

# La résistance de l'air

## Table des matières

1. Généralités.....	2
2. Les causes de la résistance de l'air.....	2
3. L'étude expérimentale de la résistance de l'air.....	3
4. Les résultats.....	4
4.1. Vitesses faibles.....	4
4.2. Vitesses subsoniques.....	4
4.3. Vitesses supersoniques.....	4
4.4. Vitesses transsoniques.....	4
5. L'expression de la résistance de l'air.....	5
5.1. Le maître couple.....	5
5.2. Le coefficient de forme.....	5
5.3. La formule simplifiée de la résistance de l'air.....	6
6. La vitesse limite de déplacement dans l'air.....	6
6.1. L'application à la chute des corps dans l'air.....	7
7. La sustentation d'une aile d'avion.....	8
7.1. Cas schématique d'une aile plane.....	8
7.2. L'aile profilée.....	9
7.3. L'équilibre d'un avion en vol horizontal.....	9

En physique, on désigne par chute avec résistance de l'air la modélisation du problème de la chute d'un corps, généralement sous atmosphère terrestre, dans laquelle on prend en compte l'influence du déplacement d'air sur la chute. Ce modèle est donc différent du modèle de chute libre, dans lequel seul l'effet du poids est considéré.

# 1. Généralités

Notre expérience de cycliste ou de passager nous apprend que l'air tend à s'opposer aux mouvements ; il les freine d'autant plus que ces mouvements sont plus rapides.

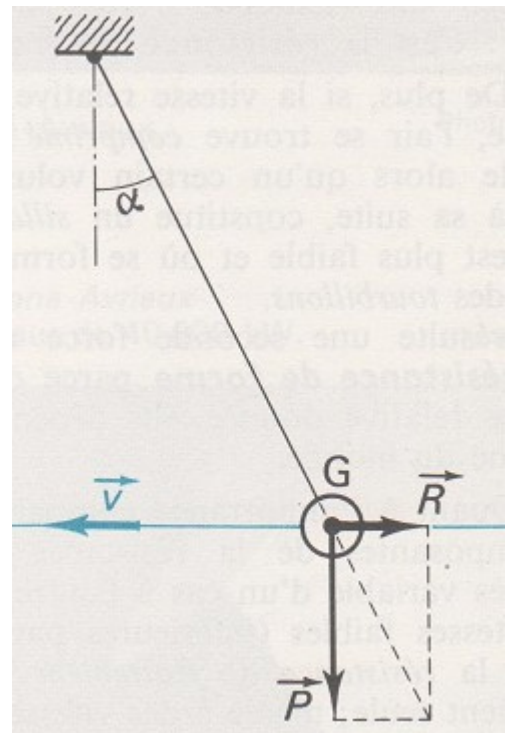
Le mouvement d'un corps dans un fluide fait naître en effet des forces résistantes, c'est-à-dire toujours opposées au mouvement. A cause de ces résistances, la chute d'un corps dans l'air peut être très différente d'une chute libre (expérience du tube de Newton) et la trajectoire d'un projectile peut s'écarter notablement de la forme parabolique prévue par la théorie. Ces forces contribuent également à amortir le mouvement d'un pendule.

L'observation de la chute tournoyante d'une feuille montre que l'action de l'air sur un mobile est en général très complexe ; elle se traduit par un système de forces équivalant à chaque instant à une force résistante  $R$ , diminuant la vitesse du centre de gravité, et à un couple, faisant tourner le corps.

Considérons une sphère légère suspendue par un fil à un support :

Si le support se déplace dans l'air calme d'un mouvement de translation rectiligne uniforme, le fil s'écarte de la verticale d'un angle constant  $\alpha$ . On en déduit que l'action de l'air sur la sphère en mouvement se réduit à une force unique  $R$ , de même direction que la vitesse  $v$  et de sens contraire.

Cette propriété peut être généralisée : quand un corps possède un axe de symétrie et se déplace d'un mouvement de translation rectiligne dont la vitesse  $v$  a même direction que cet axe, l'action de l'air se réduit à une force unique  $R$  que l'on appelle la **résistance de l'air**. La droite d'action de cette force se confond avec l'axe de symétrie du corps et son sens est opposé à celui de la vitesse  $v$ .



