

# Contribution à l'étude de l'énergie totale

J. M. Clément

Présenté à la XIII OSTIV Congress, Vršac, Yougoslavie (1972)

## 1. Considérations d'ordre général sur la polaire en air calme

Il est inutile de rappeler ce qu'est une polaire en air calme, tout le monde sait ce que c'est, et pourtant c'est la caractéristique du planeur la plus discutée parce que la plus aléatoire. Peut-être n'est il pas inutile de définir encore ce qu'est le rêve du vélivole, à savoir la compensation de l'énergie totale.

En des termes extrêmement simples, un variomètre parfaitement compensé doit indiquer, en air calme, des vitesses de chute correspondant à celles indiquées sur la polaire, à la vitesse sur trajectoire correspondante, et ce indépendamment de la variation de la vitesse indiquée? C'est donc un vario qui suit la polaire, que ce soit en piqué ou en ressource. Son intérêt réside surtout dans son utilisation en ressource, puisqu'il devrait alors tout bêtement la valeur exacte de l'ascendance, déduction faite de la vitesse de chute propre de l'instant, correspondant à la vitesse propre, lue sur la polaire en air calme.

Tout ceci a déjà été répété maintes fois, par d'autres et par moi-même, et dans Aviasport en particulier. Et pourtant, nous avons négligé un paramètre qu'aujourd'hui, après les nombreux essais en vol, il apparaît impossible de ne pas tenir compte, à savoir l'accélération, ou facteur de charge.

## 2. Etude de la dynamique de la ressource (ou du piqué)

Supposons le planeur stabilisé à  $V_i = 200$  km/h. Pour un Libelle, sa vitesse de chute sera voisine de 3,8 m/s. Si le pilote cherche à faire diminuer sa vitesse, en faisant diminuer sa vitesse de chute propre, et que son variomètre indique une diminution de la vitesse de chute non compensée de 5 m/s en 1 seconde, il aura subi une accélération de 5 m/s/s, soit environ la moitié de la pesanteur en plus de la pesanteur, soit un facteur de charge = 1,5. Or on sait que la vitesse de chute propre augmente comme la racine carrée de ce facteur de charge, ce qui porterait notre  $V_z$  à

$$3,8 \times \sqrt{1,5} = 3,8 \times 1,23$$

soit 4,7 m/s au moment même du début de la remontée.

Et si la ressource se poursuit, toutes les  $V_z$  instantanées se trouveront être considérablement plus fortes que la

$V_z$  de la polaire en air calme que nous appellerons polaire « statique ».

Sur les figures 1 et 2, nous avons tracé les polaires statique et dynamique d'un Libelle effectuant une ressource depuis 200 km/h, aux accélérations mesurées lors des essais. Dans le cas 1, il y a accélération constante, le pilote sera à la limite du décrochage à 80 km/h.

Fig. 1

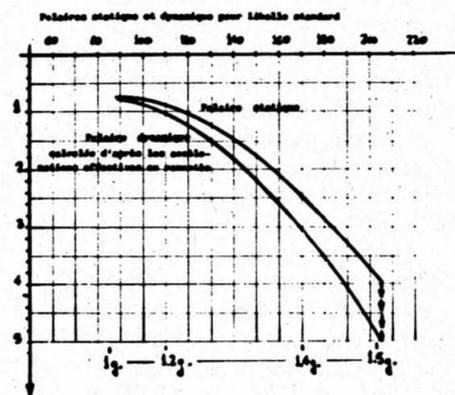
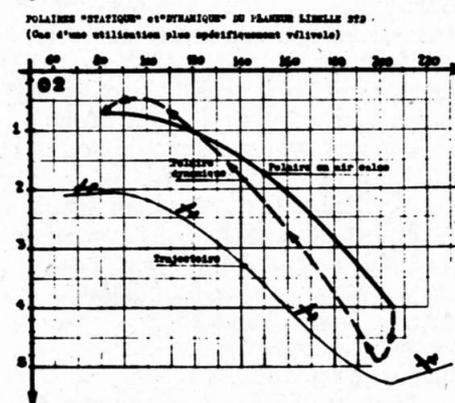


Fig. 2



Dans le cas 2, l'utilisation est plus spécifiquement vol à voile; si, arrivé à 100 km/h, le pilote décide de poursuivre sa route, il devra rendre la main et créer ainsi un facteur de charge inférieur à 1, ce qui portera la polaire dynamique au-dessus de la polaire statique.

