

# Mécanique du vol : la bille

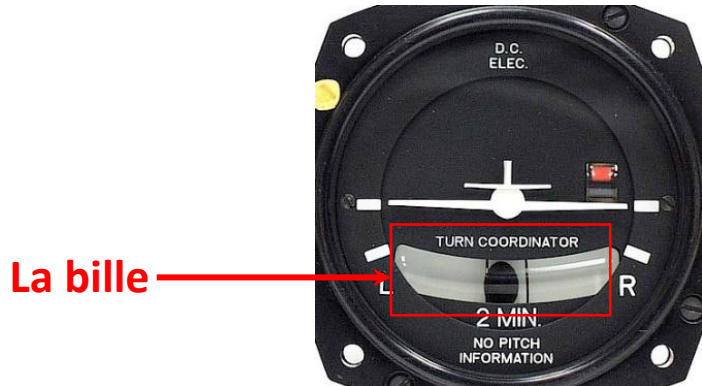
**S. Ayrinhac**  
**simon.ayrinhac@upmc.fr**

Ce document a bénéficié des remarques de Boris DOVAL (LAM, Paris), Laurent LESPIAC et Gérard PUJOL (DAFA, Montpellier). Cependant, les erreurs éventuelles sont à la seule charge de l'auteur. Ce document ne peut pas se substituer à une véritable formation aéronautique.



## Un instrument de bord : la bille

### Photographie d'un instrument réel



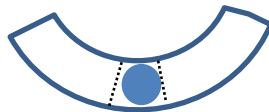
[http://img11.hostingpics.net/pics/924582coordonateur\\_de\\_virage.jpg](http://img11.hostingpics.net/pics/924582coordonateur_de_virage.jpg)

La bille est un instrument de bord qui renseigne sur la **symétrie de l'écoulement** d'air autour de l'avion.

On peut remplacer la bille par :

- un pendule suspendu dans l'habitacle.
- un brin de laine collé sur la carlingue extérieure.

### Représentation schématique



La bille est équivalente à un **accéléromètre latéral**.



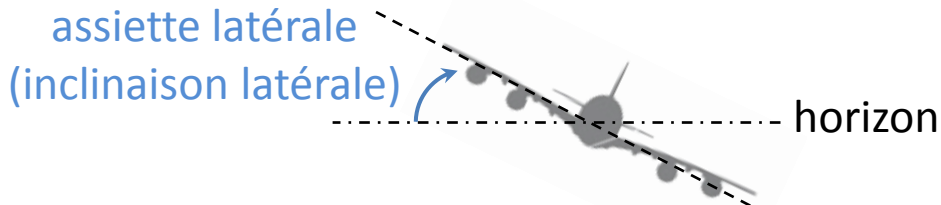
La bille seule ne dit rien sur l'assiette latérale de l'avion par rapport à l'horizon.

Remarque : l'instrument de bord représenté ci-contre (*turn coordinator*) indique aussi le taux de virage sous la forme d'un avion vu de dos, mais cette indication ne doit pas être confondue avec celle donnée par l'horizon artificiel. Il est d'ailleurs écrit à l'attention du pilote anglophone :

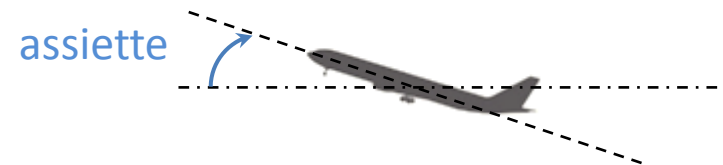
NO PITCH INFORMATION

Soit : « pas d'information sur l'assiette ».