Si, laissant le pendule immobile, on le place dans un vent régulier de vitesse  $v$  opposée à celle qu'avait la sphère précédemment, le pendule s'écarte du même angle « ; on en déduit que la résistance de l'air  $R$  ne dépend que de la vitesse relative du mobile et du fluide.

Le même dispositif permet aussi de montrer que la résistance de l'air croît rapidement avec cette vitesse relative.

## 2. Les causes de la résistance de l'air

Considérons le cas simple d'un mobile possédant un axe de symétrie et dont la vitesse par rapport à l'air a même direction que cet axe.

- Quand le mobile fraie son chemin dans une masse d'air, il se produit au voisinage de la surface du corps en mouvement un déplacement des couches d'air les unes par rapport aux autres; comme l'air a une certaine viscosité, il en résulte des forces de frottement qui s'appliquent tangentiellement à la surface du mobile et admettent une résultante portée par l'axe de symétrie : c'est la **résistance de frottement**.
- De plus, si la vitesse relative n'est pas très petite, l'air se trouve comprimé à l'avant du mobile alors qu'un certain volume d'air, entraîné à sa suite, constitue un sillage où la pression est plus faible et où se forment généralement des tourbillons. Il en résulte une seconde force résistante, appelée **résistance de forme** parce que, pour une vitesse relative donnée, elle dépend surtout de la forme du mobile.
- Quant à l'importance comparée de ces deux composantes de la résistance de l'air, elle est très variable d'un cas à l'autre :

Aux vitesses faibles (inférieures par exemple à 1 m/s) la résistance de frottement intervient pratiquement seule; même à des vitesses moyennes, elle reste une fraction non négligeable de la résistance de l'air pour des mobiles fuselés comme la carène d'un dirigeable ou le fuselage d'un avion.

Par contre, c'est à peu près uniquement la résistance de forme qui agit sur un pare-brise, un parachute ou une aile d'avion dans les conditions usuelles d'emploi.

### 3. L'étude expérimentale de la résistance de l'air

Les indications précédentes laissent entrevoir la complexité du problème ; il en ressort en effet que :

- Pour un mobile donné, la résistance de l'air dépend de la vitesse relative et des propriétés de l'air (densité, viscosité, compressibilité) qui sont fonctions de sa pression et de sa température.
- Pour un déplacement à ,vitesse donnée, dans l'air à une pression, une température et un état hygrométrique déterminés, elle dépend de la forme, des dimensions et de l'état de la surface du mobile.

Aussi n'obtient-on de renseignements valables qu'à la suite d'expériences minutieuses comportant des mesures très nombreuses et souvent délicates.

La réalisation de vitesses toujours plus grandes pour les trains, les automobiles et surtout les avions a entraîné, au cours des cinquante dernières années, un développement et un perfectionnement incessants des méthodes expérimentales d'étude de la résistance de l'air. La méthode la plus utilisée est celle du tunnel aérodynamique.

La chambre d'expérience est traversée par une « veine » d'air bien réglée dont la vitesse et le débit dépendent de la grandeur des hélices des aspirateurs et de la puissance des moteurs qui les actionnent. Le « mobile » à étudier (ou sa maquette) est immobilisé dans la veine par l'intermédiaire de dynamomètres donnant les composantes de la résistance de l'air ; des manomètres et des anémomètres donnent les pressions et les vitesses relatives en divers points de la surface du mobile. On peut aussi être renseigné sur les trajectoires des filets d'air (et, éventuellement, sur les tourbillons qu'ils forment) en mettant des fumées en suspension dans l'air de la veine et en photographiant le spectre aérodynamique ainsi obtenu.

## 4. Les résultats

L'étude expérimentale confirme la complexité de l'action de l'air sur un corps en mouvement; elle montre en particulier que la nature et l'importance relative des facteurs qui influent sur la résistance de l'air dépendent du domaine de vitesses considéré.

### 4.1. Vitesses faibles

Tant que la vitesse relative est inférieure à 1 m/s, la résistance de l'air, pratiquement réduite à la résistance de frottement, est proportionnelle à la vitesse. C'est une résistance de ce genre qui s'applique à un pendule oscillant avec une faible amplitude, ou qui limite à moins d'un centimètre par seconde la vitesse de chute des minuscules gouttelettes d'eau formant le brouillard.