Mais nous laisserons de côté ce cas, la prise de vitesse étant généralement effectuée en sortie de spirale et sans s'occuper de ce qui se passe sur le variomètre.

## 3. Erreur de compensation par introduction du $C_p = -1$

Je ne reviendrai pas sur la justification de ce  $C_p = -1$  donnant la compensation de l'énergie totale, elle a été suffisamment bien développé dans un

récent numéro, mais à l'attention de ceux qui aiment les équations différentielles (les autres peuvent passer au §-4), j'aimerais reprendre un point.

On définit énergie totale la somme de  $H_t = H + V^2/2 \cdot g$ , énergie potentielle plus énergie dynamique.

En dérivant par rapport au temps, on obtient une équation en vitesses de chute:

$$\frac{dH_t}{dt} = \frac{dH}{dt} + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$\text{soit } V_z \text{ tot} = V_z \text{ propre} + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$$

$$\text{et comme } P_t = r \cdot V^2, \frac{dP_t}{dt} = r \cdot V \cdot \frac{dV}{dt}$$

d'où l'équation très simple:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} (P_s - P_t).$$

Il suffirait donc de remplacer la pression statique par une pression  $P$  avec  $P = (P_s - P_t)$ , soit  $C_p = -1$ , pour obtenir cette compensation. Malheureusement pour nous, le terme  $(g)$ , accélération n'est pas constant, il varie même dans un rapport de 1 à 2; notre équation différentielle devient alors:

$$\frac{dH_t}{dt} = \frac{dH}{dt} + \frac{1}{2 \cdot g^2} \cdot (2 \cdot g \cdot V \cdot \frac{dV}{dt} - V^2 \cdot \frac{dg}{dt})$$

soit:

$$\frac{dH_t}{dt} = \frac{dH}{dt} + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dt} - \frac{V^2}{2g^2} \cdot \frac{dg}{dt}$$

soit, en multipliant les 2 termes par  $(r \cdot g)$ :

$$dV_{zt} \cdot r \cdot g = dV_z \cdot r \cdot g + r \cdot V \cdot dV - r \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot dg$$

$$- dP = - dP_s + dP_t - P_t \cdot dg/g$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP_s}{dt} - \frac{dP_t}{dt} + \frac{P_t}{g} \cdot \frac{dg}{dt}$$

La déviation de l'aiguille du variomètre sera:

$$D = - \frac{K}{r \cdot g} \cdot \left[ \frac{d}{dt} (P_s - P_t) + \frac{P_t}{g} \cdot \frac{dg}{dt} \right]$$

avec  $P_s - P_t = P$  locale

$$(\text{ou bien } C_p = \frac{P \text{ locale} - P_s}{P_t} = -1).$$

Et ce terme correctif en  $dg/tg$ , qu'en avons nous fait?

Je répondrai pour tout le monde qu'il n'intéresse personne. Personne, car introduire une dérivée de l'accélération entraînerait l'installation d'un véritable ordinateur de bord. Et même les variomètres électroniques à plus de 3000 francs n'en sont pas pourvus. Et pourtant, Neubert vient de boucler un triangle de 300 km à plus de 150 de moyenne! Parce que nos moyens précaires nous permettent de retomber sur nos pieds.

#### 4. Corrections des défauts dus au $C_p = -1$

Examinons ce qui se passe lorsque l'on s'éloigne de la valeur  $-1$  du  $C_p$ .

Figure 3:  $C_p = -1$

On commence la ressource avec des «g» positifs, la polaire dynamique subit une translation vers le bas.

La fin de la ressource se fait en rendant la main, donc avec un facteur de charge inférieur à l'unité: la polaire dynamique se déplace vers le haut.

Le vario suivra la polaire dynamique qui recoupe la polaire statique.

