

TRAINS D'ATTERRISSAGE

1) **Introduction** : Le train d'atterrissage d'un avion, comme son nom l'indique sert à assurer dans de bonnes conditions le posé de celui-ci , mais aussi son décollage. Suivant la dextérité du pilote le train aura à subir des efforts plus ou moins importants lors du "contact" avec la planète.

On entend par train d'atterrissage, le train principal, comportant en général 2 roues positionnées sous l'aile, qui encaisse le maximum d'efforts lors de l'atterrissage, et le train secondaire qui ne comporte qu'une roue, positionnée soit à l'arrière de l'avion (train classique), on parle alors de roulette de queue, ou à l'avant (train tricyle).

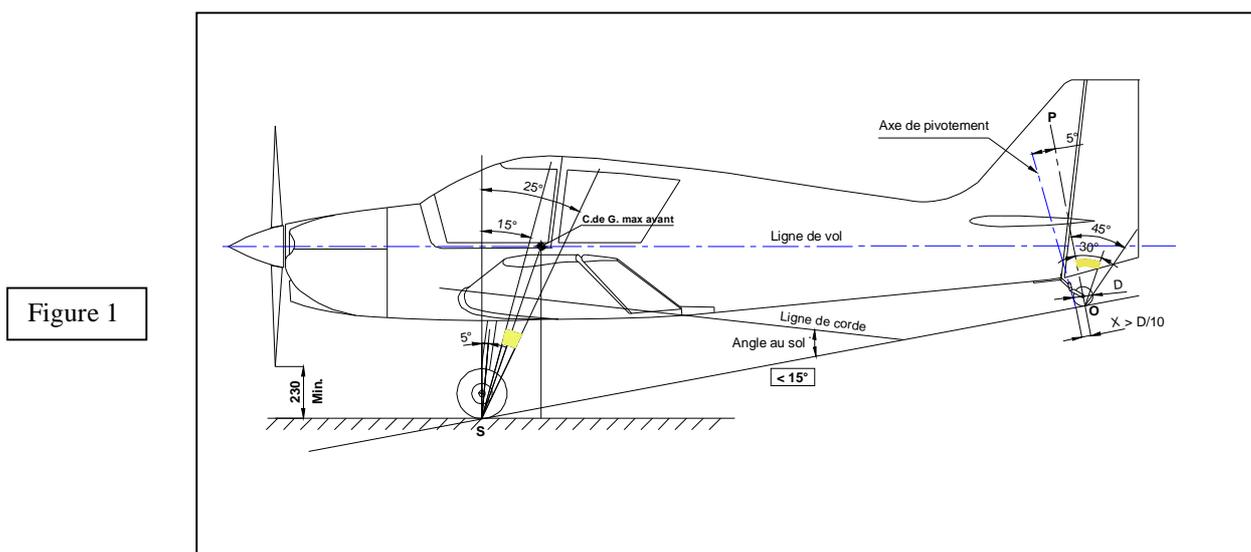
2) **Conception** : Pour déterminer les caractéristiques géométriques des trains , nous ferons la distinction train classique versus train tricyle. Les informations sont tirées de l'ouvrage de L. Pazmany: "Landing gear design for light aircraft ".

2.1) **Train classique** : Il a eu son heure de gloire jusque vers les années 70 , pour sa simplicité donc sa légèreté. Ses inconvénients liés à son manque de visibilité et son maniement quelque peu délicat par vent de travers (cheval de bois), ont eu raison de son développement au profit du train tricyle.

Il suffit pour s'en rendre compte de lancer sur le sol un petit chariot à trois roues dont la roue arrière est libre en direction. Celui-ci à une très forte tendance à se retourner, l'arrière passant préférentiellement vers l'avant (instabilité de route), alors que l'on n'a pas ce phénomène si l'on lance le chariot avec la roue directrice en avant (train tricyle)

Cependant, les puristes du vol lui accorde toute leur passion.(nostalgie!), car l'atterrissage par vent de travers peut devenir un vrai défi.

- Pour le positionnement du train principal, on part du centre de gravité max avant de l'avion



(voir figure 1), le point de contact de la roue avec le sol **S** se trouve devant le C de G. et doit se trouver dans une zone comprise entre 15 et 25°. Si le point de contact est trop en avant, on aura du mal à mettre l'avion en ligne de vol et s'il est trop en arrière, on risque le basculement sur le nez lors de l'atterrissage.

Le mouvement de la roue lié à la compression des amortisseurs doit se trouver dans un angle de 5° avec la verticale au point de contact.

Enfin la garde au sol de l'hélice qui déterminera la hauteur du train d'atterrissage est prise à 230 mm en ligne de vol. Cette garde au sol devra être encore positive (quelques cm) avec les pneus dégonflés et les amortisseurs comprimés à fond.

- En ce qui concerne le positionnement de la roulette de queue, celle-ci sera fixée le plus en arrière possible pour diminuer au maximum la charge qu'elle supporte, mais en tenant compte aussi de la rigidité de la structure sur laquelle elle sera fixée.

L'angle au sol sera tel que l'avion devra toucher d'abord le train principal, il sera choisi de 1 ou 2° de moins que l'angle de portance max.(environ 15° pour la plupart des profils courants)

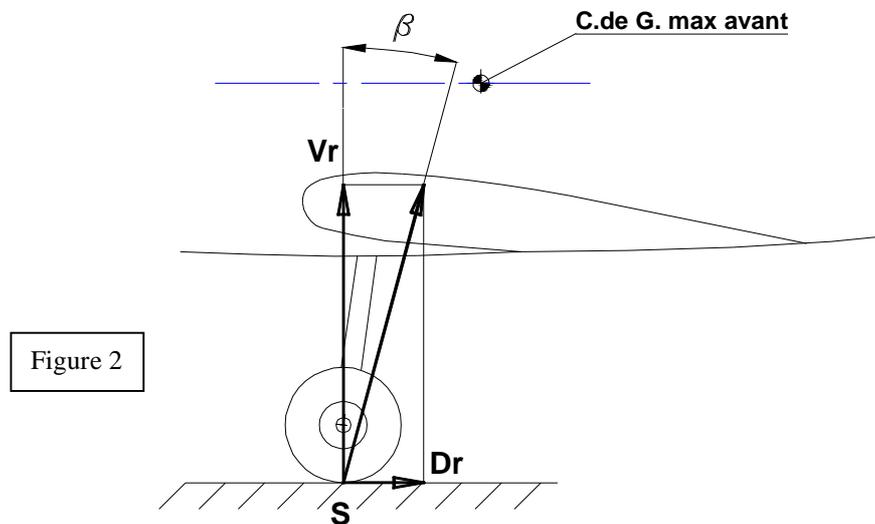
Il faudra aussi vérifier que la roulette ne touche pas le sol lors de la rotation, ce qui n'est normalement pas le cas , car l'angle de décollage est plus petit que l'angle d'atterrissage (déterminé par l'angle au sol).

L'axe de pivotement doit être incliné de 5° vers l'avant par rapport à la verticale **P** au sol, en phase de roulage. La distance **X** au sol entre l'axe de pivotement et le point de contact de la roulette avec le sol doit être supérieure ou égal au 1/10 du diamètre **D** de la roulette..

$$X > D/10$$

D'autre part, la déflexion de la roulette soumise à l'amortisseur doit rester dans un angle de 45° et mieux de 30° comme indiqué sur la figure 1.

