



L'aérodynamique

LES ORIGINES

C'est encouragé par son père que le médecin mathématicien suisse **Daniel Bernoulli** se penche très



jeune sur la question de l'écoulement des fluides et plus spécialement sur celle de la circulation sanguine. Avec l'aide de l'un de ses étudiants, Leonhard Euler, il met alors au point un système permettant d'expérimenter la relation entre la vitesse du sang et sa pression. En percevant une conduite à l'aide d'un fin tuyau, ils constatent que la hauteur à laquelle le fluide jaillit de ce dernier est liée à la pression du fluide. Une méthode qui sera utilisée jusqu'en 1896 par les médecins pour déterminer la pression sanguine de leurs patients ! En 1739, Bernoulli pose ainsi les bases mathématiques de la dynamique des fluides, une science qui étudie à la fois les mouvements des liquides et ceux des gaz. Le principe que Bernoulli énonce alors stipule qu'une augmentation de la vitesse d'écoulement d'un fluide n'entraîne jamais une diminution de sa pression. Mais, ce principe ne s'applique théoriquement qu'au cas de fluides incompressibles. Et les gaz comme l'air ne sont pas incompressibles. Pourtant, les scientifiques découvrirent très vite que, dans certaines conditions, le principe de Bernoulli peut aussi s'appliquer aux écoulements gazeux.

HISTOIRE DE L'AÉRODYNAMISME

Au xix^e siècle, Henri Navier, ingénieur français, et Georges Stokes, mathématicien et physicien britannique, se penchent à leur tour sur la question de l'écoulement des fluides. Ils établissent alors une équation connue aujourd'hui sous le nom d'équation de Navier-Stokes, équation fondamentale de la dynamique des fluides car elle permet de décrire quasiment toutes les situations d'écoulements. Elle gouverne ainsi notamment les mouvements de l'air dans l'atmosphère. Parallèlement aux travaux de Navier et de Stokes, un ingénieur britannique du nom d'Osborne Reynolds étudie les conditions de transition d'un écoulement dit laminaire à un

écoulement dit turbulent. En 1883, il propose l'introduction d'un nombre, le nombre de Reynolds, qui caractérisera dès lors la nature de l'écoulement d'un fluide. Un autre nombre aura bientôt une importance de taille dans l'étude de la dynamique des fluides, le nombre de Mach. Mis en évidence par le physicien philosophe autrichien **Ernst Mach**, il représente le rapport de la vitesse locale d'un



fluide sur la vitesse du son dans ce même fluide.

DE LA THÉORIE AUX APPLICATIONS

Dans le même temps, des ingénieurs commencent à entrevoir quelques applications à ces théories. Dès le milieu du xix^e siècle, l'un d'entre eux, le Français **Clément Ader**, après



avoir observé oiseaux et chauve-souris, construit des planeurs et mesure les forces requises pour les maintenir en vol. Il est le premier à mettre en évidence l'importance de deux forces aérodynamiques, la portance et la poussée. En 1901, les frères Wright, autres pionniers de l'aviation, sont les premiers à utiliser une soufflerie pour mettre à l'épreuve les profils de leurs engins volants. Quelques années plus tard, en France, Gustave Eiffel fait progresser l'aérodynamique à grand pas grâce à deux laboratoires équipés de souffleries. Il met au point une série de profils d'ailes et observe l'effet de la turbulence sur la traînée d'une sphère.

Au début du xx^e siècle, le physicien allemand Ludwig Prandtl propose également les premières théories de l'aviation. Selon lui, pour que se développe une force de portance, susceptible de maintenir un avion en l'air, il faut qu'une surpression soit créée à l'intrados, la surface inférieure de l'aile et/ou qu'une dépression soit créée à l'extrados, la surface supérieure de l'aile. Une différence de pression qui permet de soutenir l'avion mais qui est aussi à l'origine de phénomènes de turbulence. En effet, lorsque les courants d'air issus de l'intrados et ceux issus de l'extrados se rejoignent à l'extrémité de l'aile, il se forme des

tourbillons.

En 1930 ont lieu les essais en vol du Douglas DC-3. Un avion particulièrement innovant car pour la première fois, sa forme profilée réalise la jointure de l'aile avec le fuselage. Une idée de Théodore von Karman, ingénieur et physicien américain d'origine hongroise. Objectif : diminuer la traînée et les tremblements générés par les tourbillons qui se formaient faute de profil suffisamment aérodynamique. Bientôt l'aérodynamique redescendra sur terre pour être appliquée à la conception de voitures.