### 4.2. Vitesses subsoniques

Une variation de pression produite en un point d'une masse d'air se propage de proche en proche dans toutes les directions avec une vitesse  $V$ , appelée vitesse du son parce que l'audition d'un son résulte de variations de pression transmises par l'air avec cette vitesse de propagation.

On appelle nombre de Mach, le rapport  $\frac{v}{V}$  de la vitesse d'un mobile à la vitesse du son et l'on désigne par vitesses subsoniques les vitesses qui correspondent à un nombre de Mach inférieur à 0,8. La vitesse du son dans l'air à la température ordinaire étant de l'ordre de 340 m/s, les vitesses subsoniques sont inférieures à environ 272 m/s.

Les mesures montrent que la résistance de l'air (dont la composante principale est ici la résistance de forme) est approximativement proportionnelle au carré de la vitesse.

### 4.3. Vitesses supersoniques

Ce sont les vitesses qui correspondent à un nombre de Mach supérieur à 1,2.

L'expérience montre qu'à ces vitesses les lois de la résistance de l'air sont différentes de celles qui correspondent au domaine subsonique ; non seulement la résistance croît plus rapidement que le carré de la vitesse, mais les autres facteurs n'ont plus la même importance relative. De ce fait, les lois de similitude utilisées dans les études sur maquettes sont différentes.

### 4.4. Vitesses transsoniques

Ce domaine des vitesses voisines de celles du son (nombre de Mach compris entre 0,8 et 1,2) est, de loin, le moins bien exploré. A ces vitesses, les mesures faites dans le tunnel aérodynamique mettent en évidence des phénomènes beaucoup plus complexes encore qu'aux vitesses inférieures ou supérieures et les résultats s'interprètent difficilement.

Cette complexité peut s'expliquer de la façon suivante :

Lorsqu'un mobile, un avion par exemple, comprime l'air devant lui, la variation de pression ainsi produite se propage à partir de l'avion avec la vitesse  $V$ .

- Tant que la vitesse  $v$  de l'avion par rapport à l'air est nettement différente de  $V$ , cette perturbation s'éloigne rapidement à l'avant ou à l'arrière de l'avion ;

- Par contre, si  $v$  diffère peu de  $V$ , la perturbation accompagne l'avion et l'on conçoit que la résistance qu'offre aux ailes cet air perturbé présente des discontinuités de variation capables de modifier plus ou moins profondément les conditions du vol.

Cela explique le rôle prépondérant joué par le nombre de Mach  $\frac{v}{V}$  dans l'étude de la résistance de l'air aux vitesses transsoniques et fait comprendre, d'autre part, qu'on soit amené à modifier la forme de l'aile pour rendre plus facile le franchissement du « mur du son », quand un avion passe du vol subsonique au vol supersonique.

## 5. L'expression de la résistance de l'air

Le domaine qui présente encore actuellement le plus d'intérêt pratique est celui des vitesses subsoniques parce qu'il correspond aux vitesses usuelles.

Il est possible, dans ce domaine où intervient surtout la résistance de forme, de donner de la résistance de l'air une expression simple, suffisamment approchée pour permettre de calculer des ordres de grandeur.

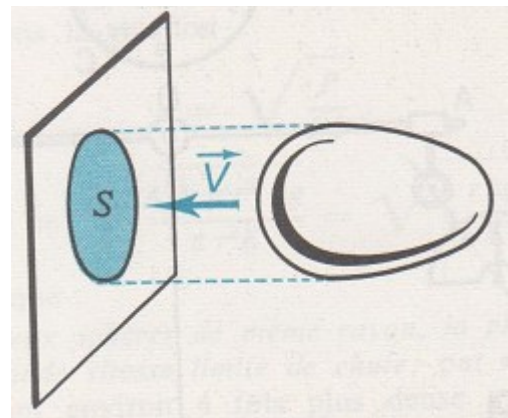
L'étude expérimentale dans le tunnel aérodynamique conduit à admettre qu'aux vitesses moyennes et pour un mobile possédant un axe de symétrie parallèle au déplacement relatif, la résistance de l'air est proportionnelle :

$$R = C.a.S.v^2$$

- $v$  : vitesse relative (m/s)
- $S$  : surface du maître couple (m<sup>2</sup>)
- $a$  : masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $C$  : coefficient caractéristique de la forme du mobile