Remarque : Il existe une autre méthode, déterminée par la FAR-23 Appendix C, pour fixer la position du train principal, en considérant l'avion lors de l'atterrissage:



Au moment du toucher des roues, il s'exerce au point de contact **S** avec le sol:

- Une force **Vr** due à la réaction du sol et proportionnelle au poids de l'avion, et aux accélérations telle que : $Vr = (n-L) P$ avec :
 - P = Poids de l'avion
 - n = Facteur de charge que doit encaisser le train(pris égal à 3 par la FAR-23)
 - L = Ratio Portance / Poids lors de l'atterrissage (pris à 0,667)

- Une force **Dr** due au frottement que l'on peut écrire :

$$Dr = K.n.P \text{ avec :}$$

K = Coefficient de friction pris généralement à 0,25 pour les avions de poids inférieur à 1,5T.

Si nous formons le rapport V_r / D_r pour retrouver la tangente de l'angle \mathbf{b} de la figure 2, il vient :

$$\frac{D_r}{V_r} = \frac{K n P}{(n-L) P} = \text{Tg } \mathbf{b} = \frac{K \cdot n}{n-L} = \frac{3 \cdot 0,25}{3 - 0,667} = \frac{0,75}{2,333} = 0,32$$

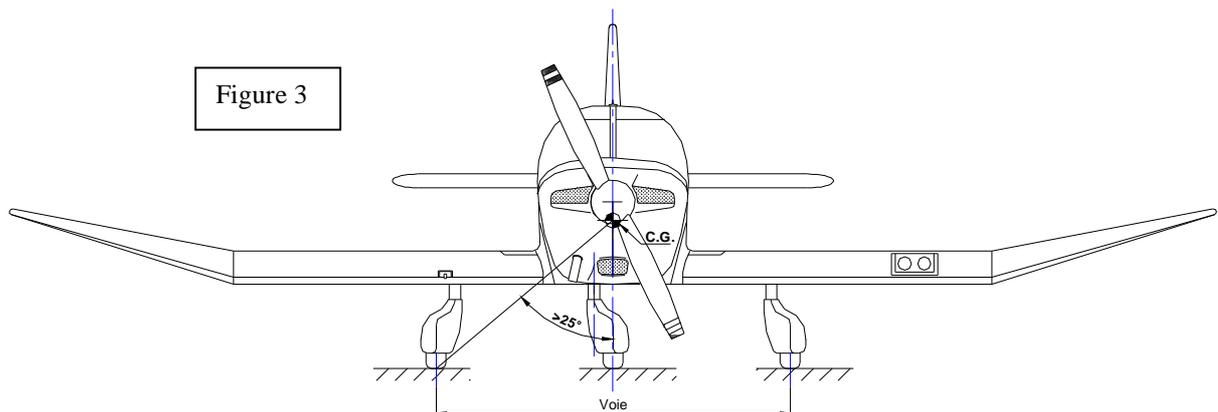
D'où $\mathbf{b} = 18^\circ$

Pour éviter le basculement de l'avion sur le nez, le centre de gravité devra se trouver à droite de la résultante de $\mathbf{D_r}$ et $\mathbf{V_r}$.

On retrouve le résultat de la figure 1 où l'on remarquait que le centre de gravité était situé dans le secteur compris entre les angles 15 et 25°.

2.2) Ecartement du Train principal (Voie du train) : Cette notion est commune au train classique et au train tricyle (figure 3)

L'angle formé par la verticale au centre de gravité et la ligne joignant ce centre de gravité au point de contact de l'une des roues principales ne doit pas être inférieur à 25° (risque de basculement sur l'aile en virage serré au sol).



2.3) Train Tricycle : Nous considérerons cette fois-ci la limite arrière du centre de gravité, et en se reportant à la figure 4 représentant l'avion en configuration d'atterrissage.

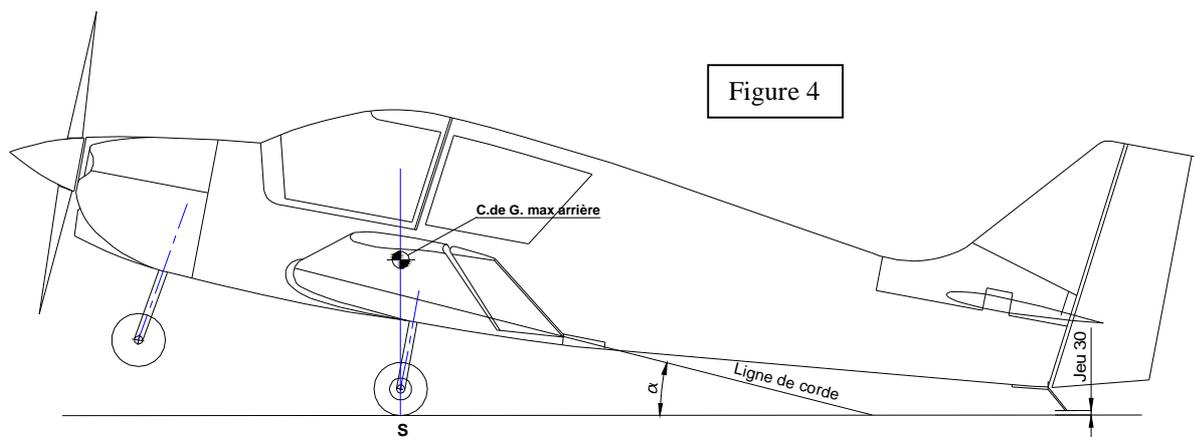
Position du train principal : Celui-ci ne devra pas être trop en avant pour ne pas risquer de toucher à l'arrière lors des décollages ou des atterrissages, ni trop en arrière pour ne pas avoir une charge à l'avant importante à soulever lors de la rotation (action de la gouverne de profondeur). En fait la roulette avant devra être le plus en avant possible du centre de gravité.

La charge normale sur le train avant est de l'ordre de 10 à 20% du poids total de l'avion.

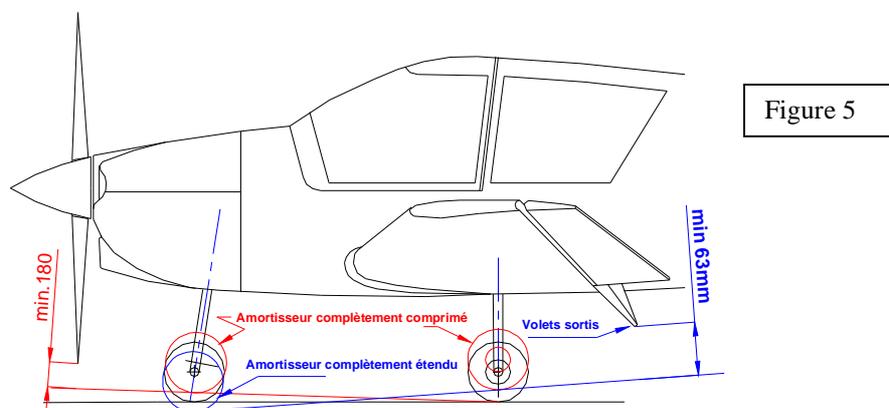
Un bon compromis serait 15% . Une charge trop faible rendrait le guidage au sol par la roue avant inefficace, et à la limite (moins de 8%) pourrait créer un effet de marsouinage lors des atterrissages.

