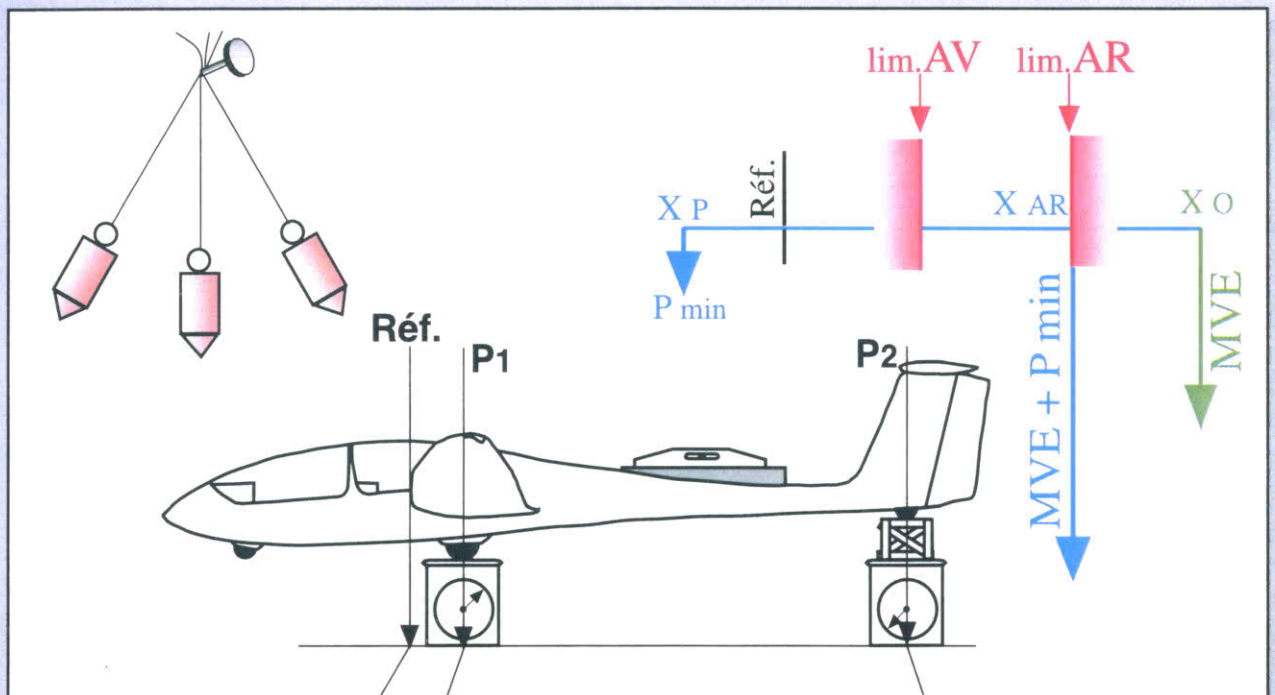


CHARGEMENT & CENTRAGE



DU PLANEUR



CHARGEMENT ET CENTRAGE DU PLANEUR

Pendant longtemps de nombreux vélivoles sont restés persuadés que les problèmes de chargement et de centrage ne concernaient que les pilotes "hors gabarit", ceux qui sont trop gros pour monter dans certains planeurs ou ceux qui, trop fluets, sont condamnés à charroyer des paquetages garnis de gueuses et de coussins plombés. Pour les pilotes "normaux", les constructeurs avaient sans doute bien fait leur travail et les problèmes de masse et de centrage étaient donc résolus par construction !

Ainsi les phénomènes liés aux dépassements des limites de chargement ou à l'approche des centrages extrêmes, peu ou mal connus, étaient soit négligés, soit dramatiquement amplifiés.

Quelque part encore, quelques légendes tenaces hantent l'esprit de quelques vélivoles...

Aujourd'hui, l'utilisation de planeurs abondamment ballastables, le souci d'optimiser la charge alaire, la recherche du centrage le mieux adapté aux souhaits du pilote sont déjà de bonnes raisons pour ne plus se satisfaire d'approximations.

Mais c'est aussi et surtout pour des raisons de sécurité que le pilote doit parfaitement connaître les limites de chargement de sa machine et l'évolution de leur comportement quand son centrage varie.

L'objectif de cet ouvrage est de présenter au vélivole d'une manière aussi simple et complète que possible ce qu'il est essentiel de connaître et de pratiquer en matière de chargement et de centrage des planeurs.

I - CHARGEMENT DES PLANEURS

Le calcul du chargement d'un planeur est nécessaire pour deux raisons :

- le respect des limitations structurales ;
- l'optimisation de la charge alaire.

1. LIMITATIONS STRUCTURALES ET CHARGEMENT

1.1 Efforts sur la voilure

Les forces verticales appliquées sur la voilure sont des sources de contraintes mécaniques qui sollicitent fortement la structure du planeur. Ces forces résultent du poids de la machine et des effets aérodynamiques.

a) Forces massiques $n \cdot mg$

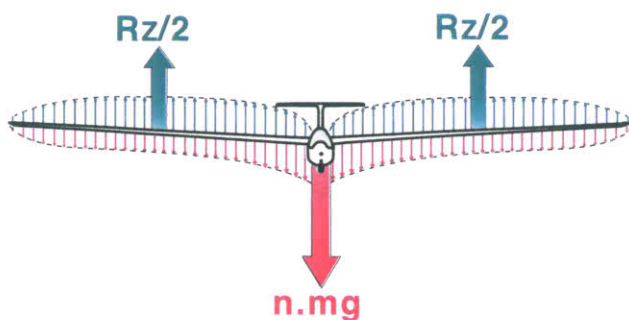
On distingue deux groupes de forces massiques :

- le poids du fuselage et des empennages appliqué entre les deux ailes ;
- le poids des ailes réparti sur l'envergure.

Ces poids sont multipliés par le facteur de charge n (virages, ressources, turbulence etc...)

b) Forces de «portance»

Elles sont la somme des composantes élémentaires de portance qui réparties le long de l'envergure admettent deux demi-résultantes au voisinage du centre géométrique de l'aile.

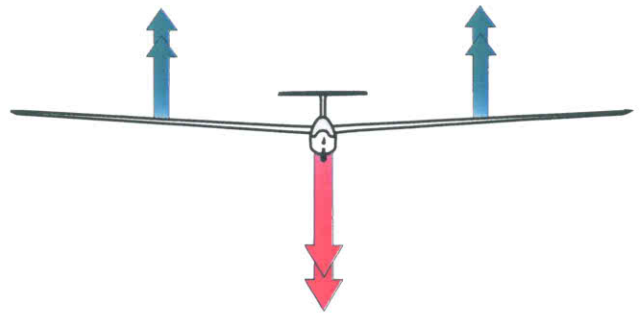


L'application de ces forces se traduit par une **flexion** des voilures et par un **effort tranchant** qui tend à «**cisailler**» les ailes au niveau de l'implanture. On conçoit donc l'existence d'une limite de charge au-delà de laquelle la résistance de la structure ne peut plus être assurée.

Toutefois, une même charge embarquée dans le planeur provoque des contraintes différentes selon qu'elle est disposée dans le fuselage ou répartie dans les ailes.

1.2. Chargement du fuselage

Toute augmentation de la charge du fuselage est équilibrée par un accroissement des forces de portance et développe les contraintes de torsion et l'effort tranchant :



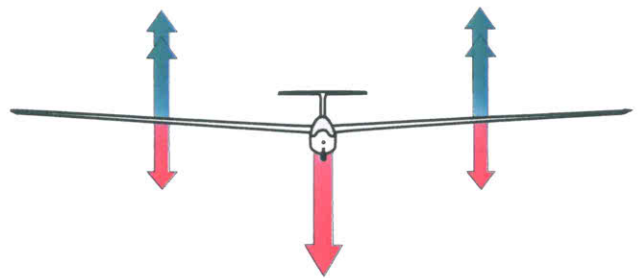
Pour éviter la rupture, il est nécessaire de définir une masse maximum pour le fuselage chargé.

En pratique, on associe fuselage et empennage que l'on qualifie d'**éléments non portants du planeur**.

Le constructeur spécifie alors une **masse maximum des éléments non portants (MMENP)**.

1.3 Chargement des ailes

Si l'on dispose la charge dans les ailes (éléments portants) et que l'on s'arrange à en amener le centre de gravité aussi près que possible du point d'application des forces de portance, on constate que l'on augmente certes la masse totale du planeur, mais sans toutefois aggraver la flexion des ailes ni accroître l'effort tranchant.



Une augmentation très sensible en chargement peut ainsi être obtenue. C'est la raison de l'implantation des water-ballasts dans les ailes.

Remarque :

En apparence, les ailes pourraient être ainsi chargées à l'infini. En réalité, bien vite apparaîtraient d'autres limites : contraintes à l'atterrissage et au roulement, charge alaire, etc...

En pratique, le chargement du fuselage reste limité mais la masse totale du planeur peut être augmentée de la valeur de la

charge disposée dans les ailes. Le constructeur calcule donc :

- la masse maximum des éléments non portants (MMENP);
- la masse maximum autorisée (MMA) pour le planeur complet.

Remarque :

Si aucune charge ne peut être placée dans les ailes (planeurs non ballastables), la limitation de masse maximum est suffisante. Elle est calculée à partir de la masse maximale des parties non portantes à laquelle est ajoutée la masse des ailes.

2. TERMINOLOGIE DU CHARGEMENT

Pour la bonne compréhension des problèmes de chargement, les termes ci-dessous sont utilisés avec l'acception suivante :

a) Masse à vide équipé (MVE)

C'est la somme des masses des éléments suivants :

- cellule complète ;
- instrumentation standard ;
- lest fixe éventuel (récupération du centrage à vide) ;
- équipement optionnel fixe (radio, équipement oxygène, batteries, calculateur etc...).

La masse à vide équipée est déterminée par une pesée soit du planeur complet soit des éléments pris séparément.

b) Éléments non portants : (ENP)

Les éléments non portants sont constitués de l'ensemble du planeur sauf les ailes.

Ils comprennent donc :

- le fuselage équipé ;
- les empennages ;

c) Masse à vide des éléments non portants (MVENP)

C'est le résultat de la pesée des éléments non portants. C'est aussi la masse à vide équipée (MVE) diminuée de la masse des ailes.

d) Charge utile (CU)

C'est l'ensemble des masses constituées par le chargement des éléments non portants :

- le ou les pilote(s) équipé(s) (parachute) ;
- lest amovible éventuel (gueuses) ;
- équipements personnels (documentation etc...) ;
- eau du ballast de dérive.

e) masse totale des éléments non portants (MTENP)

C'est la masse des éléments non portants dotés de leur chargement (CU).

f) Masse maximale des éléments non portants (MMENP)

C'est la masse maximale admissible pour les éléments non portants dotés de leur chargement (pilotes, lest amovible, ballast de dérive etc...).

g) Chargement des water-ballasts (WB)

C'est la masse de l'eau admise dans les ballasts d'aile.

h) Charge offerte (CO)

C'est l'addition :

- de la charge utile (CU) ;
- du chargement en eau des ballasts d'aile.