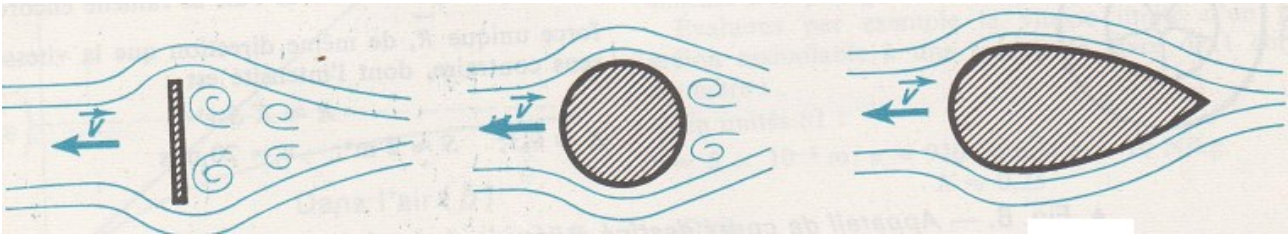
### 5.1. Le maître couple

Le maître couple, ou section « maîtresse », représente la surface de la projection orthogonale du mobile sur un plan perpendiculaire à la direction de la vitesse.

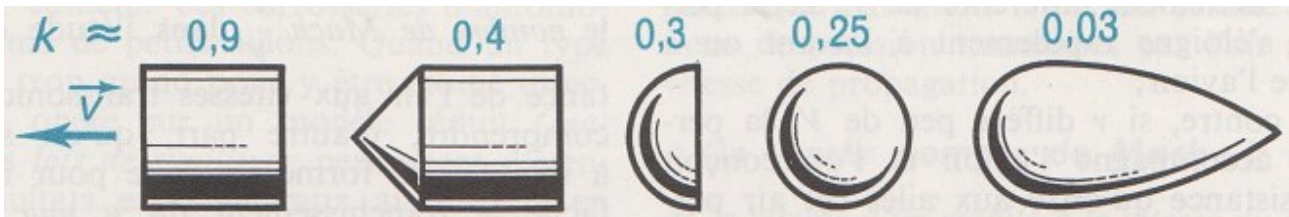


### 5.2. Le coefficient de forme

La résistance de l'air est fortement influencée par la forme, tant de la partie avant que de la partie arrière du mobile. D'une façon générale, le coefficient de forme est d'autant plus grand qu'il se forme plus de tourbillons dans le sillage du mobile :



La figure ci-dessous représente des solides de révolution de formes simples dont les coefficients de forme vont en décroissant. Par comparaison, on peut voir l'avantage d'une forme convexe à l'avant et l'inconvénient de toute partie plane à l'arrière.



On note aussi que la forme la plus avantageuse — la plus aérodynamique — est celle d'un fuseau arrondi à l'avant et effilé à l'arrière; c'est sensiblement la forme que prennent les gouttes lorsqu'elles tombent dans l'air.

### 5.3. La formule simplifiée de la résistance de l'air

Dans le cas de mobiles se déplaçant à la surface du sol ou à faible altitude, la masse volumique de l'air diffère peu de la valeur  $a_0$  qui correspond aux conditions normales (0 °C, 76 cm de mercure); il est alors commode de poser :

$$K = C \cdot a_0$$

On obtient ainsi une expression simplifiée de la résistance de l'air, fréquemment utilisée dans les calculs approchés :

$$R \approx K \cdot S \cdot v^2$$

Exemple : calculer la résistance de l'air s'exerçant sur une bille de 1 cm de diamètre qui se déplace dans l'air calme à la vitesse de 36 km/h.

$$R = K \cdot S \cdot v^2$$

avec  $K = 0,25$  (bille)

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-2})^2 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$v = 36 / 3,6 = 10 \text{ m/s}$$

$$R = 0,25 \times 7,85 \cdot 10^{-5} \times 10 = 1,96 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

