THEORIE DU VIRAGE A VITESSE ET ALTITUDE CONSTANTES

RESUME

Le virage à vitesse et altitude constantes est aussi appelé « virage à plat » ou encore « virage à inclinaison constante ». On suppose ici une atmosphère sans vent.

Quatre paramètres sont liés : la vitesse V (en kt) et l'inclinaison latérale θ (en degrés - °) de l'avion, le rayon R (en Nm) et la vitesse de rotation ω (en degrés par minute - °/mn) du virage « à plat ».

Pour une **vitesse V fixée de l'avion**, les formules « approchées » sont les suivantes :

a) Cas du virage « à plat » pour faire un demi-tour (180°) en 1 minute (hippodrome) :

L'inclinaison latérale que doit prendre l'avion et le rayon du virage qu'il effectuera sont :

$$\theta(°) \approx 0{,}15\, V(kt) \text{ et } R(Nm) \approx 0{,}005\, V(kt)$$

$$\boxed{\textbf{θ(°) est de l'ordre de 15 pour cent de V(kt)}}$$

et

$$\boxed{\textbf{R(Nm) est de l'ordre de 5 pour mille de V(kt)}}$$

b) Cas du virage « à plat » avec une inclinaison latérale de 27° :

Le rayon du vira et la durée pour faire un 180° sont :

$$\text{Virage à } \theta = 27° \text{ d'inclinaison : rayon } R(Nm) \approx \frac{V(kt)}{100} + \frac{V(kt)}{1000} - 1 \quad \text{et} \quad T_{180°}(secondes) \approx \frac{V(kt)}{3}$$

$$\boxed{\textbf{R(Nm) est de l'ordre de 1 \% de V(kt) + 1 ‰ de V(kt) – 1}}$$

et

$$\boxed{\mathbf{T_{180°}}\textbf{(s) est de l'ordre du tiers de V(kt)}}$$

***

Les pages suivantes donnent la théorie du virage « à plat ».

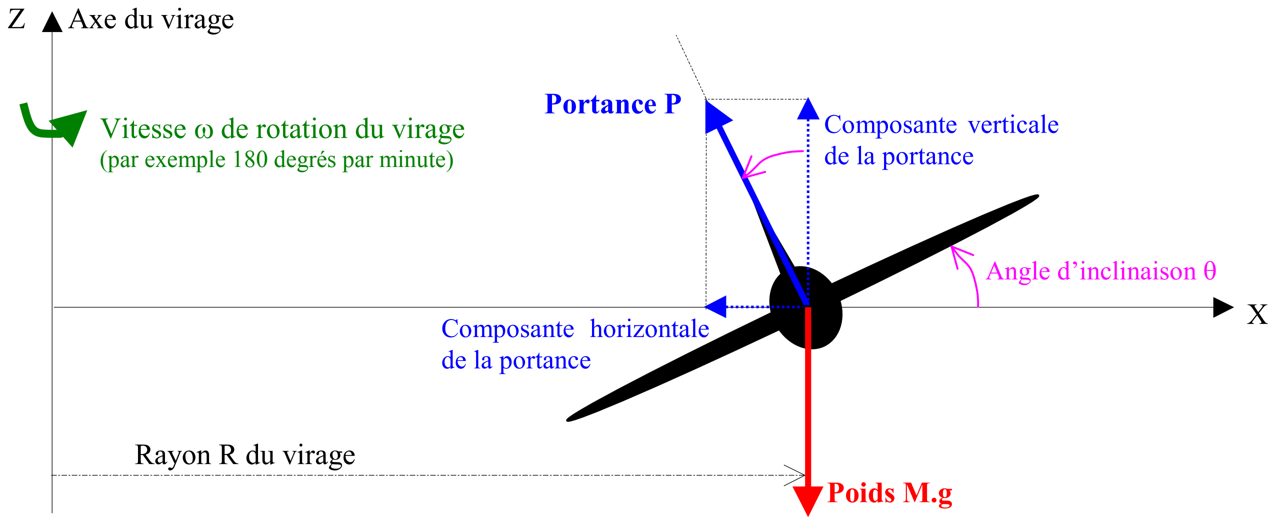
La dernière page de ce document donne les valeurs théoriques calculées sans approximation.