On notera en passant un important retard à l'indication au début, avec même augmentation du taux de chute, et des valeurs trop faibles à la fin (vario en avance).

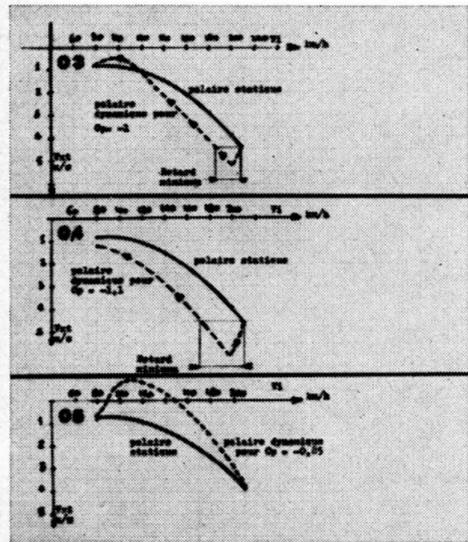


Fig. 3, 4 et 5

Figure 4:  $C_p$  inférieur à  $-1$  (sur-compensation)

L'augmentation du taux de chute en début de remontée est encore plus accentuée, le retard intrinsèque augmente, le variomètre devient inutilisable; il ressort surtout une impression désagréable, d'autant plus que les variations rapides de  $V_z$  - ascendance mal centrée - ne sont plus indiquées. C'est donc un cas à éliminer.

Figure 5:  $C_p$  supérieur à  $-1$  (sous compensation)

L'augmentation du taux de chute en début de remontée sera plus ou moins bien atténuée par l'introduction de la fraction de vitesse de montée.

Compte tenu du fait que, lors des départs à 200 km/h, nous avons toujours vu le vario non compensé en butée à  $-10$  m/s, et compte tenu du fait que la partie de  $V_z$  à «récupérer» sur la polaire dynamique est toujours inférieure à 1 m/s, vous pourrez avoir une idée de la très petite différence entre le  $C_p$  théorique ( $-1$ ) et celui réel ( $-0,9$ ).

Première conclusion: La vraie compensation ne passe pas par un  $C_p = -1$ , comme nous l'avons affirmé auparavant, mais par un  $C_p$  situé autour de  $-0,90$ .

Deuxième conclusion: Par le fait qu'il faut rendre la main en cours de remontée, et donc repasser d'une compensation sous la polaire statique à une compensation au-dessus de celle-ci, le  $C_p$  doit varier en fonction de la vitesse, pour finalement se retrouver à la valeur théorique  $-1$  avant la mise en spirale (autour de 100 km/h).

#### 5. Historique de la recherche du $C_p$ variable contrôlé

Pour reprendre dans l'ordre chronologique 5 années de recherches, commençons à Paris en 1967.

Sous la direction de M. Drivière, chef du laboratoire d'aérodynamique des Arts et Métiers, nous avons recherché un  $C_p = -1$  sur un profil NACA tri-dimensionnel, que nous n'avons pas trouvé. Puis, par hasard, nous avons retrouvé une sphère percée de trous, et l'avons passé en soufflerie.

Et le  $C_p$  théorique de la sphère  $-1,25$ , se trouvait alors voisin de  $-1$ , mais peu stable en fonction de la vitesse. Il fallait alors lui trouver un «stabilisateur», ce à quoi M. Chouart et moi-même avons travaillé, séparément, puisque je me trouvais à Turin.

En 1968 et 1969, sous les conseils du célèbre professeur Morelli, et aidé par un étudiant qui en profite pour passer sa thèse sur ce sujet,

M. Francavilla, nous reprenons les travaux sous un aspect plus théorique et trouvons enfin ce stabilisateur-correcteur en travaillant en soufflerie sur un modèle de diamètre 38 mm.

En 1970, nous commençons l'étude d'une antenne à monter sur planeur, de diamètre 20 mm, et les premiers essais s'avèrent excellents. Nous décidons donc d'en construire une pré-série et d'équiper plusieurs de nos planeurs.