Considérant la figure 4 , l'enchaînement est le suivant :

- Déterminer l'angle d'incidence de l'avion à la portance maxi volets rentrés, soit l'angle α .
- Positionner le centre de gravité maximum arrière.
- Dessiner l'avion sous l'angle α par rapport à l'horizontale.
- Tracer une verticale à partir du C de G. et une horizontale passant par la béquille arrière de protection.(prévoir un jeu de 30 mm environ)
- L'intersection de l'horizontale et de la verticale au point **S** donne le point de contact de la roue du train principal.
- Dessiner la roue dans la position où l'amortisseur et le pneu sont comprimés uniquement sous le poids de l'avion(charge statique).
- Après que la course de l'amortisseur a été déterminée, les positions extrêmes du train pourront être tracées : Complètement détendu (avion en l'air) et complètement comprimé (avion sous forte charge (3 g) à l'atterrissage)

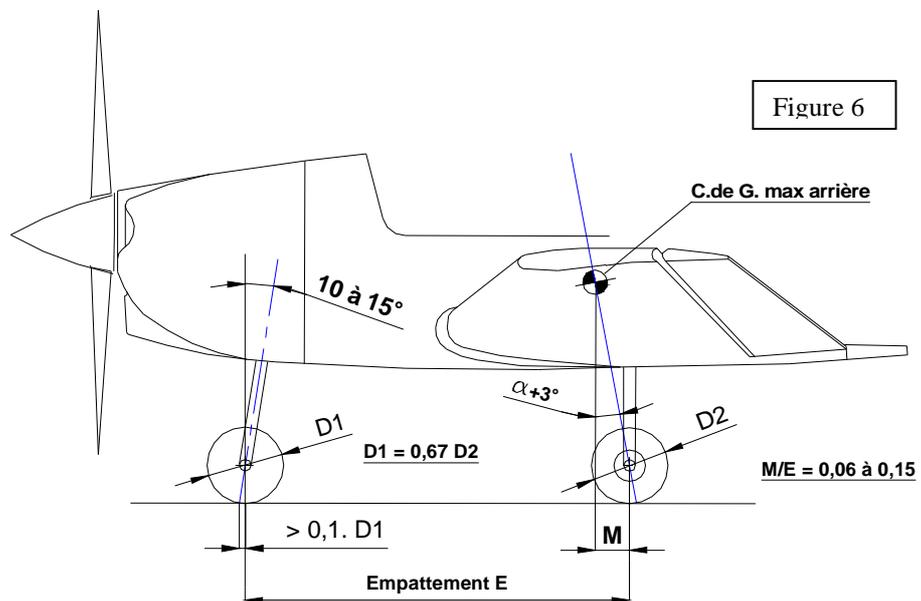


Il faut ensuite déterminer les jeux selon la position des amortisseurs en particulier pour l'hélice et pour les volets (selon la FAR 23) (figure 5)



La figure 5 précise les jeux mini à prévoir: 180 mm mini pour la garde au sol de l'hélice lorsque l'amortisseur et le pneu avant sont complètement comprimés, et 63 mm pour les volets lorsque les amortisseurs et les pneus du train principal sont complètement comprimés .

Position du train avant : Il reste à déterminer la position du train avant (Empattement **E**).



Pour cela on détermine la cote **M** entre la verticale du centre de gravité (avion en ligne de vol) et le point de contact de la roue avec le sol.(figure 6)

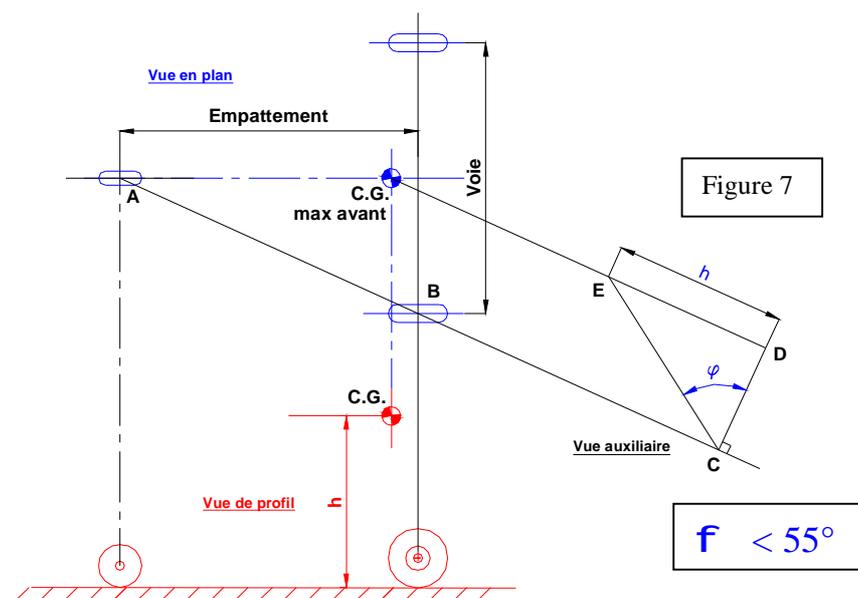
On a la relation :

$$M = 0,09 \text{ à } 0,15 E \text{ (on pourra prendre } 0,12 \text{ dans une première approche) d'où}$$

on tire:

$$E \text{ (empattement)} = 8,3 \cdot M$$

On vérifiera ensuite que la voie de l'avion est suffisante , en considérant la figure 7 dont le tracé est le suivant:



Sur une vue de profil dessiner la roue du train principal et la roulette avant (en rouge) en positionnant en hauteur le centre de gravité max avant . Soit " h " la hauteur.

Sur la vue en plan correspondante , dessiner les 3 roues des trains, selon leur voie et leur empattement (en bleu) ainsi que le centre de gravité.

On tracera ensuite la droite AB prolongée vers C. A partir du centre de gravité, on mènera une parallèle à AB, et en un point quelconque C de AB, on mènera CD, perpendiculaire à AB.

Du point D on reportera DE égal à h , puis on tracera CE pour former avec CD l'angle f .