Remarque :

Pour les planeurs non dotés de ballasts, $CO = CU$.

i) Masse au décollage (MDEC)

C'est la masse du planeur prêt à décoller. C'est la somme de la masse à vide majorée de la totalité du chargement.

j) Masse maximale autorisée (MMA)

C'est la masse maximale autorisée pour le planeur avec les ballasts partiellement ou totalement pleins.

k) Masse maximale à l'atterrissage (MMATR)

C'est la masse maximale admissible pour l'atterrissage ; elle découle de l'obligation d'atterrir avec les ballasts vidangés.

3. CALCUL DU CHARGEMENT

Deux types de calcul sont envisageables

- la détermination de la masse du planeur prêt au décollage (MDEC) :
ce calcul permet de vérifier que la masse du planeur doté de son chargement est contenue dans les limites spécifiées par le constructeur ;
- le calcul de la charge utile et de la charge offerte maximale.

Attention :

Ces calculs ne tiennent pas compte des problèmes de centrage qui doivent être étudiés séparément.

Bien que répondant à des raisonnements identiques, les calculs sont différents selon qu'ils s'appliquent à des planeurs dotés de ballasts ou non.

3.1 Planeurs non dotés de ballasts

Les éléments connus sont :

- la masse maximum autorisée, définie par le constructeur (MMA) ;
- la masse à vide équipée, résultat de la pesée (MVE).

a) Calcul de la masse au décollage (MDEC)

La masse au décollage est égale à la masse à vide équipée (MVE) augmentée de la charge utile (CU)

$$MDEC = MVE + CU$$

La masse au décollage doit être inférieure ou égale à la masse maximale autorisée (MMA)

$$\text{MDEC} \leq \text{MMA}$$

Exemple :

Soit un planeur ayant une masse maximale autorisée de 310 kg, dont la masse à vide est 216 kg et dont le chargement est composé comme suit :

pilote équipé : 78 kg ;

documentation : 3 kg

Quelle est la masse au décollage ?

$\text{MDEC} = \text{MVE} + \text{CU}$

$\text{MDEC} = 216 + (78 \text{ kg} + 3 \text{ kg}) = 297 \text{ kg}$

MDEC est inférieure à MMA. Le chargement est correct.

b) Calcul de la charge utile maximum :

La charge utile maximale (CU max.) est égale à la masse maximale autorisée (MMA) diminuée de la masse à vide équipée (MVE)

$$\text{CU max.} = \text{MMA} - \text{MVE}$$

Exemple : Soit un planeur biplace dont la pesée indique une masse à vide équipée de 296 kg et dont la masse maximum autorisée est de 520 kg.

Quelle est la charge utile maximale ?

$\text{CU max.} = 520 \text{ kg} - 296 \text{ kg} = 224 \text{ kg}$.

3.2 Planeurs dotés de water-ballasts

Les éléments suivants sont connus :

- la masse maximale autorisée (MMA)
- la masse maximale des éléments non portants (MMENP)
- la masse à vide équipée (MVE)
- la masse à vide des éléments non portants (MVENP).

a) Calcul de la masse au décollage (MDEC)

La masse au décollage est égale à la masse à vide équipée (MVE) majorée de la charge offerte (CO).

Le calcul doit toutefois être effectué en deux temps puisque deux limitations doivent être respectées :

- la masse maximale des éléments non portants (MMENP)
- la masse maximale autorisée (MMA).

1er temps : Calcul de la masse des éléments non portants :

La masse totale des éléments non portants est égale à la masse à vide des éléments non portants majorée de la charge utile

$$\text{MTENP} = \text{MVENP} + \text{CU}$$

La masse totale des éléments non portants doit être inférieure ou égale à la masse maximum des éléments non portants.

$$\text{MTENP} \leq \text{MMENP}$$

2ème temps : Calcul de la masse au décollage (MDEC)

La masse au décollage (MDEC) est égale à la masse à vide équipée (MVE) augmentée de la charge offerte CO ($\text{CO} = \text{CU} + \text{WB}$)

$$\text{MDEC} = \text{MVE} + \text{CV}$$

La masse au décollage doit être inférieure ou égale à la masse maximale autorisée

$$\text{MDEC} \leq \text{MMA}$$

Exemple :

Soit un planeur présentant les caractéristiques suivantes :

- MMA	= 450 kg
- MMENP	= 230 kg
- MVENP	= 120 kg
- MVE	= 260 kg

Le pilote équipé pèse 68 kg. Il emporte un lest amovible de 3 kg. Les water-ballasts contiennent 80 l d'eau.

Le chargement est-il admissible ?

1er temps : Vérification du chargement des éléments non portants :

CU	= 68 kg + 3 kg = 71 kg
MTENP	= MVENP + CU
	= 120 kg + 71 kg = 191 kg
MTENP est bien inférieure à MMENP.	

Le chargement des éléments non portants est accepté.

2ème temps : Vérification de la masse au décollage

CO	= CU + WB
CO	= 71 kg + 80 kg = 151 kg
MDEC	= MVE + CO
MDEC	= 260 kg + 151 kg = 411 kg

La masse au décollage est inférieure à la masse maximale autorisée : le chargement est correct.

b) Détermination de la charge utile maximale

La charge utile maximum, pour un planeur équipé de ballasts est égale à la masse maximale des éléments non portants (MMENP) diminuée de la masse à vide des éléments non portants (MVENP)

$$\text{CUmax} = \text{MMENP} - \text{MVENP}$$

Exemple :

Soit un planeur présentant les caractéristiques suivantes :

MMENP	= 240 kg
MVENP	= 125 kg

Quelle est la charge utile maximale ?

$$\begin{aligned}CU_{\max} &= MMENP - MVENP \\CU_{\max} &= 240 \text{ kg} - 125 \text{ kg} = 115 \text{ kg}\end{aligned}$$

c) Calcul du remplissage des water-ballasts

La capacité disponible des water-ballasts n'implique pas forcément que leur remplissage soit toujours possible.

Le remplissage maximum des water-ballasts est égal à la masse maximale autorisée (MMA) diminuée de la masse à vide équipée (MVE) et de la charge utile (CU)

$$\boxed{WB_{\max} = MMA - (MVE + CU)}$$

Exemple :

Soit un planeur biplace présentant les caractéristiques suivantes :

$$\begin{aligned}MMA &= 600 \text{ kg} \\ \text{Capacité WB} &= 80 \text{ l} \\ MVE &= 396 \text{ kg} \\ CU &= 156 \text{ kg}\end{aligned}$$

Quel est le ballastage maximum admissible (WB max) ?

$$\begin{aligned}WB_{\max} &= 600 \text{ kg} - (396 \text{ kg} + 156 \text{ kg}) \\ WB_{\max} &= 600 \text{ kg} - 552 \text{ kg} \\ WB_{\max} &= 48 \text{ kg soit } 48 \text{ l d'eau.}\end{aligned}$$

4. OPTIMISATION DE LA CHARGE ALAIRE

Afin d'obtenir le meilleur niveau de performance de la machine, le pilote qui entreprend un circuit ou qui prend le départ d'une compétition cherche à donner à son planeur la charge alaire qui lui semble le mieux s'adapter à la situation MTO du jour.

L'optimisation de la charge alaire est fondée sur deux calculs types :

- détermination de la charge alaire pour un chargement donné ;
- calcul du chargement pour une charge alaire donnée.

4.1 Calcul de la charge alaire

La charge alaire est égale à la masse totale du planeur divisée par la surface de la voilure :

$$\text{charge alaire} = \frac{mg}{S}$$

La masse prise en considération est la masse au décollage MDEC. Si un ballastage a été effectué, il peut être intéressant de calculer l'évolution de la charge alaire après vidange partielle ou totale des ballasts.

$$\text{charge alaire au décollage} = \frac{MDEC}{S}$$

$$\text{après vidange} = \frac{MDEC - WB}{S}$$

Exemple :

Un planeur possédant une voilure de 11 m² décolle à la masse de 480 kg dont 90 kg d'eau dans les ballasts.

Quelle est la charge alaire au décollage ? après vidange des ballasts ?

a) au décollage

$$\text{charge alaire} = \frac{480 \text{ kg}}{11 \text{ m}^2} = 43,6 \text{ kg / m}^2$$

b) après vidange WB

$$\text{charge alaire} = \frac{480 \text{ kg} - 90}{11 \text{ m}^2} = 35,45 \text{ kg / m}^2$$

4.2 Optimisation de la charge alaire

La valeur de la charge alaire est choisie par le pilote pour répondre aux besoins de son vol.

Compte tenu de la surface de la voilure, il détermine le chargement du planeur et calcule le remplissage des ballasts pour ajuster la masse au décollage à la valeur recherchée

$$\boxed{MDEC = \text{charge alaire} \cdot S}$$

et

$$\boxed{MDEC - (MVE + CU) = WB}$$

Exemple :

Soit un planeur présentant les caractéristiques suivantes :

$$\begin{aligned}MVE &= 272 \text{ kg} \\ CU &= 78 \text{ kg} \\ \text{Surface} &= 11,3 \text{ m}^2 \\ \text{Capacité WB} &= 150 \text{ l}\end{aligned}$$

Quelle masse d'eau doit être admise dans les ballasts pour décoller avec une charge alaire de 39 kg/m² ?

La masse au décollage devra être :

$$MDEC = 39 \text{ kg/m}^2 \times 11,3 \text{ m}^2 \approx 440 \text{ kg}$$

La charge des water-ballasts sera :

$$\begin{aligned}WB &= 440 \text{ kg} - (272 + 78) \\ WB &= 440 - 350 = 90 \text{ kg}\end{aligned}$$

Il faudra placer 90 l d'eau dans les ballasts.

II - EQUILIBRE DU PLANEUR EN VOL

1. NOTION DE CENTRE DE GRAVITE

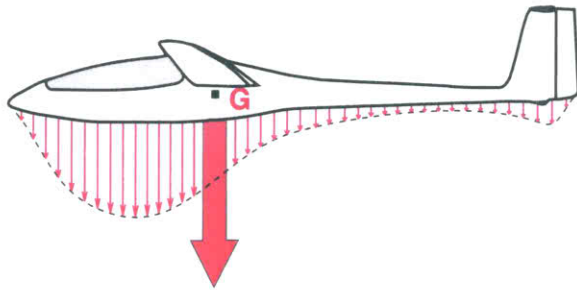
1.1. Centre de gravité

Les particules qui constituent un corps sont chacune soumises à l'action de la pesanteur.

Les poids de chacun de ces éléments sont autant de forces verticales dirigées vers le bas et qui admettent une résultante unique dont l'intensité est égale à leur somme.