Compte tenu des avis de la douzaine d'utilisateurs, nous décidons d'effectuer une série de mesures approfondies, sur un Libelle aimablement prêté par M. Dall'Amico. Excellente machine qui, entre les

maines de son propriétaire, a terminé 3<sup>e</sup> en classe libre des championnats italiens 1971 (devant les Kestrel et autres orchidées, il faut le faire!). Ce planeur était équipé de l'antenne de diamètre 20 mm, et nous avons modifié les instruments de façon à pouvoir mesurer le  $C_p$  réel en vol (méthode des deux anémomètres), et installé une caméra de 8 mm qui filmaient tout le tableau de bord à 18 images par seconde. La possibilité de pouvoir examiner avec calme la situation de 5 paramètres, image par image est un outil merveilleux et très économique, plus le contact radio pour l'enregistrement des paramètres extérieurs.

Voyons maintenant le dépouillement des résultats.

#### 6. Evolution du $C_p$ en fonction de la vitesse et de la dimension d'antenne

Diagramme 6: Nous avons représenté l'évolution du  $C_p$  pour trois diamètres d'antenne: 16,5 - 17 et 20 mm.

C'est en effet l'écroulement du  $C_p$  après 170 km/h sur le diamètre 20 mm qui nous a incité à calculer d'autres diamètres. D'autant que la courbe ne suit plus exactement celle relevée en soufflerie, que suivent bien les antennes de 16,5 et 17. Une raison pourrait être une erreur de géométrie; pourtant l'analyse de l'outil au projecteur de profil nous a montré une excentricité de 0,1 mm alors que les deux autres ont 0,2 mm.

Autre hypothèse: Le matériau choisi (Hertalon) se déforme avec la température? Nous avons donc abandonné la matière plastique, qui présentait aussi des difficultés d'usinage (vitesse de coupe). Le matériau choisi aujourd'hui est un alliage léger (anti-corrodal) que nous ferons traiter par oxydation anodique sur les modèles définitifs.

De plus, le modèle de diamètre 20 mm était supporté par une tige de diamètre 6 mm alors que les deux autres le sont par une tige de diamètre 5 mm, ce qui ne peut qu'améliorer les résultats.

Il faut noter que la faible différence de  $C_p$  à 220 km/h entre les diamètres 16,5 et 17 mm  $-0,90$  contre  $0,87$ , occasionne pourtant des comportements notablement différents en dynamique (voir § 7).

Notons aussi que le  $C_p$  est très voisin de  $-1$  en dessous de 100 km/h, ce qui est très bon pour l'indication finale du variomètre (voir § 4).

Les trois courbes ne deviennent sensiblement divergentes qu'au delà de 160 km/h, et c'est pour cela que l'antenne de diamètre 20 mm convient très bien pour les planeurs de type «Club», et que nous n'avons pas noté d'anomalie lors de nos premiers

Fig. 6

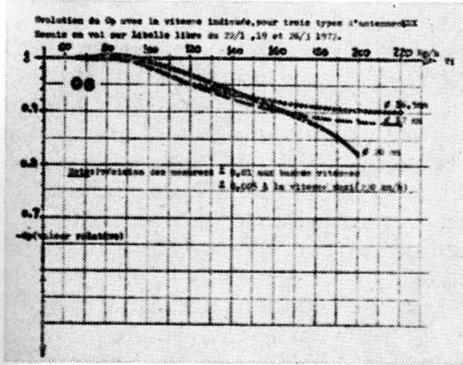
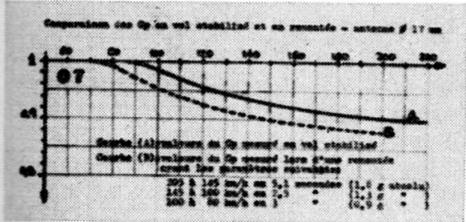


Fig. 7



essais sur M. 100 et M. 200. On peut même dire qu'elle est supérieure aux deux autres jusqu'à ce point. Au delà, elle «s'écroule», alors que les autres ont atteint leur stabilisation.