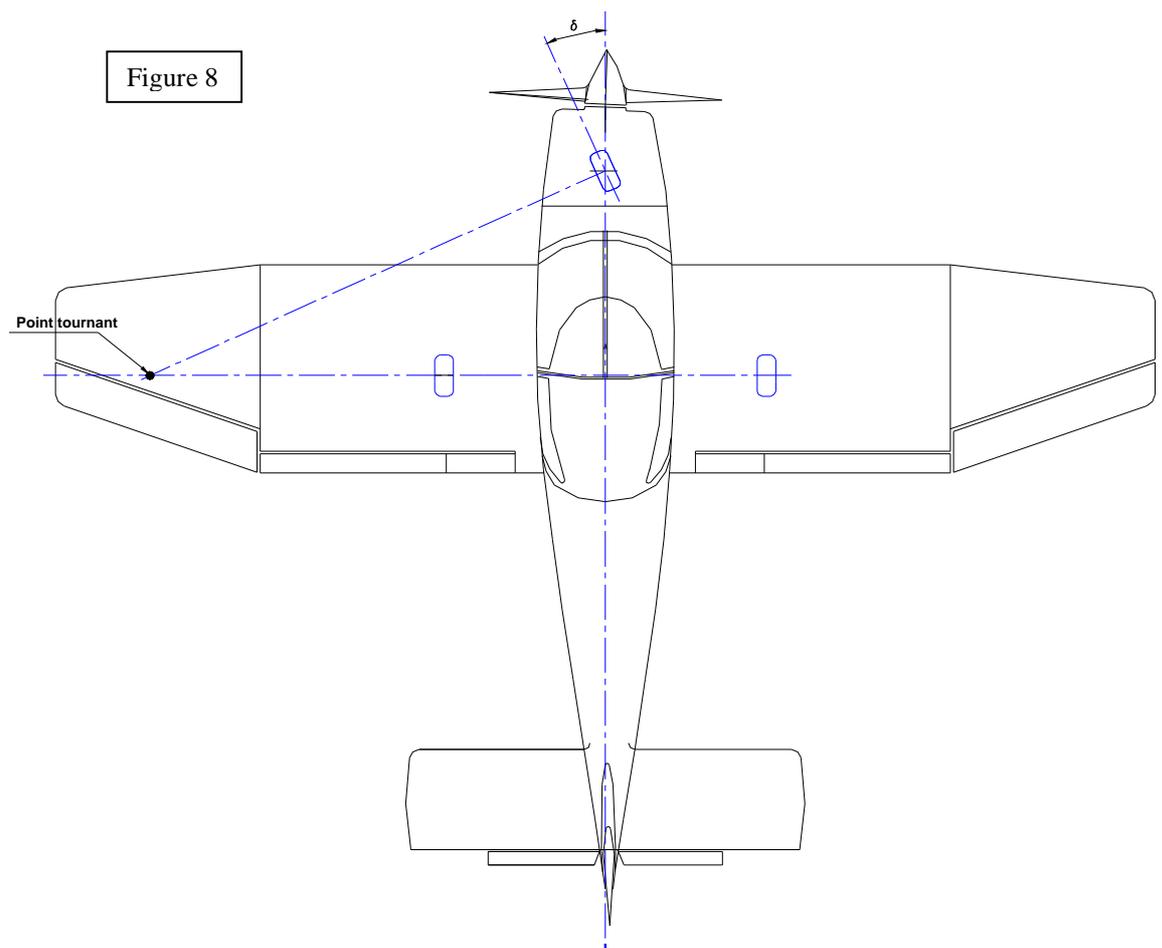
Cet angle f , appelé **angle de basculement** devra être trouvé inférieur à 55° , sinon on risque fort d'avoir, un basculement sur l'aile dans des virages serrés au sol.

On pourra ramener $f < 55^\circ$ en augmentant la voie ou l'empattement (roulette avant reportée le plus en avant possible).

Remarque : On pourra procéder au même contrôle pour un train classique en gardant $f < 63^\circ$.

Contrôle directionnel : Il est assuré soit par un freinage différentiel (pédale sur chaque palonnier) soit par application simultanée de la puissance moteur et d'un braquage de la gouverne de direction, soit encore par une roulette avant conjuguée au palonnier.

Dans le cas d'une roulette avant directionnelle (conjuguée) l'angle de braquage maxi d sera tel que le point tournant soit situé à l'intérieur de l'aile pour une meilleure manoeuvrabilité (voir figure 8)

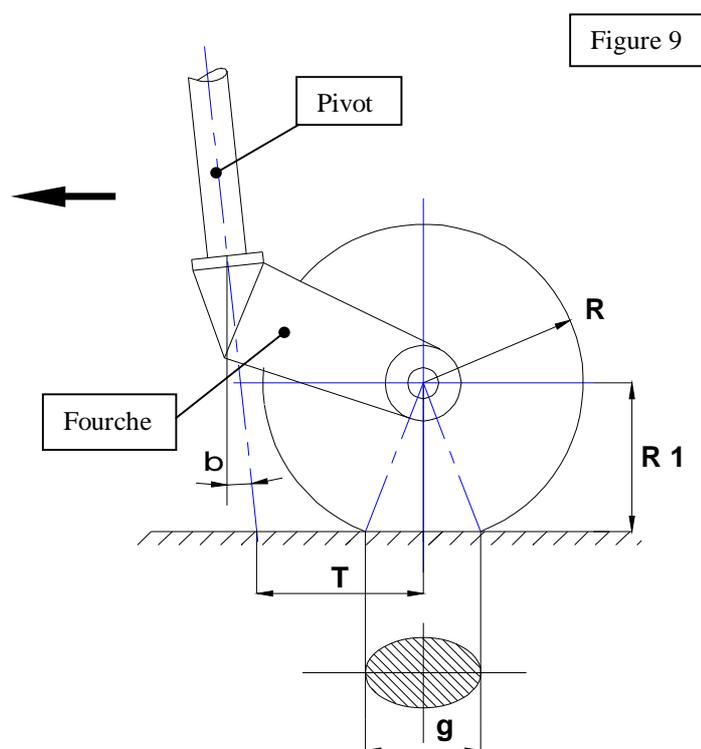


2-4) Considérations sur le train avant : Il existe 2 types principaux de train avant selon la position de l'axe vertical de direction (pivot) par rapport à l'axe de la roue.

Remarque : Les conclusions de ce chapitre pourront être étendues également aux roulettes arrière de trains classiques

2-4-1) L'axe du pivot ne passe pas par l'axe de la roue : La fourche qui maintient la roue est libre par rapport au pivot, la roue est libre en direction (figure 9) Le pivot est toujours devant l'axe de roue, pour obtenir une position stable de la fourche. La roue est dite "tirée"

Remarque : Du fait du poids d'une partie de l'avion reporté sur la roue avant, le pneu s'écrase légèrement au contact du sol, créant une surface de contact en forme d'ellipse dont nous appellerons " g " le grand axe. A l'arrêt, l'ellipse est à l'aplomb de l'axe de roue (empreinte statique), mais lors du mouvement vers l'avant l'empreinte s'allonge légèrement vers l'arrière du fait de la déformation du pneu, d'une quantité égale à $g/6$ environ (empreinte dynamique)



Les paramètres principaux définissant le train avant sont :

- L'angle b d'inclinaison du pivot.
- La distance T entre la trace de l'axe du pivot au sol, et le centre de l'empreinte statique.

Ces paramètres sont choisis pour limiter au maximum les effets du shimmy qui est une oscillation entretenue et mal contrôlée de la roue et de la fourche autour du pivot lors d'un roulage rapide.

Les effets du shimmy peuvent être dévastateurs pour le train avant. Il a lieu au-dessus d'une vitesse critique de rotation de la roue avant, qui dépend :

- 1) - De la distance T (qui est liée aussi à l'angle b)
- 2) - De la charge sur la roue avant, de sa taille (R) et de sa vitesse de rotation
- 3) - De la flexibilité latérale du train avant.
- 4) - De la masse et des moments d'inertie des pièces en mouvement (Roue et fourche).
- 5) - De la rigidité du pneu.