## 6. La vitesse limite de déplacement dans l'air

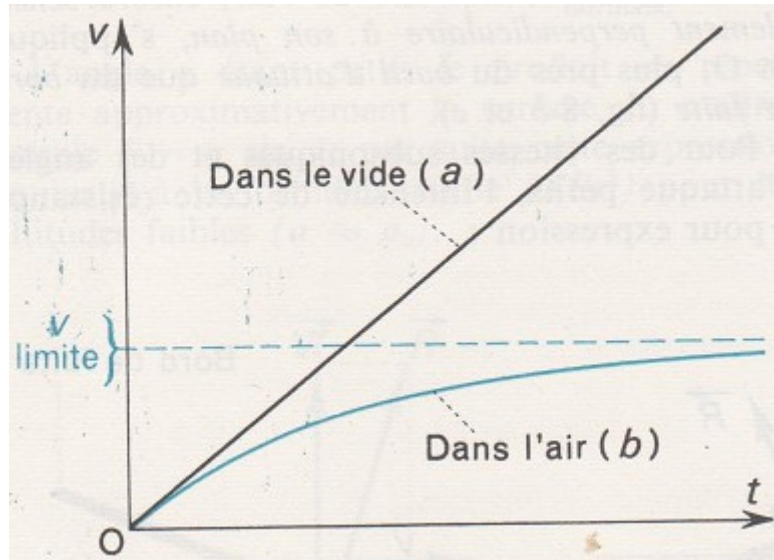
Soit un mobile mis en mouvement par une force constante  $F$ . Dans le vide, ce mouvement est rectiligne et uniformément accéléré, de mêmes direction et sens que  $\vec{F}$ .

Dans l'air, à cause de la résistance  $\vec{R}$  (que nous supposons colinéaire à  $\vec{F}$  et de sens contraire), l'intensité de la résultante des forces agissant sur le mobile n'est plus que :  $f = F - R$



R croissant comme le carré de la vitesse, f décroît dès le départ, donc l'accélération

$a = \frac{f}{m}$  est de moins en moins grande et la vitesse tend vers une valeur limite en même temps que f tend vers zéro :



En toute rigueur, cette vitesse limite ne serait atteinte qu'au bout d'un temps infini ; en fait, la vitesse prend rapidement une valeur très voisine de la vitesse limite et l'on peut considérer qu'à partir de ce moment, le mouvement est pratiquement uniforme.

### 6.1. L'application à la chute des corps dans l'air

Dans le mouvement de chute, la force constante est le poids du mobile  $P = m \cdot g^1$ .

A vitesse constante :  $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ , c'est-à-dire que la résistance de l'air est opposée au poids du corps :

$$R = K \cdot S \cdot v^2 = P$$

$$\text{d'où : } v = \sqrt{\frac{P}{K \cdot S}}$$

Ainsi, la vitesse limite de chute est d'autant plus grande que le poids par unité de maître-couple ( $P/S$ ) est plus important et que la forme est plus « aérodynamique » ( $K$  plus petit).

Exemple : calculer la vitesse limite de chute d'une sphère de rayon  $r$  et de masse volumique  $\rho$ .

$$P = m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g$$

$$S = \pi \cdot r^2$$

$$v = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g}{K \cdot \pi \cdot r^2}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot \rho \cdot g}{3 \cdot K}}$$

<sup>1</sup> En ne considérant que des corps pour lesquels la poussée d'Archimède est négligeable devant le poids.

On voit que :

- De deux sphères de même rayon, la plus dense a la plus grande vitesse limite de chute; par exemple, le plomb étant environ 4 fois plus dense que l'aluminium, une sphère de plomb tombe à peu près 2 fois plus vite qu'une sphère d'aluminium.
- De deux sphères de même substance, la plus volumineuse a la plus grande vitesse de chute.

Exemple : calculer la vitesse limite d'un grêlon assimilable à une sphère de glace de 1 cm de diamètre.