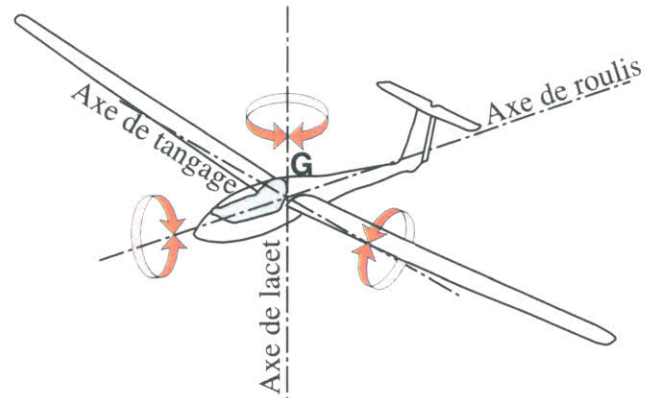
Cette résultante, appelée «**poids du corps**» mg admet un point d'application G : **le centre de gravité**

Ainsi, on considère qu'un planeur est composé d'un grand nombre d'éléments pesants. Le centre de gravité d'un planeur est le point d'application des forces de pesanteur qui s'exercent sur l'ensemble de ses constituants.



Ainsi, le centre de gravité d'un planeur est un point très important :

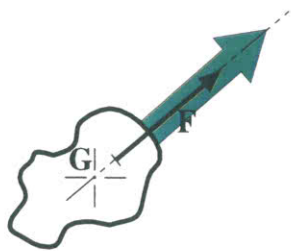
- la trajectoire du planeur est assimilée à la trajectoire de son centre de gravité ;
- comme point d'application du poids, il est déterminant pour les calculs d'équilibre ;
- il est le centre des rotations du planeur sur lui-même et donc l'intersection de ses axes de tangage, roulis et lacet.



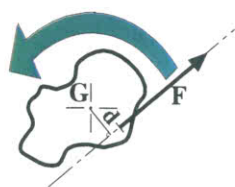
2. NOTIONS D'EQUILIBRE

1.2. Propriété du centre de gravité

Lorsqu'on applique une force sur un corps en prenant soin que sa direction passe par le centre de gravité, elle provoque (ou modifie) le déplacement du corps. La trajectoire du corps peut être étudiée comme la **trajectoire de son centre de gravité**.



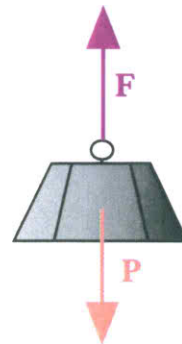
Si la force est appliquée de telle sorte que sa direction ne passe pas par le centre de gravité, elle provoque un mouvement de **rotation** du corps sur lui-même. Le **centre de cette rotation** est le **centre de gravité**.



La force F provoque un moment de rotation tel que :

$$M_t = F \cdot d$$

d = distance perpendiculaire entre G et la direction de F



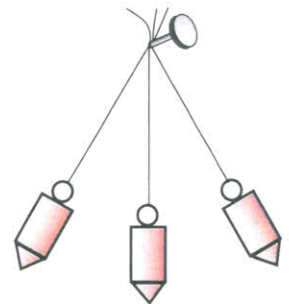
Un corps abandonné à lui-même tombe entraîné par la pesanteur. Si l'on oppose à son poids une force égale et opposée, sa vitesse se stabilise :

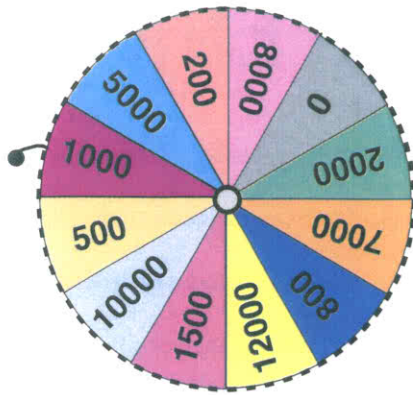
il est **en équilibre**.

L'équilibre est stable si le corps, écarté de sa position d'équilibre, y revient de lui-même et s'y maintient.

Exemple :

fil à plomb.





L'équilibre est **indifférent** si le corps reste en équilibre quelle que soit la position qu'on lui donne.

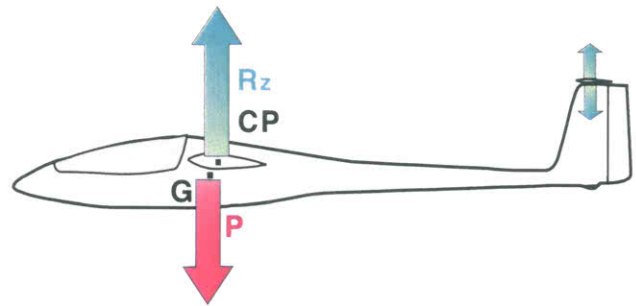
Exemple :
roue de loterie
(non truquée)

L'équilibre est instable si le corps, à peine écarté de sa position d'équilibre ne peut y revenir de lui-même et au contraire s'en écarte.

Exemple :
crayon posé sur une de ses extrémités.



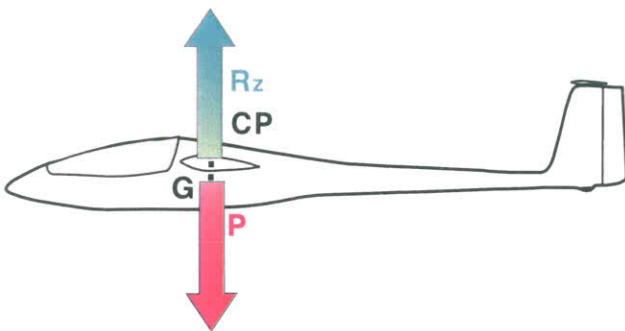
De plus, quand le chargement du planeur est modifié le centre de gravité se déplace. Aligner la résultante aérodynamique et le poids est donc pratiquement impossible. Ainsi, pour assurer l'équilibre utilisera-t-on l'ensemble constitué par le plan fixe horizontal et la gouverne de profondeur.



L'équilibre étant ainsi réalisé, il s'agit maintenant de déterminer dans quelles conditions il peut être stable indifférent ou instable.

3. EQUILIBRE DU PLANEUR EN VOL

Pour que le planeur vole, il faut et il suffit d'opposer à son poids une force qui lui est égale.



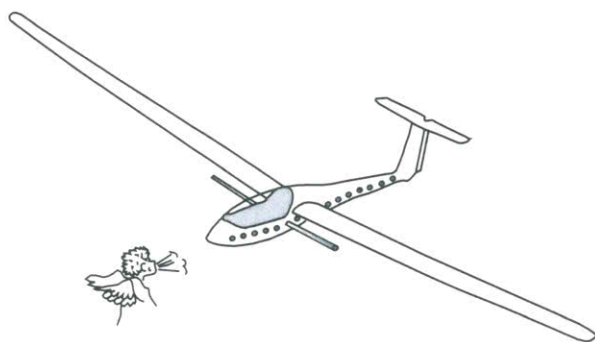
Le point d'application de la résultante aérodynamique de l'aile (centre de poussée) dépend de la géométrie de la voilure. Il se déplace sensiblement quand l'incidence change.

III - STABILITE LONGITUDINALE DU PLANEUR

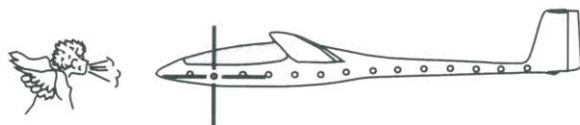
1. ETUDE EXPERIMENTALE

Une maquette est montée en «girouette» dans un courant d'air de manière à pouvoir pivoter librement autour d'un axe. Un ensemble de trous est aménagé le long du fuselage de façon à pouvoir déplacer l'axe depuis l'avant jusqu'à l'arrière de la maquette.

Pour chaque position de l'axe, la maquette est soigneusement équilibrée à l'aide de petites masselottes. Cette précaution permet de faire coïncider le centre de gravité avec l'axe. Ainsi le montage simule parfaitement les rotations en tangage autour de son centre de gravité d'un planeur libre dans l'espace et seuls les phénomènes aérodynamiques sont mis en évidence.



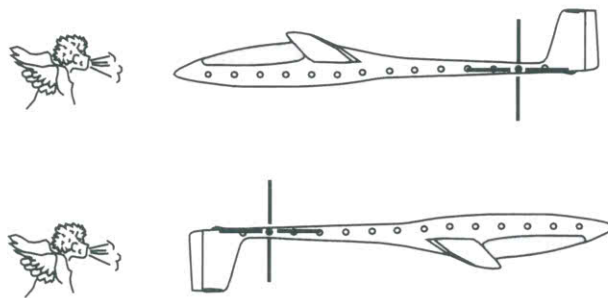
Lorsque l'axe est placé près du nez, le planeur est vigoureusement maintenu dans le fil du vent relatif. Si l'on cherche à l'en écarter, il y revient. On dit que le «moment de rappel» est important : **l'équilibre est stable**.



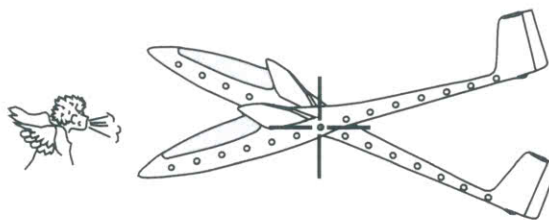
Quand on éloigne sensiblement l'axe du nez, on note que le planeur reste toujours aligné dans le vent relatif mais que si on l'en écarte, le retour à la position d'équilibre est moins énergique et qu'il s'effectue après quelques molles oscillations. Le moment de rappel a déchu : **la stabilité a diminué**.



Si l'on recule l'axe vers l'arrière du planeur, on constate qu'une position d'équilibre est quasiment impossible à trouver et qui, si miraculeusement elle est obtenue, la moindre sollicitation appliquée à la maquette fait qu'elle pivote violemment sur elle-même en présentant ses empennages au courant d'air. Il n'y a plus de moment de rappel : **l'équilibre est instable**.



En recherchant une position d'axe intermédiaire, on va découvrir par tâtonnement un point pour lequel la maquette ne présente plus de position d'équilibre déterminée. Elle est capable de garder une position quelconque. Il n'y a plus de moment de rappel : **l'équilibre est indifférent**.



Cette expérience met en évidence l'existence d'un point particulier autour duquel le planeur est, en tangage, en équilibre indifférent. Ce point est appelé **Foyer du planeur**.

Si l'axe de rotation est placé **en avant** du foyer, l'équilibre est **stable** et ce d'autant plus que l'axe est éloigné du foyer. Au contraire, si l'axe est situé **à l'arrière** du foyer, l'équilibre est **instable**.

Rappelons que dans notre expérience, la mise en place de l'axe simule des rotations autour du centre de gravité. Ainsi, tout ce qui a été démontré quant à la position de l'axe est vrai pour la position du centre de gravité.
Si le centre de gravité est :

- **au foyer** : l'équilibre est indifférent ;
- **en avant du foyer** : l'équilibre est stable et d'autant plus qu'il en est éloigné ;
- **en arrière du foyer** : l'équilibre est instable.

