pales ; vaut-il mieux adopter celui-ci ou bien la turbine multipale ?

Les moulins à axe vertical ne sont pas nombreux ; on peut encore citer le moulin Coste, antérieur au moulin Lafond ; les ailes y ont un profil de ligne brisée. L'emploi de surfaces planes paraît contre indiqué dans toutes les applications aérodynamiques.

On a toujours reproché aux moulins à axe vertical leur faible rendement. J'ignore quel serait celui d'un moulin construit suivant les idées exposées dans ce travail, mais à la C^{ie} des Salins du Midi où on se sert d'une turbine Lafond, on emploie la formule empirique $1/40 S V^3$ (*).

(S surface balayée ou HD... V vitesse moyenne du vent). Ce coefficient est aussi bon que celui des moulins américains, mais au point de vue pratique, il faut comparer non le travail à la seconde, mais la somme des travaux au bout de 24 heures ou d'un mois. Cette somme serait supérieure avec les moulins à axe vertical, parce qu'ils travaillent beaucoup plus longtemps avec les plus faibles brises comme avec le mistral. Ils ne risquent pas de s'emballer, leur vitesse de rotation étant limitée par l'action des moments négatifs. Ils sont en outre plus simples, plus faciles à construire, à installer, et moins chers d'entretien, toutes qualités fort appréciables pour les industriels et agriculteurs.

Nos prochaines expériences porteront sur les améliorations des profils, et sur le rendement.

D^r AMANS.

(*) Ce coefficient $1/40$ ou $0,025$ se rapprocherait du rendement théorique calculé par Rateau, mais il serait bien supérieur au chiffre de $0,003$ donné par certains expérimentateurs. Cette supériorité nous surprend, mais nous n'insistons pas, n'ayant pas encore opéré dans des conditions identiques à celles de M. Lafond.