Pour déterminer ces 2 paramètres (**b** et **T**), nous envisagerons les différents cas possibles :

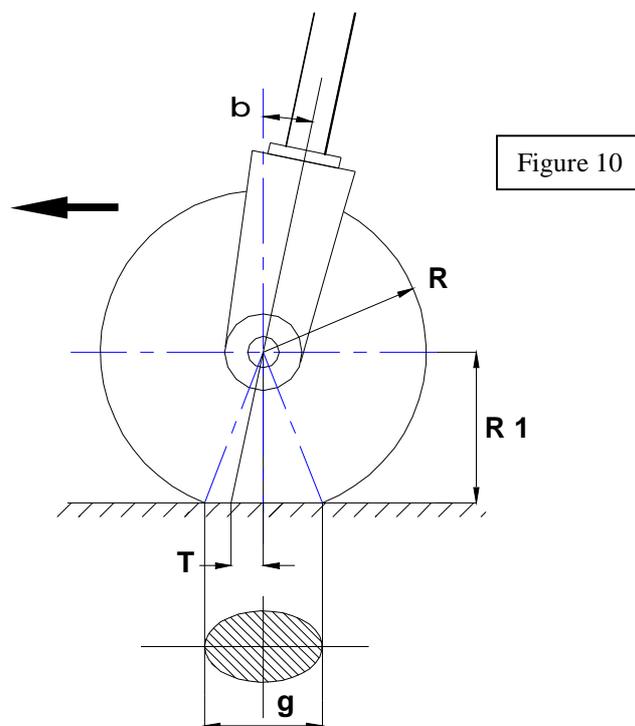
Cas a) Pour **b** = 0 (pivot vertical) on prend $0,3 R < T < 0,6 R$ Le train est dit statiquement neutre et dynamiquement stable. Il est recommandé de prévoir un amortisseur entre le pivot et la fourche.

Cas b) Pour $4^\circ < b < 6^\circ$ (pivot incliné vers l'avant) $R < T < 1,2R$ Le train est dit statiquement stable et dynamiquement stable. On peut ne pas prévoir d'amortisseur, mais il sera prudent de freiner la fourche en rotation (rondelles Belleville)

Pour une roulette de queue, on prendra $0,4 R < T < 1,2 R$

Cas c) Pour $0 < b < -15^\circ$ (pivot incliné vers l'arrière) Le train est dit statiquement instable et dynamiquement stable, dans ce cas, le fait de pivoter la fourche à droite ou à gauche, fait légèrement descendre le nez de l'avion dans une position plus stable. Ceci prouve que la position arrière de la fourche est instable. Il faut prévoir soit un couplage avec le palonnier, soit un recentrage automatique de la fourche (comme sur le train avant de Rallye)

2-4-2) L'axe du pivot passe par l'axe de la roue: (Figure 10)



Deux cas sont à envisager:

Cas a) **b** = 0 alors **T** = 0 Le pivot est vertical, le train est statiquement neutre, et dynamiquement neutre. Ce type de configuration n'est envisageable qu'avec un couplage avec le palonnier.

Cas b) $15^\circ < b < 20^\circ$ avec $T \approx 0,2 R$ (pour 15°) Le train est statiquement instable comme dans le cas c) du chapitre précédent, et dynamiquement stable. Le pivot doit être couplé au palonnier et un amortisseur peut s'avérer nécessaire. Ce cas n'est pas envisageable pour une roulette de queue.

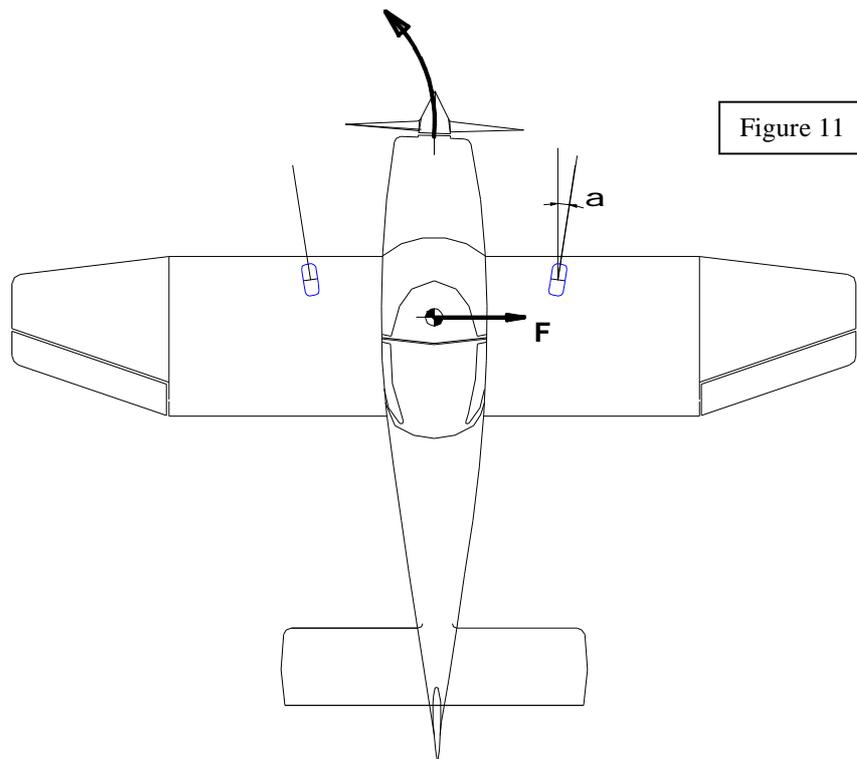
2-5) Parallélisme des roues du train principal : La question est de savoir, si les roues du train principal doivent être strictement parallèles ou au contraire, présenter une ouverture ou un pincement

La réponse très controversée serait de dire que:

- Pour les trains classiques une légère ouverture de 1 à 2° serait nécessaire (nous verrons pourquoi plus loin).

- Pour les trains tricycle, un très léger pincement inférieur à 1° pourrait être adopté.

De toute façon, il est quand même indispensable de vérifier ces angles, surtout pour les avions pratiquants beaucoup les pistes en dur (usure irrégulière des pneus)



Si nous considérons l'avion de la figure 11 avec les roues présentant un angle d'ouverture a (exagéré), s'il se trouve embarqué lors d'un atterrissage par vent de travers vers la gauche; la force centrifuge F induite tendra à reporter le poids en majorité sur la roue droite qui aura tendance à ramener l'avion vers la droite jusqu'à ce que la trajectoire devienne droite et annule la force F .

De même , si l'avion se pose sur la roue droite, celle-ci aura tendance à emmener l'avion vers la droite, ce qui créera , cette fois-ci une force centrifuge vers la gauche et fera basculer l'avion sur sa roue gauche et stabilisera la trajectoire.

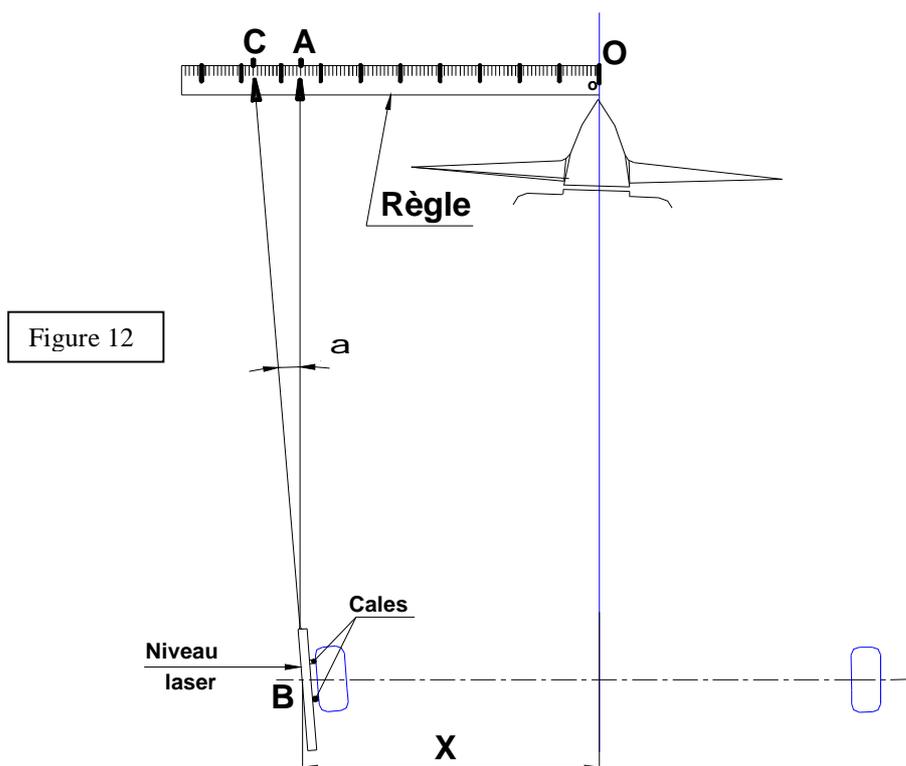
En inversant le sens de rotation de l'avion, et de poser de roue on observe la même notion de stabilité avec une ouverture des roues.