**Remarque importante.** Les valeurs de la figure 6 correspondent à des valeurs de  $C_p$  mesurées en vol stabilisé. Il est évident que lors d'une remontée rapide, et puisque le variomètre est un instrument qui fait intervenir un débit d'air entre l'antenne et la palette (ou la capsule), ce  $C_p$  instantané sera toujours en retard sur le  $C_p$  stabilisé. L'exemple le plus démonstratif est représenté sur la figure 7, où nous avons testé l'antenne de diamètre 17 lors d'une remontée de 205 à 80 km/h. La différence entre les deux courbes, sensiblement parallèles, est non seulement due aux pertes de charge consécutives à l'écoulement de l'air à travers tout le système variométrique, mais aussi à la variation de l'incidence, qui entraîne une modification de l'écoulement autour de la sphère, matérialisée par une sensible augmentation du  $C_p$  (n'oublions pas que  $-0,88$  est plus grand que  $-0,91$ ). Les essais en soufflerie nous avaient montré que le  $C_p$  variait entre les valeurs  $-1$  et  $-0,90$  lorsque l'incidence variait de  $0$  à  $+ ou - (7^\circ)$ ; heureusement pour nous, les planeurs n'utilisent pas même le tiers de cet intervalle.

Devons nous conclure que ce retard dans la valeur du  $C_p$  appliqué au variomètre nous introduit un retard dans la lecture du variomètre? Non, bien au contraire, puisqu'un  $C_p$  trop grand introduit une avance dans les résultats (voir § 4). Mais il nous faudra tenir compte de ce phénomène dans le choix du diamètre de l'antenne.

### 7. Dépouillement des photographies pour l'antenne diamètre 16,5 mm

Il convient de préciser encore une fois que nous voulons montrer là des similitudes d'évolution de polaires dynamiques, et non ces polaires en tant que valeur absolue. Ceci parce que nous avons tracé des courbes à partir de la lecture d'un instrument standard (variomètre PZL), qui présente encore quelques défauts, que son installation ne peut être parfaite, et que l'atmosphère n'est jamais stable lorsque le jour s'est levé. Mais nous sommes persuadés que c'est justement parce que les pilotes doivent voler dans ces conditions que ces résultats doivent être publiés sous leur forme la plus pure.

Figures 9 – 13

Tous ces essais ont été effectués en un seul vol commencé vers 1550 m. Nous n'avons pas pu éviter un début d'instabilité qui certainement faussé les dernières secondes de la figure 11. Dans tous les cas, nous pouvons noter que la toute première partie (de 0,6 à 1,6 seconde) de la remontée est caractérisée par une brusque augmentation du taux de chute compensé, sans variation de la vitesse indiquée, et avec très faible variation de la  $V_z$  non compensée (non représentée sur les courbes), correspondant parfaitement avec l'augmentation de la charge alaire (facteur de charge).

Fig.

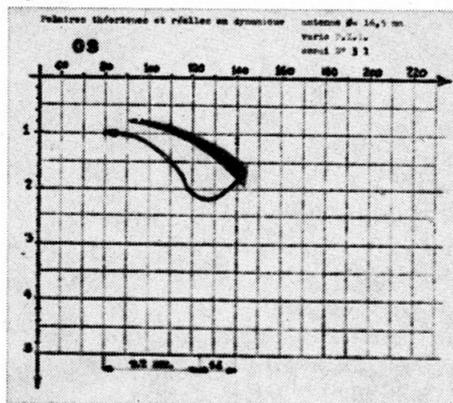
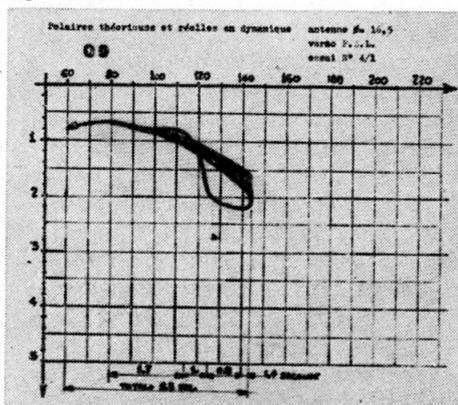


Fig. 9



2. Cette augmentation n'augmente qu'assez peu avec la vitesse de départ de la manœuvre, parce que le  $C_p$  augmente lui aussi ( $-0,95$  à  $145$  km/h contre  $-0,90$  à  $220$  km/h).
3. Par contre, la zone où la  $V_z$  compensée reste forte est beaucoup plus importante lors des départs à basse vitesse. Ceci peut être gênant lors de vols effectués par temps moyen avec des ascendances inférieures à  $1,5$  m/s.

