

# Protection d'un planeur contre les effets du coup de foudre et de l'électricité atmosphérique

Par l'Ing. él. J. ZIELINSKI, Laboratoire des hautes tensions de l'École Polytechnique, Varsovie

Conférence au 7<sup>e</sup> Congrès de l'OSTIV, Leszno (Pologne), juin 1958

En volant dans des nuages d'orage, un planeur est exposé aux effets de l'électricité atmosphérique et même aux coups de foudre. Le pilote du planeur et le passager peuvent observer pendant l'orage un nombre de phénomènes qui se produisent dans le planeur ou dans son entourage direct. Ce sont des décharges de foudre, des décharges partielles (couronne), l'électrisation des éléments du planeur, etc. Ces phénomènes peuvent être dangereux pour le planeur et son personnel, car le planeur peut être fracassé ou incendié par un coup de foudre; le personnel peut subir un choc électrique; enfin, quelques éléments indispensables pour diriger régulièrement le planeur peuvent être endommagés, comme par exemple les commandes des gouvernails, des ailerons et des freins, les instruments sur la planche de bord, etc.

Les conséquences du coup de foudre et de l'électricité atmosphérique sont particulièrement graves pour un planeur à cause de sa construction en matériaux inflammables et parce que sa cabine n'est pas écranée par des surfaces métalliques.

Les recherches conduites par le Laboratoire des hautes tensions de l'École Polytechnique à Varsovie et commandées par l'Aéro-Club polonais visent à déterminer les dangers liés aux vols dans les nuages orageux, choisir des mesures de protection convenables et contrôler l'efficacité de la protection. Les résultats de ces recherches seront utilisés pour la construction d'un planeur à deux places du type Bocian («Cigogne»). Quelques résultats et la méthode d'exécution de ces recherches seront discutés ci-dessous.

## Le planeur frappé par coup de foudre direct

Puisque c'est impossible d'éviter qu'une décharge de foudre frappe le planeur pendant un orage, les travaux sur la protection d'un planeur contre un coup de foudre direct consistaient à déterminer les endroits susceptibles à être frappés par la foudre et à installer à ces endroits des paratonnerres. Ces conducteurs ont été assortis et connectés de telle manière que même quand une foudre les frappe, le planeur reste intact. Le contrôle par le moyen de paratonnerres permettait

de vérifier si la foudre ne peut pas frapper d'autres endroits non protégés du planeur. Ces essais ont été exécutés sur un modèle du planeur (réduction 1 : 20). Ce modèle fut placé dans l'espace de 3 m entre les électrodes d'un générateur de tension de choc. Le générateur produisait des ondes de choc d'une tension de l'ordre de 2 000 000 V, causant des décharges entre les électrodes, analogues aux décharges de foudre entre nuages et terre. Des photographies de ces décharges qui servent à déterminer l'endroit atteint par la décharge sont présentées dans les figures 1-4. Les recherches ont démontré que l'installation des conducteurs de décharge sur quelques endroits saillants du planeur, comme la proue, les extrémités des ailes, etc., suffit pour protéger les autres parties du planeur. Dans quelques cas on a utilisé des éléments métalliques de construction du planeur comme paratonnerres.

## L'origine des surtensions dans la cabine du planeur

La protection du personnel contre un choc électrique fut considérée comme le problème le plus important de la protection d'un planeur. Ce problème consiste à limiter les surtensions qui peuvent se produire dans la cabine du planeur à des valeurs non dangereuses pour la santé. L'apparition de ces surtensions peut être causée par le passage du courant de foudre de courte durée et d'une grande intensité (jusqu'à 100 000 A) dans la proximité de la cabine. Ce courant donne origine à des surtensions induites électro-magnétiquement. Les surtensions induites électrostatiquement ne se produisent cependant pas sous l'influence du passage du courant, mais à cause de l'apparition sur le planeur d'un haut potentiel en relation à la terre. Ce potentiel peut apparaître pendant le développement d'une décharge de foudre envers le planeur - la valeur maximum de ce potentiel, selon la littérature technique, peut atteindre 100 000 000 V. De même, sans décharge de foudre, le planeur en motion dans un fort champ électrique des nuages orageux amasse sur sa surface une charge électrique par induction ou électro-friction. Cette charge, prenant son origine de l'électricité atmosphé-