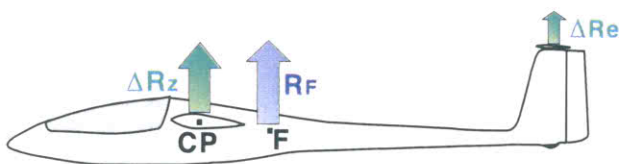
2. ANALYSE DES CONDITIONS D'EQUILIBRE

2.1. Foyer général du planeur

Supposons un planeur en vol. Si pour une raison quelconque son assiette varie (action pilote ou effet de la turbulence), il en résulte un changement de son incidence qui engendre une modification des forces aérodynamiques

Une augmentation générale de l'incidence se traduit par :

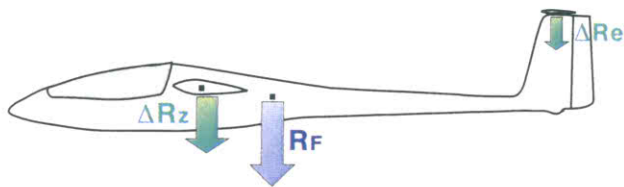
- une augmentation de la résultante aérodynamique de l'aile (ΔR_z)
- et selon le cas, une augmentation de l'effet porteur sur l'empennage ou une diminution de son effet déporteur, ce qui revient au même, (ΔR_e).



Les variations respectives de «portance» admettent une résultante R_F dirigée vers le haut et appliquée en un point F, le **foyer du planeur**.

Inversement, une diminution de l'incidence a pour effet :

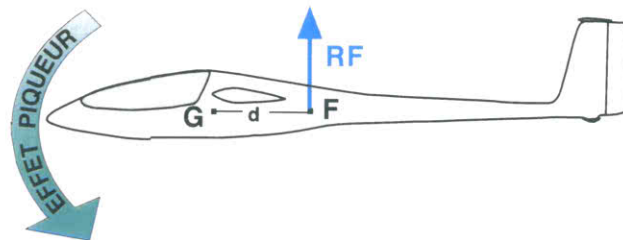
- une diminution de la résultante aérodynamique de l'aile (ΔR_z)
- et selon le cas, une diminution de l'effet porteur de l'empennage ou une augmentation de son effet déporteur (ΔR_e) ce qui revient au même.



Ces variations des forces aérodynamiques admettent une résultante R_F , cette fois-ci dirigée vers le bas mais toujours appliquée au foyer F.

2.2. Influence de la position du centre de gravité

a) Le centre de gravité est à l'avant du foyer

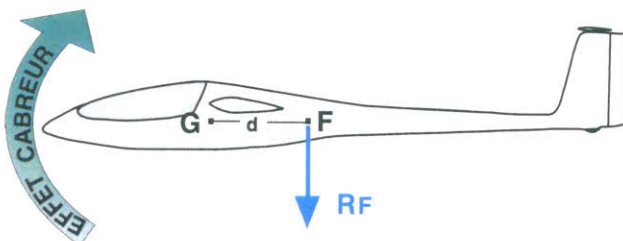


Le centre de gravité G est situé à l'avant du foyer F et à une distance d.

Si le planeur cabre (action pilote ou turbulence), R_F est dirigée vers le haut. Il se crée par rapport au centre de gravité (centre de rotation en tangage) un moment piqueur $R_F \cdot d$, et le planeur tend à revenir à son assiette initiale.

Si le planeur pique (action pilote ou turbulence), R_F est dirigée vers le bas. Le moment

$R_F \cdot d$ est alors cabreur et le planeur revient de lui-même à sa position d'origine.

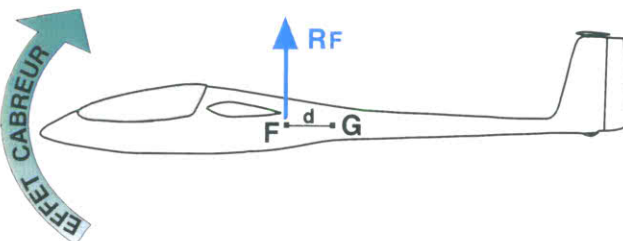


Dans les deux cas, le planeur tend à revenir à sa position d'équilibre : il est donc **stable**.

Le moment de rappel est d'autant plus grand que la distance d est grande. La stabilité est d'autant plus forte que le centre de gravité est plus éloigné en avant du foyer.

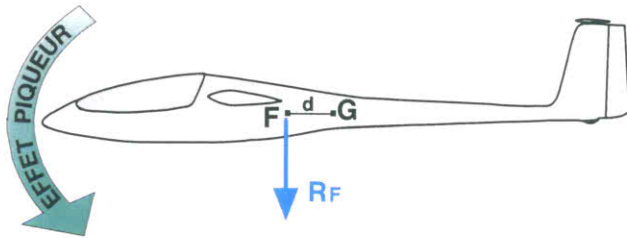
b) Centre de gravité à l'arrière du foyer

Si le planeur cabre (action pilote ou turbulence), R_F est dirigée vers le haut. Le moment par rapport à G est cette fois cabreur et accentue le mouvement.



Le planeur ne revient donc pas à sa position initiale mais au contraire s'en écarte.

Si le planeur pique (action pilote ou turbulence), R_F est dirigée vers le bas et provoque un moment piqueur qui là encore renforce le mouvement.



Dans ces deux cas, le planeur est instable.

3. PLAGE DE CENTRAGE

Pour des raisons de facilité de pilotage mais aussi de confort, la position du centre de gravité doit être choisie de telle sorte que l'équilibre soit stable. Le planeur est donc toujours conçu pour que son centre de gravité soit positionné en avant du foyer général.

Il reste toutefois à définir le **degré de stabilité** en déterminant d , distance entre le foyer et le centre de gravité. Il s'agit en fait de définir les valeurs minimales et maximales de d et ainsi de déterminer la **plage de centrage**.

Un centrage loin du foyer favorise la **stabilité**. Le planeur corrige de lui-même les variations accidentelles d'incidence mais s'oppose aussi à celles commandées par le pilote : ainsi la **manœuvrabilité diminue** quand la stabilité augmente.

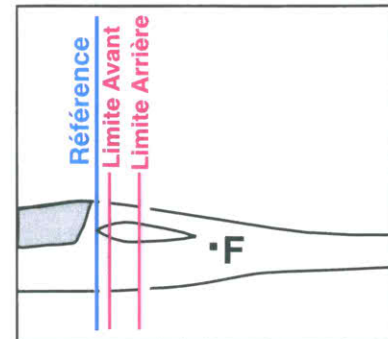
Les braquages de gouvernes nécessaires pour les manœuvres en tangage sont importants surtout à faible vitesse où certaines évolutions peuvent être rendues difficiles (spirale à faible V_i , arrondi etc...). Le pilotage est «lourd» et le rendement aérodynamique dégradé.

Un centrage proche du foyer **diminue la stabilité**. La correction de variations accidentelles d'incidence demande souvent l'intervention du pilote ! Les corrections doivent être bien dosées et coordonnées afin de ne pas laisser apparaître des risques de «pompage piloté». Par contre, la machine s'oppose beaucoup moins aux manœuvres demandées par le pilote pour lesquelles de faibles braquages de gouvernes sont nécessaires. Le pilotage est «léger» et le rendement aérodynamique est favorisé particulièrement pour les vitesses faibles et modérées.

Le constructeur calcule la limite de **centrage avant** pour répondre à des impératifs de **manœuvrabilité minimale** et la limite de centrage arrière pour satisfaire à des exigences de **stabilité minimale**.

En pratique, la plage de centrage n'est jamais spécifiée par rapport au foyer du planeur qui est un point physiquement difficile

à identifier aussi est-elle définie par rapport à un point aisément repérable (en général bord d'attaque d'une nervure particulière de l'aile) appelé **référence des centrages**.



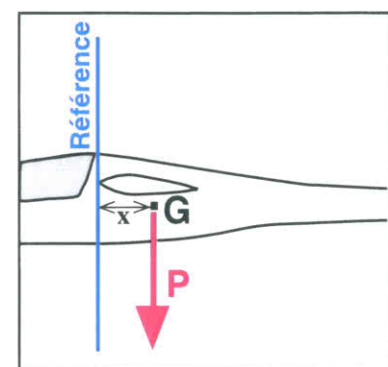
Le pilote doit vérifier son chargement de manière à ce que le centre de gravité du planeur soit toujours situé à l'intérieur des limites de centrage.

Il peut éventuellement optimiser son centrage de manière à conférer à sa machine des caractéristiques particulières :

- recherche de manœuvrabilité et de rendement aérodynamique
- recherche de stabilité etc...

4. CALCUL DU CENTRAGE METHODE DES MOMENTS

A l'issue de la pesée, la masse du planeur est connue et la position du centre de gravité peut être calculée.



On considère que le poids du planeur P exerce par rapport à la référence un moment M^t égal au produit de son intensité par le bras de levier x , qui est la distance entre G et la référence.

$$M^t = P \cdot x$$

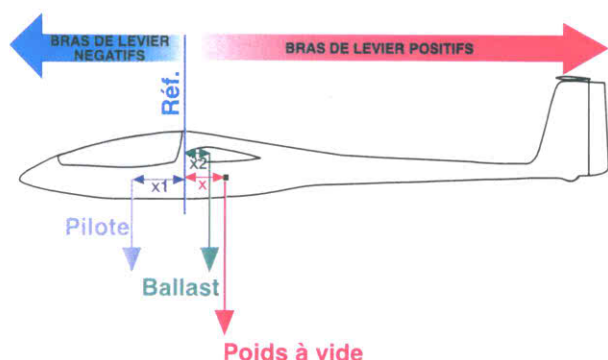
Si l'on ajoute une charge, le pilote par exemple, on peut dire qu'assis dans sa cabine à une distance X de la référence, il exerce un moment M_1^t tel que :

$$M_1^t = \text{Poids du pilote} \cdot X_1$$

Ainsi toute charge disposée dans le planeur produit une augmentation du poids total et exerce un moment supplémentaire.

L'addition de toutes les charges constitue pour le planeur chargé son poids total et la somme des moments son moment résultant.

Par convention et pour éviter les erreurs de calcul, les bras de leviers (et donc les moments) sont considérés comme négatif (-) s'ils concernent des charges placées en avant de la référence et positifs (+) s'ils intéressent des masses disposées à l'arrière de la référence. Il s'agit donc d'effectuer une somme algébrique des moments (attention aux signes - et +).



CHARGES	POIDS	BRAS DE LEVIER	MOMENTS
Planeur VIDE	P	$x + X$	$= + M^t$
PILOTE	P_1	$x - X_1$	$= - M_1^t$
BALLASTS D'AILES	P_2	$x + X_2$	$= + M_2^t$
Planeur CHARGE	$P + P_1 + P_2$	BRAS DE LEVIER RESULTANT	$M_+^t (-M_1^t) + M_2^t$

La division de la somme des moments par la somme des poids donne le bras de levier résultant.

$$\text{Bras de levier résultant} = \frac{\text{Somme des moments}}{\text{Somme des masses}}$$

Et le bras de levier résultant indique la position du centre de gravité du planeur chargé par rapport à la référence.

