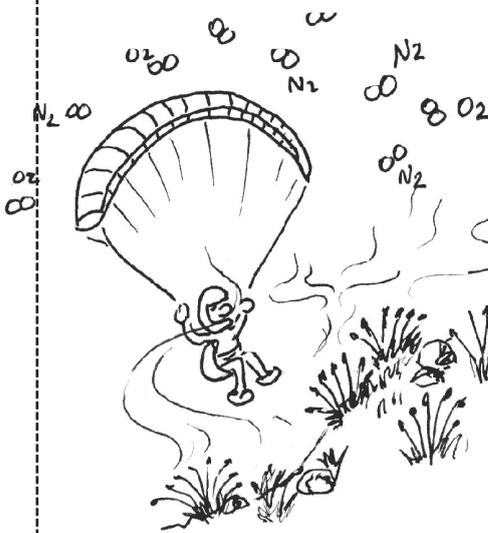


## D'où viennent les forces aérodynamiques ?

Texte et croquis :  
Olivier Caldara



**Le mois dernier, je vous ai proposé de m'accompagner un bout de chemin (que j'espère sans embûches...) sur la compréhension des phénomènes qui nous permettent de voler. Nous allons commencer tout naturellement par une description du milieu dans lequel nous nous ébattons, et des principales lois qui le régissent.**

Tant que cet air en mouvement ne rencontre aucun obstacle, les lignes de courant sont parallèles et une surface quelconque  $S_1$  laissant passer un certain "débit"  $Q$  (volume d'air par unité de temps) reste inchangée le long du trajet des lignes de courant. On appelle "tube de courant" la succession des surfaces  $S$  le long des lignes de courant. Cela peut être un tube réel (un bête tuyau !), ou bien fictif. Ce comportement est le même pour tous les fluides, les gaz, l'eau, etc. Tout au moins pour les gaz tant que la compressibilité n'intervient pas.

En 1738, pour son traité d'hydrodynamique, Daniel Bernouilli a découvert et énoncé la loi qui porte son nom, sur la conservation de la pression totale  $Pt$  le long d'un tube de courant quelle que soit sa forme, à partir de la conservation du débit  $Q$  et de l'énergie totale  $E$  (2) :

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

conservation du débit

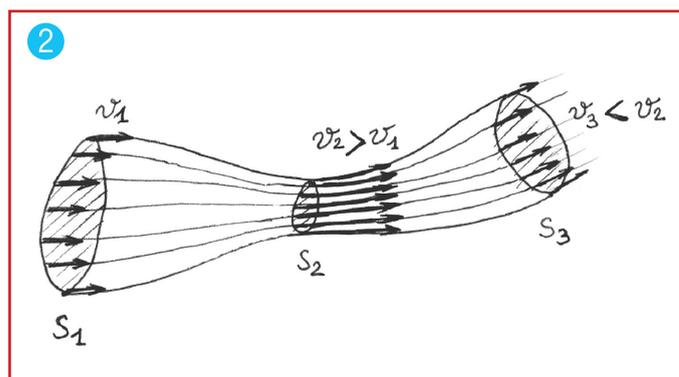
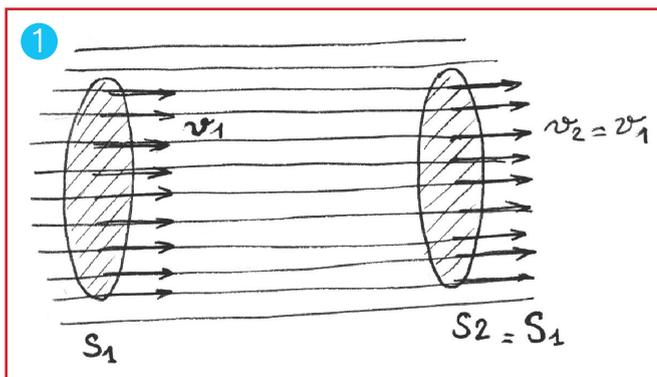
$$Ep_1 + Ec_1 = Ep_2 + Ec_2$$

conservation de l'énergie totale,  
énergie de pression + cinétique

**L'**air... Outre qu'il permet à tout un chacun de respirer, il nous permet, à nous pilotes, par quelques simples caractéristiques, de nous adonner à notre passion. Comme chacun sait, il est composé principalement de molécules d'oxygène et d'azote. Comme Arnaud Campredon l'a très bien décrit, d'autres composants le caractérisent, comme la vapeur d'eau, indispensable à certains phénomènes de convection et donc à notre pratique. D'autres

composants peuvent être présents, en traces infimes mais parfois très agréables comme le parfum de lavande lorsqu'on vole sur une colline provençale...

Pour la suite du propos, je considérerai l'air comme composé de molécules, dont la densité dépend de la pression atmosphérique et de la température. Comme tout fluide, lorsqu'il est mis en mouvement, ses molécules suivent des "lignes de courant" (1) :



La loi de conservation du débit rend simplement compte du fait que tout ce qui rentre dans le tube en ressort, dirait monsieur de la Palice... Le débit étant constant, si la section du tube décroît, la vitesse du fluide augmente. Un exemple très simple est le tuyau d'arrosage : sans l'embout, le jet est peu rapide et ne porte pas loin, avec l'embout de section plus petite c'est le contraire. Le rapport entre  $V_1$  et  $V_2$  est inverse du rapport entre  $S_1$  et  $S_2$ .

L'énergie totale pour un petit volume (ou particule) le long du tube de courant est la somme de deux termes :

1. L'énergie de pression  $P \cdot v$ , qui caractérise l'énergie emmagasinée dans le volume  $v$  à la pression statique  $P$ . Si l'on imagine par exemple un ballon gonflé, c'est l'énergie qui se libère lorsqu'on laisse échapper le ballon et qui le fait voyager dans toute la pièce... La poussée est proportionnelle à la pression interne  $P$ , la durée du "vol" est proportionnelle au volume. L'énergie dépensée pour le "voyage" du ballon jusqu'à l'arrêt, égale au produit de la poussée par la longueur du trajet, est équivalente à l'énergie initiale  $P \cdot v$  (rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme je vous dis...) :

2. L'énergie cinétique du petit volume, étant sa masse et  $V$  sa vitesse.

La loi de conservation de l'énergie totale s'écrit donc, entre les sections 1 et 2 du tube :

$$P_1 \cdot v + \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 = P_2 \cdot v + \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_2^2$$

Le fluide étant supposé incompressible (c'est vrai pour l'eau, et pour l'air tant que les vitesses sont faibles, loin en dessous du Mach), le volume  $v$  de la particule ne change pas entre 1 et 2, et l'on peut simplifier l'équation en la divisant par  $v$ . Elle devient :

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2$$

$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$  est appelée **Pt** pression totale, constante par la conservation de l'énergie totale,  $P$  est la pression statique,

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$  est appelée pression dynamique  $q$ , due à l'énergie des particules de fluide à la vitesse  $V$ .

En résumé, dès qu'un tube de courant est déformé, par exemple s'il est forcé dans un tube de section variable, ou bien si cette déformation est provoquée par une interaction avec une forme quelconque, il est le siège de variations et d'un échange entre pressions statiques et dynamiques, la pression totale étant constante, par le mécanisme suivant :

1. Le débit étant constant (tout ce qui rentre doit sortir...), la vitesse varie ;
2. La pression dynamique varie avec la vitesse (au carré) ;
3. La pression totale étant constante, la pression statique varie en sens inverse de la pression dynamique.

Je vous laisse deviner de quoi nous parlerons la prochaine fois (cela ne doit pas être bien difficile, enfin pour ceux qui suivent...).