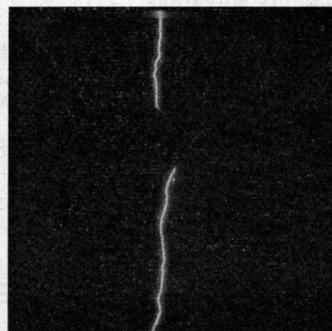
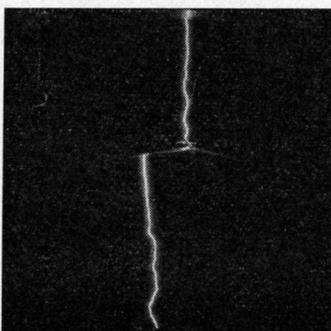
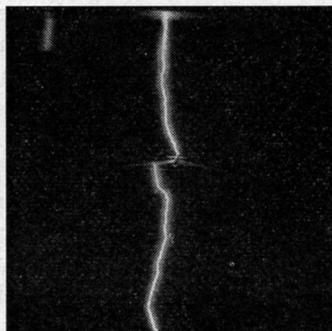
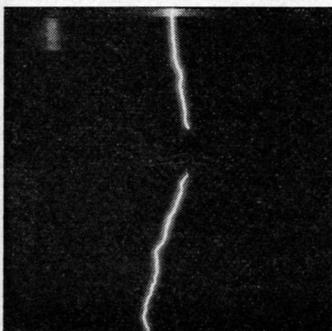
Fig. 1-4 Les décharges de choc aux environs d'un modèle du planeur

Fig. 1 La foudre frappe la première partie du fuselage

Fig. 2 La foudre frappe l'enrayure aérodynamique

Fig. 3 La foudre frappe l'extrémité des ailes

Fig. 4 La foudre frappe la queue



rique statique, peut provoquer une tension entre le planeur et la terre de l'ordre de 500 000 V.

### Effet physiologique du courant électrique

Il est bien connu que le corps humain est un conducteur du courant électrique, et sa résistance peut être évaluée à quelques kilo-ohms jusqu'à quelques dizaines de kilo-ohms. Ainsi donc, dans le cas d'apparition de surtensions dans la cabine du planeur, un courant peut traverser les corps du pilote et du passager. L'effet physiologique du courant électrique dépend de son intensité et de sa durée. Un courant de faible intensité irrite les centres nerveux; l'intensité plus grande peut les paralyser et causer des perturbations dans l'action du cœur et des organes respiratoires, et enfin des intensités très grandes peuvent causer une décomposition et intoxication du sang et même une carbonisation de la peau et des muscles.

On a accepté comme principe pour l'élaboration de la protection d'un planeur que les surtensions dans un planeur provenant de l'électricité atmosphérique statique, comme celles rencontrées assez souvent, doivent être limitées à des valeurs qui ne dépassent pas le seuil d'excitabilité des nerfs et muscles humains même les plus susceptibles. Un symptôme du dépassement de ce seuil peut être, par exemple, un picotement désagréable ou une irritation des doigts, pourtant pas dangereux pour la santé humaine. Par contre, les surtensions ayant comme origine un coup de foudre direct doivent être limitées de façon à ne pas causer un dépassement du seuil d'excitabilité de ces muscles dont un mouvement réflexe ou une paralysie momentanée pourrait causer une perte temporaire du pouvoir de gouverner le planeur. Tous les deux seuils sont situés beaucoup au-dessous des valeurs causant des altérations irréversibles dans l'organisme humain et dangereuses pour la vie.

La dépendance du courant  $i$  qui détermine le seuil de l'excitabilité, du temps de sa durée  $t$  s'exprime selon la littérature médicale par la formule suivante

$$i = \frac{a}{t} + b$$

si  $a, b$  = coefficients constants;

$b$  = rhéobase correspondant à la valeur du courant de longue durée qui cause un dépassement du seuil d'excitabilité;

$\frac{a}{b}$  = chronaxie correspondant au temps de durée du courant pendant lequel il doit atteindre la double valeur de rhéobase pour causer un dépassement du seuil d'excitabilité.

On a accepté, selon la littérature, pour les nerfs et les muscles les plus susceptibles (premier seuil d'excitabilité) les valeurs suivantes:

la rhéobase  $b = 1$  mA et la chronaxie  $\frac{a}{b} = 0,1$  ms,

et pour le deuxième seuil d'excitabilité:

la rhéobase  $b = 4$  mA et la chronaxie  $\frac{a}{b} = 5$  ms.

