

(a) Turboréacteur à double flux **(b)** Turbopropulseur

Figure 42 – Exemples de turbomachines

Remarque : *D'autres réacteurs sont à simple flux. La soufflante entraine tout l'air entrant uniquement dans le compresseur sans séparation : il n'y a qu'un seul flux d'air.*

Un turbopropulseur est tout à fait identique à un turboréacteur simple flux à l'exception du fait que la turbine n'entraine pas uniquement la soufflante mais également l'hélice via un système d'engrenages.

6.4. Autres motorisations

L'aviation électrique et à hydrogène notamment se développent actuellement. Néanmoins, si les considérations écologiques peuvent justifier le développement de ces nouvelles motorisations, le stockage de la source d'énergie (batterie ou réservoir à hydrogène) est encore lourd et la puissance des moteurs reste en deçà des motorisations utilisant les carburants fossiles.

Les drones peuvent fonctionner avec un moteur électrique lorsqu'ils sont de petite taille même en comportant des calculateurs capables de stabiliser celui-ci en l'air.

7. Instruments de bord

Pour la conduite du vol et le suivi d'une navigation, un aéronef doit obligatoirement être équipé des instruments de bord suivants :

- un altimètre ;
- un variomètre ;
- un anémomètre ;
- un horizon artificiel ;
- un indicateur de virage et de dérapage ;
- un compas magnétique compensable ou un indicateur gyroscopique de direction ;

Ces six instruments sont donc classiquement retrouvés dans tous les aéronefs, en des positions généralement semblables d'un appareil à l'autre. Nous allons voir dans cette section le fonctionnement de ces instruments.



Figure 43 – Les six instruments du tableau de bord standard

Remarque : *Règlementairement, la liste des équipements dont un aéronef doit disposer pour pouvoir entreprendre un vol est plus complexe et dépend notamment du type de vol à réaliser (vol à vue de jour ou de nuit, vol aux instruments) mais nous n'entrerons pas dans le détail de cette liste dans le cadre de ce cours.*

7.1. L'altimètre

L'altimètre indique l'altitude de l'avion. Celle-ci est affichée en **pieds**, ou plus rarement en mètres. La lecture de l'altitude se fait comme sur une montre : la grande aiguille indique des centaines de pieds tandis que la petite aiguille indique des milliers de pieds.



Figure 44 – Le cadran de l'altimètre

L'altimètre est un instrument pneumatique : son fonctionnement est basé sur la mesure d'une pression. En l'occurrence, l'altimètre mesure la pression statique pour estimer l'altitude de l'avion. En effet, nous verrons dans le chapitre de météorologie que la pression atmosphérique diminue selon une loi théorique

précise en fonction de l'altitude. Il suffit donc de graduer le cadran de l'instrument en unité d'altitude pour récupérer cette information.

L'altimètre fonctionne par rapport à une pression de référence réglée par le pilote. Cette pression est choisie par le pilote au moyen d'un système de réglage agissant sur une capsule fermée placée au milieu d'une chambre à la pression atmosphérique courante. L'expansion ou la contraction de la capsule de référence est alors transmise à un dispositif mécanique permettant l'affichage sur le tableau de bord.

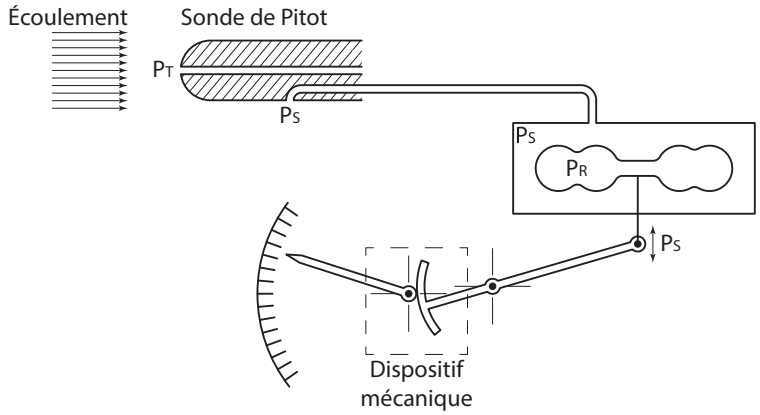

Figure 45 – Principe de fonctionnement de l'altimètre

7.2. Le variomètre

Le variomètre indique la vitesse verticale de l'avion, en montée ou en descente, exprimée en **pieds par minute**, ou plus rarement en mètres par seconde.