Fig. 10

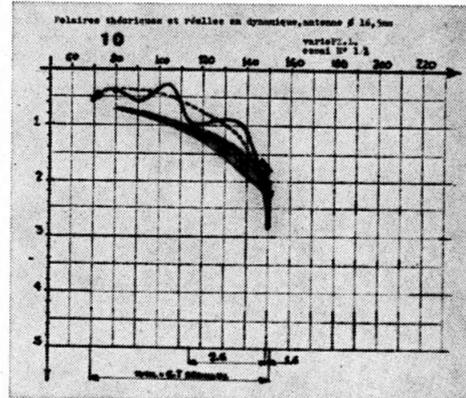


Fig. 11

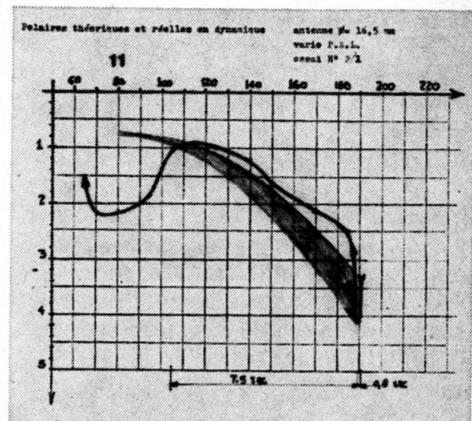
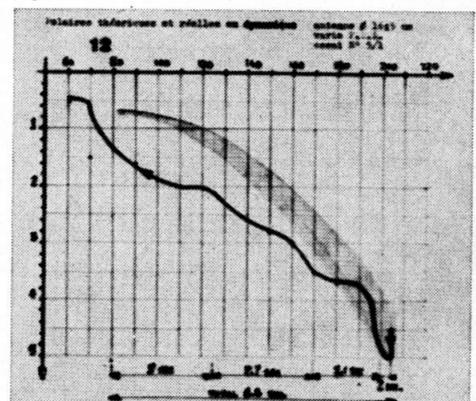


Fig. 12



4. Dans les cas 8 et 9, 11, 13 et 12 la polaire dynamique apparente est toujours située en dessous de la polaire statique (ou tout au plus confondue) après 3 à 4 secondes, situation toujours gênante pour le pilote.
5. Dans tous les cas, l'indication du variomètre ne passe jamais sensiblement au-dessus de la vitesse de

chute mini (0,67 m/s), ce qui est très intéressant.

Mais cette seule qualité n'a pas été jugée prépondérante par la grande majorité des pilotes car, à juste titre, on ne recherche pas d'ascendance de 0,5 m/s lorsque l'on vole plus de 200 km/h!

### 8. Dépouillement des photogrammes pour l'antenne diamètre 17 mm (14-17)

Reprenons dans l'ordre les commentaires du paragraphe précédent.

1. La brusque augmentation du taux de chute est beaucoup moins évidente (0,3 m/s à 145 km/h et 0,4 m/s à 175 km/h) et est toujours contenue dans la première seconde qui suit le début de la remontée.

2. Cette augmentation ne varie pratiquement pas avec la vitesse de départ.

3. La remarque reste valable, avec ceci en plus (et en mieux) que cette zone devient inexistante après 175 km/h, et est encore faible lors de départ à 155 km/h (courbe 15).

Pour la vitesse la plus basse (courbe 14) on note un écart maximum de 0,8 m/s entre la polaire apparente et celle calculée (dynamique), qui intervient 2,9 secondes après la décision de remontée.

Mais il reste 2,5 secondes avant d'atteindre les 90 km/h, où les deux polaires collent parfaitement.