THEORIE DU VIRAGE A VITESSE ET ALTITUDE CONSTANTES

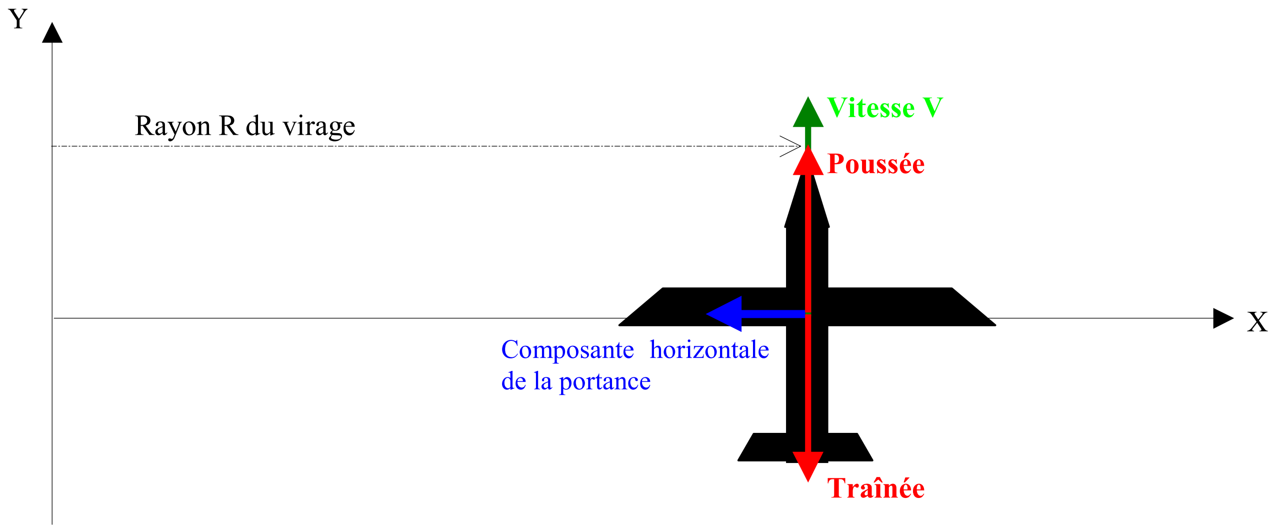
1. EQUATIONS SIMPLIFIEES

Le virage à vitesse et altitude constantes est aussi appelé « virage à plat » ou encore « virage à inclinaison constante ». On suppose ici une atmosphère sans vent. La masse de l'avion (supposée constante pendant le virage) est M.

Dans le **plan vertical**, à tout instant, l'inclinaison de l'avion est θ et les forces en jeu sont la portance P et le poids M.g de l'avion :



Dans le **plan horizontal**, la poussée équilibre à tout instant la traînée, la vitesse V de l'avion est constante et la seule force résultante est la composante horizontale de la portance :



La composante verticale de la portance P est P.cosθ, elle équilibre le poids M.g : l'avion reste à altitude constante, donc **P.cosθ = M.g** ; la masse et la vitesse de l'avion étant supposées constantes pendant le virage, la portance de l'avion est donc constante et l'inclinaison est constante.

La composante horizontale de la portance est P.sinθ, et c'est une force centripète qui produit le virage de l'avion selon un rayon instantané R et avec une vitesse de rotation instantanée ω tels que : **P.sinθ = M.ω².R**. La portance et l'inclinaison étant constantes, le produit ω^2.R est constant.

Enfin, à tout instant, la vitesse de rotation est ω telle que **V = R.ω**. Or la vitesse V est constante et le produit ω^2.R est constant. Donc, la vitesse de rotation ω et le rayon R sont constants : la trajectoire dans le plan horizontal est donc un cercle (ou du moins une portion de cercle).

