

Chapitre 1

Introduction

1.1 L'avion

Le mot "avion" est le nom donné par Clément Ader à sa série d'aéronefs plus lourds que l'air. L'Avion I, baptisé "Éole", fut ainsi le premier aérodyne à s'élever au-dessus du sol sur une distance de quelques dizaines de mètres grâce à sa propulsion assurée par un petit moteur à vapeur.

Le dictionnaire en donne la définition suivante :

"Tout appareil de navigation aérienne plus lourd que l'air, muni d'ailes (fixes) et propulsé par un ou plusieurs moteurs.¹"

Cette définition permet de situer l'avion dans la famille des aéronefs qui distingue les aérostats (les "moins lourds que l'air") dont la sustentation est assurée par la poussée d'Archimède, des aérodynes (les "plus lourds que l'air") dont la sustentation est assurée par une portance provenant de la vitesse de l'air autour des ailes (FIG. (1.1)).

Un avion en vol est soumis à deux types de forces :

- des forces de masse : pesanteur et inertie ;
- des forces de surface : propulsion et aérodynamique.

Nous retiendrons qu'en dehors des forces d'inertie, il est soumis principalement à trois efforts extérieurs qui sont :

- le poids ;
- la résultante aérodynamique ;
- la poussée.

1.2 Les commandes

La définition du mot "avion" précise qu'il s'agit d'un appareil de "navigation aérienne", sous-entendant ainsi qu'il est possible d'en maîtriser la trajectoire. À cette fin, le pilote dispose de 4 commandes :

- une commande en tangage : δm ;
- une commande de roulis : δl ;

1. Source Larousse.

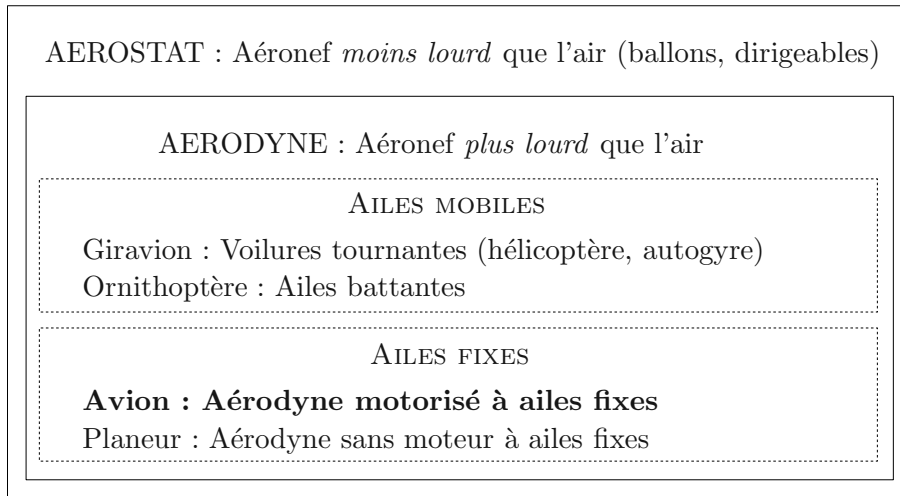


FIGURE 1.1 – Famille des aéronefs.

- une commande en lacet : δn ;
- une commande des gaz : δx .

Les commandes de tangage et de roulis sont groupées sur un seul organe de commande dénommé “manche à balai”². Le manche se situe généralement face au pilote sous la forme d’un volant sur le tableau de bord, d’une colonne ou d’un simple manche entre les jambes. Sur certains avions à commandes de vol électriques, le manche est déporté sur le côté du cockpit, toujours à droite sur un avion de combat ou bien de chaque côté sur un avion de transport type “Airbus”.³

1.2.1 La commande de tangage δm

La commande de tangage δm actionne la gouverne de profondeur généralement située à l’arrière de l’avion. Certains avions disposent d’un plan horizontal et d’une gouverne de profondeur à l’avant pour une meilleure efficacité aux grandes incidences, on parle dans ce cas de configuration “canard”. Dans de rares cas, l’avion dispose de gouvernes de profondeur à l’arrière et à l’avant, on parle dans ce cas d’une configuration “triplan”.