Vue de face ou de dos  
roulis (*roll/bank*)

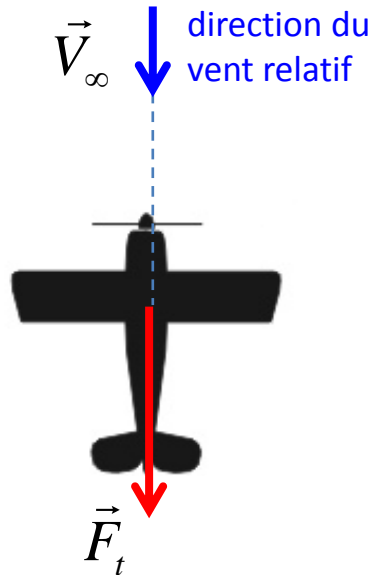


Vue de profil  
tangage (*pitch*)

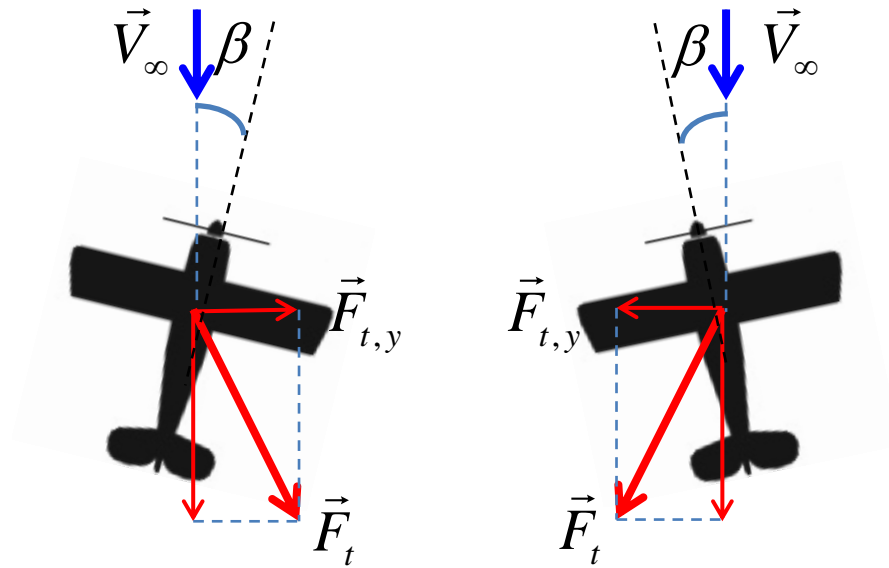


## Symétrie de l'écoulement

Écoulement symétrique



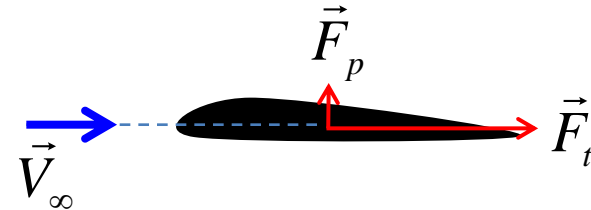
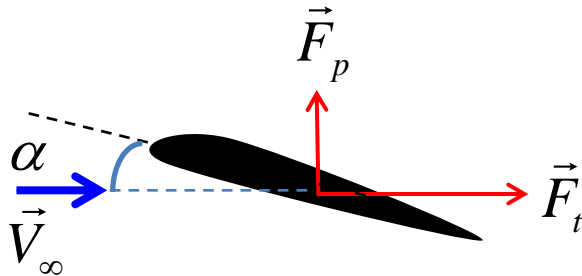
Écoulement dissymétrique



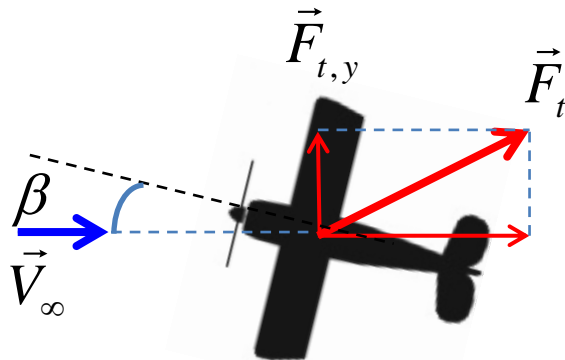
Il apparaît une composante  $\vec{F}_{t,y}$  de la force de traînée  $\vec{F}_t$ .