Figure 46 – Le cadran du variomètre

Le variomètre est un instrument pneumatique : son fonctionnement est basé sur une mesure de pression. En l'occurrence, le variomètre mesure la différence de pression statique entre l'instant actuel et une pression statique retenue quelques instants auparavant. Pour effectuer cela, la pression statique est amenée à l'intérieur d'une capsule fermée mais également autour de cette capsule par l'intermédiaire d'un orifice capillaire, de sorte que la pression statique s'établit lentement autour de la capsule. Les déformations de la capsule sont ensuite transmises à un dispositif mécanique permettant l'affichage sur le tableau de bord.

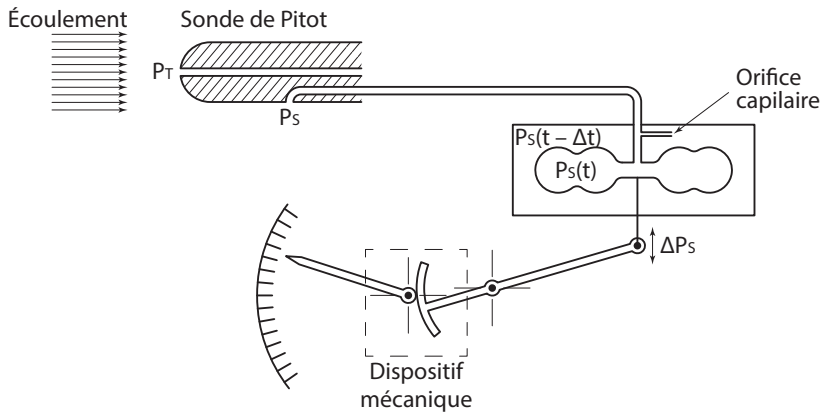

Figure 47 – Principe de fonctionnement du variomètre

7.3. L'anémomètre

L'anémomètre (également appelé badin, du nom de son inventeur) indique la vitesse de l'aéronef par rapport à la masse d'air qui l'entoure. Elle est généralement exprimée en **nœuds** (correspondant à un mile nautique parcouru par heure, soit 1852 m par heure) ou parfois en kilomètres par heure.



Figure 48 – Le cadran de l'anémomètre

Le cadran de l'anémomètre comporte des arcs de couleur qui correspondent à des **vitesses caractéristiques**.

L'arc blanc permet d'identifier la plage de vitesses compatibles avec l'utilisation des systèmes hypersustentateurs (volets et becs). La limite basse de l'arc blanc correspond à la vitesse de décrochage pleins volets. La limite haute de l'arc blanc correspond à la vitesse maximale d'utilisation des volets, appelée VFE pour *Velocity Flaps Extended*.

L'arc vert permet d'identifier la plage de vitesses en utilisation normale. La limite basse de l'arc vert correspond à la vitesse de décrochage volets rentrés. La limite haute de l'arc vert correspond à la vitesse à ne pas dépasser en air turbulent, appelée VNO pour *Velocity Normal Operating*.

L'arc jaune permet d'identifier la plage de vitesses incompatibles avec la conduite du vol en air turbulent. La limite haute de l'arc jaune est la vitesse maximale que l'avion peut supporter, appelée VNE pour *Velocity Never Exceed*. Cette limite est également matérialisée par un trait rouge.