La dépendance du seuil d'excitabilité du temps de durée du courant est présentée dans la figure 5.

Ci-après on discutera les conditions imposées pour ne pas dépasser les seuils d'excitabilité pour divers types de surtensions qui ont lieu dans un planeur.

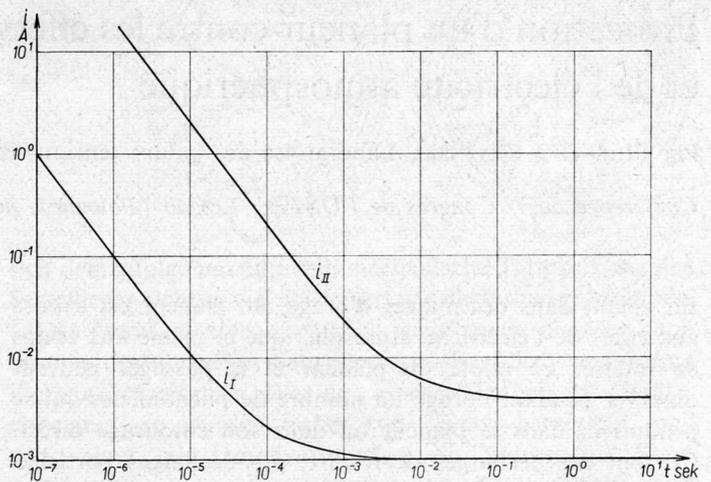


Fig. 5 Le courant correspondant d'un seuil d'excitabilité en fonction de sa durée

### Surtensions induites d'origine électromagnétique

La tension induite électro-magnétiquement par le courant de foudre passant dans la proximité de la cabine par les conducteurs de décharge, à laquelle un homme à l'intérieur de la cabine est exposé (tension causant un choc électrique) dépend de la chute de tension sur la réaction des conducteurs

$$\Delta \mu = L \frac{di}{dt}$$

et du couplage magnétique entre les hommes dans la cabine et les conducteurs de décharge. Cette tension est proportionnelle à la rigidité du courant de foudre

$$\frac{di}{dt}$$

exprimée en kA/ $\mu$ s.

En conformité avec les renseignements en notre possession qui concernent les paramètres de décharge de la foudre, on a accepté pour les calculs et mesures un accroissement uniforme du courant de foudre d'une intensité de 100 kA pendant 10  $\mu$ s, ce qui donne une rigidité du courant de 10 kA/ $\mu$ s et un temps de durée de la surtension de 10  $\mu$ s.

La tension causant un choc électrique peut être limitée par l'écranisation de l'homme dans l'intérieur de la cabine, par une augmentation du nombre des conducteurs de décharge et par une dislocation convenable. Les résultats des calculs exécutés pour une dislocation symétrique des conducteurs de décharge sur une surface cylindrique sont présentés dans la figure 6. Dans l'installation projetée qui prévoit en partie 7 et en partie 9 conducteurs de décharge (en moyenne 8 conducteurs), la tension induite sera d'environ 1200 V. Ce calcul fut vérifié expérimentalement sur un modèle de la cabine (réduction 1 : 2) en appliquant un courant d'une rigidité connue et par la mesure de la tension causant un choc électrique qu'un homme pourrait subir. Le résultat, réduit à la rigidité de 10 kA/ $\mu$ s acceptée antérieurement et aux dimensions du gabarit d'un homme assis de 130 cm, était d'environ 830 V.

La divergence des résultats du calcul et des mesures n'est pas seulement justifiée par l'inexactitude de mesure et de l'exécution du modèle de la cabine, mais aussi par l'acceptation de conditions sévères pour le circuit équivalent. Pourtant, même en acceptant cette valeur plus sévère, pour  $U_{EM} = iR_c = 1200$  V, on obtiendra pour des temps de durée de la

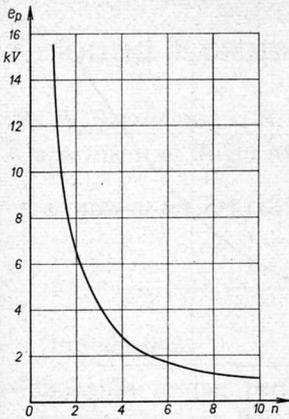


Fig. 6 La tension causant un choc électrique en fonction du nombre des conducteurs de décharge