## Analogie entre $F_{t,y}$ et la portance $F_p$ d'une aile

Dans les deux cas l'écoulement est dissymétrique



**Remarque 1 :** une aile d'avion à incidence nulle génère un peu de portance car l'écoulement est dissymétrique autour de l'aile.



**Remarque 2 :** la force de traînée se décompose en une force parallèle à la direction du vent relatif et une force perpendiculaire. La direction de cette force est indépendante du fuselage.

# **En vol horizontal stabilisé (VHS)**

## Bilan des forces lorsqu'il existe un angle de lacet $\beta$

La traction  $T$  est attachée au repère de l'avion.  
Sa direction est donnée par le fuselage de l'avion.

Sur l'axe x dans le repère aérodynamique

$$\vec{F}_{t,x} = -\vec{T}_x$$

La traction **compense** la traînée.  
L'accélération est nulle dans la direction x, donc la vitesse est constante

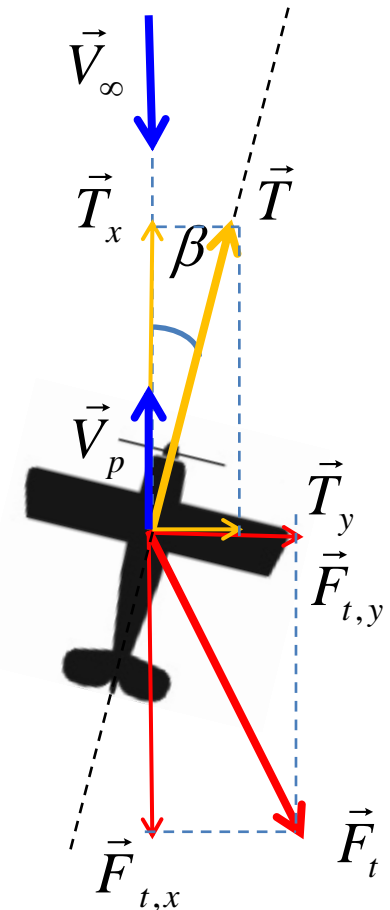
Sur l'axe y dans le repère aérodynamique

$$\vec{F}_{t,y} + \vec{T}_y = m\vec{a}_y$$

La traction et la traînée latérales **s'ajoutent**.  
L'avion subit une accélération latérale  
(la bille s'écarte de sa position centrale)

→ Il apparaît une vitesse latérale  $v$  (avec  $v_{0,y}=0$ )