IV - PESEE DU PLANEUR

La pesée est un travail préparatoire indispensable à tout calcul de chargement et de centrage. Elle doit être effectuée avant la mise en service initiale de l'appareil et aussi après toutes modifications importantes dont l'influence sur la masse et le centrage ne peut être déterminée par le calcul avec précision (réparation par exemple).

L'intervalle entre deux pesées ne doit pas excéder 5 ans.

La pesée fait l'objet de consignes particulières décrites dans le manuel de vol ou le manuel d'entretien. Elle permet de déterminer :

- La masse à vide (MVE) et la masse à vide des éléments non portants (MVENP) ;
- Le centrage à vide.

1. PRINCIPE DE LA MESURE

1.1. Détermination de la masse à vide

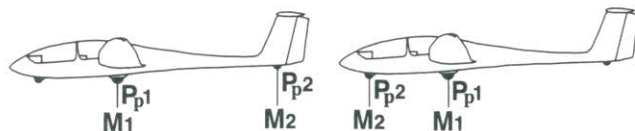
a) Pesée par éléments séparés

Le planeur est démonté puis tous ses éléments sont pesés séparément. Les masses relevées sont portées sur deux colonnes, l'une permettant le calcul de la masse à vide (MVE), l'autre de la masse à vide des seuls éléments non portants (MVENP).

b) Pesée du planeur complet

Le planeur est disposé en appui sur deux bascules, chacune étant respectivement placée :

- sous l'atterrisseur principal (point de pesée Pp1) ;
- sous le patin de queue ou dans certains cas sous l'atterrisseur avant (point de pesée Pp2).



Les bascules relèvent les masses M_1 et M_2 .

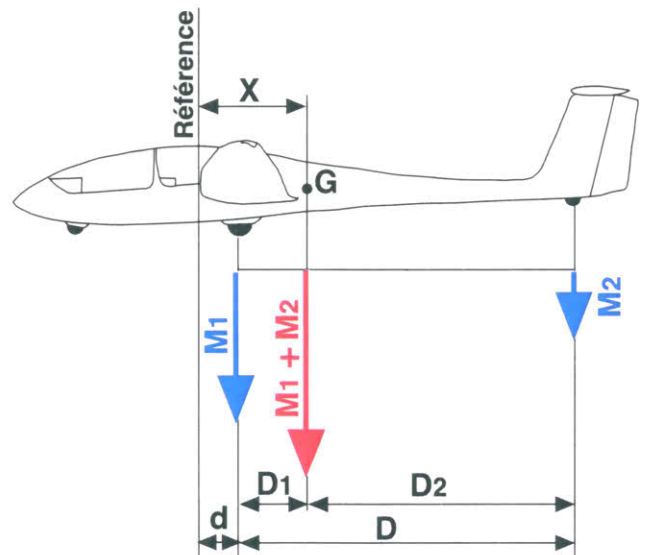
La masse totale du planeur est la somme des masses relevées :

$$\text{masse totale} = M_1 + M_2$$

1.2. Calcul du centrage à vide :

La position du centre de gravité à vide est calculée à partir des résultats de la pesée du planeur complet.

En un premier temps, on le positionne par rapport à l'un des points de pesée (généralement Pp1).



$$D1 = \frac{M2 \cdot D}{M1 + M2}$$

La position du centre de gravité doit toutefois être exprimée par rapport à la référence des centrages telle qu'elle a été définie par le constructeur :

$$X = D1 + d$$

Les points de pesée ne sont généralement pas définis par le constructeur même s'ils s'imposent d'eux mêmes. Les valeurs de D et d ne sont pas fournies et doivent donc faire l'objet d'une mesure précise pendant la pesée.

2. PRATIQUE DE LA PESEE

Seule la pesée du planeur complet sera décrite dans ces lignes. Rappelons que même si une pesée par éléments séparés est effectuée, la pesée du planeur complet est indispensable pour déterminer la position du centre de gravité.

2.1. Préparation du planeur

Les résultats de la pesée ne peuvent être exploitables que si la «définition» exacte du planeur est connue. Aussi est-il nécessaire d'établir un **inventaire exhaustif** des équipements installés d'une manière permanente dans l'appareil.

Le planeur doit être parfaitement nettoyé et débarrassé de tout objet ne correspondant pas à la définition décrite par l'inventaire (parachute, gueuses, etc...).

Remarque :

Lorsqu'une très grande précision de mesure est souhaitée (préparation pour une compétition par exemple) le planeur peut être pesé en configuration «prêt à voler». Il est alors préparé exactement comme s'il devait décoller (pilote, parachute, batterie, baro etc...).

2.2. Local et matériel nécessaire

La pesée doit être entreprise dans un local fermé, à l'abri de tout courant d'air qui agissant sur les surfaces du planeur pourrait fausser sensiblement les mesures. Il est souhaitable de s'installer sur un sol parfaitement plan et horizontal et de préférence en dur. L'opération nécessite le matériel suivant :

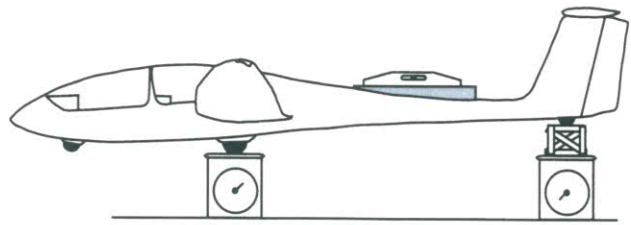
- deux bascules (il est possible d'opérer avec une seule bascule, mais les manipulations sont plus nombreuses et les risques d'erreurs plus grands) ;
- un niveau à bulle (niveau de maçon) et son éventuelle cale de réglage ;
- un fil à plomb ;
- de la craie pour marquer le sol ;
- un mètre à ruban ;
- des bras volontaires et des esprits patients !

2.3. Installation du planeur

L'installation consiste à disposer le planeur sur les bascules, conformément aux directives du constructeur. L'opération est décrite pour le cas d'un planeur s'appuyant sur le train principal et le patin de queue (cas le plus courant). Dans un cas différent, le mode opératoire resterait équivalent.

a) mise à niveau

La mise à niveau permet de conférer au planeur l'assiette convenable pendant la pesée (ligne de vol). Elle est définie par le constructeur. Si cette assiette n'a aucune importance pour la détermination de la masse totale, elle influe sur la répartition des masses relevées par les bascules et son respect est donc impératif pour assurer la justesse du calcul de centrage.

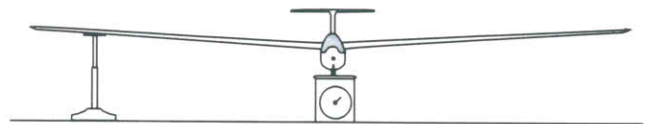


En pratique, on dispose le train principal sur la première bascule puis on rehausse la queue jusqu'à ce que l'assiette spécifiée soit atteinte. Le réglage s'effectue à l'aide d'un niveau à bulle placé sur une partie définie du fuselage, en intercalant éventuellement une cale façonnée selon une pente spécifiée.

Si les objets destinés à rehausser le planeur sont disposés sur la bascule, leur masse devra être déduite des valeurs mesurées (tare).

b) réglage de l'inclinaison

Les ailes doivent être maintenues aussi horizontales que possible. Dans cette position les réactions d'appui en bout d'aile sont négligeables et n'altèrent donc pas la précision de la pesée.



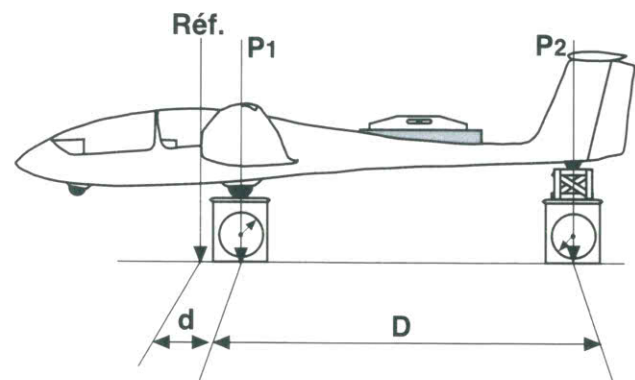
2.4. Relevé des mensurations

Il s'agit de mesurer avec précision la distance qui sépare les points de pesée ainsi que la distance qui sépare ceux-ci de la référence des centrages.

Pour cela, on procède de la manière suivante :

a) on repère sur le sol la trace des verticales issues de la référence des centrages et des points de pesées (fil à plomb et bâton de craie).

b) on mesure les distances qui séparent les repères marqués parallèlement à l'axe longitudinal du planeur à l'aide du mètre ruban.



Planeur type : n° de série : Immatriculation :	RAPPORT DE PESEE CFA St AUBAN MCE 01/94	LIEU : DATE : OPERATEUR :																
Référence :			Mise à niveau :															
D =			d =															
Centrage à vide		PESEE PLANEUR COMPLET			Centrage à vide													
Distance P₁ → G $D_1 = \frac{M_2 \times D}{M_1 + M_2} =$		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th></th> <th>Masses lues</th> <th>Tares</th> <th>Masses nettes</th> </tr> <tr> <td>M₁ à P₁</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>M₂ à P₂</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				Masses lues	Tares	Masses nettes	M ₁ à P ₁				M ₂ à P ₂				Distance P₁ → G $D_1 = \frac{M_2 \times D}{M_1 + M_2} =$	
	Masses lues	Tares	Masses nettes															
M ₁ à P ₁																		
M ₂ à P ₂																		
Distance Réf. → G X = D₁ + d =		Masse totale			Distance Réf. → G X = d - D₁ =													
PESEE ELEMENTS SEPARES			CHARGEMENT		CENTRAGE													
ELEMENTS	CALCUL MVE	CALCUL MVENP	MMA		Limite AV													
AILE DROITE			MVE		Limite AR													
RALLONGE DROITE			CO max		Pilote mini AV													
AILE GAUCHE			MMENP		Pilote max AV													
RALLONGE GAUCHE			MVENP		Pilote mini AR													
FUSELAGE + DIRECTION			CU max		Pilote max AR													
VERRIERE			MASSES		Masses	Bras levier												
EMPENNAGE HORIZONTAL			PLANEUR VIDE															
TABEAU DE BORD			PILOTE AVANT															
OXYGENE			PILOTE ARRIERE															
BATTERIES			BALLASTS PRINCIPAUX															
			BAGAGES															
TOTAL			BALLAST DERIVE															
	MVE	MVENP	PLANEUR CHARGE															

INVENTAIRE

des éléments compris dans la masse à vide du planeur

	Equipements	Marque type	Nombre	Masse	Moment
X	Anémomètre	Badin Crouzet	1		
X	Variomètre	Badin T100	1		
X	Antenne compensation	IRWING	1		
X	Altimètre	WINTER	1		
X	Bille	WINTER	1		
X	Compas	HAMILTON	1		
X	Calculateur GPS	LX 4000	1		
X	Ballasts	SCHEMPP-HIRTZ	1		
X	Crochet	Tost B75	1		
O	Voltmètre	Jeager	1		
X	Batterie	SAFT	1		
X	VHF	TX 760D	1		
O	Balise de détresse	JE2	1		
O	Transpondeur	ATC 2000R	1		

X En place lors de la pesée
O Démonté lors de la pesée

3. PESEE

3.1. Relevé de mesures

L'opération est très facile puisqu'elle consiste en une simple lecture des indications des balances.

