



CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

imprimé le 25 septembre 1999



ASSOCIATION NATIONALE SCIENCES TECHNIQUES JEUNESSE

## *S e c t e u r   E S P A C E*

16 Place Jacques Brel - 91130 RIS ORANGIS

Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43

E-Mail : [espace@anstj.mime.univ-paris8.fr](mailto:espace@anstj.mime.univ-paris8.fr)

Web: <http://anstj.mime.univ-paris8.fr>

Edition Octobre 1999

### **Les navettes spatiales en minifusées**

---

**Note technique ANSTJ**

# Les navettes spatiales

par C. Couvrechef

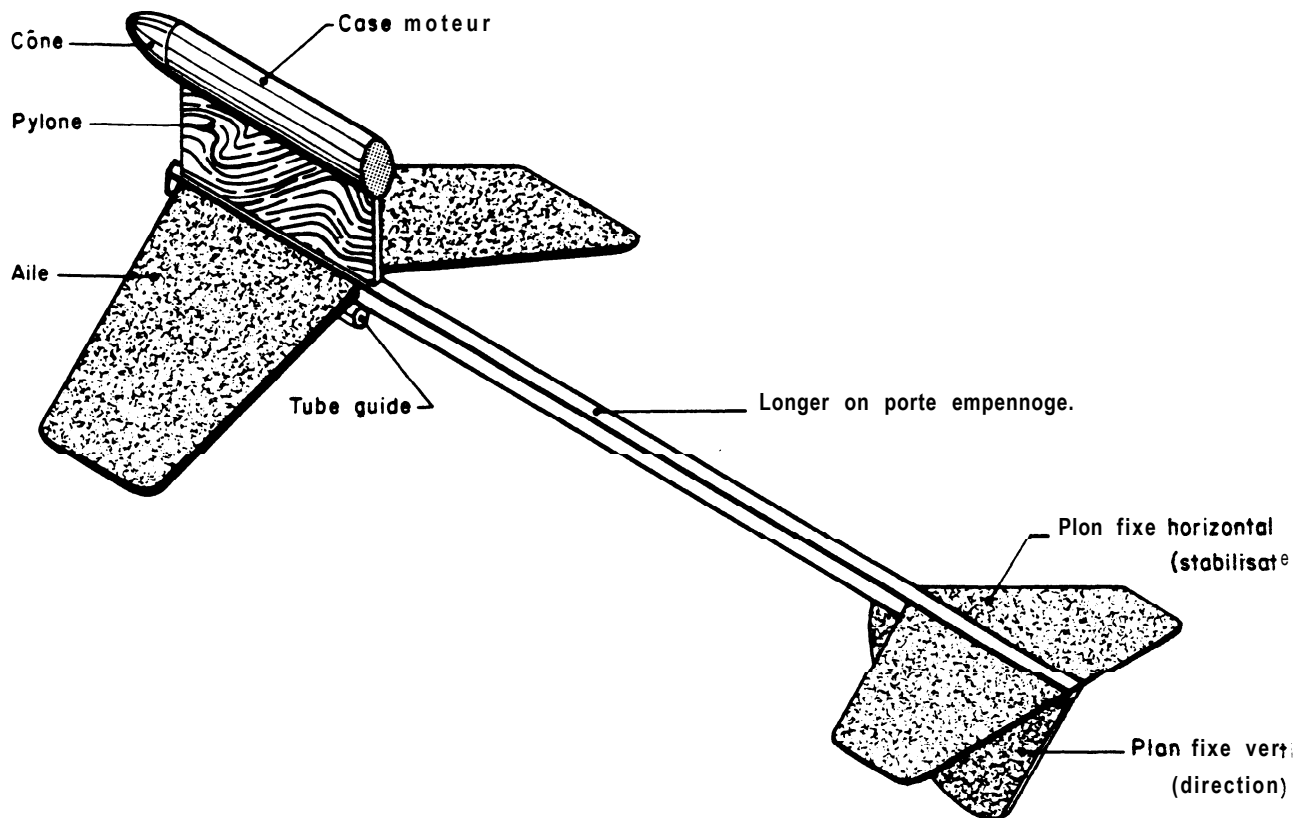
A partir des mêmes matériels, le constructeur de mini-fusées, déjà expérimenté, peut concevoir et réaliser une navette spatiale : planeur à fusée auxiliaire-avant, que nous présentons ici.

Ce modèle pose, en des termes plus précis, le problème de la stabilité qui est déterminant pour ces petits engins. Il ne s'agit plus seulement de garantir une trajectoire correcte durant la phase propulsée. Les ailes ont, en effet, un rôle d'autant plus important qu'elles doivent assurer la seconde partie de l'expérience "planeur".

Le planeur offre aussi la perspective d'une recherche de finition plus poussée.

De telles expériences permettront à ceux qui auront largement passé en revue les multiples ressources des activités mini-fusées d'aller plus loin ...

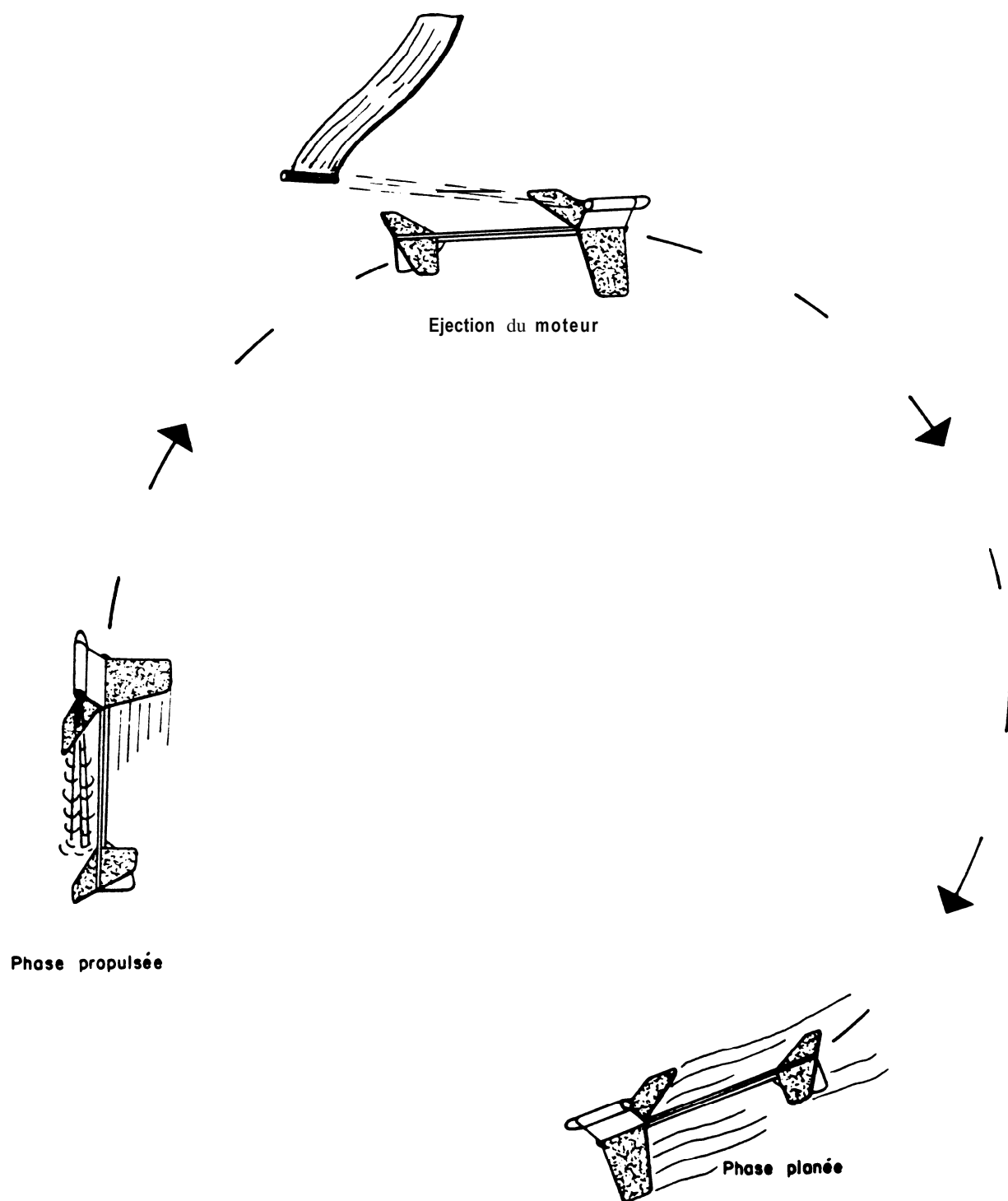
Le spectacle offert par le vol d'un planeur, réalisé avec le plus grand soin, ne constituera-t-il pas la meilleure des récompenses pour le jeune technicien ? Mais, précisément, sur le plan technique, comment peut fonctionner un tel engin ?