1.2.2 La commande de roulis δl

La commande de roulis δl , appelée “gauchissement”, actionne les ailerons de manière dissymétrique en bout d’ailes. Sur certains avions sans empennage horizontal, comme les avions à aile delta, les commandes de tangage et de roulis actionnent la

2. L’invention du manche à balai revient à l’ingénieur français Robert Esnault-Peletrie. Avant cette invention, les pilotes disposaient de deux manches découplés pour le tangage et le gauchissement.

3. Boeing a conservé la commande classique “colonne” sur ses avions à commandes de vol électriques.



FIGURE 1.2 – Le Sukhoï Su-30 MKI est un avion en configuration “triplan” et dispose également d’une capacité de poussée vectorielle, c’est-à-dire qu’il peut orienter le jet de ses réacteurs de manière à produire un moment sur les trois axes de l’avion.

même gouverne qui est appelée dans ce cas “elevon”, contraction des termes anglais “elevator” (profondeur) et “aileron”.

[H] *Le terme de “gauchissement” provient des débuts de l’aviation où la mise en roulis de l’avion était obtenue par une simple torsion des ailes, ce qui était le cas notamment sur le “Flyer” des frères Wright. Le pilote gauchissait l’aile grâce à un système de câbles et de poulies relié au manche, ce qui avait pour effet de modifier la répartition des efforts de portance sur l’envergure de l’aile, produisant ainsi un moment de roulis.*

Des recherches ont été menées aux États-Unis au début des années 2000 afin d’étudier la possibilité de revenir à un pilotage en roulis de l’avion par torsion des ailes pour alléger la structure de la voilure pour un avion de ligne ou accroître la manœuvrabilité sur un avion de combat. Un McDonnell Douglas F-18 fut ainsi spécialement modifié conjointement par la NASA et Boeing, programme dénommé “X-53”, de manière à ce que la commande de roulis actionne à la fois un braquage dissymétrique des bords d’attaque des ailes et un braquage dissymétrique classique des ailerons. Grâce à ce braquage des différentes surfaces, une torsion sur les ailes put être obtenue augmentant alors sensiblement le taux de roulis de cet avion.

1.2.3 La commande de lacet δn

La commande de lacet, appelée “palonnier”, est placée au pied du pilote. Elle actionne la gouverne de direction ou drapeau⁴ qui est la partie mobile l’empennage vertical de l’avion. Sur certains avions, la palonnier actionne également la roulette du train avant pour une meilleure contrôlabilité de l’avion lors des phases de roulage au

4. Ce terme provient du fait que le drapeau de nationalité était généralement peint sur cette partie mobile jusqu’à il y a peu.

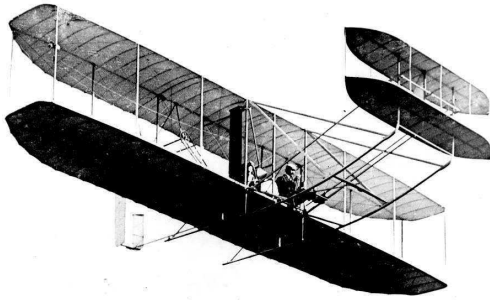


FIGURE 1.3 – Le “Flyer” des frères Wright. FIGURE 1.4 – Le Boeing X-53 (F-18 Active Aeroelastic Wing)

sol (taxi, décollage, atterrissage).

Sur certains avions avec un empennage arrière en “V”, les commandes de profondeur et de direction sont couplées de manière à produire soit un moment de tangage si les parties mobiles sont braquées symétriquement, soit un moment de lacet si elles sont braquées dissymétriquement.