En éliminant la portance P dans les deux premières équations, on obtient les deux équations du « virage à plat » :

$$\boxed{tg\theta = \frac{R.\omega^2}{g} = \frac{V^2}{R.g} = \frac{\omega.V}{g} \quad et \quad V = R.\omega}$$

Ou encore, en approximant la tangente de l'angle θ à l'angle θ lui-même (en radians) :

$$\boxed{\theta \approx \frac{R.\omega^2}{g} = \frac{V^2}{R.g} = \frac{\omega.V}{g} \quad et \quad V = R.\omega}$$

On a donc deux équations et quatre paramètres : l'inclinaison θ de l'avion, la vitesse V de l'avion, le rayon R et la vitesse de rotation ω de la trajectoire. La connaissance de deux paramètres suffit pour fixer les deux autres.

2. FORMULES APPROCHEES

En unités aéronautiques :

- l'inclinaison θ de l'avion est exprimée en degrés (°)
- le rayon R du virage est exprimé en miles nautiques (Nm, avec 1 Nm = 1852 m)
- la vitesse V de l'avion exprimée est en noeuds (kt, avec 1 kt = 1 Nm/h)
- la vitesse de rotation ω du virage est exprimée en degrés par minute (°/mn)

Dans ces unités, la constante g (9,81 m/s^2) est égale à 68649 Nm/h^2.

A partir des équations simplifiées, les formules approchées, dans les unités aéronautiques et dans les cas les plus intéressants, sont les suivantes :

2.1. Vitesse V de l'avion et vitesse ω du virage imposées

a) <u>Cas général</u>

Si la vitesse V de l'avion et la vitesse ω du virage sont imposées, alors l'inclinaison nécessaire est $\theta(°) \approx \frac{\omega(°/mn).V(kt)}{1140}$ et le rayon du virage est $R(Nm) \approx 0{,}955\,\frac{V(kt)}{\omega(°/mn)}$

Soit, très simplifié : $\theta(°) \approx \frac{\omega(°/mn).V(kt)}{1000}$ et le rayon du virage est $R(Nm) \approx \frac{V(kt)}{\omega(°/mn)}$

b) <u>Virage à 180 °/mn</u>

Dans le cas classique du virage d'hippodrome d'attente dans lequel la vitesse du virage serait imposée à **ω = 180 °/mn** (soit un demi-tour en 1 mn), on a les formules approchées suivantes : l'inclinaison nécessaire est $\theta(°) \approx 0{,}157\,V(kt)$ et le rayon du virage est $R(Nm) \approx 0{,}0053\,V(kt)$.

Et donc, au premier ordre : $\theta(°) \approx 0{,}15\,V(kt)$ et $R(Nm) \approx 0{,}005\,V(kt)$

θ(°) est de l'ordre de 15 pour cent de V(kt) et R(Nm) est de l'ordre de 5 pour mille de V(kt)

Ainsi, pour une vitesse V de 180 kt, l'inclinaison devra être d'environ 27° et le rayon sera d'environ 0,9 Nm.

Nota :

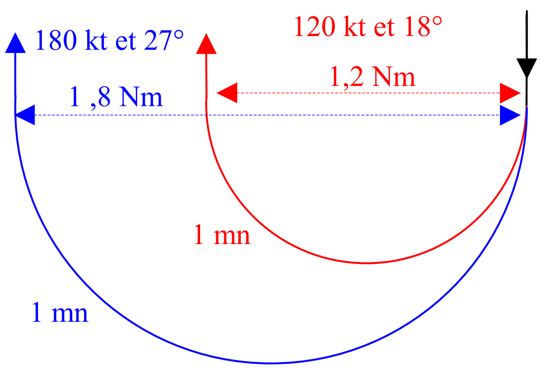
Pour un calcul mental rapide, on procède de la manière suivante pour calculer l'inclinaison : on prend d'abord 10 % de la vitesse (par exemple, pour 180 kt, c'est donc 18°) puis on prend la moitié du résultat (la moitié de 18°, c'est 9°) et on ajoute les deux nombres (18° + 9° = 27°).