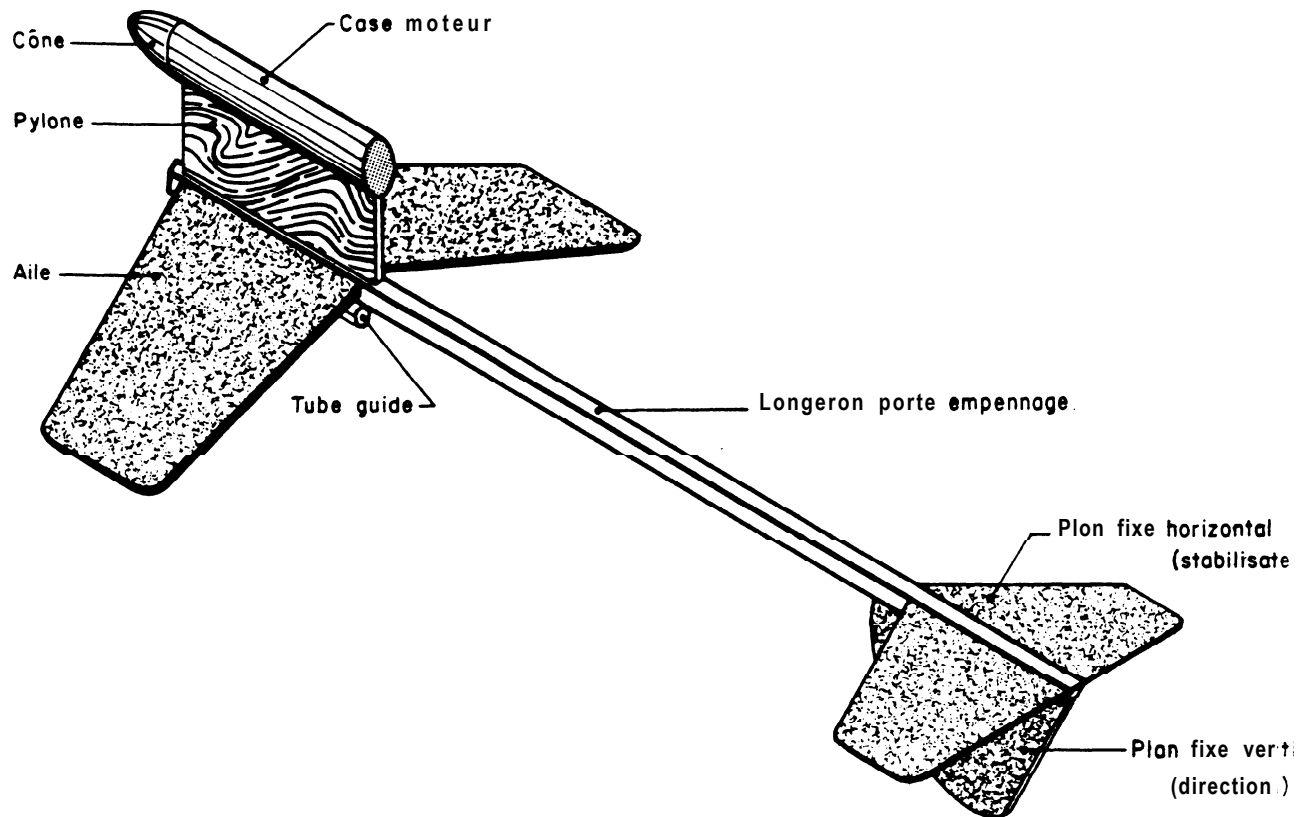


La navette mini-fusée utilise la propulsion par fusée comme **moyen de " lancer"**.

Elle s'élèvera verticalement sans utiliser ses surfaces **portantes**. L'entrée en phase de récupération, correspondant à la phase planée, devra survenir sans à-coup après l'éjection du moteur.

La conception de ce modèle doit ainsi allier les contraintes de la fusée avec celles inhérentes au planeur, d'où de nombreuses modifications aux principes admis pour les mini-fusées ordinaires,

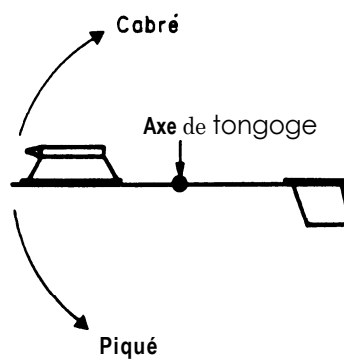
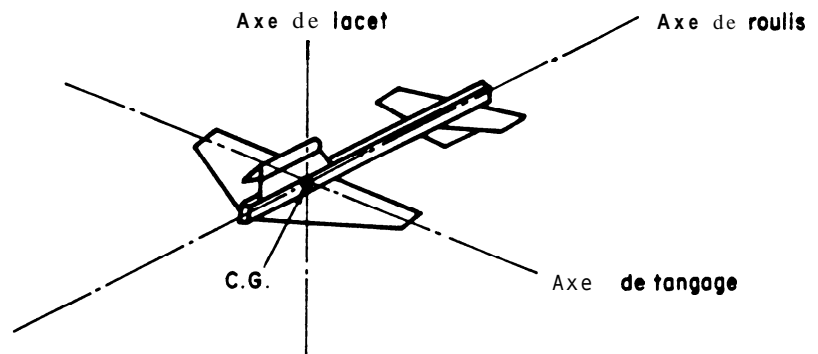




La navette mini-fusée utilise la propulsion par fusée comme moyen de "lancer".

Elle s'élèvera verticalement sans utiliser ses surfaces portantes. L'entrée en phase de récupération, correspondant à la phase planée, devra survenir sans à-coup après l'éjection du moteur.

La conception de ce modèle doit ainsi allier les contraintes de la fusée avec celles inhérentes au planeur, d'où de nombreuses modifications aux principes admis pour les mini-fusées ordinaires,



## I - DEFINITION DES AXES DE ROTATION

Trois axes sont définis autour desquels le **vecteur peut tourner**. Leur intersection est le centre de gravité.

Toute évolution rotative du planeur se **ramène** à une composition de mouvements autour de ces **3** axes.

Une **rotation** positive (dans le sens trigonométrique), autour de l'axe de tangage, se nomme "**piqué**". Si elle est négative, elle se nomme "**cabré**".

## **II - LE VOL EN PHASE PROPULSEE**

### **1 - Forces aajssantes**

Ce sont :

- le poids suivant la verticale,
- la poussée du moteur,
- la portance,
- la traînée.

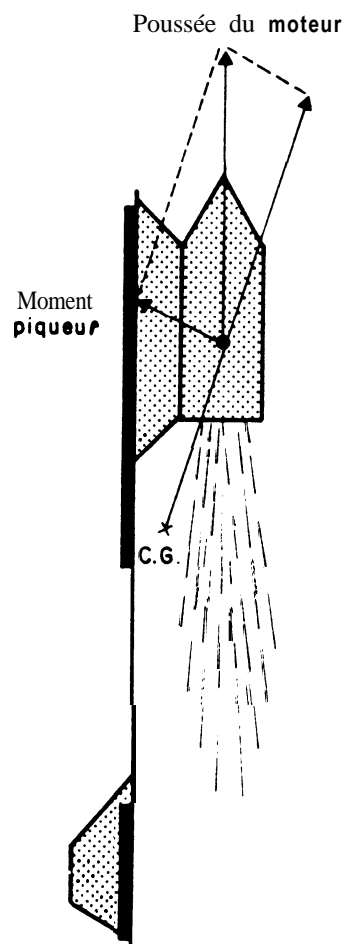
### **2 - Stabilité lonaitudinale**

Durant la phase propulsée, le vecteur doit posséder une bonne stabilité longitudinale lui permettant de monter verticalement.