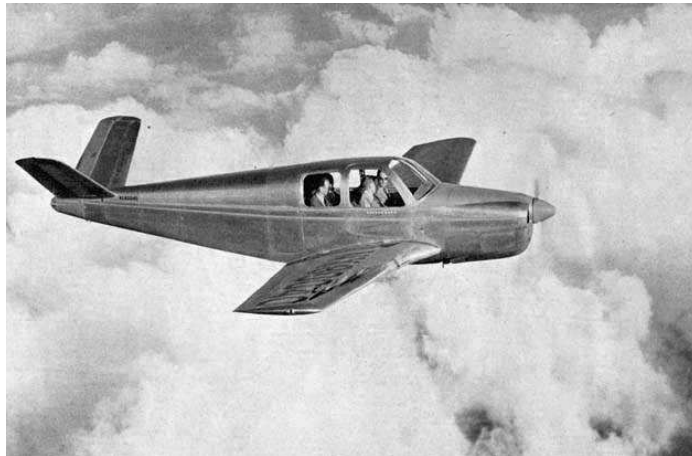


FIGURE 1.5 – Le Beechcraft “Bonanza” à empennage arrière en “V”.

1.2.4 La commande des gaz δx

La commande des gaz δx se situe sur le côté gauche du cockpit dans un avion de chasse et au centre de l’habitacle dans un avion de transport. Elle fait varier la poussée de l’avion en actionnant le régulateur de débit du carburant du moteur.

La poussée peut également être régulée automatiquement sur les avions disposant d’un système “d’auto-manette”⁵. Celle-ci permet de stabiliser la vitesse de l’avion sur une cible déterminée par le pilote. Dans ce mode, la manette des gaz se déplace

5. A-THR ou Auto-Throttle en anglais

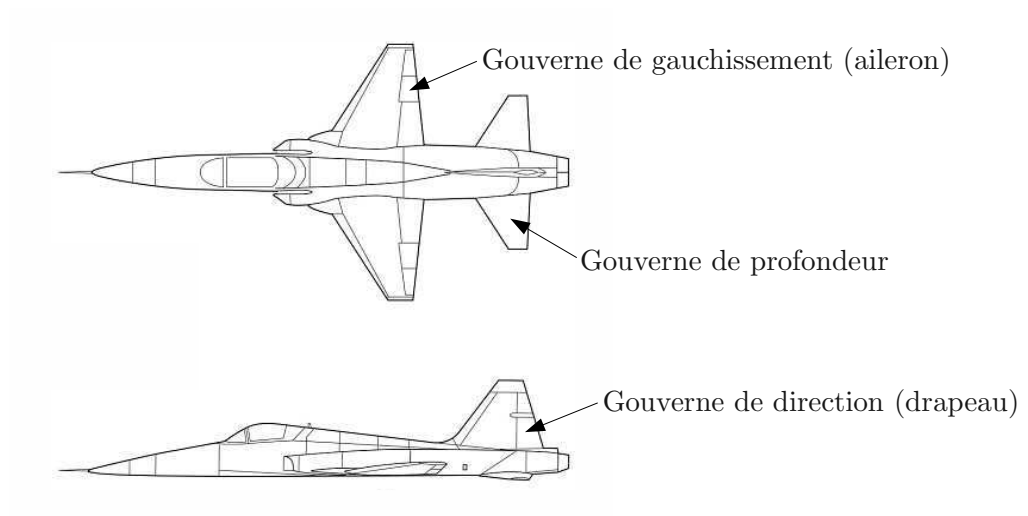


FIGURE 1.6 – Position des surfaces de contrôle sur un avion de combat classique, ici le Northrop F-5 “Tiger”.

automatiquement si elle est motorisée en fonction de la poussée nécessaire calculée par l’auto-manette, ou reste figée dans un “cran” correspondant à cette fonction comme sur les avions Airbus.

Chapitre 2

Les repères

Nous allons définir dans ce chapitre les différents repères qui seront utilisés tout au long de ce cours. Ces repères sont liés à la Terre, l'avion ou la vitesse aérodynamique. À ce titre, ils assurent chacun une fonction particulière, pour écrire la relation fondamentale de la dynamique ou projeter les forces et moments s'appliquant à l'avion. La position relative de ces repères permettra de définir des angles caractéristiques qui seront utilisés tout au long de cet ouvrage. Enfin, les différentes vitesses de rotation entre repères poseront les bases permettant d'écrire les équations cinématiques (CHAP. (4), p. 41).