Les cales servant à fixer l'assiette du planeur doivent être pesées de manière à ce que leurs masses puissent être extraites de la mesure si elles y étaient incluses.

Si une seule balance est utilisée, on effectue une mesure successivement sous chaque point de pesée. Une précision suffisante sera obtenue si les points d'appui restent inchangés et si l'assiette du planeur est rigoureusement conservée (remplacement de la balance par une cale de même hauteur).

4. RAPPORT DE PESEE

Le rapport de pesée s'effectue sur un formulaire composé de plusieurs tableaux qui permettent de :

- consigner les paramètres propres à la pesée ;
- relever les mesures ;
- d'effectuer les calculs.

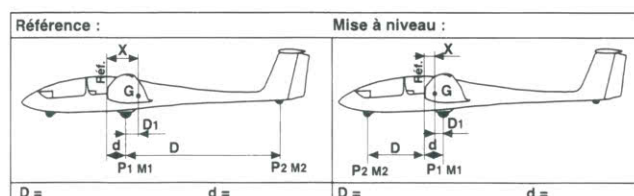
4.1. Tableau «Paramètres de pesée»

Cette première partie du rapport est utilisée pour identifier le planeur, noter le lieu et la date de la pesée et désigner le responsable de l'opération.

Planeur type :	RAPPORT DE PESEE	LIEU :
n° de série :	CFA St AUBAN	DATE :
Immatriculation :	MCE 01/94	OPERATEUR :

Elle est complétée par un cadre dans lequel sont consignés les paramètres et les conditions particulières de la pesée :

- référence des centrages ;
- conditions de mise à niveau ;
- identifications des points de pesée (Pp₁, Pp₂)
- relevé des mensurations (D et d)



Ce cadre prévoit deux cas possibles de pesée en fonction des positions respectives de pesée Pp₁ et Pp₂.

Il doit être complété par l'inventaire du planeur (liste des équipements), imprimé en verso du rapport et sur lequel est consignée la définition précise du planeur pesé.

4.2. Tableaux «Dépouillement de la pesée»

Le dépouillement de la pesée est l'opération qui consiste à relever les indications des balances et à en commencer l'exploitation.

a) Calcul de la masse à vide (MVE)

Les masses lues sur les balances doivent être éventuellement diminuées de la masse des «tares». Ainsi sont obtenues les masses nettes qui additionnées donnent la masse totale.

PESEE PLANEUR COMPLET			
	Masses lues	Tares	Masses nettes
M ₁ à P ₁			
M ₂ à P ₂			
Masse totale			

Masse lue - tare = masse nette
Somme des masses nettes = masse totale

b) Calcul du centrage à vide

Le mode de calcul est rappelé dans des tableaux correspondant à chaque type de pesée. Il est effectué chaque fois en deux temps :

- calcul de G par rapport à Pp₁
- calcul de G par rapport à la référence.

Centrage à vide	Centrage à vide
Distance P ₁ → G	Distance P ₁ → G
$D_1 = \frac{M_2 \times D}{M_1 + M_2} =$	$D_1 = \frac{M_2 \times D}{M_1 + M_2} =$
Distance Réf. → G	Distance Réf. → G
$X = D_1 + d =$	$X = d - D_1 =$

c) Masses des éléments non portants

Les masses relevées lors de la pesée des éléments séparés sont additionnées dans deux colonnes distinctes, l'une totalisant l'ensemble des éléments du planeur et permettant le calcul de la masse à vide (MVE), l'autre rassemblant les seuls éléments non portants dont la somme est la masse à vide des éléments non portants (MVENP).

Exemple :

PESEE ELEMENTS SEPARES		
ELEMENTS	CALCUL MVE	CALCUL MVENP
AILE DROITE		
RALLONGE DROITE		
AILE GAUCHE		
RALLONGE GAUCHE		
FUSELAGE + DIRECTION		
VERRIERE		
EMPENNAGE HORIZONTAL		
TABLEAU DE BORD		
OXYGENE		
BATTERIES		
TOTAL		
	MVE	MVENP

V - EXPLOITATION DE LA PESEE

AVERTISSEMENT

Pour les calculs de masse et de centrage la rigueur scientifique exigerait que toutes les grandeurs soient exprimées selon les unités du système international, ainsi :

- les masses en kilogramme : kg
- les poids en Newton N avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- la longueur en mètres : m
- les moments en Newton par mètre : N/m

Pour rendre les explications qui suivent accessibles à tous et se rapprocher des pratiques courantes choisies par les constructeurs, les unités suivantes seront utilisées :

- kilogramme pour les masses ;
- DecaNewton pour les poids avec $g = 10$;
les masses et les poids seront ainsi représentés par les mêmes chiffres et pourront donc sans inconvénient être confondus.
- les moments en DecaNewton par m : DaN/m.

Par ailleurs, les centres de gravité des masses disposées dans le planeur sont désignés par les termes X_0 , X_2 , X_{LF} , X_{AV} , X_{AR} etc... L'utilisation de ces termes pourra représenter selon le cas :

- le point par lui-même ;
- sa «cote» par rapport à la référence (longueur du bras de levier).

1. CALCUL DES LIMITES DE CHARGEMENT

A partir des limitations de masses définies par le constructeur et les résultats de la pesée, on détermine la charge variable maximale (CV max) et la charge utile maximale (CU max). Le calcul est intégré dans le tableau «chargement-centrage» du rapport de pesée.

1.1 Calcul de la charge variable maximale

$$CV \text{ max} = MMA - MVE$$

MMA = masse maxi autorisée
MVE = masse à vide équipée

1.2 Calcul de la charge utile maximale

$$CU \text{ max} = MMENP - MVENP$$

MMENP = masse maxi ENP
MVENP = masse à vide ENP.

Remarque :

Pour les planeurs non dotés de ballasts, $CV_{\text{max}} = CU_{\text{max}}$

2. VERIFICATION DU CENTRAGE A VIDE

La norme JAR 22 spécifie que le centrage à vide d'un planeur doit être contenu dans les limites telles que puisse prendre place à bord un pilote pesant équipé de 70 à 110 kg sans qu'il soit nécessaire de disposer un lest amovible (gueuse).

Le constructeur définit à cet effet des limites avant et arrière de **centrage à vide**. Cette plage spécifiée dans le manuel d'entretien est généralement assez étroite et ne doit pas être **confondue** avec la plage des **centrages en vol** correspondant au planeur chargé. Si les résultats de la pesée montrent qu'une des limites de centrage à vide n'est pas respectée, il devient nécessaire de le modifier par la mise en place d'un **lest fixe**.

Si cette solution ne peut être appliquée, il convient alors de déterminer les masses maximales et minimales des occupants qui peuvent prendre place à bord du planeur sans qu'il soit nécessaire de disposer un lest amovible.

3. CORRECTION DU CENTRAGE A VIDE

La correction du centrage à vide s'effectue par la mise à demeure d'une masse convenable dans un endroit choisi du planeur.

Un centrage à vide trop avant est corrigé par un lest fixe disposé dans la queue du planeur et inversement un centrage à vide trop arrière par un lest fixe positionné dans le nez. Le bras de levier doit être choisi aussi grand que possible de manière à limiter la masse du lest qui affecte la charge utile du planeur.

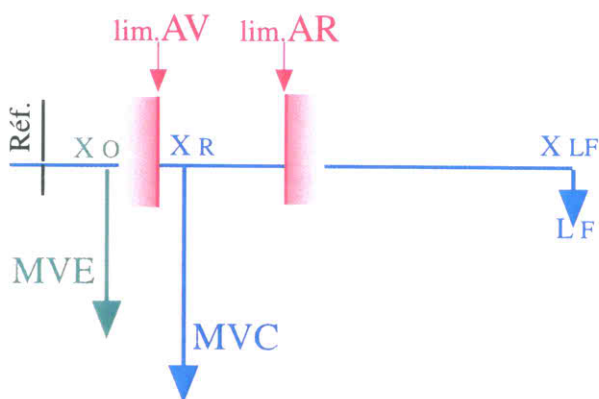
La mise en place d'un lest fixe justifie une nouvelle pesée qui seule permet le contrôle de la nouvelle masse à vide et la justesse de la correction du centrage.

3.1. Correction d'un centrage à vide trop avant

Le centrage à vide X_o , point d'application de la masse à vide MVE est situé en avant de la place de centrage à vide préconisée. Il est corrigé par la mise en place d'un lest fixe LF implanté au point X_{LF} .

Le centrage recherché est le point X_r .

Les points X_o , X_f et X_r sont «cotés» par rapport à la référence.



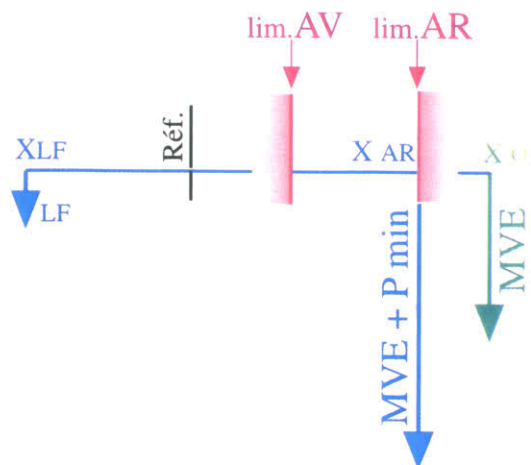
La masse du lest est trouvée lorsque la relation suivante est satisfaite :

$$LF (X_{LF} - X_r) = MVE(X_r - X_o)$$

$$LF = \frac{MVE (X_r - X_o)}{X_{LF} - X_r}$$

3.2 Correction d'un centrage à vide trop arrière

Contrairement au cas précédent, X_o est trop arrière et le lest fixe LF est implanté dans le nez du planeur.



$$LF (X_{LF} + X_r) = MVE(X_o - X_r)$$

$$LF = \frac{MVE (X_o - X_r)}{X_{LF} + X_r}$$

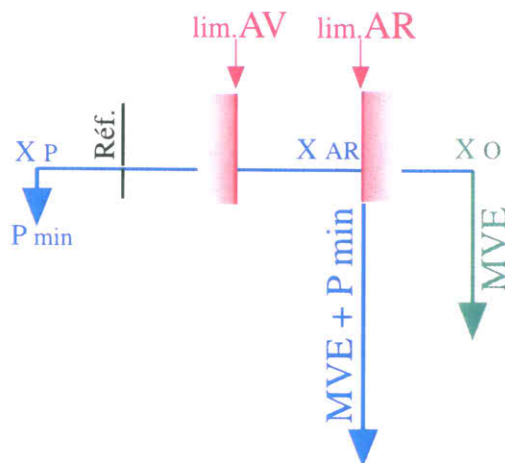
4. CALCUL DES MASSES MAXI ET MINI DU PILOTE

Les limites de centrage à considérer ne sont plus les limites de centrage à vide mais les limites de centrage en ordre de vol.