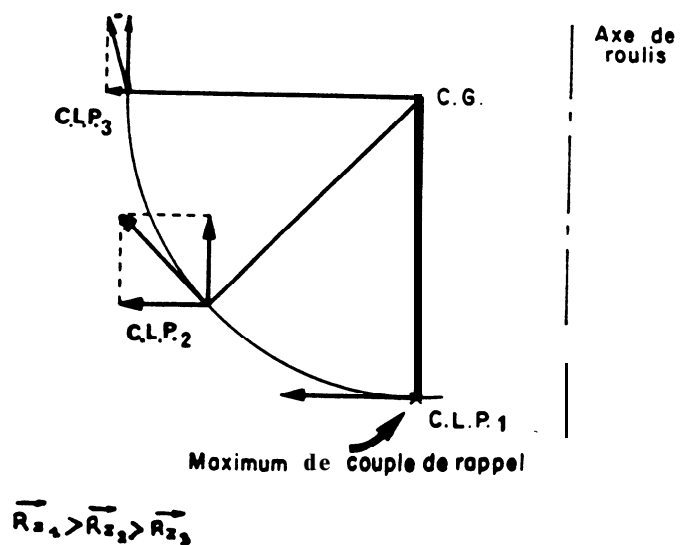
Pour obtenir l'effet voulu du couple de rappel  $\vec{R}_3$  de portance, la marge statique (distance centre de gravité - centre de poussée) doit être de 3/4 de calibre (diamètre) environ. Cette caractéristique est simple à obtenir, puisque le moteur est placé vers le haut du vecteur.

Par contre, l'assymétrie de la navette nuit grandement à la stabilité longitudinale et provoque un déplacement du centre de poussée suivant l'incidence; le couple de rappel est donc variable suivant l'incidence prise.

A cela, vient s'ajouter le couple dû à la force de poussée qui crée un sensible moment "piqueur".



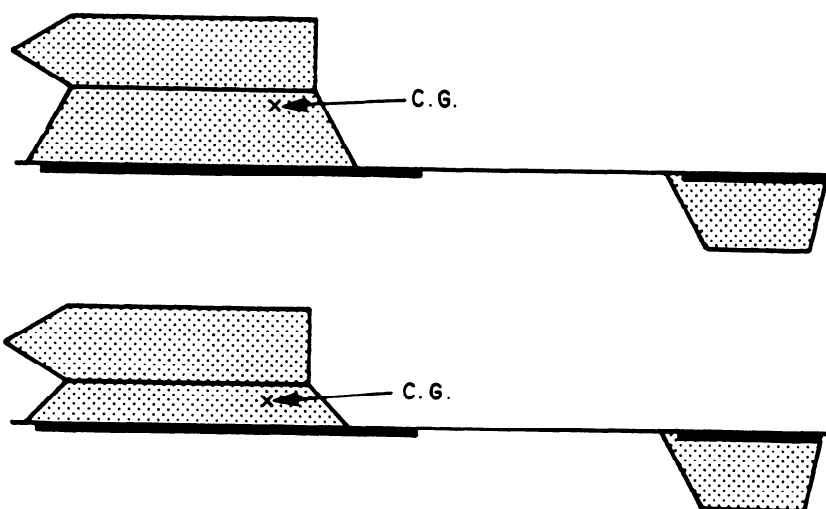
Afin d'obtenir une efficacité maximum, l'axe centre de gravité - centre latéral de poussée doit être parallèle au sens de déplacement, c'est à dire à l'axe de roulis. C'est en effet à cette condition qu'est obtenu l'effet optimum du couple de rappel.





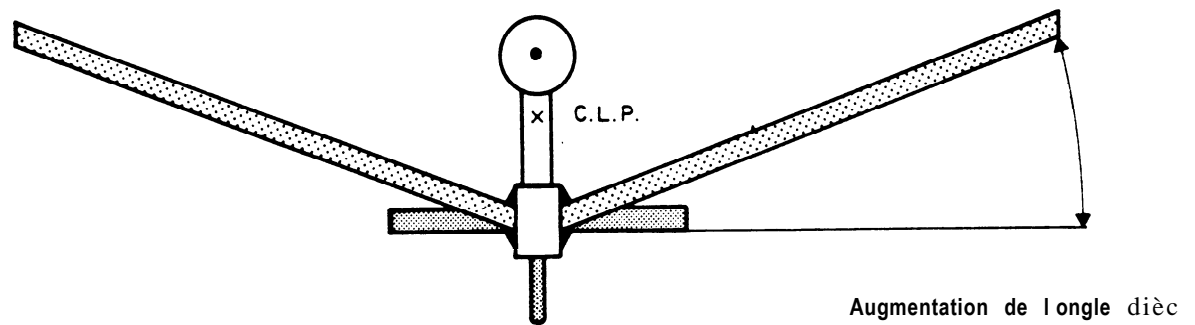
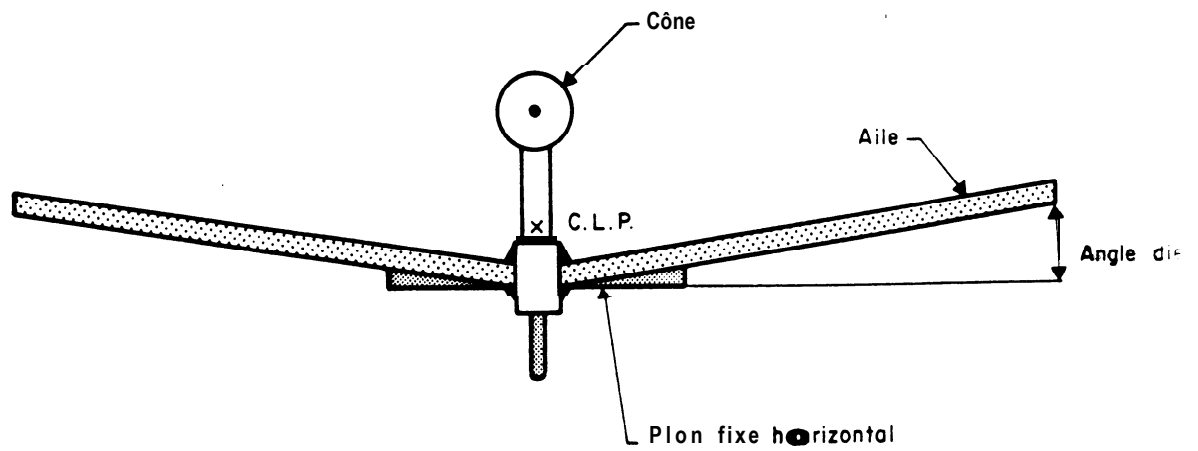
Comme le centre de gravité se trouve près du moteur, élément le plus lourd du planeur, tandis que le centre latéral de poussée est proche des ailes, parties les plus portantes, il faut donc :

- abaisser le centre de gravité en ayant une hauteur de pylône pas trop importante.

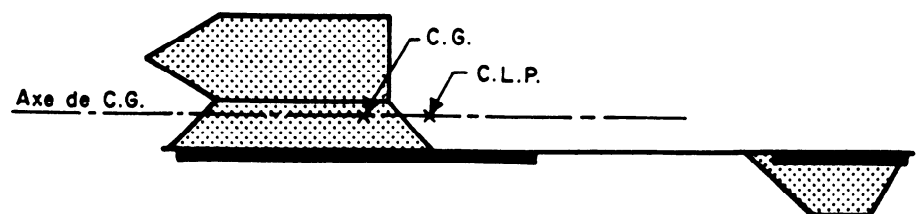


Abaissier le C.G. . . .

- élever le centre latéral de poussée en donnant un angle dièdre côté moteur aux ailes, qui ne doit pas, toutefois, être trop important afin d'éviter d'affaiblir les structures.



... Elever le C.L.P. ...



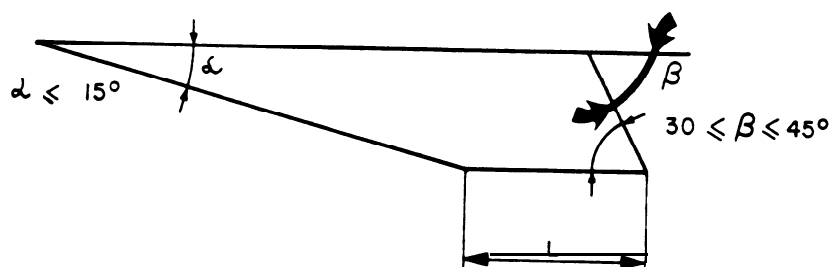
... Pour que l'axe C.G. - C.L.P. soit sur l'axe de roulis.

### 3 - Le pylône

Le pylône doit faire corps avec le longeron porte-empennage. Il sera de même matière et épaisseur que celui-ci.

La meilleure hauteur pour le pylône de la case moteur est environ 12 mm, des pylônes plus élevés étant moins résistants et produisant un moment "piqueur" plus important lors de la phase "propulsée". Des pylônes moins hauts conduisent généralement à endommager le longeron porte-empennage et l'empennage lui-même du fait des gaz d'échappement.

Il est intéressant d'avoir un angle de pylône à l'avant très petit (environ une quinzaine de degrés), mais à l'arrière, il devra être augmenté afin que le bord de fuite ne soit pas endommagé par le jet du moteur. Des angles compris entre 30 et 45 degrés sont admissibles.