On donne  $\rho_{\text{glace}} = 920 \text{ kg/m}^3$

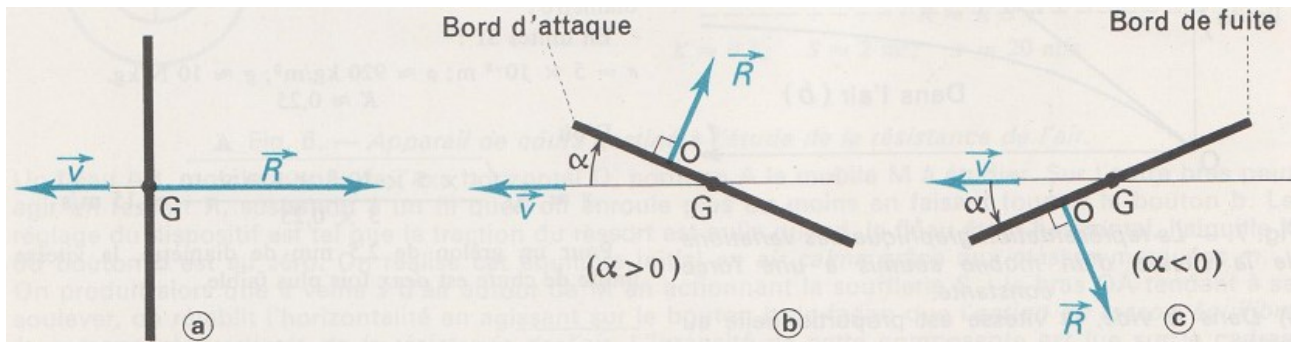
$$v = 2 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot \rho \cdot g}{3 \cdot K}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^{-2} \times 920 \times 9,81}{3 \times 0,25}} = 15,5 \text{ m/s}$$

## 7. La sustentation d'une aile d'avion

### 7.1. Cas schématique d'une aile plane

Considérons une aile assimilable à une plaque rectangulaire se déplaçant dans l'air calme à la vitesse  $\vec{v}$  :

- Si l'aile était normale à la direction de la vitesse (a), par raison de symétrie la résistance de l'air  $\vec{R}$  lui serait perpendiculaire et s'appliquerait en son centre.
- Mais comme elle prend, par rapport à  $\vec{v}$ , une position oblique caractérisée par l'angle d'attaque  $\alpha$ , l'expérience montre que la résistance de l'air, encore sensiblement perpendiculaire à son plan, s'applique en O, plus près du bord d'attaque que du bord de fuite (b et c).



Pour des vitesses subsoniques et des angles d'attaque petits, l'intensité de cette résistance a pour expression :

$$R = K \cdot \frac{a}{a_0} \cdot \sigma \cdot \alpha \cdot v^2$$

- $v$  : vitesse relative (m/s)
- $\alpha$  : angle d'attaque (en rad)
- $\sigma$  : surface de l'aile ( $\text{m}^2$ )
- $a$  : masse volumique de l'air à l'altitude du vol ( $\text{kg/m}^3$ )
- $a_0$  : masse volumique normale ( $\text{kg/m}^3$ )

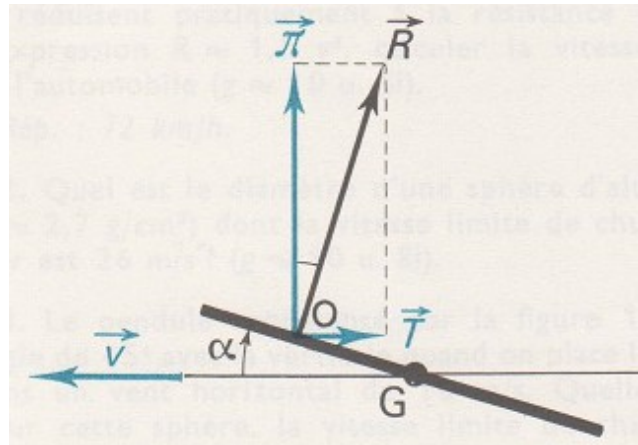


L'angle  $\alpha$  étant petit, le produit  $\alpha \cdot \sigma$  représente approximativement la surface du maître-couple  $S = \sigma \cdot \sin \alpha$  ; par suite, cette expression équivaut à la formule usuelle ( $K \cdot S \cdot v^2$ ) pour les altitudes faibles ( $a \approx a_0$ ) .

Décomposons la résistance  $R$  suivant la direction de la vitesse et la direction perpendiculaire à la vitesse :

$\vec{\pi}$  est la portance, de module :  $\pi = R \cdot \cos \alpha$

$\vec{T}$  est la traînée, de module :  $T = R \cdot \sin \alpha$



Pour des angles d'attaque positifs, la portance tend à soulever la plaque ; quant à la traînée, elle tend toujours à s'opposer au mouvement.

On appelle finesse de l'aile le rapport :  $\frac{\pi}{T} = \cot \alpha$

Comme l'angle d'attaque est petit :  $\pi \approx R$  et  $T \approx R \cdot \alpha$

D'où :  $\frac{\pi}{T} = \frac{1}{\alpha}$

La finesse d'une aile plane varie donc approximativement en raison inverse de l'angle d'attaque. Elle vaut par exemple 7 pour  $\alpha = 0,14$  rad.