4. Sauf dans le cas 14 et un peu dans le cas 15, la polaire apparente est toujours située au-dessus de la polaire dynamique calculée. Situation naturelle qui ne gênera personne.

5. Dans tous les cas, au contraire de l'antenne de diamètre 16,5 mm, la  $V_z$  mini lue est supérieure à la vitesse de chute mini (0,67 m/s)

- 0,45 m/s pour un départ à 145 km/h (courbe 14)

- 0,20 m/s pour un départ à 155 km/h (courbe 15)

+ 0,60 m/s pour un départ à 175 km/h (courbe 16) (présence d'instabilité?)

- 0,15 m/s pour un départ à 215 km/h (courbe 17).

Ceci est un point extrêmement intéressant, car on voit que l'écart augmente très peu avec la vitesse initiale. Cette augmentation s'explique très bien par le fait que la résolution d'une équation différentielle dépend des conditions à l'origine, et l'application du  $C_p$  le plus fort aux plus fortes vitesses doit donner des valeurs de  $(-V_z)$  les plus fortes. Mais cette différence est très peu sensible, va de toutes façons dans le sens de la valeur des ascendances que l'on est sensé rechercher. Seule la courbe 16 présente une légère anomalie; peut-être est-ce un début d'instabilité, car le vario non compensé indiquait encore + 9,2 m/s alors qu'il n'indiquait

Fig. 13

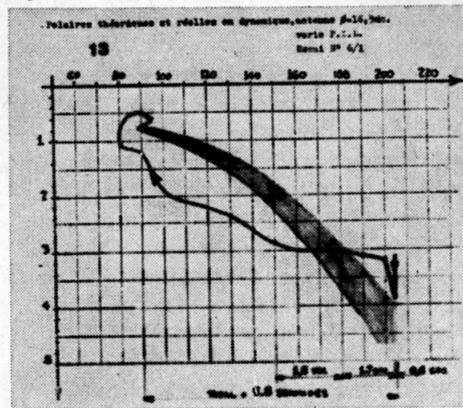


Fig. 14

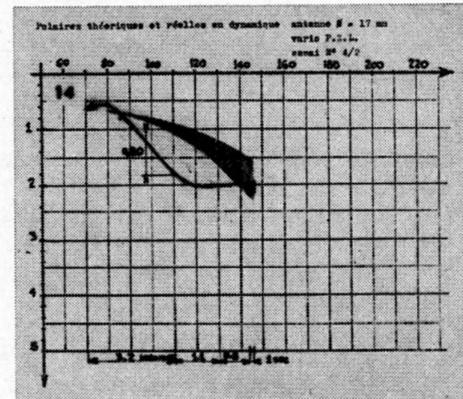
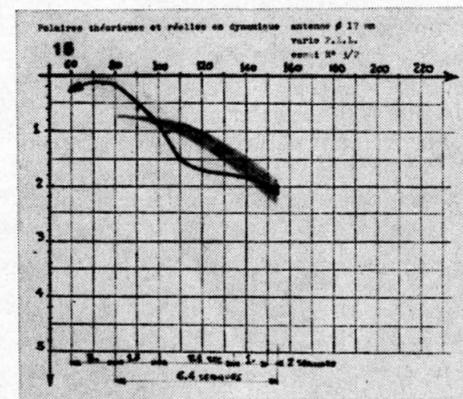


Fig. 15



que + 7 m/s au maximum pour toutes les autres courbes pour le point 80 km/h.

### 9. Conclusions

Première constatation: L'énergie totale parfaite passe par une compensation accélérométrique.

Conséquence: L'application d'un  $C_p$  théorique = - 1 conduit à un variomètre inutilisable parce qu'apparemment surcompensé en début de remontée, et accusant des retards de plusieurs secondes, qu'il faut ajouter au retard propre de l'instrument.

Deuxième constatation: Il est possible de compenser artificiellement l'erreur accélérométrique en « sous-compensant » le variomètre d'une quantité diminuant avec la vitesse, c'est-à-dire en appliquant un  $C_p$  supérieur à - 1 (- 0,90 par exemple), le tout étant variable et se retrouvant voisin de la valeur théorique aux basses vitesses.