Toutefois, il faudra veiller à ce que la surface servant à la liaison pylône - longeron porte-empennage soit suffisante pour effectuer un collage qui devra résister aux diverses forces produites.

### III - L EJECTION DU MOTEUR

Après combustion de la poudre, la navette poursuit son vol en phase balistique.

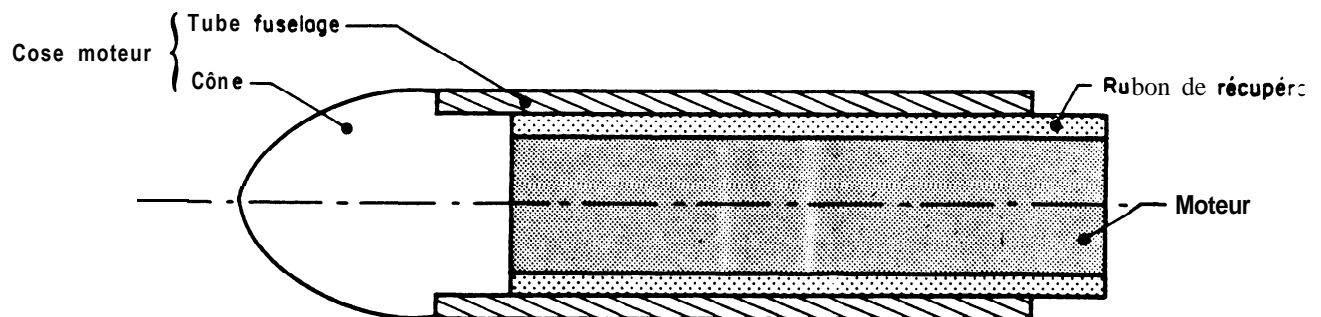
A culmination, le moteur ne doit pas tomber en chute libre après son éjection de la navette.

Aussi, la case-moteur est construite dans un tube-fuselage d'un diamètre légèrement supérieur à celui du moteur.

Cette différence de diamètre est rattrapée à l'aide d'un ruban de 15 à 30 cm de longueur, lié à l'enveloppe par collage, puis enroulé autour de celle-ci.

Lors de l'éjection, cette banderole se déroulera d'elle même ralentissant ainsi la chute du propulseur.

Quel que soit le *cas*, il convient de calculer la longueur de la case-moteur de telle manière qu'une fois le cône monté, le moteur qui a été mis en place et qui touche le cône, dépasse encore du côté tuyère de 2 à 3 mm.



Après éjection du moteur à culmination, survient l'entrée dans la phase de récupération : le " plané".

#### IV - LE VOL EN PHASE PLANEE

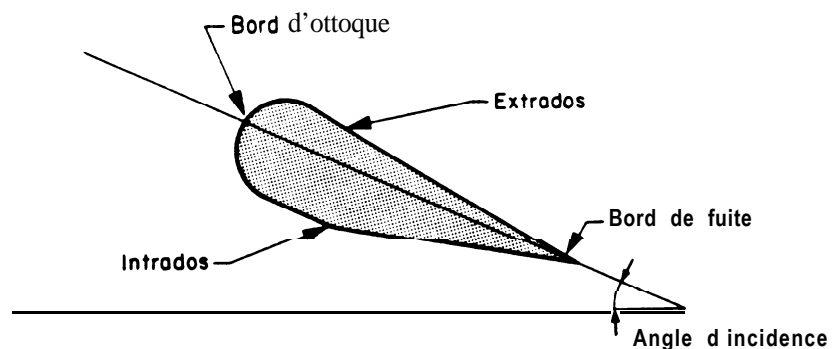
##### 1 - Forces aérodynamiques

Durant la phase planée, la détermination et l'équilibre des forces sont tout autre que ceux étudiés dans le cas de la phase propulsée.

Effectivement, les forces aérodynamiques deviennent prépondérantes, la poussée ayant disparu.

Pour la navette, ces forces se caractérisent principalement par la portance et la stabilité.

La phase planée utilise la portance non plus uniquement comme élément de stabilité longitudinale, mais également comme facteur d'augmentation du temps de vol. La portance doit donc être maximum. Elle est assurée principalement par les ailes, de par leur forme et leur angle d'incidence par rapport au déplacement.



La stabilité devra être obtenue suivant les trois axes :

- l'axe de tangage : stabilité longitudinale,
- l'axe de roulis : stabilité latérale,
- l'axe de lacet : stabilité de route.

##### 2 - Portance de l'aile

La portance augmente avec l'angle d'incidence jusqu'à un angle limite où, l'écoulement de l'air devenant trop turbulent, le planeur décroche : il tombe comme une pierre.

Cet angle de décrochage se situe entre 15 et 20°.

La portance peut également être augmentée en réalisant un profil asymétrique qui force l'air à effectuer un trajet plus long sur l'extrados que sur l'intrados.

### 3 - Charge et surface alaires

La charge alaire est un facteur des plus importants pour obtenir un temps de vol maximum.

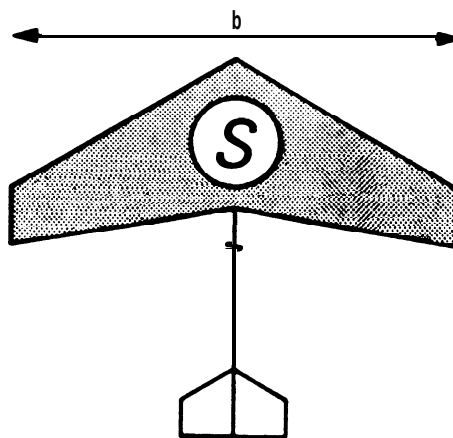
C'est le rapport du poids du planeur sur la surface des ailes (exprimé en  $\text{kg/m}^2$ ).

La portance étant proportionnelle à la surface portante, plus ce rapport sera faible, plus long sera le temps de vol. Il y a pourtant une limite qui est due à la traînée et à une vulnérabilité au gauchissement. Pour une navette, la moyenne est comprise entre  $0,83$  et  $1,46 \text{ kg/m}^2$  de charge alaire pour une surface comprise entre  $130$  et  $260 \text{ cm}^2$ .

Les allongements des navettes ne sont limités qu'à  $\lambda \leq 4,5$  ceci pour conserver tout de même une rigidité suffisante du vecteur.

#### ALLONGEMENT

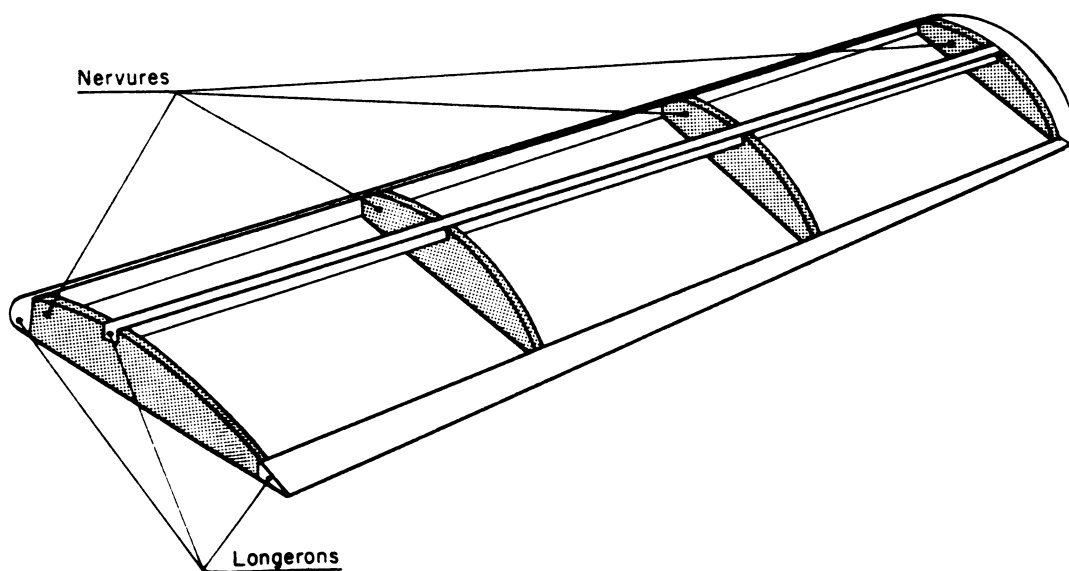
L'allongement est égal au rapport du carré de l'envergure ( $b^2$ ) sur la surface alaire.



