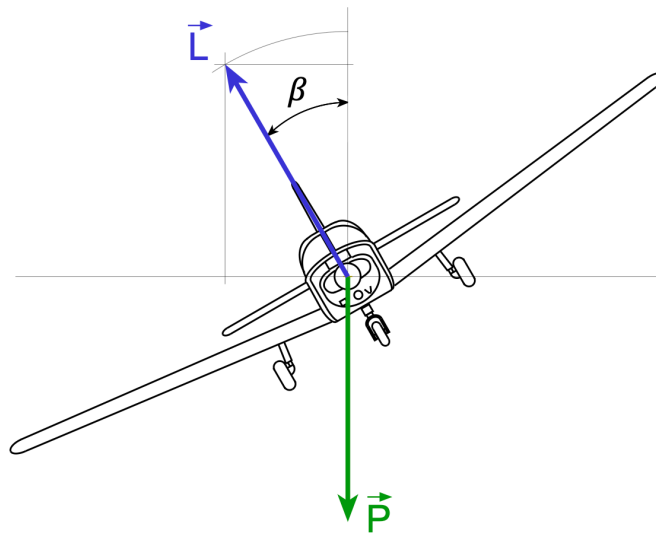


Le vol en virage – Quelques clarifications

E. Bornand¹

Résumé : lors du virage, l'avion n'est pas à l'équilibre dynamique. Il subit une accélération, l'accélération centripète, laquelle résulte d'une force normale, la force centripète, qui s'exerce en direction de l'intérieur du virage.



v 1.2 © Août 2003 - Février 2019

¹ FI SEP(A), etienne.bornand@mac.com .

1. INTRODUCTION

L'un des objectifs de la première version du papier (2003), était d'attirer l'attention sur le fait que le vol en virage était expliqué de façon erronée dans certains ouvrages de la littérature spécialisée, en particulier dans certains ouvrages édités en Suisse. Depuis lors fort heureusement, les erreurs ont été corrigées dans la majorité des ouvrages actuels.

2. RAPPEL : DYNAMIQUE DU CORPS SOLIDE

La dynamique d'un corps solide est régie par la deuxième loi de Newton :

$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \frac{d^2\vec{s}}{dt^2}, \quad (1)$$

où m est la masse, \vec{a} l'accélération, \vec{v} la vitesse, \vec{s} le chemin et t le temps. Dans le cas où plusieurs forces \vec{F}_i agissent sur le corps, leur résultante \vec{F} sera donnée par :

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i. \quad (2)$$

Ainsi, comme le montre (1), si la force est nulle, l'accélération sera nulle et la vitesse constante (voire nulle). Le corps suivra alors une **trajectoire rectiligne uniforme**. Pour que le corps amorce une trajectoire curviligne, il est nécessaire qu'une force (force centripète) agisse normalement à sa trajectoire initiale. C'est par exemple pour cette raison que les anneaux de vitesse pour automobiles, les pistes de vélodromes ou les voies de chemin de fer sont inclinés, ou encore, que le motard ou la motarde se penche dans les virages.

Pour étudier le mouvement d'un corps solide, il est nécessaire de "isoler" et de représenter les forces qui s'exercent sur lui. Considérons par exemple l'étude du pendule conique (figure 1).

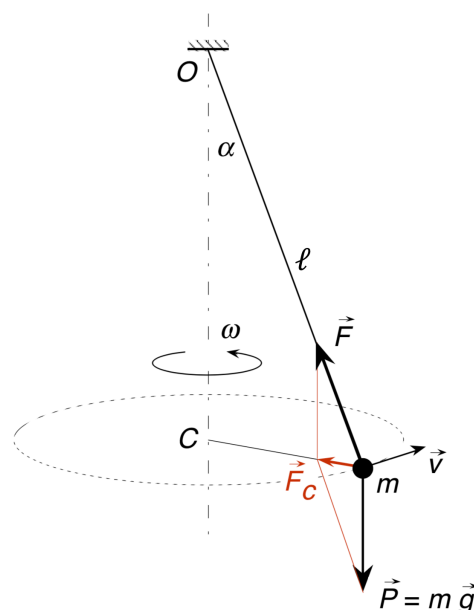


Figure 1 : pendule conique.