$$v_y = \frac{\vec{F}_{t,y} + \vec{T}_y}{m} \Delta t + v_{0,y}$$



→ Le vecteur vitesse est modifié

$$\vec{V}_p = \vec{V}_{p,x} + \vec{V}_{p,y}$$

→ Le vent relatif est modifié en conséquence

$$\vec{V}_\infty = -\vec{V}_p$$

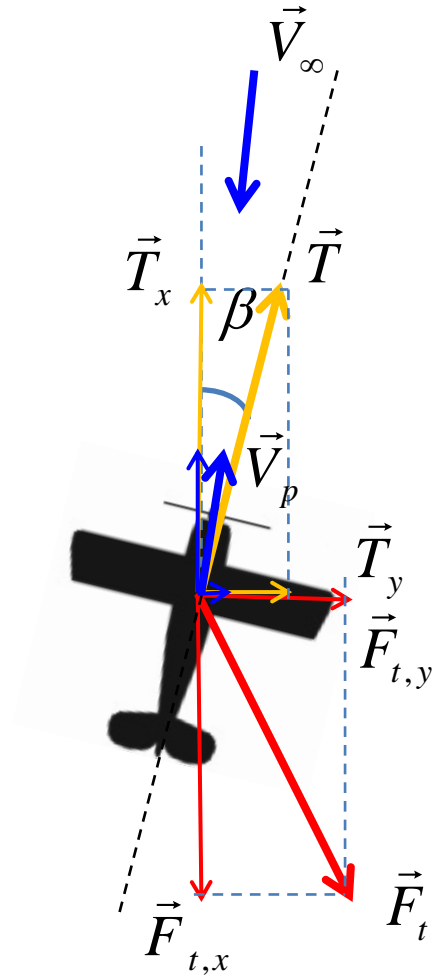
→ L'angle  $\beta$  se réduit

→ L'avion tourne ! (c'est bien le rôle attendu de la gouverne de direction)

Si le pilote suit un certain cap, la manœuvre est forcément **transitoire**.

Lorsque l'avion tourne autour de son axe de lacet, une aile va plus vite qu'une autre, sa portance est modifiée donc il apparaît un **roulis induit**.

Cependant pour tourner, on préfère modifier l'angle de roulis.





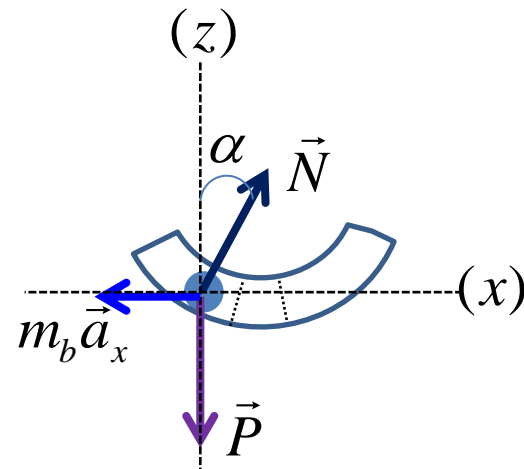
## Dans le cas de la bille en VHS :

On peut montrer que lorsque la bille **s'écarte du centre**, il y a apparition d'une **accélération latérale**.

Soit une bille de masse  $m_b$  à l'équilibre dans sa rigole, les forces suivantes s'exercent sur la bille :

- La réaction du support  $N$  faisant un angle  $\alpha$  avec la verticale du repère terrestre
- La force d'inertie  $F_i$  due au virage de l'avion
- Le poids  $P=m_b g$

On néglige les frottements.



Dans le cas de la bille en VHS :

Mise en équation :

$$\begin{cases} (z) & N \cos(\alpha) - m_b g = 0 \\ (x) & N \sin(\alpha) - m_b a_x = 0 \end{cases}$$