#### 4 - Construction des ailes

Il y a deux possibilités de construction de la voilure :

- le type massif : constitué d'une feuille de balsa façonnée en profil aérodynamique avec du papier abrasif,
- le type composite : constitué d'une ossature de nervures et de longerons revêtue de papier de soie ou de papier traité.



Dans les modèles réduits d'avions, l'aile composite est presque exclusivement utilisée car elle permet un gain de poids considérable. Cependant cet avantage n'est pas aussi net dans la navette, car le gain de poids ne correspond, le plus souvent, qu'à quelques grammes. La différence de charge ailaire due à l'utilisation d'une aile massive ou d'une aile composite est généralement négligeable. Par contre, l'effort supplémentaire que représente la construction d'une aile composite n'est payant que devant des exigences extrêmement rigoureuses.

Et, donc, dans ce dernier cas, le constructeur devra choisir avec soin l'organisation des nervures et des longerons, sans quoi il risquera de dépasser le poids d'une aile massive.

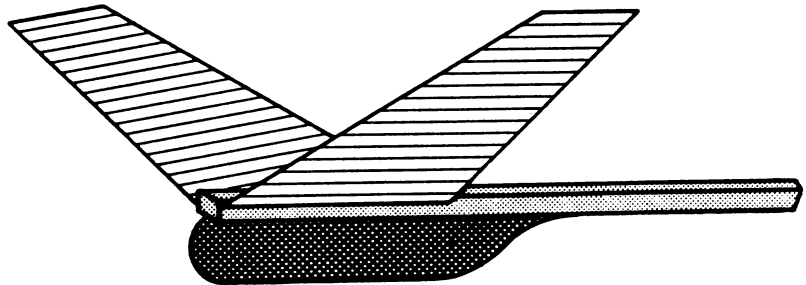
## 5 - Stabilité longitudinale (axe de tangage)

Elle est principalement assurée par le plan fixe horizontal qui doit avoir une surface comprise entre 30 et 40 % de la surface alaire.

Tout comme la voilure, il y a tout intérêt à concevoir celui-ci de type massif et ayant une forme aérodynamique. Ce plan pourra toutefois n'être constitué que d'une mince feuille de balsa.

Le plan fixe horizontal peut parfois être remplacé par un empennage dit en "V" ou "Papillon".

Il permet de diminuer la surface de la dérive, donne un bon plané mais casse plus facilement.

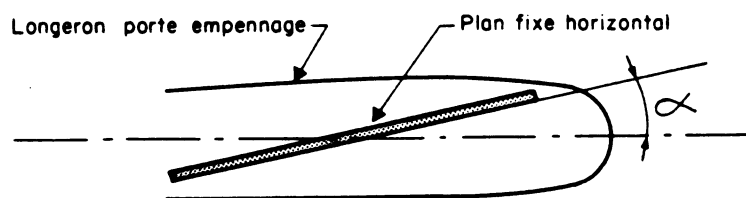


Lorsque l'aile ne présente pas de profil aérodynamique, une légère incidence négative à l'inverse du sens trigonométrique donnée au plan fixe horizontal, entraîne une meilleure stabilité longitudinale.

A cet effet, une cale de balsa est placée sous le bord de fuite du plan fixe, lors de son collage.

Ainsi, ce plan forme un léger angle avec l'axe du longeron porte-empennage.





Cet angle ne doit pas dépasser  $1^\circ$ .

L'inconvénient de ce procédé est de donner lieu le plus souvent à de mauvaises caractéristiques lors de la phase propulsée, et, en particulier, d'induire un moment "cabreur" non négligeable.

Celui-ci réduit notablement l'altitude et peut provoquer des boucles et même l'écrasement au sol.

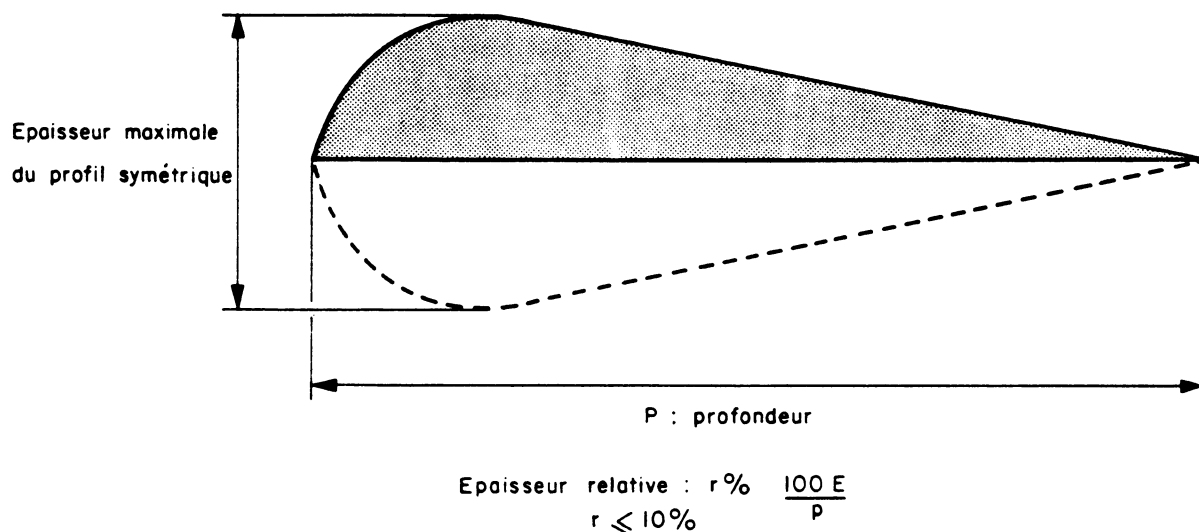
Il faut donc réaliser un hypothétique équilibre entre le moment "piqueur" (position du moteur) et le moment "cabreur" ( incidence du plan fixe horizontal).

Dans le cas d'une aile profilée aérodynamiquement, une stabilité longitudinale maximale est assurée.

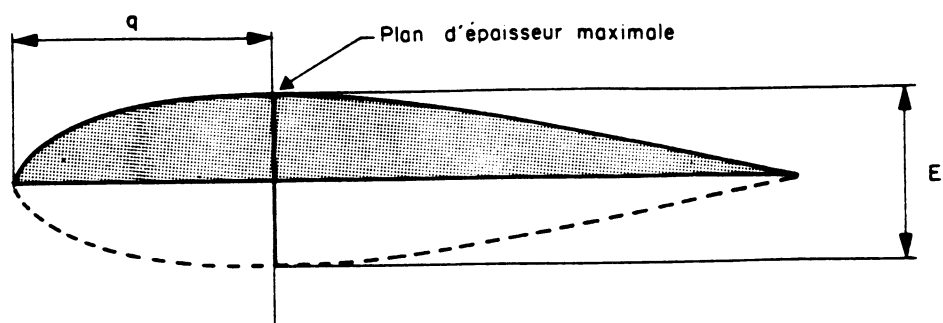
A ce propos, les profils minces restent les plus performants, de forme plan convexe et d'épaisseur relative ( $r$ ) inférieure ou égale à 10 %.

### EPAISSEUR RELATIVE :

Epaisseur maximale de l'aile sur la profondeur du profil



De plus, la valeur de l'épaisseur maximale doit se situer entre 25 % et 35 % de la profondeur (q) entre le bord d'attaque et le plan d'épaisseur maximale.



$$25\% \leq \frac{E}{q} \leq 35\%$$

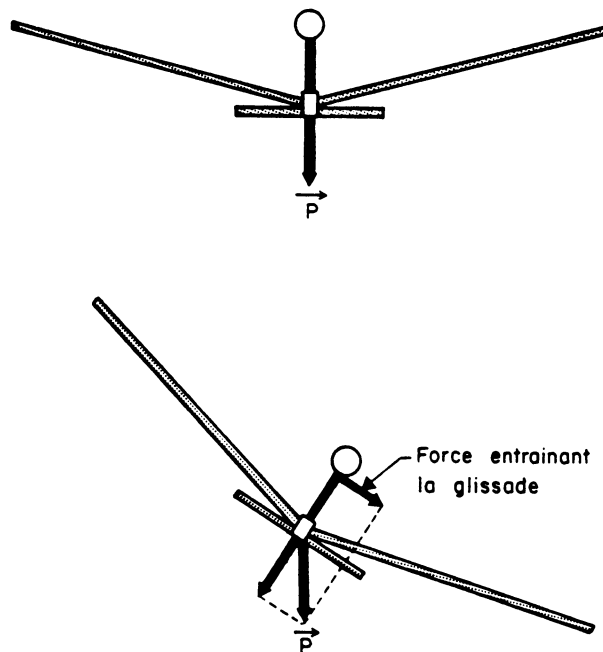
Le profil CLARK Y, décrit ci-après, est très satisfaisant mais il est possible d'en réaliser des plus complexes (pour une aile de profondeur différente de 100 mm, il suffit de dessiner le profil à une échelle différente).