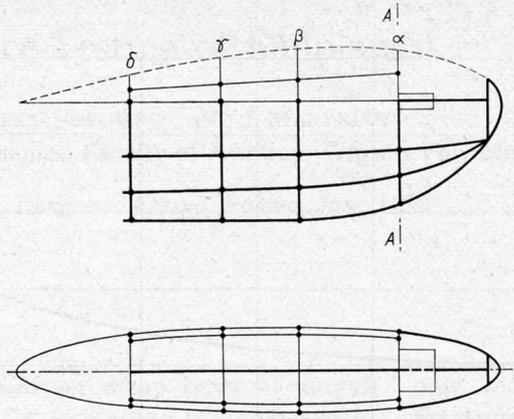


Fig. 7 Les conducteurs de décharge dans l'entourage de la cabine

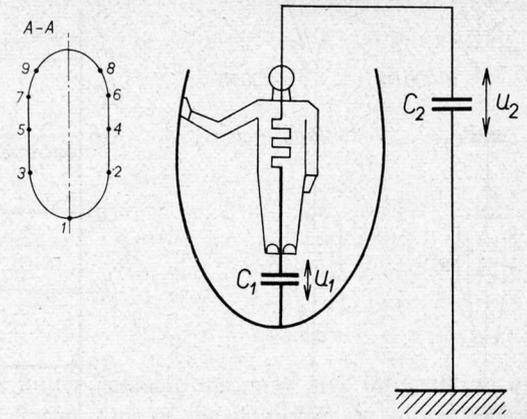


Fig. 8 Le circuit équivalent dans lequel se produisent les surtensions électrostatiques, dues à l'électricité atmosphérique

surtension  $t = 10 \mu s$  des conditions de dépassement des seuils d'excitabilité

$$U_I = 0,011 R_c = 1200 \text{ V}$$

$$U_{II} = 2,004 R_c = 1200 \text{ V}$$

Le seuil II d'excitabilité ne serait pas dépassé dans le cas de la résistance du corps  $R_c \geq 0,6 \text{ k}\Omega$ ; le seuil I, par contre, ne serait pas dépassé dans le cas de la résistance du corps  $R_c \geq 111 \text{ k}\Omega$ . Vu que la résistance du corps humain varie en général entre des limites de  $R_c = 3 - 50 \text{ k}\Omega$ , on peut constater que dans une cabine écranée de la manière représentée dans la figure 7, le seuil I de l'excitabilité peut être dépassé pendant le passage du courant de foudre; pourtant, le dépassement du seuil II d'excitabilité n'est pas probable. Ce fait prouve la possibilité que des contractions sensibles et irritantes prennent naissance dans les muscles plus susceptibles; cependant les muscles importants des bras, des pieds et du torse ne subiront pas de contraction.

*Surtensions induites d'origine électrostatique*

Dans le cas où une haute tension par rapport à la terre apparaît sur la surface du planeur, une tension surgit à l'intérieur de la cabine entre l'homme qui n'a pas de connexion métallique avec la surface du planeur et la cabine. Cette tension est causée par l'induction électrostatique de la charge. La valeur de cette tension dépend de la relation des capacités  $C_1$  entre l'homme et la surface du planeur et de la capacité  $C_2$  entre l'homme et la terre, puisque la tension du planeur envers la terre  $U$  est divisée en deux parties, la tension entre l'homme et la surface du planeur  $U_1$  (tension causant un choc électrique) et la tension de l'homme envers la terre  $U_2$ . La répartition de ces tensions est en relation inverse avec les capacités correspondantes.

Afin de réduire la tension causant un choc électrique  $U_1$  et ayant accepté une valeur probable de la tension entre le planeur et la terre  $U$ , il faut tendre à augmenter la capacité de l'homme envers le planeur ou à réduire sa capacité par rapport à la terre. La méthode la plus efficace pour obtenir ces conditions est l'écranisation de la cabine par des surfaces conductives.

Dans le cas de l'apparition de surtensions causées par l'électricité atmosphérique statique, elles peuvent être suivies par un passage du courant par le corps humain quand l'homme touche à un élément métallique du planeur. La capacité  $C_1$  sur laquelle existait une tension  $U_1$  est alors

déchargée par la résistance du corps  $R_c$ . Pour ce cas le circuit équivalent de distribution du courant est présenté dans la figure 8.