Le pendule, de masse m , tourne à la vitesse angulaire ω autour de l'axe OC. La longueur du fil est ℓ . Les deux forces qui s'exercent sur le pendule sont le poids $\vec{P} = m\vec{g}$, où \vec{g} est l'accélération de la pesanteur, et la force \vec{F} de tension du fil. La résultante de \vec{P} et \vec{F} est la force centripète \vec{F}_c . Si l'on calcule l'angle α que fait le fil avec la verticale, en fonction de ω et de ℓ , on obtient :

$$\cos\alpha = \frac{g}{\omega^2 \ell} . \quad (3)$$

L'angle est d'autant plus grand que la vitesse est élevée. Notons que le pendule conique est utilisé comme régulateur de vitesse.

3. MECANIQUE DU VOL

Lors du vol, un avion est soumis aux quatre forces suivantes [1 - 4] (figure 2) :

- le poids \vec{P}
- la portance \vec{L}
- la traction \vec{T}
- la traînée \vec{D} .

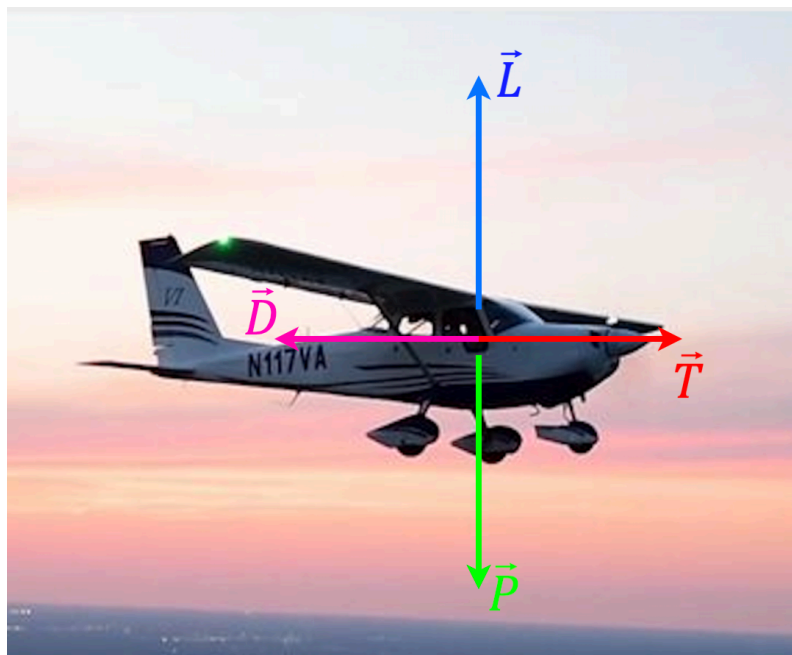


Figure 2 : représentation des quatre forces qui s'exercent sur l'avion en vol (photo : AOPA).

3.1 Le vol horizontal rectiligne uniforme

Lors du vol horizontal rectiligne uniforme (croisière stabilisée), la portance compense le poids et la traction compense la traînée. La somme des forces qui s'exercent sur l'avion est donc nulle².

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0}. \quad (4)$$

Ainsi, l'accélération est nulle et la vitesse constante. Si l'une ou plusieurs des forces sont modifiées, l'avion subira une accélération et déviara de sa trajectoire horizontale rectiligne uniforme initiale. Si par exemple la traction (puissance du ou des moteurs) est augmentée, la vitesse augmentera, ce qui aura pour effet d'augmenter la portance et la traînée. Pour que l'avion conserve sa trajectoire horizontale, il sera nécessaire d'exercer une force de "poussé" sur le manche, ou de retrimmer la profondeur "nez bas".