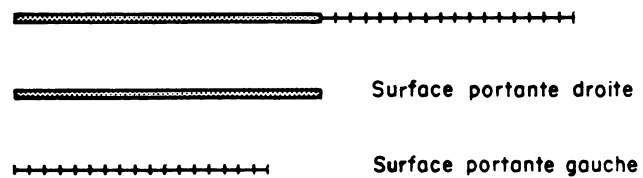
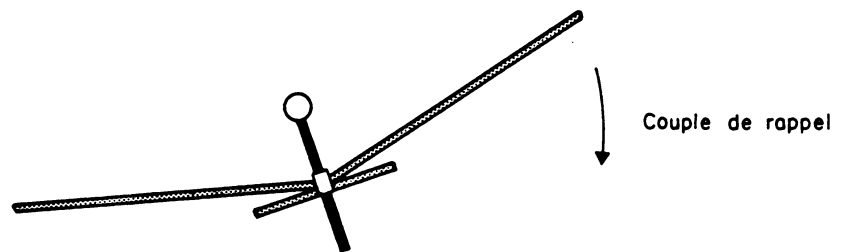
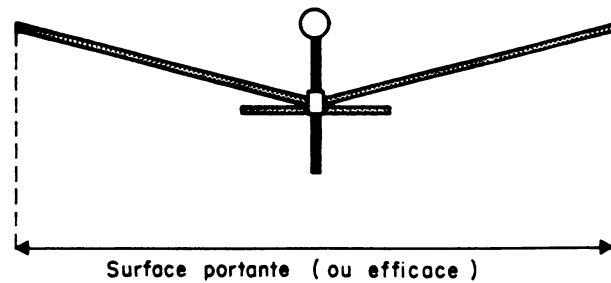
| X              | 0   | 1,25 | 2,5  | 5    | 7,5  | 10   | 15    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60   | 70   | 80   | 90   | 95   | 100  |
|----------------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Y <sub>1</sub> | 3,5 | 1,93 | 1,47 | 0,93 | 0,63 | 0,42 | 0,15  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Y <sub>2</sub> | 3,5 | 5,45 | 6,5  | 7,90 | 8,85 | 9,6  | 10,69 | 11,36 | 11,70 | 11,40 | 10,52 | 9,15 | 7,35 | 5,22 | 2,80 | 1,49 | 0,12 |

## 6 - Stabilité latérale (axe de roulis)

Lorsque la navette s'incline latéralement, le vecteur "poids" quitte le plan de symétrie, l'appareil est alors entraîné du côté où l'aile penche amorçant ainsi une glissade.

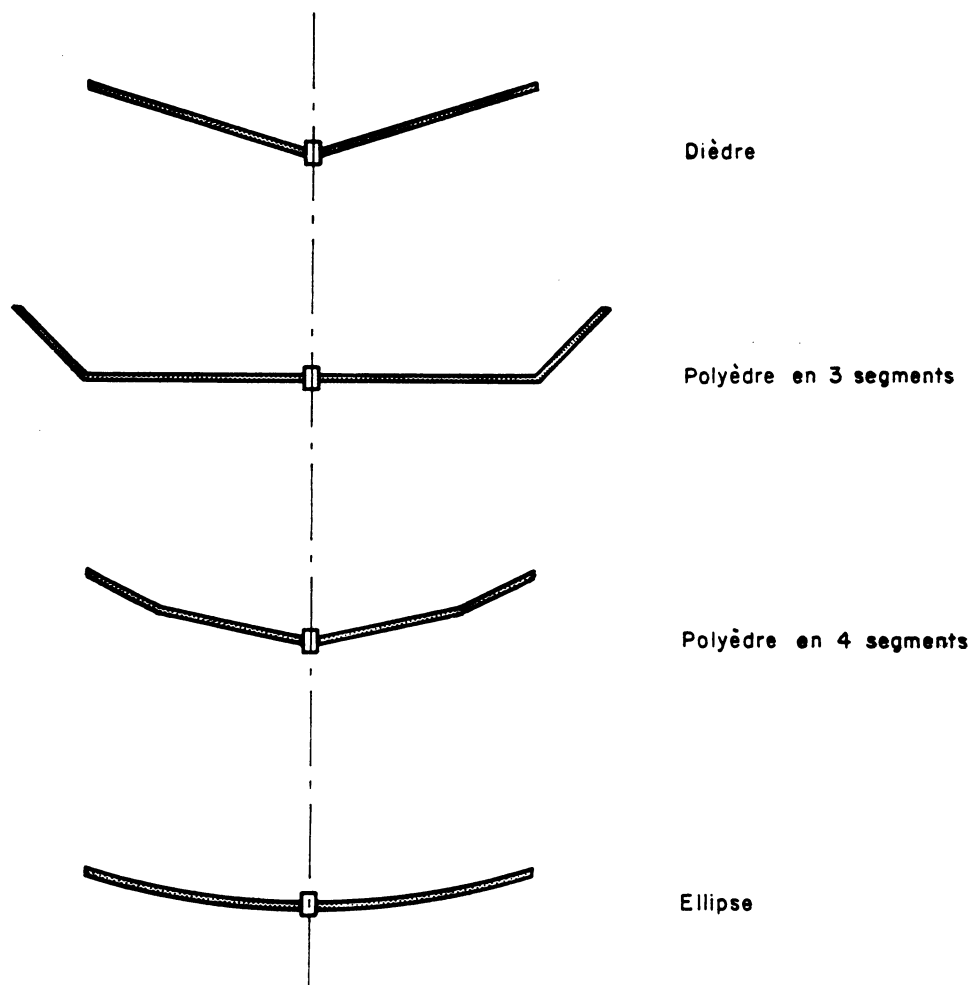


Une bonne stabilité latérale est obtenue en donnant du dièdre à l'aile. En effet, le dièdre augmente la surface portante ( ou surface efficace ) du côté du basculement, créant ainsi un couple de rappel, facteur de stabilité.



Mais ce couple de rappel va entraîner l'aile trop loin, d'où un couple inverse, et donc une oscillation du planeur autour de l'axe de roulis.

Pour remédier à cet inconvénient, il peut être bon de segmenter les ailes, c'est à dire de remplacer l'angle dièdre par l'angle polyèdre, la forme idéale étant l'ellipse.



Les ailes polyédriques posent toutefois des problèmes, lorsque le profil n'est pas suffisamment épais pour résister aux gauchissements qui sont provoqués par la poussée et les forces aérodynamiques.

En pratique, il est préférable de réaliser un polyèdre simple, car l'efficacité aérodynamique maximale est rapidement atteinte ( 2 à 4 côtés ).

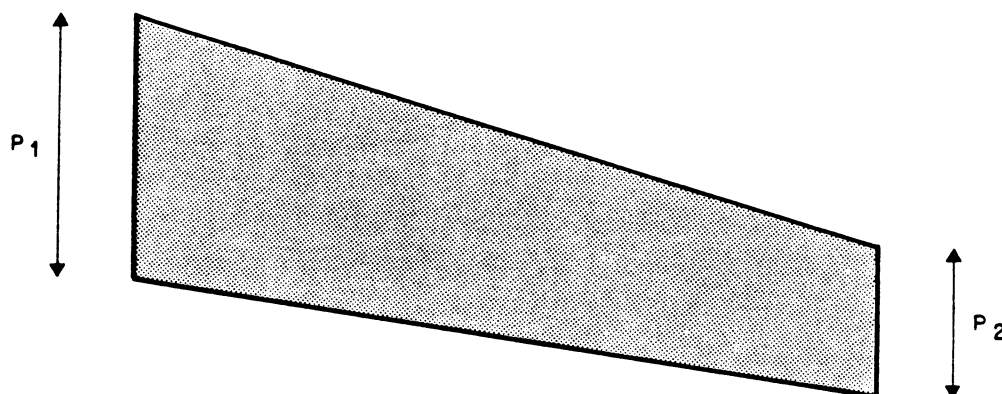
La vaste gamme des angles dièdres admissibles varie de 0 à 30 degrés, les meilleurs résultats étant obtenus entre 4 et 16 ° .

Dans le cas d'un plané sans vent, les angles de 4 à 8° sont aussi valables. Dans cette gamme, le dièdre augmente la stabilité latérale sans diminution notable de portance.

L'effilement doit être compris entre 0,3 et 0,6. Un effilement plus faible diminue la stabilité en roulis. En effet, la limite supérieure est fixée par la tenue mécanique de la structure.