Pour le rayon, on prend 1 % de la vitesse (pour 180 kt, c'est donc 1,8 Nm) et on prend la moitié du résultat (la moitié de 1,8 Nm, c'est 0,9 Nm).

Table des valeurs approximatives des inclinaisons et rayons de virage pour ω = 180 °/mn

V (kt)	θ (°)	R (Nm)
100 kt	15°	0,5 Nm
120 kt	18°	0,6 Nm
140 kt	21°	0,7 Nm
160 kt	24°	0,8 Nm
180 kt	27°	0,9 Nm
200 kt	30°	1 Nm
220 kt	33°	1,1 Nm
240 kt	36°	1,2 Nm

Dans le cas d'un demi-tour (sur un hippodrome d'attente par exemple), le diamètre du demi-tour est bien entendu le double du rayon R ci-dessus :



2.2. Vitesse V et inclinaison θ de l'avion imposées

a) Cas général

La vitesse V et l'inclinaison θ de l'avion sont imposées. On peut alors déterminer le rayon R du virage et la vitesse de rotation ω avec les formules approchées suivantes :

$$R(Nm) \approx 8{,}4\,\frac{(V(kt)/100)^2}{\theta(°)} \quad \text{et} \quad \omega(°/mn) \approx 11{,}4\,\frac{\theta(°)}{V(kt)/100}$$

Le temps pour faire le virage à 180° (demi-tour) est $T_{180°}(mn) = 180° / \omega(°/mn)$ ou donc :

$$T_{180°}(mn) \approx 0{,}157\,\frac{V(kt)}{\theta(°)} \quad \text{ou encore} \quad T_{180°}(secondes) \approx 9{,}44\,\frac{V(kt)}{\theta(°)}$$

Très simplifié, cela donne :

$$R(Nm) \approx 10\,\frac{(V(kt)/100)^2}{\theta(°)} \quad \text{et} \quad \omega(°/mn) \approx 10\,\frac{\theta(°)}{V(kt)/100} \quad \text{et} \quad T_{180°}(secondes) \approx 10\,\frac{V(kt)}{\theta(°)}$$

b) Virage à 27° d'inclinaison

Dans le cas des hippodromes d'attente avec virage à **θ = 27°** d'inclinaison (c'est généralement le cas des hippodromes d'attente à vitesse supérieure à 180 kt), les formules approchées sont les suivantes :

$$R(Nm) \approx \left(\frac{V(kt)}{180}\right)^2 \quad \text{et} \quad T_{180°}(secondes) \approx 0{,}35\,V(kt)$$

Soit donc les formules approximatives suivantes :

$$\text{Virage à } \theta = 27° \text{ d'inclinaison : rayon } R(Nm) \approx \frac{V(kt)}{100} + \frac{V(kt)}{1000} - 1 \quad \text{et} \quad T_{180°}(secondes) \approx \frac{V(kt)}{3}$$

R(Nm) est de l'ordre de 1 % de V(kt) + 1 ‰ de V(kt) – 1, et $T_{180°}$(s) est de l'ordre du tiers de V(kt)

Par exemple, toujours pour une inclinaison θ de 27° :

- Avec une vitesse V de 200 kt :

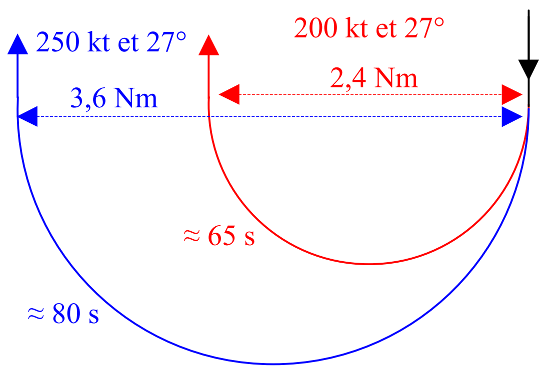
rayon de virage $R \approx 2\ Nm + 0{,}2\ Nm - 1\ Nm = 1{,}2\ Nm$ et durée virage à 180° d'environ 65 sec.