3.2 Le vol en virage

Pour qu'un avion dévie de sa trajectoire rectiligne (figure 3a³) et suive une trajectoire curviligne⁴, à savoir amorce un virage, d'inclinaison β , il est nécessaire qu'une force le pousse vers l'intérieur de celui-ci. Si cette force (centripète) est relâchée, l'avion reprendra une trajectoire rectiligne (tangente à la courbure qu'il est en train de suivre).

Relevons que, lors du virage, les forces qui s'exercent sur l'avion sont, évidemment, les mêmes que lors du vol horizontal rectiligne. Ce sont le poids, la portance, la traction et la traînée.

La mise en virage est effectuée au moyen du manche par une action sur les ailerons (gauchissement), laquelle action a pour effet de faire pivoter l'avion autour de son axe de roulis. Une fois l'inclinaison du virage établie, le manche est ramené au neutre et l'avion maintient son inclinaison.

C'est grâce à la portance, qui est toujours perpendiculaire au plan des ailes (figure 3b), que le virage est réalisé. En effet, lors de celui-ci, la portance n'est plus verticale par rapport au référentiel terrestre. Elle peut être décomposée en une composante horizontale, la force centripète (\vec{F}_c), et une composante verticale (force verticale).

Lorsque l'avion effectue un vol horizontal rectiligne uniforme et qu'un virage est engagé, comme la force verticale ne compense plus le poids, l'avion commence à descendre. Pour qu'il ne perde pas d'altitude, il est nécessaire d'augmenter la portance (figure 3c), soit en augmentant l'angle d'incidence, soit en augmentant la puissance, donc la vitesse, ou alors, en réalisant

² Dans ce texte, dans un but de simplification, on considère les forces comme étant colinéaires deux à deux. L'avion n'est ainsi soumis à aucun moment.

Par ailleurs, du fait de la consommation de carburant, le poids de l'avion n'est pas constant, mais diminue continuellement. Cependant, sur un temps court, on peut considérer celui-ci comme restant constant.

³ Dans les figures 3a à 3d, les forces de traction et de traînée ne sont pas représentées.

⁴ Comme dans le cas du pendule conique.

conjointement les deux actions. Notons que si l'angle d'incidence est augmenté, la portance va augmenter, mais la traînée également, ce qui aura pour conséquence de diminuer la vitesse.

Dans le cas du virage horizontal à vitesse constante, la force verticale (augmentée) compense le poids, et la traction compense la traînée. Ces forces s'annulent deux à deux, seule reste, comme le montre la figure 3d, la force centripète (augmentée), force responsable du virage :

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_c, \quad (5)$$

En résumé : **dans le virage, la résultante des forces qui s'exercent sur l'avion n'est pas nulle et celui-ci subit une accélération, l'accélération centripète!**