Une autre théorie inverse les conclusions, à savoir que si l'on est embarqué vers la gauche, la roue gauche se met de plus en plus en travers et crée un freinage alors que la roue droite se met dans l'axe créant ainsi un couple vers la gauche qui a tendance à amplifier le défaut.

En conclusion, il vaut mieux garder les roues parallèles.

Mesure du parallélisme : On peut utiliser un niveau laser, ce qui permet de prolonger la mesure et gagner en précision. (figure 12)

On pourra s'aider d'une règle graduée d'environ 2m de long (ou d'un gros mètre à ruban) que l'on placera au sol perpendiculairement à l'axe de l'avion. A l'aide d'un fil à plomb, on positionnera le zéro de l'échelle à la verticale de l'axe de l'avion (au point O).



On placera ensuite le niveau laser (voir photo) sur la jante de la roue (ici la roue gauche sur le dessin) de telle sorte que le rayon laser vienne sur la règle (au point C sur la figure).

On pourra utiliser 2 cales de même épaisseur sous le niveau, pour éviter que celui-ci ne vienne porter sur le pneu .

On mesurera la distance X entre l'axe de l'avion et l'axe du niveau, que l'on reportera en OA. On obtiendra alors la distance AC qui correspond à l'ouverture (ou au pincement) de la roue gauche .

L'angle a sera déterminé par :

$$\operatorname{tg} a = AC/AB$$

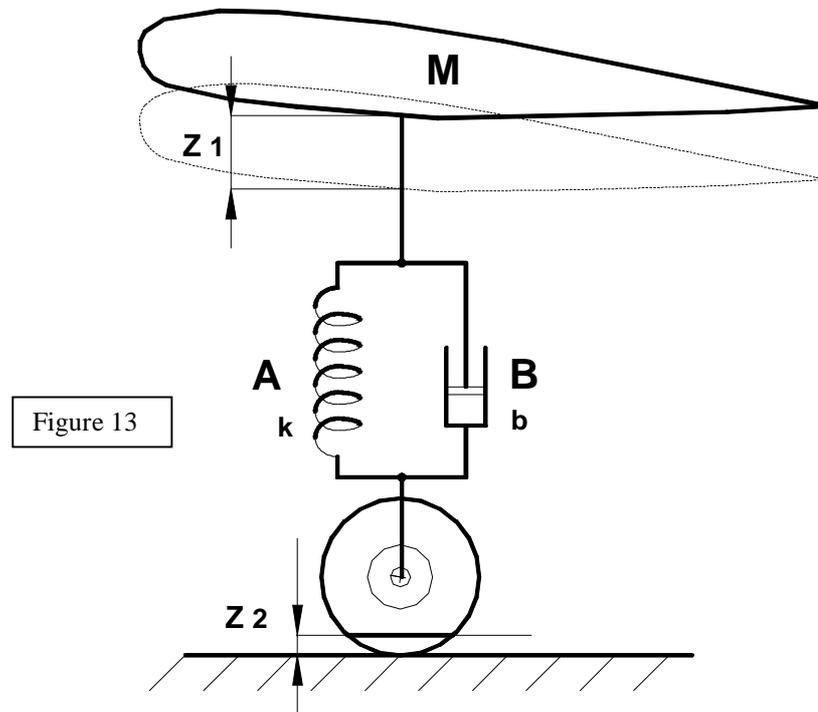
La géométrie de l'autre roue sera déterminée de la même façon symétriquement.



3) Suspension des trains d'atterrissage : Au tout début de l'aviation, les trains étaient rigides, ce qui, en dehors du fait que les roulages étaient inconfortables, les rendaient très fragiles lors des atterrissages durs. Ainsi, à l'instar de l'automobile, le concept de suspension s'est développé.

Si nous examinons la figure 13, qui schématise une suspension, nous voyons qu'elle se compose:

- d'un dispositif A, destiné à absorber les chocs.
- d'un dispositif B, destiné ,en parallèle à amortir les oscillations générées lors de l'absorption des chocs.



3-1) L'absorption (A) : Lorsque l'avion touche le sol, plus ou moins durement, il faut absorber l'énergie cinétique liée au poids et à la vitesse verticale de l'avion (diminué de la portance résiduelle) par un dispositif mécanique qui évitera les déformations de la cellule.

On utilise couramment:

- Des ressorts (spirale , à lame ou à barre de torsion)
- Des élastiques(sandows)
- Des vérins à air comprimé.
- Des morceaux de caoutchouc travaillant en compression...

La caractéristique principale de l'absorbeur est la raideur **k**.

L'effort exercé par l'absorbeur est :

$$F1 = - k \cdot z1 \quad z1 \text{ étant la course effectuée sous l'effort } F1$$

Les pneus participent également par leur élasticité à l'absorption des chocs éventuels et ils subissent également sous l'effort **F1**, une déflexion **z 2**.

3-2) L'amortissement (B) : Ce dispositif peut-être considéré comme un ralentisseur de course, on dit plus couramment un amortisseur . Lorsque l'absorbeur d'énergie **A** (ici un ressort spirale) se comprime sous l'effet de l'impact , il a tendance ensuite à se détendre et revenir à sa position d'origine. En l'absence d'amortisseur (donc de frottement) , il s'ensuivrait une série d'oscillations fort désagréables. C'est pourquoi on ajoute cet amortisseur que l'on trouve sous la forme :

- De vérins hydrauliques dont le piston comporte des petites ouvertures par lesquelles l'huile s'échappe lors de la compression ou de l'extension.
- Des compas comprenant des disques à friction frottant les uns sur les autres (on se souvient des amortisseurs de 2 CV Citroën)

La caractéristique principale de l'amortisseur est sa force de frottement , proportionnelle à la vitesse verticale.

$$F_2 = -b V$$

On peut faire varier la valeur de **b** en modifiant le diamètre des trous par lesquels l'huile circule.

4) Calcul des suspensions : Le calcul consiste à déterminer la course de la tige mobile d'une suspension oléopneumatique par exemple ou la déflexion d'une jambe de train constituée d'une lame d'acier, (type Cessna) d'aluminium ou de composite.

Connaissant le poids **P** de l'avion, la vitesse **V_v** de descente verticale, ainsi que les diverses constantes des suspensions, on peut déterminer la course.