La tension du seuil I d'excitabilité déterminée de ce circuit sera

$$U_{II} = \frac{0,27}{C_1} + 0,001 R_c.$$

Le diagramme de cette relation, en pratique ne dépendant pas de  $R_c$ , est présenté par la figure 9. Pour des valeurs de la capacité  $C_1$  (de l'ordre de 100-500 pF) mesurées sous des conditions pratiques, les tensions admissibles du point de vue du seuil I d'excitabilité atteignent une valeur jusqu'à quelques kilovolts. Ce fait est causé par une basse valeur de charge induite sur la surface du planeur. En acceptant une influence négligeable de la résistance du corps et pour  $C_1 \gg C_2$ , on obtiendra une relation entre la tension du planeur par rapport à la terre  $U$  et la capacité de l'homme par rapport à la terre, admissible du point de vue du seuil I d'excitabilité

$$C_2 \leq \frac{0,27}{U}$$

et pour l'accepté  $U = 500\,000 \text{ V}$   $C_2 \leq 0,54 \text{ pF}$ .

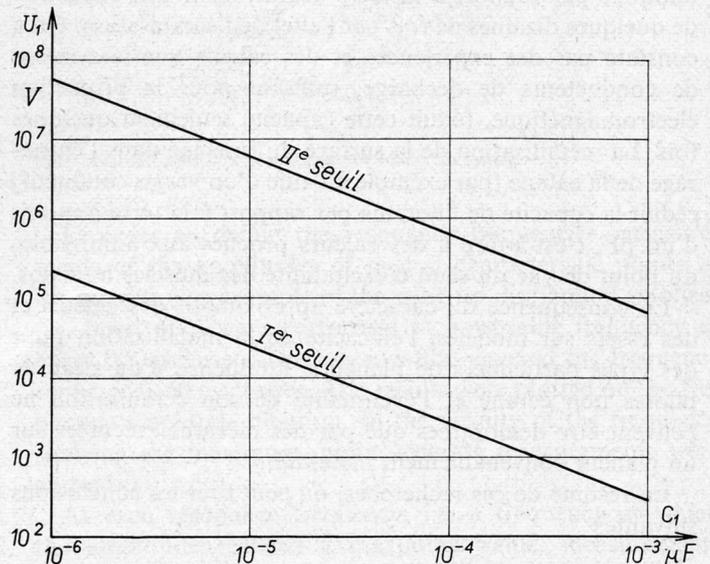


Fig. 9 La valeur de surtension électrostatique en fonction de la capacité de l'homme par rapport à la cabine

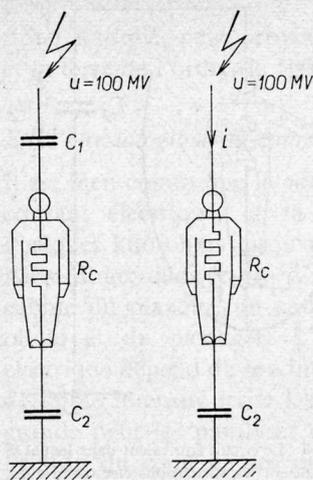


Fig. 10 Les surtensions électrostatiques dues au coup de foudre

Un circuit équivalent, un peu différent de la distribution du courant, se produit lors d'une tension induite par une décharge préliminaire de la foudre qui se rapproche au planeur (cf. fig. 10). Pour un accroissement uniforme de la tension  $U$  pendant un temps du développement de la décharge  $t_w$  le courant sera

$$i = \frac{U}{t_w} \cdot C_2.$$

Alors, en acceptant que le seuil  $I$  d'excitabilité ne devrait être dépassé, il faudrait que ce soit

$$C_2 \leq \frac{20 + t_w}{U}.$$

Pour la valeur acceptée de  $U = 100\,000\,000$  V et un temps  $t_w$  de l'ordre de millisecondes, la capacité admissible de l'homme par rapport à la terre est de l'ordre de dixièmes de 1 pF (cf. fig. 11).

La capacité de l'homme par rapport à la terre dans un planeur complètement non écrané est d'environ 18 pF (en remplaçant l'homme par un ellipsoïde rotatoire de dimensions convenables). Des conditions d'écranisation contre les surtensions électrostatiques il résulte que la capacité de l'homme par rapport à la terre devrait subir une réduction de quelques dizaines de fois par l'effet de l'écranisation. On a constaté par des expériences et des calculs que le système de conducteurs de décharge, suffisant pour la protection électromagnétique, réduit cette capacité seulement quelques fois. La métallisation de la surface du fuselage dans l'entourage de la cabine (par exemple à l'aide d'un vernis conducteur) réduit la capacité de l'homme par rapport à la terre à moins d'un pF, c'est-à-dire à des valeurs proches aux admissibles du point de vue du seuil d'excitabilité des muscles humains.