## 7.2. L'aile profilée

Une aile d'avion n'est pas plane ; pour le vol subsonique, son bord d'attaque est arrondi et son bord de fuite est effilé : on dit qu'elle est profilée.

A la différence de ce qui a lieu pour une aile plane, la résistance de l'air sur une aile profilée n'est pas normale à l'aile mais légèrement inclinée vers l'avant ; il en résulte principalement une augmentation de la finesse.

Pour les angles d'attaque usuels, généralement petits (quelques degrés), la finesse d'une aile profilée peut atteindre 15 ou 20, parfois 30.

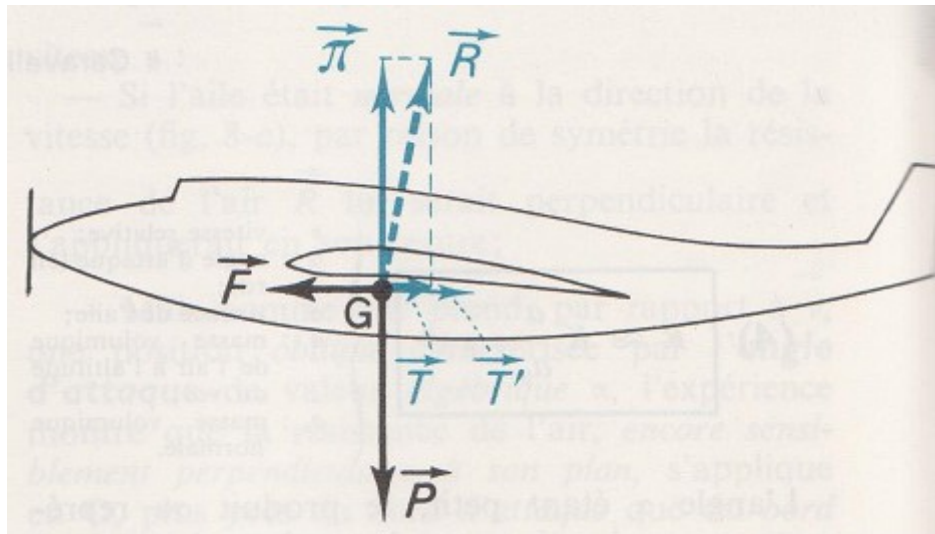
A égalité de portance  $\vec{\pi}$ , la traînée  $\vec{T}$  de l'aile profilée est nettement plus petite, de sorte que la sustentation de la même charge totale exige du moteur de l'avion une puissance plus faible.

Un autre avantage de l'aile profilée est de garder une portance ascendante (donc toujours sustentatrice), même pour de petites valeurs négatives de l'angle d'attaque ; la stabilité du vol s'en trouve évidemment augmentée.

## 7.3. L'équilibre d'un avion en vol horizontal

Considérons un petit avion de tourisme et admettons pour simplifier que ses ailes n'en forment qu'une, soumise de la part de l'air à une résistance  $R$  que nous supposons transportée au centre de gravité de l'avion. Admettons aussi que l'action de l'air sur le

fuselage se réduise à une traînée  $T'$  appliquée en G où nous transporterons également la force motrice  $F$  développée par l'hélice :



D'après le principe de l'inertie, le vol s'effectue horizontalement à vitesse constante si la résultante de toutes les forces est nulle, ce qui exige, à la fois, que la portance  $\pi$  équilibre le poids  $P$  de l'avion et que la force motrice  $F$  équilibre la somme des traînées  $T$  (de l'aile) et  $T'$  (du fuselage). Toutes choses égales d'ailleurs, cette force motrice est d'autant plus faible que la finesse de l'aile est plus grande et que la forme du fuselage est plus « aérodynamique ».

Si le pilote accélère la rotation du moteur,  $F$  croît, la vitesse augmente, la portance surpasse le poids et l'avion monte ; il atteint nécessairement un plafond, à la fois parce que  $F$  ne peut croître indéfiniment et que la masse volumique de l'air diminue à mesure que l'altitude augmente.

Si au contraire il la réduit,  $F$  décroît, la vitesse diminue, le poids l'emporte sur la portance et l'avion descend.