L'anémomètre est un instrument pneumatique : son fonctionnement est basé sur la mesure de pressions. En l'occurrence, l'anémomètre mesure la pression dynamique pour estimer la vitesse de l'avion par rapport à la masse d'air. Pour effectuer cette mesure, en plus du cadran d'affichage, l'anémomètre est constitué d'une sonde de mesure de pression appelée sonde de Pitot. Celle-ci mesure la pression totale ainsi que la pression statique. Un dispositif à capsule permet de faire la différence entre pression totale et pression statique pour déterminer la pression dynamique, transmise à un dispositif mécanique permettant l'affichage sur le tableau de bord.

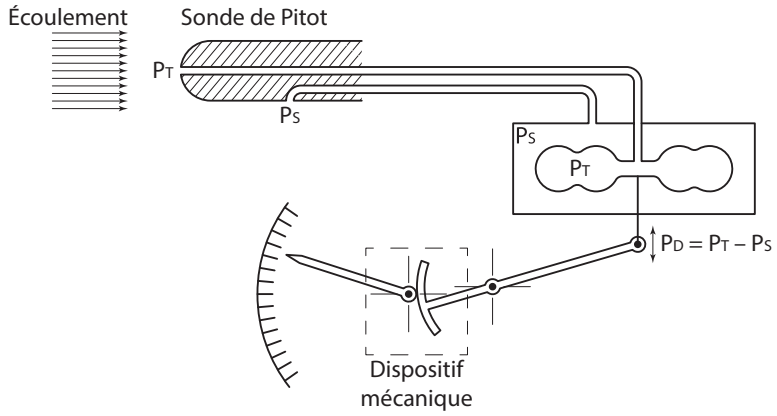

Figure 49 – Principe de fonctionnement de l'anémomètre

7.4. L'horizon artificiel

L'horizon artificiel restitue la position de l'horizon naturel lorsque celui-ci n'est pas visible (lors d'un vol de nuit ou dans les nuages). Il devient alors possible de contrôler l'attitude de l'avion par une parfaite similitude avec le vol à vue.

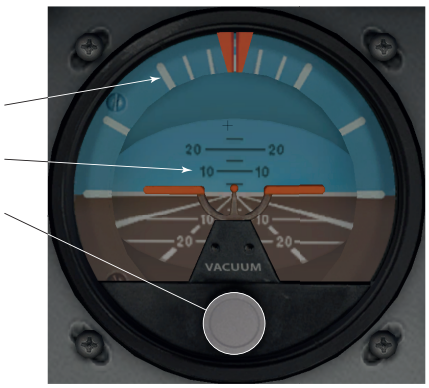

Figure 50 – Le cadran de l'horizon artificiel

L'horizon artificiel est constitué :

- d'une maquette centrale qui représente l'avion, fixe par rapport à l'avion ;
- d'une couronne extérieure mobile par rapport à l'avion, sur laquelle figurent des graduations indiquant les valeurs de l'inclinaison de l'avion ;
- d'une sphère intérieure mobile par rapport à l'avion et à la couronne extérieure, sur laquelle figurent des graduations indiquant les valeurs d'assiette de l'avion.

Lors d'un mouvement de l'avion, c'est l'ensemble {avion + maquette} qui se déplace autour de la sphère et de la couronne rendues fixes dans l'espace par un gyroscope.

L'horizon artificiel est un instrument gyroscopique : son fonctionnement est basé sur la rotation rapide d'une pièce massive (le gyroscope), assurée par un moteur pneumatique ou électrique. L'axe du gyroscope est fixé à un cadre mobile lié à la sphère. Ce cadre mobile est lui-même orientable par rapport à un cadre intermédiaire lié à la couronne. L'ensemble est également orientable par rapport au boitier de l'instrument et à l'avion.