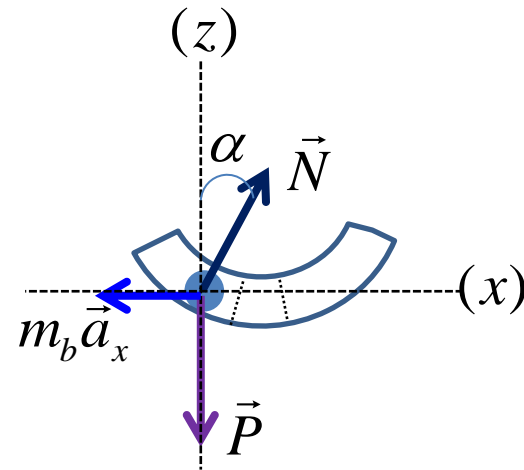
$$(z) \quad N \cos(\alpha) = m_b g$$

$$(x) \quad N \sin(\alpha) = m_b a_x$$

$$a_x = -g \tan(\alpha)$$

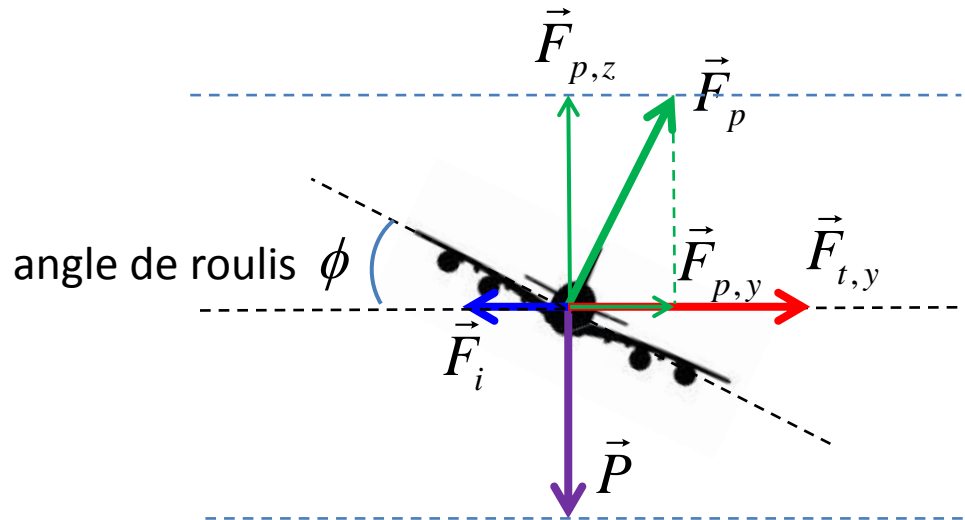
L'angle  $\alpha$  mesure l'accélération  $a_x$ .

La bille est donc équivalente à un **accéléromètre latéral**.



# Rappels sur le vol en virage stabilisé

## Cas du virage stabilisé à droite



Il existe une force d'inertie  $F_i$  centrifuge liée à l'accélération centripète de l'avion ( $V_p$  est la vitesse propre de l'avion et  $R$  le rayon de la trajectoire)

$$\vec{F}_i = -m\vec{a} = -m \frac{V_p^2}{R} \vec{u}_y$$

La vitesse est constante, les forces s'équilibrent :

$$\vec{F}_i + \vec{F}_t + \vec{F}_p + \vec{P} = 0$$

## Projection sur (z)

En virage stabilisé, la portance compense exactement le poids, **l'altitude de vol est constante.**

$$\vec{F}_{p,z} = \vec{P}$$

$$F_{p,z} - P = 0$$

$$F_p \cos(\phi) - mg = 0$$

$$F_p = \frac{mg}{\cos(\phi)} = nmg$$

n est appelé le **facteur de charge**.

Lorsque  $\Phi$  augmente, le **poids apparent** augmente.

## Projection sur (y)

$$-F_i + F_{t,y} + F_p \sin(\phi) = 0$$

$$-\frac{mV_p^2}{R} + F_{t,y} + \frac{mg}{\cos(\phi)} \sin(\phi) = 0$$

$$F_{t,y} = \frac{mV_p^2}{R} - mg \tan(\phi)$$

Lorsque l'écoulement est symétrique  $F_{t,y}=0$ , l'angle de roulis  $\phi$  ne dépend que de la vitesse de l'avion ou du rayon de la trajectoire.