4.1. Masse minimale du pilote

Il s'agit de déterminer la masse minimale d'un pilote équipé en dessous de laquelle la limite arrière de centrage en vol est atteinte.

Un planeur présente à vide une masse MVE et un centrage X_o . Le pilote de masse maximale P_{min} est installé sur son siège en un point X_p .



Le poids mini du pilote est celui qui justifie la relation suivante :

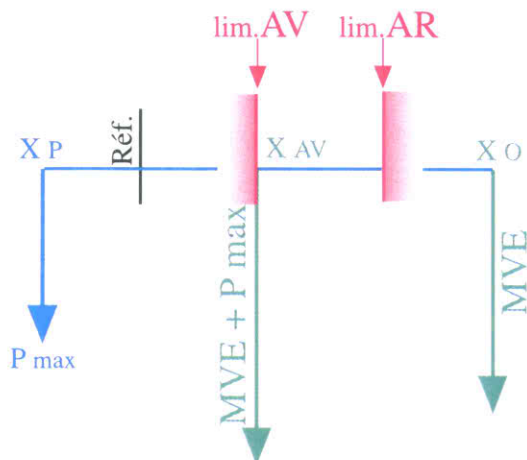
$$P_{\text{mini}} \times (X_P + X_{AR}) = LVE (X_O - X_{AR})$$

$$P_{\text{mini}} = \frac{MVE (X_O - X_{AR})}{X_P + X_{AR}}$$

4.2. Masse maximale du pilote

A l'inverse du cas précédent, il s'agit de déterminer la masse maximale d'un pilote équipé au-delà de laquelle la limite avant de centrage en vol serait franchie.

La méthode de calcul reste identique, mais la masse du pilote est calculée pour amener le centrage du planeur chargé à sa limite avant.



La masse maxi du pilote est trouvée lorsque la relation suivante est satisfaite :

$$P_{\text{maxi}} (X_P + X_{AV}) = MVE (X_O - X_{AV})$$

$$P_{\text{maxi}} = \frac{MVE (X_O - X_{AV})}{X_P + X_{AV}}$$

Un calcul analogue peut être appliqué pour le chargement d'un planeur biplace.

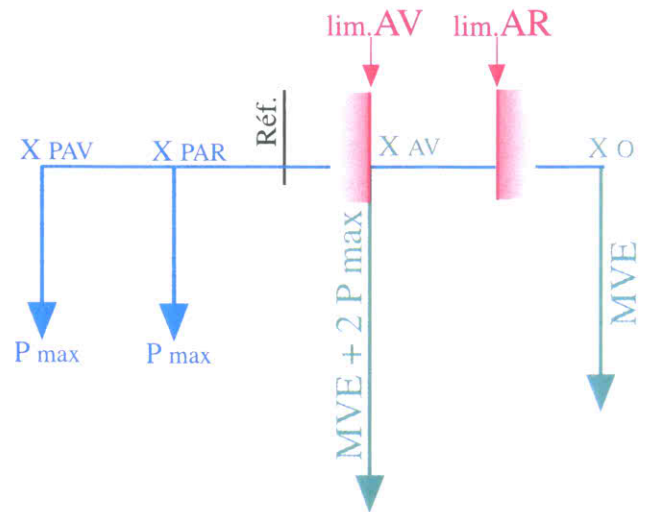
Deux cas peuvent être distingués :

1er cas :

La masse d'un des pilotes est connue et sa place dans le planeur aussi. Le centrage est calculé en un premier temps avec ce seul pilote à bord. Ensuite, il suffit de déterminer la masse du pilote supplémentaire qui en fonction de sa place amènera le centrage en position maxi avant (même calcul que pour un mono-place).

2ème cas :

La masse d'aucun des occupants n'est connue. C'est la masse totale de l'équipage qui sera prise en considération en supposant que les deux pilotes présentent des masses identiques.



$$P_{\text{max}} (X_{PAV} + X_{AV}) + P_{\text{max}} (X_{PAR} + X_{AV}) = MVE (X_O - X_{AV})$$

$$2P_{\text{max}} (X_{PAV} + X_{PAR} + 2X_{AV}) = MVE (X_O - X_{AV})$$

$$2 P_{\text{mini}} = \frac{MVE (X_O - X_{AV})}{X_{PAV} + X_{PAR} + 2X_{AV}}$$

5. CORRECTION DU CENTRAGE PAR LEST AMOVIBLE

Le planeur étant centré à vide pour admettre des pilotes équipés de masse «standard» (70 à 110 kg) ou étant exceptionnellement limité dans une fourchette de masses plus réduite, il faut admettre qu'un pilote de masse inférieure à la limite prescrite ait à effectuer un vol.

Il convient alors de corriger le centrage pour les besoins de ce vol. On utilise alors un **lest amovible**.

5.1. Correction par «coussin plombé»

C'est en principe le système le plus simple. Le pilote s'assoit sur un coussin garni de grenaille de plomb. La masse totale pilote + coussin correspond à la masse recherchée. Pour les pilotes de «petit gabarit», le coussin peut être très lourd et difficile à manipuler (ce sont les plus petits pilotes qui ont à porter les plus gros coussins !).

Toutefois, cette solution limite le risque d'oubli du lest dans les puits à gueuse peu visibles et souvent d'accès difficile.

5.2. Correction par «gueuses»

Un puits à gueuses est aménagé dans le planeur pour recevoir autant de lest qu'il est nécessaire pour qu'un pilote de 55 kg équipé puisse prendre place à bord.

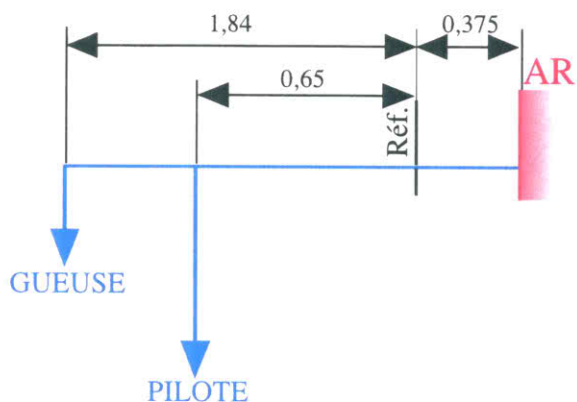
Les gueuses sont des pièces de plomb de forme adaptée au puits (disques, lingots, plaques etc...).

La corrélation entre la masse des gueuses et la correction correspondante de masse pilote dépend de la différence des longueurs de bras de levier du puits à gueuse et du siège pilote mesurés dans la limite AR de centrage en vol.

Exemple :

C101 Pégase :

limite AR de centrage	+ 0,375 m
bras de levier pilote	- 0,65 m
bras de levier gueuses	- 1,84 m



$$\frac{\text{masse gueuse}}{\text{correction pilote}} = \frac{\text{bras de levier gueuse}}{\text{bras de levier pilote}}$$

$$\frac{\text{masse gueuse}}{\text{correction pilote}} = \frac{1,84 + 0,375}{0,65 + 0,375} \approx 2$$

- 1 kg de gueuse corrige un déficit de masse pilote de 2 kg
- inversement une correction de 8 kg de masse pilote exige approximativement :

$$\frac{8}{2} = 4 \text{ kg de gueuse.}$$

La correction du centrage par gueuses fait l'objet d'un tableau dans le manuel de vol et d'un affichage par plaquette dans la cabine du planeur.

Aussi le pilote est-il dispensé de tout calcul.

V - CENTRAGE DU PLANEUR CHARGE

1. CALCUL DU CENTRAGE « EN ORDRE DE VOL »

Il s'agit de déterminer le centrage exact du planeur en vol, tel qu'il résulte de son chargement.

Toute masse ne figurant pas dans l'inventaire de la pesée doit être prise en compte pour ce calcul

Le manuel de vol indique la valeur des bras de levier correspondant à l'emplacement des charges habituelles :

- bras de levier du ou des sièges ;
- bras de levier du coffre à bagage ;
- bras de levier des lests amovibles ;
- bras de levier des ballasts d'aile ;
- bras de levier de l'équipement d'oxygène etc...

Rappelons que les bras de levier sont considérés comme **négatifs** quand la charge est positionnée à l'avant de la référence et **positifs** si la charge est positionnée à l'arrière.

C'est la méthode des moments qui est utilisée.

On remplit un tableau permettant d'effectuer la somme des masses, le calcul et l'addition algébrique des moments.

La division de la somme des moments par la masse totale est le centrage en charge.

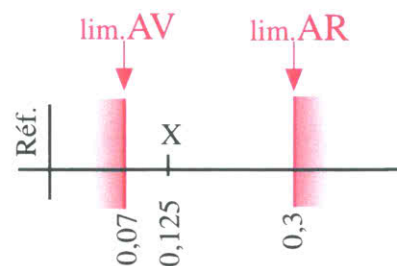
Exemple :

Quels sont la masse et le centrage d'un planeur dont le chargement est décrit ci-dessous et les limites de centrage AV + 0,07 m AR 0,300 m.

CHARGES	MASSES	BRAS DE LEVIER	MOMENTS
Planeur VIDE	385,3	x + 0,507	= +195,30
Pilote AVANT	75	x - 1,300	= - 97,50
Pilote ARRIERE	72	x - 0,190	= - 13,68
BAGAGES	5	x - 0,100	= - 0,50
BALLASTS D'AILES	50	x - 0,196	= - 9,80
LEST AMOVIBLE		x	=
BALLAST DE QUEUE		x	=
TOTAL	587,3	+0,125	+ 73,82

$$\text{Bras de levier résultant} = \frac{\text{Somme des moments}}{\text{Somme des masses}}$$

$$= \frac{73,82}{587,30} = 0,125$$



Le centrage est contenu dans les limites prescrites et peut être accepté.

En fin de vol, les ballasts sont vidangés.

Que donne le centrage du planeur ?

CHARGES	MASSES	BRAS DE LEVIER	MOMENTS
Planeur VIDE	385,3	x + 0,507	= +195,30
Pilote AVANT	75	x - 1,300	= - 97,50
Pilote ARRIERE	72	x - 0,190	= - 13,68
BAGAGES	5	x - 0,100	= - 0,50
BALLASTS D'AILES	50 0	x - 0,196	= -9,80 0
LEST AMOVIBLE		x	=
BALLAST DE QUEUE		x	=
TOTAL	537,3	+0,155	+ 83,62

$$\text{Bras de levier résultant} = \frac{\text{Somme des moments}}{\text{Somme des masses}}$$

$$= \frac{83,62}{537,30} = 0,155 \text{ m}$$

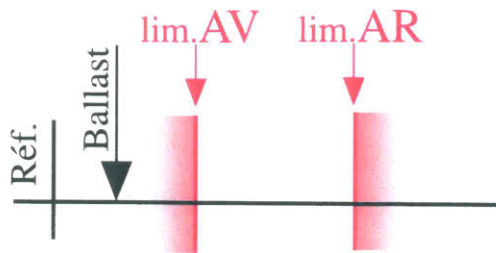
On note que la vidange des ballasts a fortement reculé le centrage. C'est en général le cas des planeurs ballastables (mais pas de tous).