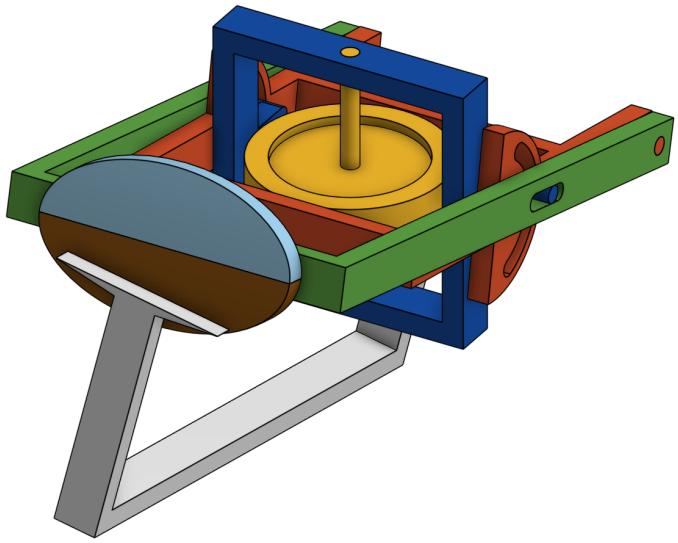

Figure 51 – Principe de fonctionnement de l'horizon artificiel

7.5. L'indicateur de virage et de dérapage

L'indicateur de virage et de dérapage est en fait la réunion de deux instruments.



Figure 52 – Le cadran de l'indicateur de virage et de dérapage

L'indicateur de virage est, dans une certaine mesure, en doublon par rapport à l'horizon artificiel bien que les informations qu'il apporte soient légèrement différentes. Là où l'horizon artificiel donne précisément l'inclinaison de l'avion par rapport à la verticale, l'indicateur de virage indique uniquement le taux de virage, dépendant notamment de la vitesse de l'avion. Ainsi, l'indicateur de virage possède généralement une seule graduation (parfois deux) indiquant l'inclinaison nécessaire à avoir pour que l'avion effectue un tour complet en deux minutes.

L'indicateur de virage est un instrument gyroscopique : son fonctionnement est basé sur la rotation rapide d'une pièce massive (le gyroscope), assurée par un moteur pneumatique ou électrique. L'axe du gyroscope est fixé à un cadre mobile lié à la maquette ou à l'aiguille. L'ensemble est orientable par rapport au boitier de l'instrument et à l'avion. Le principe de fonctionnement de l'indicateur de virage est tout à fait similaire à celui de l'horizon artificiel (à quelques éléments près) et nous ne présenterons pas d'illustration spécifique pour son fonctionnement.

L'indicateur de dérapage permet d'identifier si le flux d'air est symétrique sur les deux ailes. Ceci est obtenu en maintenant la bille au centre de l'instrument, entre les deux marques. Un défaut de symétrie dans le vol peut être gênant car cela se traduit pas le fait qu'une aile engendre une plus forte portance que l'autre.

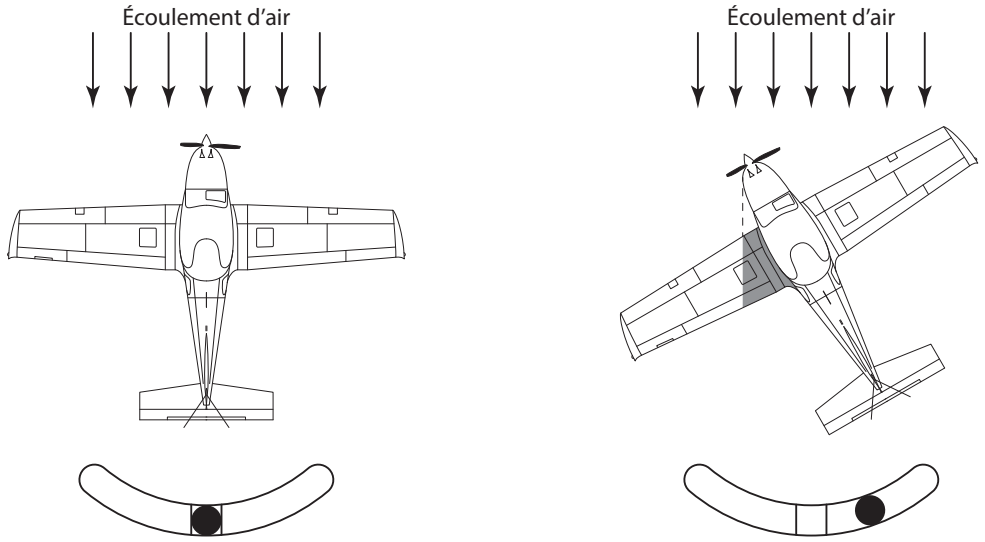

Figure 53 – Principe de fonctionnement de l'indicateur de dérapage

7.6. Le compas ou l'indicateur de direction

Le compas ou l'indicateur de direction permettent de mesurer l'orientation de l'avion par rapport au nord magnétique.