La norme FAR 23.473, nous dit que le calcul du train se fera pour une vitesse verticale de toucher des roues, ne devant pas dépasser 3,05 m/s , mais supérieure à 2,13 m/s.(un bon atterrissage ou kiss landing se fait avec une vitesse verticale de 0,6 à 0,9 m/s)

$$2,13 \text{ m/s} < V_v < 3,05 \text{ m/s}$$

La même norme considère le facteur de charge limite $n = \frac{L}{P}$ avec **L** = Charge verticale maximale
P = Poids de l'avion

et donne $n \geq 2$. On prend généralement, par sécurité $n = 3$ par roue, sachant que, plus la course de l'amortisseur sera longue, et plus faible sera le facteur de charge limite (à la masse maxi).

Si l'on trace le diagramme donnant la charge sur le train de l'avion, en fonction de la course totale (suspension + pneu) soit $Z = Z_1 + Z_2$, on trouve une courbe analogue à celle montrée en figure 14

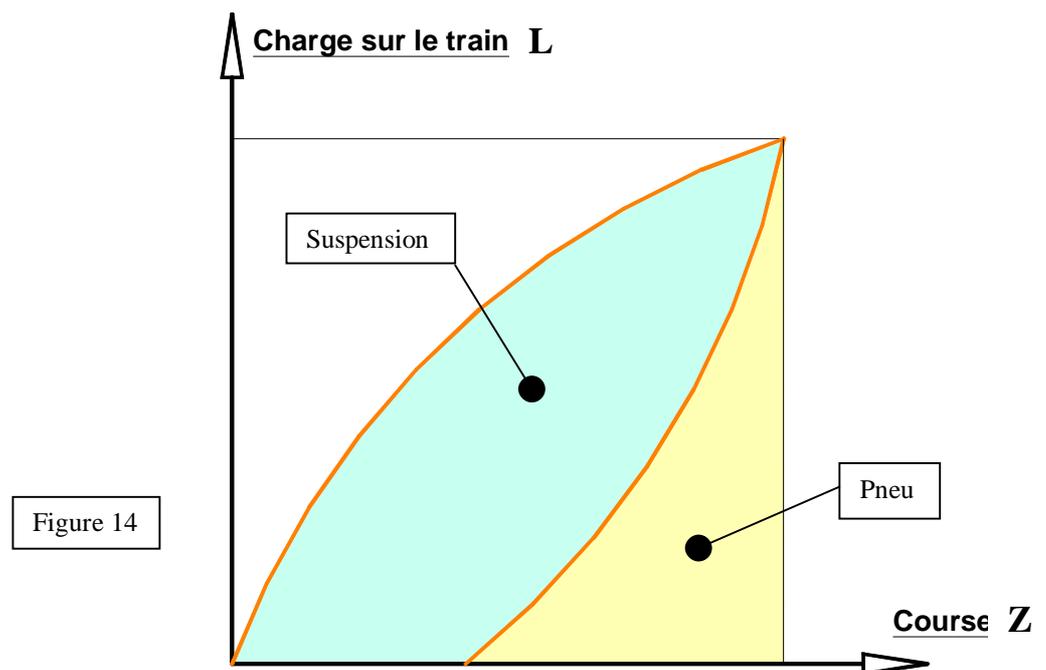


Figure 14

Les aires colorées représentent l'énergie totale **E** absorbée par la suspension (en bleu) et par le pneu (en jaune).

4-1) Calcul de la course de l'amortisseur :

Cette énergie totale est donnée par :

$$\boxed{E = h \cdot L \cdot Z}$$
 avec **h**: coefficient d'efficacité
L : Charge maxi verticale
Z : Course totale (déflexion amortisseur + pneu)

On peut citer quelques coefficients d'efficacité d'absorbeurs courants :

Type d'absorbeur	h
- Pneus	0,47
- Ressorts acier	0,50
- Bagues caoutchouc	0,60
- Oléopneumatiques	0,85

L'énergie totale de l'avion, peut aussi s'écrire :

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2} m V_v^2}$$
 avec **m** = Masse totale de l'avion = $\frac{P}{g}$

D'où $E_c = \frac{P \cdot V^2}{2 \cdot g}$ Avec **P** : poids total de l'avion
V_v : Vitesse verticale de l'avion.
g : Accélération de la pesanteur = 9,81 m/s

Lors du toucher avec le sol, nous aurons :

$$E = E_c \quad \text{d'où :}$$

$$\eta \cdot L \cdot Z = \frac{P \cdot V_v^2}{2 \cdot g} \quad \text{et} \quad \eta \cdot Z = \frac{V_v^2}{2 \cdot g \cdot L/P} \quad \text{Or, nous avons vu que } L/P \text{ n'est autre que}$$

le facteur de charge limite **n**, que la norme FAR 23.473, nous demande:

- d'une part de prendre **n** = 3.
- d'autre part de limiter la vitesse verticale **V_v** au maximum à 3,05 m/s.

La formule devient alors :

$$\eta \cdot Z = \frac{3,05^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 3} \quad \text{et} \quad \boxed{\eta \cdot Z = 0,157 m.}$$

Or, nous avons vu que **n · Z** concerne la déflexion de l'ensemble pneu + amortisseur; on peut écrire :

$$\eta Z = \eta_p Z_p \text{ (pneu)} + \eta_a Z_a \text{ (amortisseur)}$$

- 4-2) Déflexion des pneus du train principal: Si nous sélectionnons par exemple un pneu de 5.00- 4, nous devons d'abord calculer la charge statique sur les pneus du train principal, en s'aidant de la feuille de pesée de l'avion, à partir des distances du centre de gravité au roues principales **d₂**, et de celle entre la roue avant et les roues principales **D**. Soit **P₂** la charge statique cherchée et **P**, le poids de l'avion :

$$P_2 = P/D (D- d_2)$$

Remarque : Pour la roue avant, nous aurions (toujours pour un train tricycle) :

$$P_1 = P/D \cdot d_2$$

Supposons que nous ayons une charge de 600 kg sur le train principal ($P_2 = 600\text{kg}$), la charge sur un pneu sera de 300kg.

Nous verrons dans le chapitre concernant les pneus que les fabricants de pneus donnent des courbes , pour un taille de pneu (ici 5.00 – 4), une déflexion en mm, pour une charge donnée et une pression de gonflage donnée (p. ex 20 psi).

Dans l'exemple présent, la courbe nous donne une déflexion de 38 mm.

Or nous avons η_p (pour le pneus dans le tableau ci-dessus) égal à 0,47, le produit $\eta_p Z_p$ vaudra :
 $0,47 \cdot 0,038 = 0,018 \text{ m}$.

Nous allons maintenant calculer la déflexion (la course) de l'amortisseur , que nous prendrons oléopneumatique ($\eta_a = 0,85$ toujours d'après le tableau)

$$\eta \cdot Z = 0,018 + 0,85 \cdot Z_a \quad \text{et} \quad 0,157 = 0,018 + 0,85 \cdot Z_a \quad \text{d'où} \quad Z_a = 0,16 \text{ m}.$$

Course maxi de l'amortisseur : 16 cm . On peut dire que plus la course de l'amortisseur sera longue, et plus faible sera le facteur de charge, et meilleur sera le confort.

5) Cas des trains principaux à lames : Un certain nombre d'avions, y compris chez les constructeurs amateurs, utilisent maintenant la flexibilité des lames d'acier ou de duralumin, pour absorber les chocs lors de l'atterrissage. Comme nous l'avons vu dans le tableau précédent, le coefficient d'efficacité des ressorts en acier est parmi les moins bons ($\eta = 0,50$), ainsi ce modèle de train, n'a aucun amortissement, ce qui le rend sujet aux rebonds, lors des atterrissages.