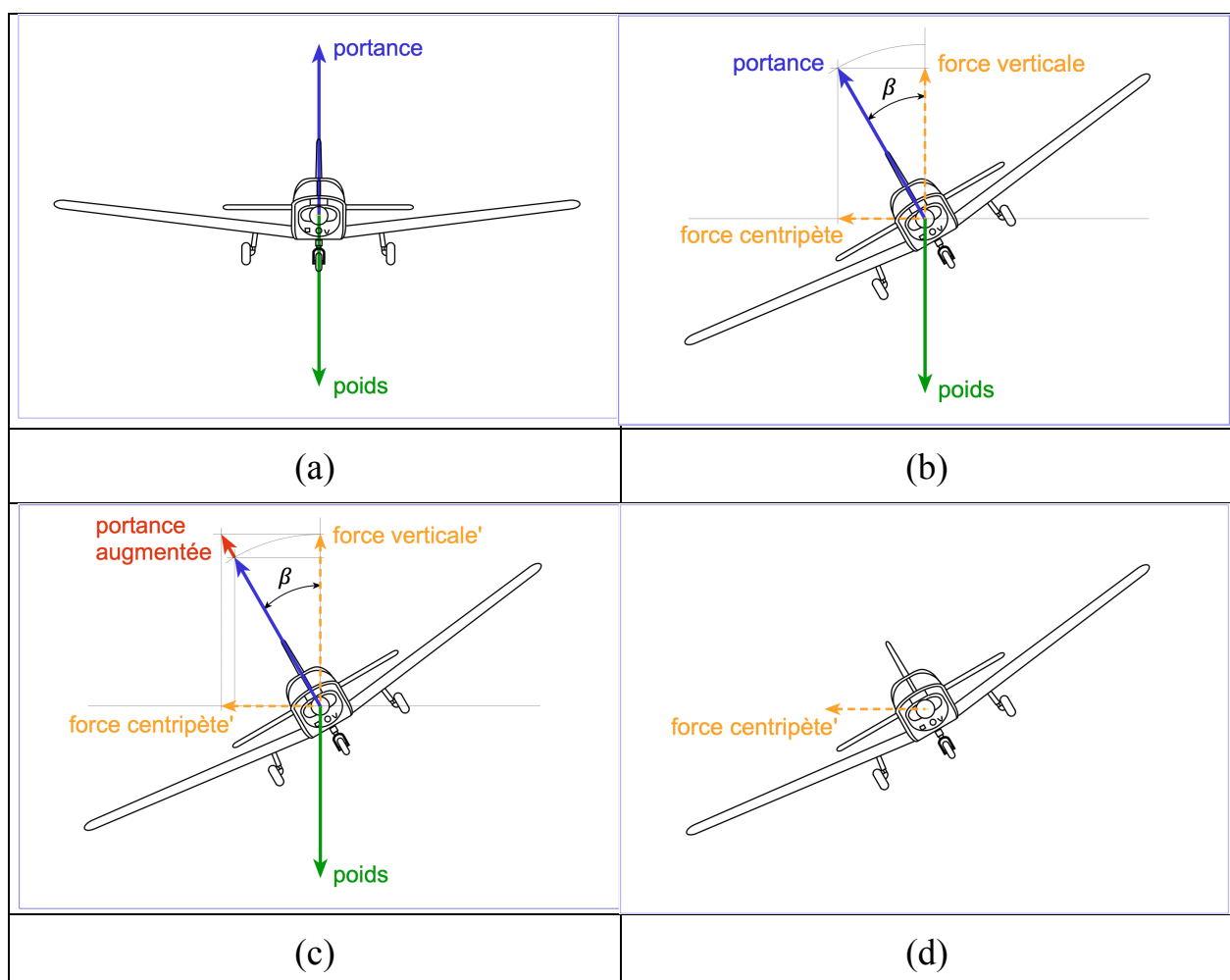


Figure 3 : a) L'avion suit une trajectoire rectiligne uniforme³. La portance compense le poids (et la traction compense la traînée).

- b) L'avion est en virage. La portance, qui s'exerce toujours perpendiculairement aux ailes, n'est plus verticale et ne compense plus le poids. La portance peut être décomposée en une force centripète et une force verticale.
- c) La portance est augmentée de façon à ce que la nouvelle force verticale compense à nouveau le poids.
- d) L'avion est en virage horizontal à vitesse constante. La résultante des forces est la force centripète (augmentée).

4. CONCLUSION

Le but de ce texte était de discuter la mécanique du vol lors du virage, à savoir, de préciser et de clarifier quelles sont les forces qui s'exercent sur l'avion lors de cette manœuvre. Il est important de retenir est que, lors du virage, l'avion subit une accélération et - comme tout corps qui subit une accélération - n'est pas à l'équilibre dynamique (contrairement à ce que continuent de prétendre certains ouvrages, ou que l'on peut trouver sur certains sites) ! Nous nous sommes attachés à démontrer cela dans le présent document.

REFERENCES

1. W. Langewiesche, *Stick and Rudder : an Explanation of the Art of Flying*, McGraw-Hill, 1972 (1^{ère} édition : 1944).
2. R. von Mises, *Theory of flight*, Dover, 1959 (1^{ère} édition : 1945).
3. B. W. McCormick, *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*, John Wiley & Sons, 1995.
4. S. Bonnet et J. Verrière, *La mécanique du vol de l'avion léger*, Cépaduès-Editions, 2001.
5. W.F. Phillips, *Mechanics of Flight*, Wiley, 2004.