### EFFILEMENT

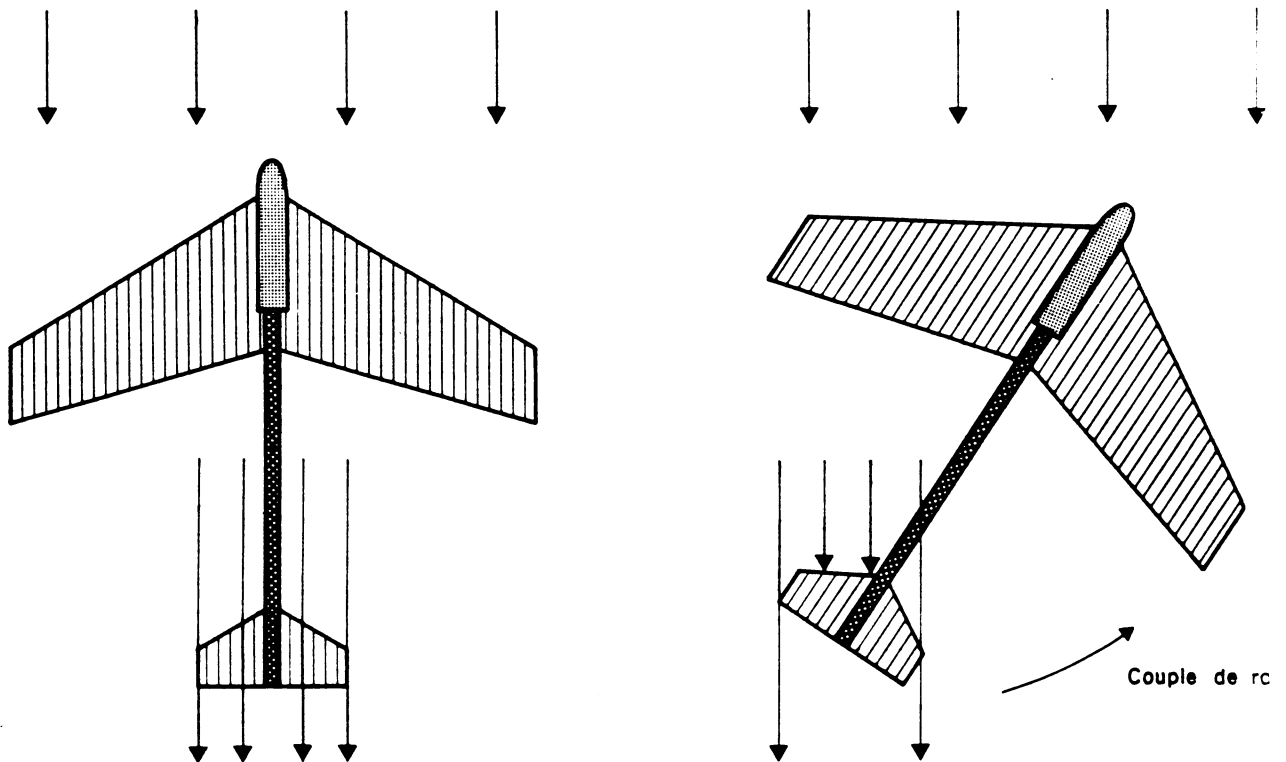
L'effilement est égal au rapport de la profondeur de l'extrémité de l'aile sur la profondeur de l'emplanture.



$$e = \frac{P_2}{P_1}$$

## 7 - Stabilité de route (axe de lacet)

Cette dernière est obtenue grâce à l'empennage vertical ou dérive dont la traînée, augmentant avec l'incidence, crée un couple de rappel. Sa surface se situe entre 8 et 15 % de la surface alaire.



L'épaisseur du fuselage et le dièdre des ailes contribuent également à cette stabilité.

La flèche des ailes, dans le cas d'un début de rotation, augmente la surface de l'aile extérieure à cette rotation, et donc sa traînée, d'où un couple de rappel.

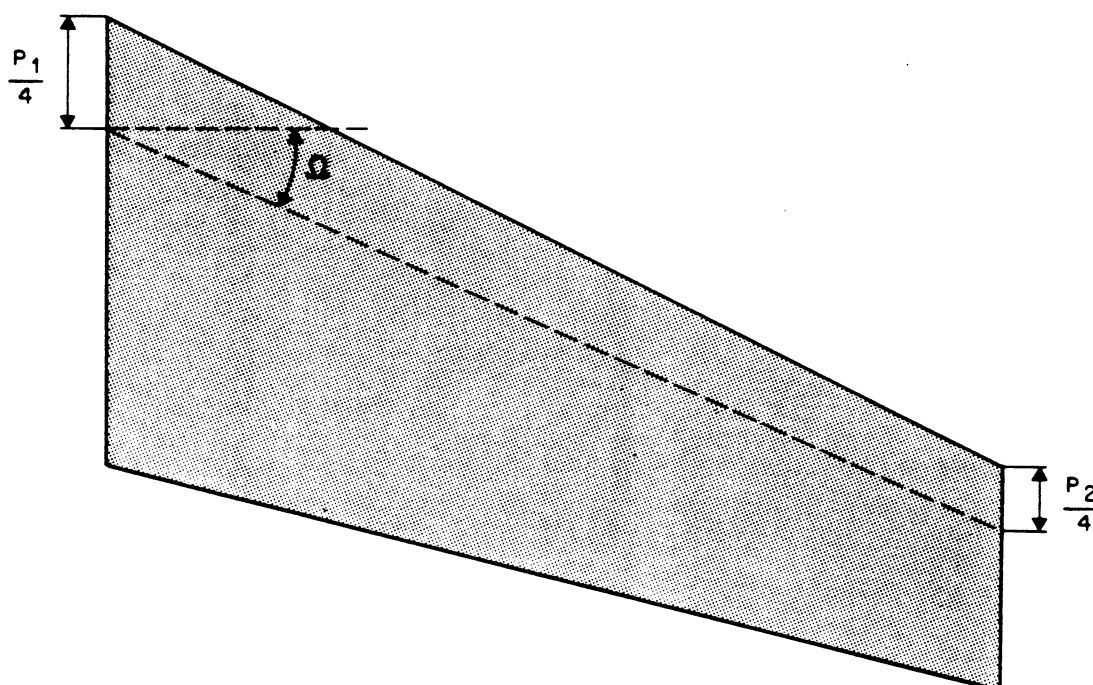
Cette flèche est située entre 15 et 55 degrés.

Un compromis judicieux entre les exigences structurales et aérodynamiques se trouve entre 40 et 45 degrés.



### FLECHE D'UNE AILE

La flèche est mesurée sur une ligne située au premier quart de la profondeur de l'aile en partant du bord d'attaque. Cet angle ( $\Omega$ ) est appelé flèche au quart de la profondeur.



### 8 - Vrille et roulis

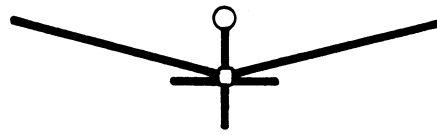
Un équilibre très délicat est à réaliser entre les stabilités latérales et de route.

Deux cas peuvent se présenter :

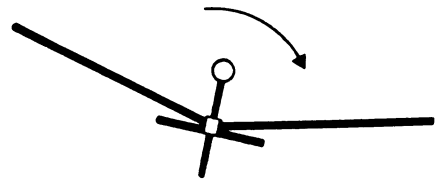
- la stabilité de route est trop importante par rapport à la stabilité latérale : l'appareil part en vrille,
- la stabilité latérale est prépondérante sur la stabilité de route : l'appareil a du roulis.

La vrille apparaît lorsque, la stabilité de route étant trop importante, la force sur l'aile extérieure au virage devient supérieure à celle de portance sur l'aile intérieure au virage.

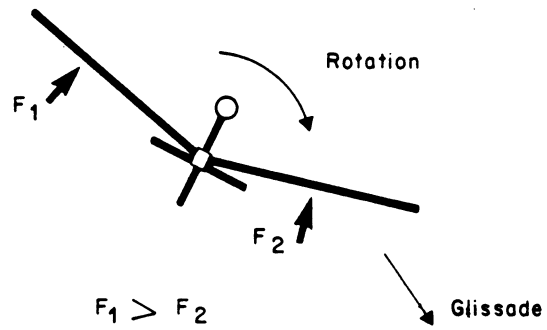
Le virage s'accroît alors jusqu'à ce que la navette bascule, décroche et chute verticalement en tournant.