Etant donné qu'il n'y a pas d'amortissement, l'énergie absorbée par la lame de ressort, n'est pas transformée en chaleur, donc est restituée quasi intégralement; à ceci près que, dans son mouvement vers le haut, la roue se déplace aussi latéralement (cote t figure 15), d'où une certaine absorption par frottement latéral, et donc usure des pneus sur pistes en dur.

Les trains à lame sont fabriqués soit en acier (module d'élasticité $E = 21000 \text{ kg/mm}^2$) ou en aluminium plus léger, mais dont le module d'élasticité n'est que de 7000 kg/mm^2 .

La jambe de train est conçue de telle sorte que le point de contact **A** de la roue avec le sol se trouve dans le prolongement de l'axe de la jambe. Ainsi la réaction **D** vers l'arrière due au frottement de la roue, crée un couple qui s'exerce vers l'arrière dans le plan de la lame.

Si le point A venait en A', on aurait en plus un couple de torsion de la lame dû à la distance **d** et tel que

$$T = D \cdot d \quad \text{dont il faudrait tenir compte dans le calcul de la déflexion.}$$

Lors de la conception de la jambe de train on lui donne une concavité vers le bas , hors charge statique (en vol) ce qui fait que, au sol sous la charge statique due au poids de l'avion la jambe se redresse et devient droite , et la roue est alors perpendiculaire au sol.

En outre, le moment fléchissant le long de la jambe va en décroissant à partir du point **B**, ce qui permet de diminuer progressivement la largeur **a** de la lame. On lui donne en fait la forme d'un trapèze, ce qui fait gagner du poids à résistance égale.

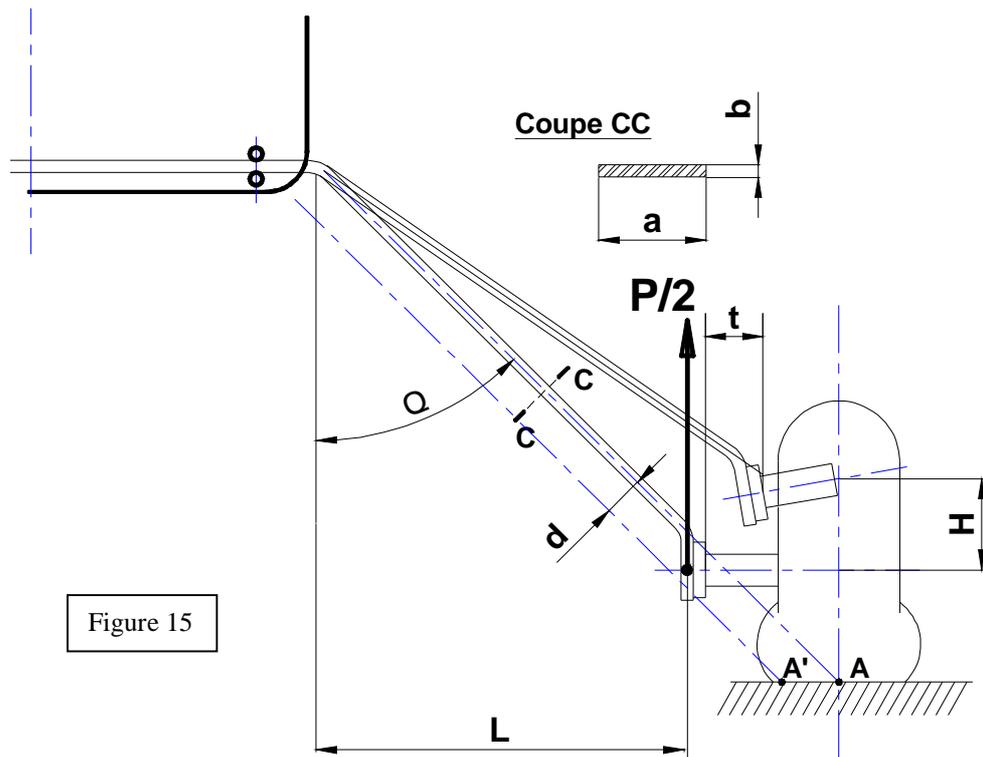


Figure 15

- Calcul de la déflexion : Dans le cas simple d'une lame rectangulaire (a : constant), on calcule la déflexion de la lame sous un impact de $2g$, au moyen de la formule suivante :

$$H = \frac{P/2}{3 \cdot E \cdot I} \frac{L^3}{\sin^3 Q}$$

avec P : Poids en charge de l'avion (p. ex. 1000 kg)

L : Ecartement de la roue (p. ex. 0,60m.) d'où longueur de la jambe : $L / \sin Q$

E : Module d'élasticité de l'aluminium $7000 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2$

I : Moment d'inertie de la section de lame ici : $a \cdot b^3 / 12$

D'où, en remplaçant I par sa valeur :

$$H = \frac{2P}{E \cdot a} \left(\frac{L}{b \sin Q} \right)^3$$

Si nous prenons $Q = 60^\circ$, il vient : $\sin Q = 0,866$; ($a = 0,08 \text{ m.}$ et $b = 0,02 \text{ m.}$ par ex.)

$$\text{D'où } H = \frac{2000}{7000 \cdot 10^6 \cdot 0,08} \left(\frac{0,60}{0,02 \cdot 0,866} \right)^3$$

$H = 0,15 \text{ m.}$

Remarques: 1) En toute logique il faudrait prendre la composante de $P/2$ perpendiculaire à la lame, soit , dans le cas de $Q = 60^\circ$, multiplier $P/2$ par $0,866$, il viendrait alors $H' = 0,15 \times 0,866 = 0,13 \text{ m.}$

- 2) La déflexion d'une lame dont la largeur diminue progressivement vers la roue (vue en plan en trapèze) est : $H'' = 1,5 H$

- 3) On pourrait ajouter, à cette déflexion, celle liée au pneu , comme nous l'avons vu précédemment, qui nous donnerait alors la déflexion totale de l'axe de roue.

6) Trains à lames en composite : On peut faire un gain important sur le poids en utilisant les matériaux composites (fibre de verre ou de carbone + résine époxy) dans la construction des trains à lames. La capacité d'absorption d'énergie par les composites est bien meilleure que celle des métaux.

Le module d'élasticité relativement bas des fibres unidirectionnelles, (env.5000. 10⁶ kg/mm²) couplé à la haute résistance à la rupture, déterminent une capacité d'absorption environ 4 fois celle de l'acier. D'autre part, les composites ont une bien meilleure résistance à la fatigue que les aciers.

On utilise des tissus unidirectionnels qui sont enrubannés de tissus bidirectionnels à l'extérieur pour le maintien, et pour éviter le délaminage lors des flexions.

La résistance à la corrosion et aux UV sont excellentes.

Pour obtenir la même déflexion, l'épaisseur de composite sera de 1,8 fois celle de l'acier, alors que la densité est dans le rapport 4,1 ; d'où le gain en poids.

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des matériaux :

Matériaux	Composite Verre + époxy	Alu	Acier
Masse volumique : (g/cm ³)	1,9	2,8	7,8
Module d'élasticité : (de Young) (kg / mm ²)	5000	7200	21000
Résistance à la flexion : (kg / mm ²)	80	50	80



michel.suire2@wanadoo.fr