$$\boxed{\frac{V_p^2}{gR} = \tan(\phi)}$$

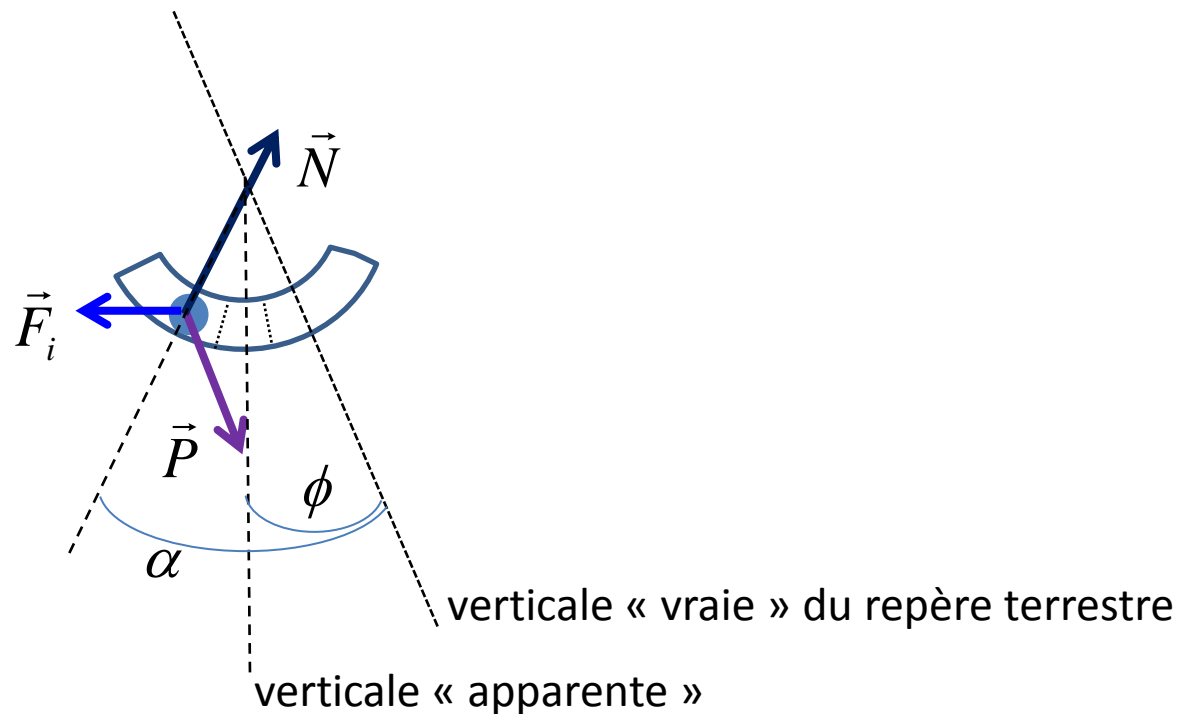
# Position de la bille en virage

## Bilan des forces qui s'exercent sur la bille

On considère une bille de masse  $m_b$  à l'équilibre dans sa rigole sur laquelle s'exercent les forces suivantes :

- La réaction du support  $N$  faisant un angle  $\alpha$  avec la verticale
- La force d'inertie  $F_i$  due au virage de l'avion
- Le poids  $P=m_b g$

On néglige les frottements.





## Projections en (z) et (y)

$$(z) N \cos(\alpha) - m_b g = 0 \Rightarrow N = \frac{m_b g}{\cos(\alpha)}$$

$$(y) - F_i + N \sin(\alpha) = 0 \Rightarrow F_i = m_b g \tan(\alpha)$$

$$F_i = \frac{m_b V_p^2}{R} \Rightarrow \tan(\alpha) = \frac{V_p^2}{Rg}$$

Dans cette formule, l'angle  $\alpha$  dépend de paramètres liés à l'avion uniquement.

Revenons à l'expression de  $F_{t,y}$  :

$$F_{t,y} = \frac{mV_p^2}{R} - mg \tan(\phi)$$

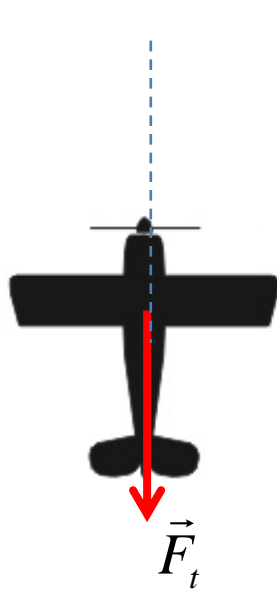
$$\frac{F_{t,y}}{mg} = \frac{V_p^2}{gR} - \tan(\phi)$$