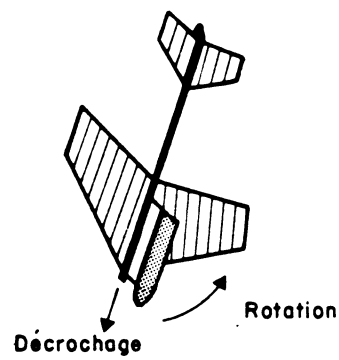
Vol normal



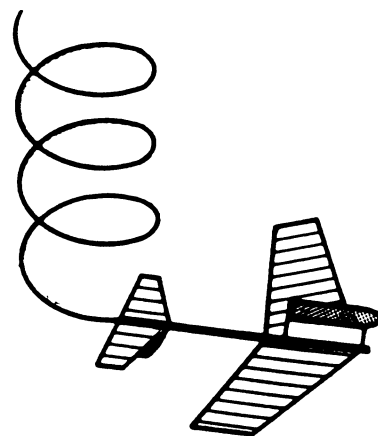
Virage forcé



Basculement et glissade



Décrochage

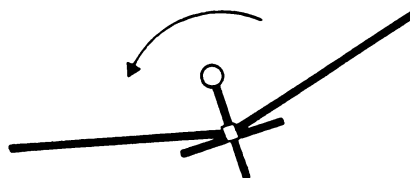


Vrille

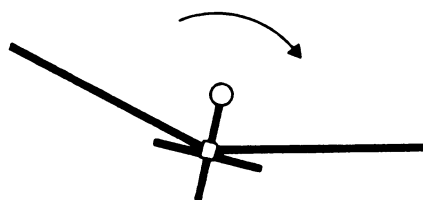
Par contre, lorsque la stabilité latérale domine la stabilité de route, aucune force importante ne vient s'opposer au couple de rappel latéral, ce qui crée de sensibles oscillations des ailes : le roulis.



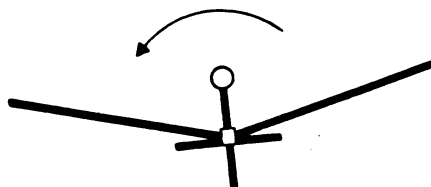
Vol normal



Virage fortuit



Redressement et basculement de l'autre côté



Redressement et basculement de l'autre côté

En résumé, le tableau ci-après présente les diverses manières d'assurer la stabilité de la navette.

| STABILITE<br>TROP FAIBLE | AXE     | CONSEQUENCES   | REMEDES   |
|--------------------------|---------|--|---|
| LONGITUDINALE            | tangage | <ul style="list-style-type: none"> <li>- boucles</li> <li>- piqué</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- plus grand plan fixe horizontal</li> <li>- légère incidence à ce plan fixe ( <math>\angle</math> 1%)</li> <li>- ailes profilées</li> <li>- longeron porte-empennage plus long</li> </ul> |
| LATERALE                 | roulis  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- glissade</li> <li>- vrille</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- angle dièdre plus grand</li> <li>- si nécessaire, diminuer la stabilité de route</li> </ul>  |
| DE ROUTE                 | lacet   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- direction de vol aléatoire</li> <li>- roulis</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- plus grande dérive</li> <li>- plus grande flèche des ailes</li> <li>- longeron porte empennage plus long</li> <li>- si nécessaire, diminuer la stabilité latérale</li> </ul>             |

## 9 - Le longeron porte empennage

Cet élément contribue à la stabilité s'il n'est pas trop court.

Une longueur exagérée augmentant le poids, un compromis doit être trouvé : entre 0,9 et 1,1 fois l'envergure.

Lors du choix du longeron porte empennage, le constructeur doit tenir compte des forces produites par le plan fixe horizontal et la dérive, ainsi que des accélérations rencontrées lors de la phase fusée.

En balsa, une section de 6 x 6 mm ou 6 x 12 mm convient pour la plupart des modèles.

Un longeron à section en "T", réalisé en balsa de 3 ou 1, 5 mm, présente souvent une plus grande résistance tout en étant moins lourd qu'un longeron massif.

Il est également possible de le confectionner à l'aide d'une feuille de balsa épais, ou de réaliser un fuselage de type composite (cette technique conduisant cependant à alourdir la navette).

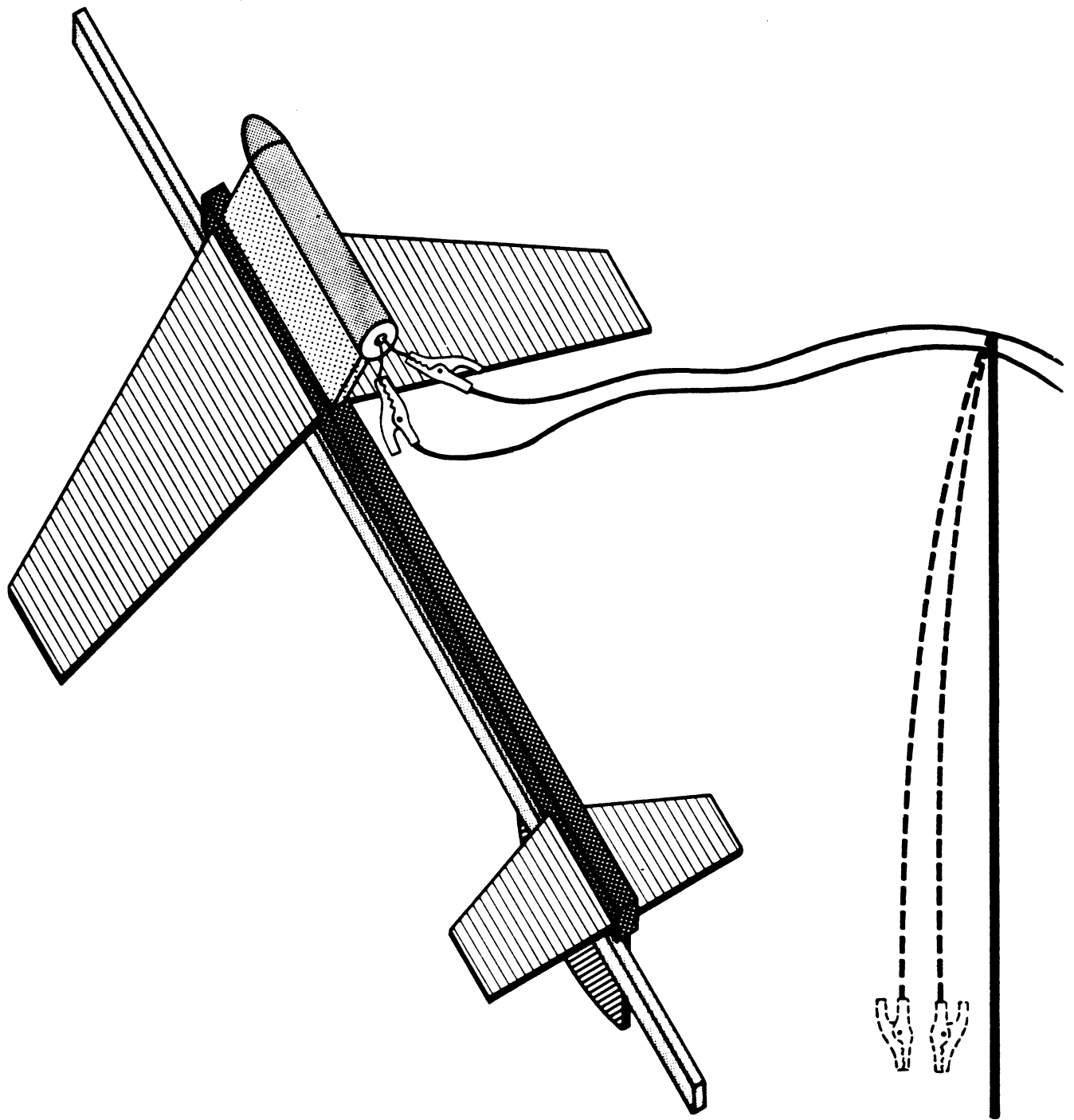
## V - LE LANCEMENT

Revenons à la toute première phase du vol pour que les consignes de sécurité soient, encore plus qu'à l'habitude, respectées.

La navette peut en effet se mettre à l'horizontale en sortie de rampe.

D'autre part, pour éviter de détruire l'empennage par les pinces crocodiles de mise à feu, il suffit de fixer les fils sur de petites potences situées à environ 70 à 100 mm de la tige de lancement.

Lors de la mise à feu, les pinces se rabattent alors sur leur tige de fixation au lieu de retomber verticalement le long de la tige de lancement.



En conclusion, sont présentés ci-après quelques exemples de planeurs réalisés qui vous aideront à définir et réaliser votre navette spatiale.