Il est donc très important de vérifier à la fois le centrage ballasts pleins et le centrage ballasts vides, de manière à éviter tout dépassement des limites lors de la vidange.

2. INFLUENCE DE L'IMPLANTATION DES WATER-BALLASTS

L'influence des water-ballasts sur le centrage des planeurs dépend de leur implantation et donc de leur position par rapport à la plage des centrages.

2.1. Ballasts implantés en avant de la limite AV



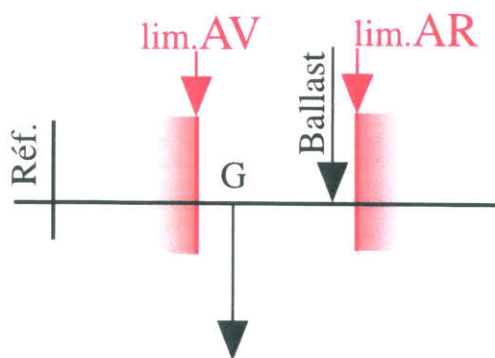
C'est le cas général et quelque soit le centrage initial du planeur (ballasts vides) le remplissage modifie le centrage vers l'avant et inversement la vidange ramène le centrage vers l'arrière.

2.2. Ballasts implantés entre les limites AV et AR

Sur certains planeurs, les water-ballasts sont situés entre les limites AV et AR de centrage.

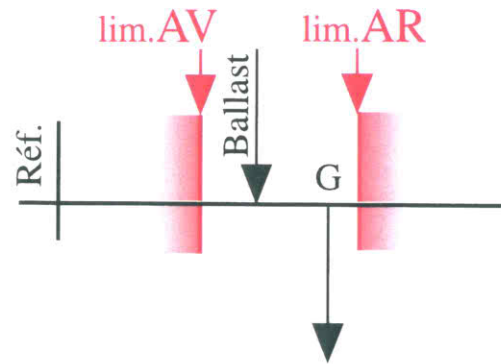
Leur influence sur la position du centre de gravité est donc double :

a) Planeur centré «avant», avant remplissage



Si le planeur est centré en avant de la position des water-ballasts, leur remplissage a pour effet de ramener le centrage vers l'arrière et la vidange de le ramener en avant.

b) Planeur centré «arrière», avant remplissage :



Si le planeur a un centrage non ballasté dans la partie arrière de la plage, le remplissage a pour effet d'avancer le centre de gravité et la vidange de le ramener en arrière.

2.3. Ballasts implantés en AR de la limite AR

Il n'y a pas de cas de water-ballasts implantés en arrière de la plage de centrage (sauf ballast de dérive).

3. OPTIMISATION DU CENTRAGE

Bien que contenue dans les limites spécifiées par le constructeur, le centrage peut être jugé perfectible par le pilote à la recherche de meilleures performances ou d'un plus grand agrément de pilotage (ou des deux).

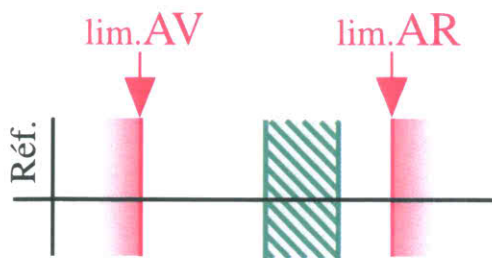
L'optimisation du centrage consiste donc à amener le centre de gravité à une position convenable qui en général privilégie à la fois les performances et l'agrément.

Les préférences des pilotes en matière de centrage idéal sont vastes et varient d'un pilote à l'autre.

On remarque en général que :

- un centrage trop près de la limite avant est généralement peu apprécié (pilotage lourd, difficulté de tenue des vitesses faibles en spirale).
- un centrage près de la limite arrière est théoriquement favorable aux performances en spirale, mais souvent considéré comme désagréable et fatigant surtout en transition rapide.

Il semble qu'une majorité de pilotes se dégage pour préférer une plage de centrage comprise entre le milieu de la plage générale et le milieu de la plage arrière.



La plage idéale reste toutefois une notion très suggestive qui dépend :

- des convenances propres à chaque pilote ;
- du type de planeur et de son modèle particulier ;
- de la charge alaire choisie ;
- du type de météo rencontrée etc...

Le bon compromis est avant tout le fruit de tâtonnements successifs et d'expériences accumulées vol après vol, dans des conditions variées.

Pour optimiser le centrage, trois moyens sont à disposition :

- changements de la répartition des masses dans le planeur ;
- correction du centrage par lest amovible ;
- utilisation de water-ballasts de dérive.

3.1. Changement de la répartition des masses :

Il s'agit d'intervertir des masses comprises dans le chargement du planeur, de manière à ramener le centrage à une valeur plus favorable.

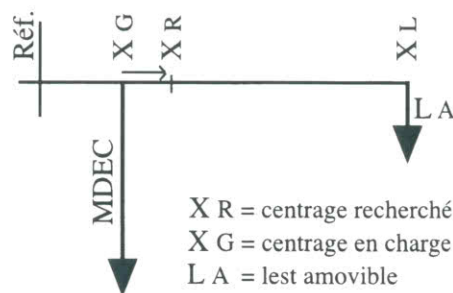
En pratique, cette possibilité reste limitée au chargement des planeurs biplaces en tandem où il est possible d'intervertir les pilotes s'ils sont de masses sensibles différentes.

3.2. Optimisation du centrage par lest amovible :

Le principe retenu est le même que celui qui préside aux corrections de centrage à vide ou pour ramener un centrage défectueux dans des limites spécifiées.

Le centrage est rétabli par la mise en place de lest amovible qui doit être disposé dans un emplacement **prévu à cet effet** (les bricolages, collages de masses ne sont pas reconnus) :

- puits à gueuse dans le nez pour corriger un centrage trop près de la limite AR ;
- puits à gueuse (coffre à batterie) de dérive si le planeur en est équipé pour corriger un centrage trop près de la limite AV.



$$LA (XL - XR) = MDEC(XR - XG)$$

$$LA = \frac{MDEC(XR - XG)}{XL - XR}$$

Exemple :

La pesée d'un planeur chargé donne les valeurs suivantes :

MDEC = 420 kg ; XG = 0,300 m.

Le pilote désire optimiser le centrage à la valeur XR = 0,325 m.

Quelle valeur de lest doit-il déposer dans le puits de dérive qui est situé à 4,3 m de la référence ?

$$LA = \frac{420(0,325 - 0,300)}{4,3 - 0,325} = 2,64 \text{ kg}$$

Un lest de 2,6 kg dans le compartiment de queue ramène le centrage à la valeur souhaitée.

Remarque :

Le poids du lest se rajoute à la masse des parties non portantes et augmente d'autant la masse au décollage.

4. UTILISATION DU BALLAST DE DERIVE

On a vu précédemment que le positionnement des water-ballasts était souvent tel qu'il ramenait le centrage vers l'avant lors du remplissage. Cette particularité nuit généralement aux performances et à l'agrément de pilotage.

L'utilisation du water-ballast de queue permet d'optimiser le centrage, notamment pour les raisons suivantes :

- compensation du remplissage des water-ballasts principaux ;
- compensation de la masse pilote.

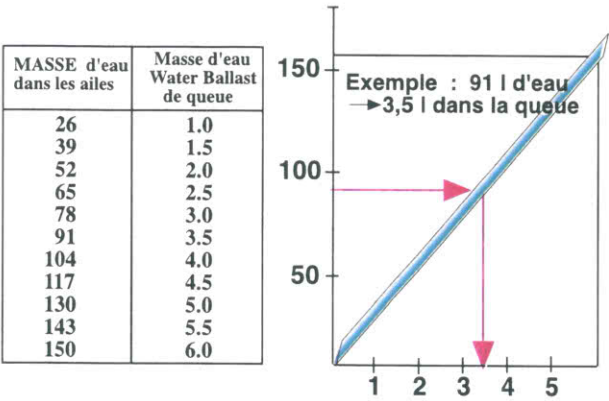
4.1. Correction de ballastage

Le déplacement vers l'avant du centre de gravité causé par les water-ballasts peut être compensé par le remplissage d'un réservoir d'eau dans la dérive.

Le ballast de dérive destiné à compenser le centrage dû aux water-ballasts d'aile possède un dispositif de vidange solidaire du dispositif de vidange des water-ballasts principaux et ce pour palier tout oubli fâcheux qui risque d'entraîner un dépassement de la limite AR.

La correspondance entre le remplissage des water-ballasts d'aile et le contenu du réservoir de dérive est donnée soit par un tableau soit par un graphique :

Exemple : DISCUS



4.2. Compensation de la masse pilote :

Un tableau ou un graphique indique la quantité d'eau à charger pour compenser une masse déterminée de pilote (pilote équipé).

La limite AR de centrage étant atteinte pour un pilote de 70 kg, la compensation de centrage ne s'effectue que pour un pilote dont la masse équipée est supérieure à 70 kg.

Exemple : LS6, maximum 5,5 l

MASSE PILOTE EQUIPE	QUANTITE D'EAU Water ballast arrière
70 kg	0
80 kg	1 l
90 kg	2 l
100 kg	3 l
110 kg	4 l

4.3. Compensation masse pilote et ballast

Le ballast de queue peut aussi être utilisé à la fois pour compenser la masse pilote et le chargement avant des water-ballasts. Les calculs sont cumulables dans la limite de la capacité généralement faible du réservoir.

Attention :

La masse d'eau disposée dans le ballast de dérive se rajoute à la masse totale et à la masse de parties non portantes. Si ce type de ballast doit être utilisé, il est impératif de vérifier que ce complément de charge est possible sans outrepasser ces limites.

5. UTILISATION DE LA PESEE EN CHARGE

L'optimisation du centrage est une correction fine qui demande une connaissance précise du chargement du planeur et des bras de levier correspondant aux charges disposées. Par exemple le bras de levier «pilote» qui dépend, entre autres, du réglage du siège et le la position du palonnier peut être sensiblement différent du bras de levier «siège pilote» décrit dans le manuel de vol.

Tout calcul précis peut être fastidieux et pas toujours juste. Une manière simple d'obtenir le résultat recherché sans risque d'erreur est d'effectuer une pesée «en charge».

Le planeur est déposé sur la bascule comme dit dans le chapitre «pesée», étant préalablement chargé dans les conditions exactes du vol. Plusieurs pesées peuvent être effectuées avec en particulier une pesée ballast vide, puis avec plusieurs remplissages.