On peut introduire l'angle  $\alpha$  lié à la bille

$$\boxed{\frac{F_{t,y}}{mg} = \tan(\alpha) - \tan(\phi)}$$

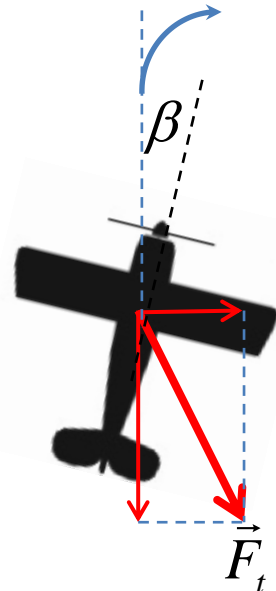
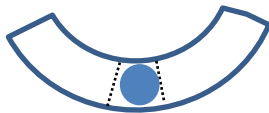
La force d'inertie est liée à l'accélération de l'avion, donc à sa trajectoire courbe. Cette force s'exerce **à la fois** sur la bille et sur l'avion. Par contre la force  $F_{t,y}$  s'exerce **seulement** sur l'avion. La bille montre donc que la force d'inertie devient trop grande ou trop faible par rapport à l'équilibre des forces qui s'exercent sur l'avion.

## Position de la bille dans la rigole (virage à droite)



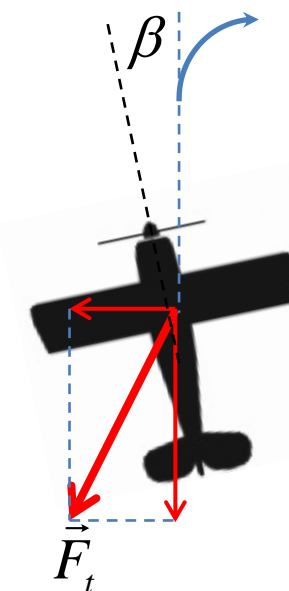
$$F_{t,y} = 0$$

$$\alpha = \phi$$



$$F_{t,y} > 0$$

$$\alpha > \phi$$



$$F_{t,y} < 0$$

$$\alpha < \phi$$



## Origine d'un écoulement dissymétrique

Une analyse trop sommaire des forces qui s'exercent sur l'avion ne permet pas de comprendre l'origine d'un écoulement dissymétrique.

En effet l'angle de roulis  $\Phi$  dépend de la vitesse  $V_p$  de l'avion et du rayon  $R$  de la trajectoire, mais ne dépend pas de l'angle de lacet  $\beta$ . L'écoulement reste donc symétrique en virage.

$$\frac{V_p^2}{R} = g \tan(\phi)$$

En réalité, l'analyse de la situation est **incomplète** : la répartition des forces est plus compliquée.

La modification de l'angle de roulis peut entraîner une rotation autour de l'axe de lacet et donc un écoulement dissymétrique :

- La traînée de l'aileron baissé est plus grande que celle de l'aileron levé (**lacet inverse**)
- l'aile externe au virage va moins vite que l'aile interne (**lacet induit**)

## Bibliographie

- « Mécanique, fondements et applications »  
J.-P. Perez, Dunod (2001)
- « Aérodynamique et mécanique du vol BIA »  
CAEA, Ciras Montpellier 1
- « MODÉLISATION ET IDENTIFICATION DE COMPORTEMENTS DE L'AVION EN VOL  
TURBULENT PAR MODÈLES À RETARDS »  
François Veysset, thèse (2006)
- Wikipédia anglophone : Turn and slip indicator  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Turn\\_and\\_slip\\_indicator](http://en.wikipedia.org/wiki/Turn_and_slip_indicator)