2.1 Définition des repères

2.1.1 Le référentiel inertiel $\mathcal{R}_i (\mathcal{C}_T, \vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$

Nous définissons en premier lieu un référentiel *inertiel* lié à la Terre, \mathcal{R}_i , qui a pour l'origine le centre de la Terre, \mathcal{C}_T , et dont les directions sont *fixes* dans l'espace. La définition précise de ce référentiel \mathcal{R}_i n'est pas fondamentale en dynamique du vol. Cependant, pour fixer les idées, nous pouvons convenir d'une définition de \mathcal{R}_i issue de la mécanique spatiale, c'est-à-dire l'axe \vec{z}_i porté par le vecteur vitesse de rotation de la Terre, $\vec{\Omega}_T$, l'axe \vec{x}_i porté par l'intersection du plan équatorial et du plan de l'écliptique, et enfin l'axe \vec{y}_i venant compléter le trièdre direct.

Ce repère fixe dans l'espace, dit "galiléen", servira de référence pour écrire les relations fondamentales de la dynamique appliquées à l'avion et qui permettront ensuite d'obtenir les équations du mouvement.

Dans le référentiel \mathcal{R}_i , la vitesse de rotation de la Terre s'écrit :

$$\vec{\Omega}_T^{[\mathcal{R}_i]} = \begin{pmatrix} \Omega_T \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

2.1.2 Le repère fixe lié à la Terre $\mathcal{R}_T(\mathcal{O}, \vec{x}_T, \vec{y}_T, \vec{z}_T)$

Le repère fixe lié à la Terre, \mathcal{R}_T , a pour origine un point \mathcal{O} , placé *arbitrairement* à la surface de la Terre. Par exemple, cette origine peut être placée à l'intersection de l'équateur et du méridien de Greenwich, c'est-à-dire au point de longitude et latitude nulles.

L'axe \vec{z}_T de ce repère est porté par la force de gravitation *locale* en \mathcal{O} et pointe vers le centre de la Terre. Les axes \vec{x}_T et \vec{y}_T sont perpendiculaires à l'axe \vec{z}_T , c'est-à-dire qu'ils définissent l'horizontale terrestre en \mathcal{O} . Leurs directions peuvent être choisies arbitrairement, il est cependant d'usage d'orienter l'axe \vec{x}_T vers le "Nord", c'est-à-dire qu'il est porté par le méridien passant par \mathcal{O} , et d'orienter l'axe \vec{y}_T vers "l'Est" de manière à compléter le trièdre direct (FIG. (2.1)).

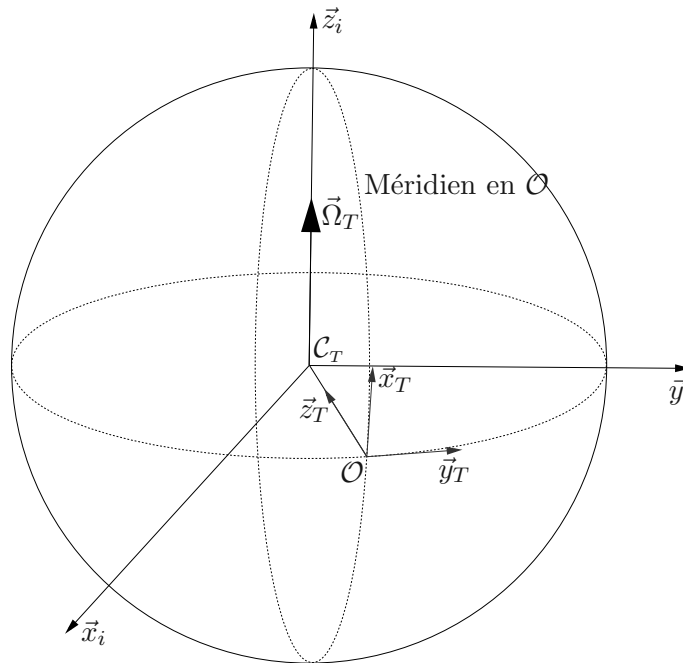


FIGURE 2.1 – Positions relatives du repère fixe par rapport à la Terre \mathcal{R}_T et du référentiel inertiel \mathcal{R}_i .