Figure 54 – Le cadran du compas magnétique

Le compas est un instrument mécanique : son fonctionnement est basé sur la rotation libre d'un aimant. Il s'agit d'une boussole libre de s'aligner sur le champ magnétique terrestre. Sur cet aimant est fixée une couronne graduée indiquant la direction suivie par l'avion en dizaine de degrés. Généralement, les

directions principales sont indiquées par des lettres selon l'initiale anglaise : **N** pour le nord ; **W** pour l'ouest ; **S** pour le sud et **E** pour l'est. Pour pouvoir utiliser le compas magnétique, il est nécessaire d'être en vol stabilisé, c'est-à-dire hors montée/descente, virage, accélération. Par ailleurs, les indications fournies par le compas magnétique sont antidirectionnelles : en volant vers le sud par exemple, pour tourner de manière à suivre le cap 150 il faut tourner vers la gauche alors que l'indication « 15 » est située à droite sur le compas magnétique. Pour ces raisons, on lui préfère généralement l'indicateur de direction.



Figure 55 – Le cadran de l'indicateur de direction

L'indicateur de direction est une instrument gyroscopique : son fonctionnement est basé sur la rotation rapide d'une pièce massive (le gyroscope), assurée par un moteur pneumatique ou électrique. L'axe du gyroscope est fixé à un cadre mobile lié à un disque gradué. L'ensemble est orientable par rapport au boitier de l'instrument et à l'avion.

Au bout d'un certain temps, le gyroscope perd sa référence d'orientation. Il est donc nécessaire de le recaler périodiquement (toutes les quinze minutes environ) sur la référence du compas magnétique en s'étant assuré que le vol est stabilisé, de manière à pouvoir y lire des indications fiables.

7.7. Cas des avions avec instrumentation digitale

Nous avons présenté ici les versions analogiques des instruments de bord. Sur les avions disposant d'un instrumentation plus moderne, les six instruments vus ici sont toujours présents, mais leur organisation est revue pour être intégrée sur un affichage unique synthétique.

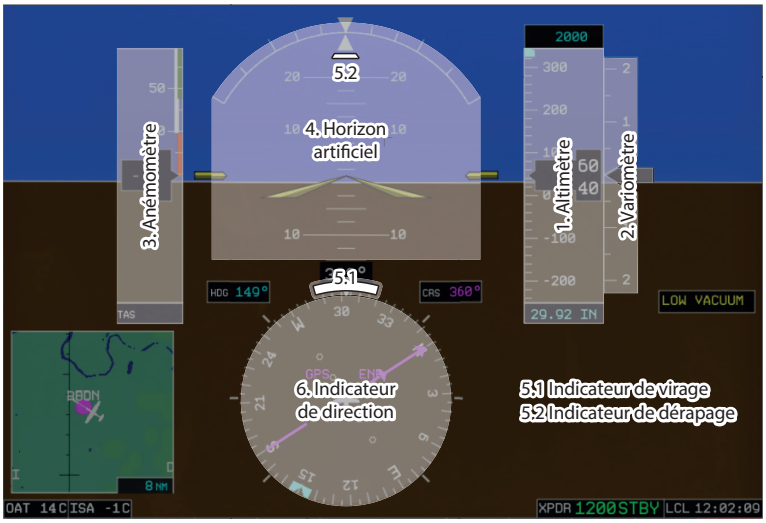

Figure 56 – La présentation synthétique des instruments sur afficheur digital