- Avec une vitesse V de 220 kt :

rayon de virage $R \approx 2{,}2\ Nm + 0{,}2\ Nm - 1\ Nm = 1{,}4\ Nm$ et durée virage à 180° d'environ 70 sec.

- Avec une vitesse V de 250 kt :

rayon de virage $R \approx 2{,}5\ Nm + 0{,}3\ Nm - 1\ Nm = 1{,}8\ Nm$ et durée virage à 180° d'environ 80 sec.



VIRAGE A PLAT

Valeurs théoriques

en fonction de l'inclinaison θ (en degrés) et de la vitesse V (en kt) de l'avion

$$tg\theta = \frac{R.\omega^2}{g} = \frac{V^2}{R.g} = \frac{\omega.V}{g} \quad et \quad V = R.\omega$$

Rayon R du virage, en Nm

	10°	15°	20°	25°	27°	30°
120 kt	1,2 Nm	0,8 Nm	0,6 Nm	0,4 Nm	0,4 Nm	0,4 Nm
140 kt	1,6 Nm	1,1 Nm	0,8 Nm	0,6 Nm	0,6 Nm	0,5 Nm
160 kt	2,1 Nm	1,4 Nm	1,0 Nm	0,8 Nm	0,7 Nm	0,6 Nm
180 kt	2,7 Nm	1,8 Nm	1,3 Nm	1,0 Nm	0,9 Nm	0,8 Nm
200 kt	3,3 Nm	2,2 Nm	1,6 Nm	1,2 Nm	1,1 Nm	1,0 Nm
220 kt	4,0 Nm	2,6 Nm	1,9 Nm	1,5 Nm	1,4 Nm	1,2 Nm
240 kt	4,8 Nm	3,1 Nm	2,3 Nm	1,8 Nm	1,6 Nm	1,5 Nm
260 kt	5,6 Nm	3,7 Nm	2,7 Nm	2,1 Nm	1,9 Nm	1,7 Nm
280 kt	6,5 Nm	4,3 Nm	3,1 Nm	2,4 Nm	2,2 Nm	2,0 Nm

Vitesse ω du virage, en degrés par minute

	10°	15°	20°	25°	27°	30°
120 kt	96 °/mn	146 °/mn	199 °/mn	255 °/mn	278 °/mn	315 °/mn
140 kt	83 °/mn	125 °/mn	170 °/mn	218 °/mn	239 °/mn	270 °/mn
160 kt	72 °/mn	110 °/mn	149 °/mn	191 °/mn	209 °/mn	237 °/mn
180 kt	64 °/mn	98 °/mn	133 °/mn	170 °/mn	186 °/mn	210 °/mn
200 kt	58 °/mn	88 °/mn	119 °/mn	153 °/mn	167 °/mn	189 °/mn
220 kt	53 °/mn	80 °/mn	108 °/mn	139 °/mn	152 °/mn	172 °/mn
240 kt	48 °/mn	73 °/mn	99 °/mn	127 °/mn	139 °/mn	158 °/mn
260 kt	44 °/mn	68 °/mn	92 °/mn	118 °/mn	128 °/mn	146 °/mn
280 kt	41 °/mn	63 °/mn	85 °/mn	109 °/mn	119 °/mn	135 °/mn

Durée d'un demi-tour (180°), en secondes

	10°	15°	20°	25°	27°	30°
120 kt	112 s	74 s	54 s	42 s	39 s	34 s
140 kt	131 s	86 s	63 s	49 s	45 s	40 s
160 kt	149 s	98 s	72 s	57 s	52 s	46 s
180 kt	168 s	111 s	81 s	64 s	58 s	51 s
200 kt	187 s	123 s	91 s	71 s	65 s	57 s
220 kt	206 s	135 s	100 s	78 s	71 s	63 s
240 kt	224 s	148 s	109 s	85 s	78 s	68 s
260 kt	243 s	160 s	118 s	92 s	84 s	74 s
280 kt	262 s	172 s	127 s	99 s	91 s	80 s