REMARQUE : Ce repère servira notamment à définir proprement une vitesse cinématique de l'avion, qui est la vitesse de déplacement de l'avion par rapport à la Terre.

2.1.3 Le repère lié à la Terre $\mathcal{R}_o(\mathcal{O}, \vec{x}_o, \vec{y}_o, \vec{z}_o)$

Le repère lié à la Terre, \mathcal{R}_o , possède la même origine \mathcal{O} que le repère \mathcal{R}_T . L'axe \vec{z}_o de ce repère est porté par la force de gravitation *locale* au niveau de la position de l'avion et pointe vers le centre de la Terre. Les axes \vec{x}_o et \vec{y}_o sont perpendiculaires à l'axe \vec{z}_o , c'est-à-dire qu'ils définissent l'horizontale terrestre *locale* au niveau de

l'avion. Comme pour le repère \mathcal{R}_T , il est d'usage d'orienter l'axe \vec{x}_o vers le "Nord" et l'axe \vec{y}_o vers "l'Est" de manière à compléter le trièdre direct (FIG. (2.2)).

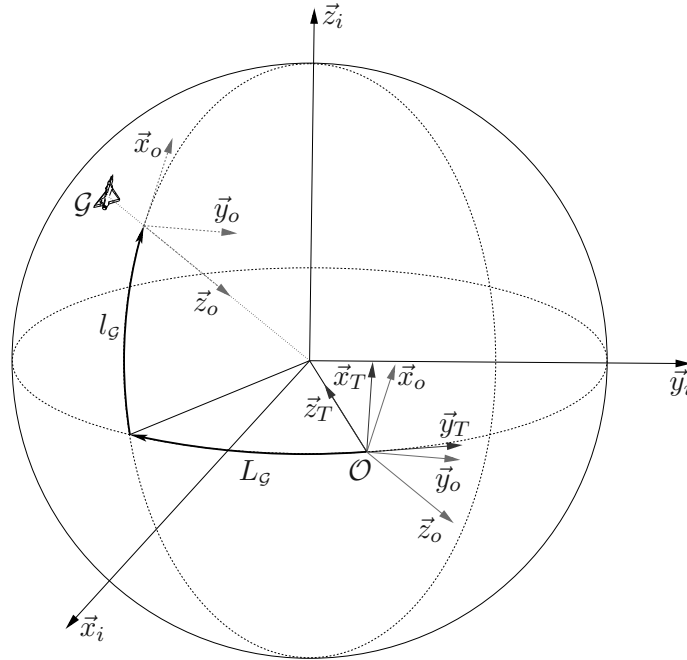


FIGURE 2.2 – Positions relatives du repère terrestre \mathcal{R}_o et du repère fixe lié à la Terre \mathcal{R}_T . La position de l'avion, repérée par \mathcal{G} , permet de déterminer la direction des axes du repère \mathcal{R}_o , mais celui-ci a pour origine le point O qui est fixe à la surface de la Terre.

REMARQUE : Afin de visualiser les angles caractéristiques entre le repère lié à l'avion \mathcal{R}_b et celui lié à la Terre \mathcal{R}_o , les axes du repère \mathcal{R}_o seront par la suite "transportés" au niveau du centre de gravité de l'avion \mathcal{G} (PAR. (2.2.1), p. 27).

2.1.4 Le repère aérodynamique $\mathcal{R}_a(\mathcal{G}, \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$

Le repère aérodynamique, \mathcal{R}_a , a pour origine le centre de gravité de l'avion \mathcal{G} . L'axe \vec{x}_a est porté par la vitesse aérodynamique \vec{V}_a . L'axe \vec{z}_a est perpendiculaire à l'axe \vec{x}_a et se situe dans le plan de symétrie de l'avion. L'axe \vec{y}_a vient compléter le trièdre direct (FIG. (2.6)).

Ainsi, le vecteur vitesse aérodynamique \vec{V}_a s'écrit dans le repère aérodynamique \mathcal{R}_a :

$$\vec{V}_a^{[\mathcal{R}_a]} = \begin{pmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$