En conséquence du caractère approximatif des calculs et des essais sur modèles, l'efficacité de la métallisation pour des types particuliers de planeurs, l'influence d'un siège de pilotes non écrané et l'éventualité de son écranisation ne peuvent être démontrées que par des mesures exécutées sur un planeur convenablement métallisé.

En résumé de ces recherches, on peut tirer les conclusions suivantes:

1. Il est possible de réaliser d'une manière simple une protection du planeur et de son personnel contre les effets

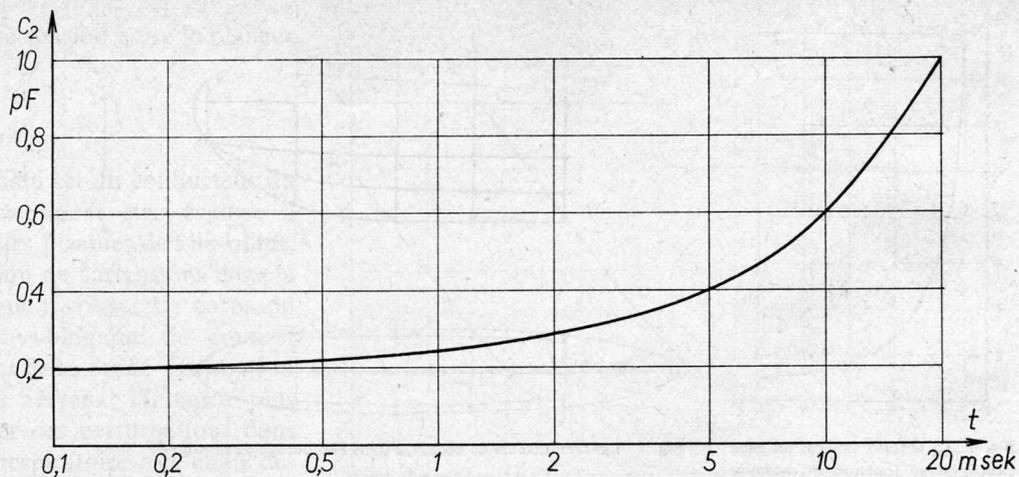


Fig. 11 La capacité maximale de l'homme par rapport à la terre en fonction du temps du développement de la décharge

nuisibles des décharges de foudre et de l'électricité atmosphérique. Un exemple de la localisation des paratonnerres et des conducteurs de décharge sur un planeur du type Bocian est montré dans la figure 12. Le poids des éléments métalliques supplémentaires installés pour la protection du planeur serait d'environ 10 kg.

2. Il n'est pas probable qu'une foudre frappe les parties du planeur non protégées par des paratonnerres placés sur des éléments saillants du planeur; donc, après l'installation des paratonnerres et des conducteurs de décharge un coup de foudre ne menace pas de détruire le planeur.
3. L'installation de protection élimine l'apparition de contractions des muscles pendant des vols dans des nuages d'orage et de la perte, par cause physiologique pendant un coup de foudre, de la capacité de gouverner le planeur.
4. L'efficacité de l'écranisation du planeur contre les surtensions électromagnétiques dépend fortement du nombre des conducteurs de décharge, et le danger menaçant le pilote est directement influencé par la résistance du corps de celui-ci.

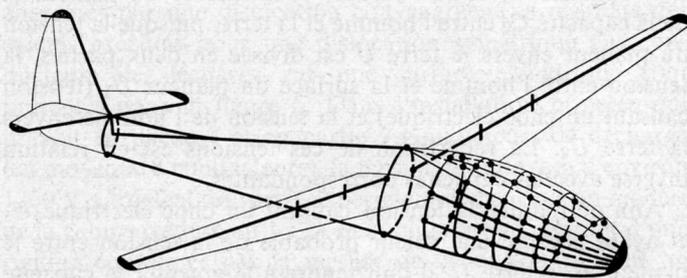


Fig. 12 Projet de localisation des paratonnerres et des conducteurs de décharge sur un planeur du type Bocian

5. La capacité du pilote par rapport à la terre a une influence directe sur la menace par les surtensions électrostatiques; c'est pourquoi il en résulte la nécessité d'une protection contre ces surtensions par une métallisation de la surface du fuselage.