Conséquence: Un type d'antenne (de quel constructeur que ce soit), ne peut convenir parfaitement que pour un type de vol ou un type de planeur, c'est-à-dire pour une plage de vitesse entre ascendances bien déterminée.

En ce qui nous concerne, nous pouvons dire que les plages sont les suivantes (pour une application parfaite):

- jusqu'à 150 km/h pour l'antenne diamètre 20 mm
- de 150 à 220 km/h pour l'antenne diamètre 17 mm (plage supérieure non explorée).

Nos deux Libelle sont équipés chacun de l'un de ces deux types et je dois dire que, malgré la petite minute qu'il faut pour passer d'un type à l'autre, nous volons toujours avec la même; et les utilisateurs de l'une et de l'autre sont également satisfaits!

**Nota.** Nous n'avons pas effectué de recherche systématique de la position idéale de l'antenne, mais il semble que les avis soient partagés entre le montage sur dérive et celui sur dorsale de fuselage.

Glassflugel livre ses Libelle et Kestrel avec le montage sur dérive, et les résultats sont ceux qui sont présentés ici.

Nous avons reçu de Schleicher un ASW 15 avec prise sur dorsale de fuselage mais nous ne pouvons nous

Fig. 16

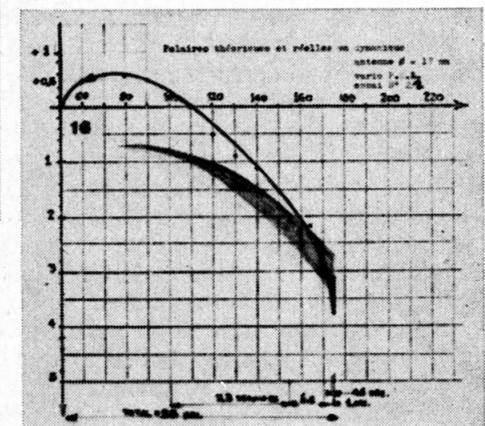
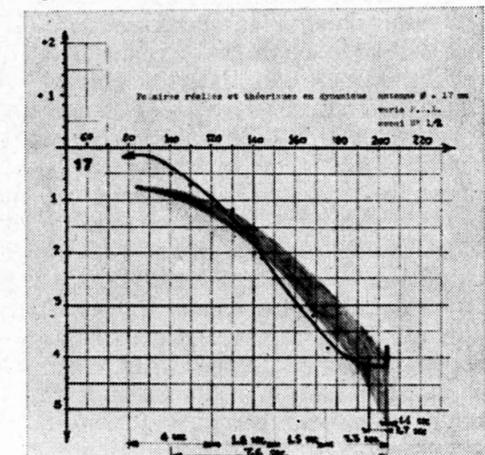


Fig. 17



prononcer que lorsque cette machine aura reçu son CDN italien.

Un montage similaire sur A-2 a donné des résultats un peu inférieurs.

Par contre, le Ka-6 E livré l'an passé avec un montage sur le nez a donné des résultats désastreux avec l'antenne d'origine (Althaus). Nous n'avons pas cherché à installer la nôtre dans cette position, car, connaissant les résultats de l'antenne

Althaus expérimentée par nous sur un Kestrel, il est certain que seul le montage peut être mis en cause.

(Notez au passage que l'antenne de Althaus donne des résultats équivalents à l'antenne de diamètre 17 mm, en apparence tout au moins car nous n'avons pas encore fait de relevés cinématographiques pour ce matériel.)

Il ne me reste plus qu'à vous laisser méditer sur cette montage d'informa-

tions, et à vous donner rendez-vous subséquemment les résultats de notre antenne montée sur le fuselage d'un ASW 15, et de celle d'Althaus montée en dérive sur un Kestrel.

Les résultats des antennes de 17 mm et 20 mm sont d'ores et déjà définitifs, et nous n'y apporteront d'autres modifications que celles qui peuvent nous être demandées par des utilisateurs autres que nous mêmes.