LES ÉCOULEMENTS DE L'AIR

Si le terme aérodynamique est souvent associé dans le langage commun à l'aviation, il désigne en fait une réalité bien plus large. L'aérodynamique est en effet une branche importante de la dynamique des fluides qui se charge de l'étude des écoulements d'air. Elle se divise traditionnellement en deux catégories définies par le nombre de Mach. Car, en plus d'un rapport de vitesses, le nombre de Mach mesure aussi la compressibilité d'un fluide. En dessous de Mach 0,3, l'air est considérée comme incompressible. Au dessus, il devient compressible. Ainsi, l'aérodynamique dite incompressible analyse les écoulements présentant un nombre de Mach inférieur à 0,3. Pour ce type d'écoulements, quelques hypothèses simplificatrices permettent de faciliter les études. Au-delà de cette limite, c'est l'aérodynamique dite compressible qui prend le relais. Au-delà de cette division entre aérodynamique compressible ou non, les écoulements d'air sont eux-mêmes classés selon deux grands types. Les écoulements laminaires sont caractérisés par leur régularité. Toutes les couches de tels écoulements suivent des trajectoires parallèles et les résistances sont faibles. Les écoulements turbulents quant à eux sont des plus désordonnés. Leur comportement est imprévisible et ils sont le siège de tourbillons de taille, de localisation et d'orientation constamment variables.

L'ÉQUATION DE NAVIER-STOKES

L'équation de Navier-Stokes est considérée comme l'équation qui gouverne les écoulements de fluides en général et d'air en particulier. C'est une équation dite différentielle. Elle ne conduit donc pas directement à des relations entre les variables du système mais plutôt à des relations entre les variations de ces variables. Elle dicte par exemple, comme

l'avait pressenti Bernoulli, dans le cas d'un fluide idéal, que la variation de vitesse est directement liée à la variation de pression. De plus, le fait que l'équation de Navier-Stokes ne soit pas linéaire la rend, dans la plupart des cas, extrêmement difficile à résoudre. Une complexité que cette équation doit principalement à l'existence du phénomène de turbulence. Heureusement, dans certains cas particuliers, quelques hypothèses simplificatrices permettent aux scientifiques de la résoudre plus aisément. Dans le cas d'un fluide dit parfait, par exemple, lorsque la viscosité est négligeable et que le fluide est incompressible, l'équation de Navier-Stokes se simplifie et emprunte le nom d'équation d'Euler.

LE NOMBRE DE MACH

En aérodynamique, le nombre de Mach est défini comme la vitesse de l'écoulement d'air autour d'un objet sur la vitesse du son aux alentours. Dans l'air, la vitesse du son varie avec l'altitude et la température. Ce qui rend le nombre de Mach encore plus utile puisque, par définition, à nombre de Mach égal, les fluides se comportent également. Ainsi, un avion se déplaçant à Mach 1 au niveau de la mer, soit à environ 340 mètres par seconde, subira les mêmes ondes de choc qu'un avion se déplaçant à Mach 1 à une altitude de 11 000 mètres, soit à environ 295 mètres par seconde. En s'appuyant sur les équations de Bernoulli, les scientifiques montrent d'autre part qu'un fluide est d'autant plus incompressible que le nombre de Mach correspondant est petit. En d'autres mots, plus l'écoulement est lent, plus le fluide peut être considéré comme incompressible. Ainsi, pour des nombres de Mach inférieurs à 0,3, la compressibilité de l'air peut être négligée. Ensuite, les choses se compliquent. Pour des nombres de Mach inférieurs à 0,8, les scientifiques parlent d'écoulement subsonique. Jusqu'à Mach 1,2, ils parlent d'écoulement transsonique. Entre 1,2 et 5 Mach, l'écoulement devient supersonique puis même hypersonique.

LE NOMBRE DE REYNOLDS

Le nombre de Reynolds est défini comme le rapport entre deux types de forces : les forces d'inertie et les forces visqueuses. De ce fait, il caractérise la nature de l'écoulement d'un fluide. Ainsi, lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 1, les forces de viscosité sont dominantes. Les scientifiques parlent alors d'écoulement de Stokes. Dans ce cas là, l'écoulement qualifié de laminaire est gouverné par une version simplifiée de l'équation de Navier-

Stokes, l'équation de Stokes. Les fluides visqueux s'écoulent lentement dans un canal étroit ou autour d'un petit objet sont concernés par ce régime. Caractéristique importante : l'écoulement d'un tel fluide est réversible. En d'autres mots, si les forces extérieures sont subitement inversées, l'écoulement change brutalement de sens. Pour des nombres de Reynolds compris entre 1 et environ 2 000, les forces d'inertie prennent le dessus. L'écoulement reste laminaire mais, il n'est plus réversible. Ainsi, si les forces extérieures s'arrêtent, l'écoulement se poursuit pendant un temps.

Pour des nombres de Reynolds plus élevés, les forces d'inertie dominent tellement l'écoulement qu'il en devient turbulent. Toutefois, la forme de l'objet placé dans l'écoulement peut reculer l'instant du passage à un écoulement turbulent. Ainsi dans le cas d'un bord effilé, l'écoulement reste laminaire jusqu'à une certaine distance de ce bord. Les turbulences n'apparaissent que plus loin.

LES FORCES AÉRODYNAMIQUES

L'aérodynamique est régie par deux forces fondamentales : la portance et la traînée. Par définition, la force de portance est perpendiculaire au courant d'air et dirigée vers le haut. Elle est proportionnelle à la densité de l'air, à la vitesse de déplacement au carré, à la surface de l'objet et à son coefficient de portance. Un coefficient de portance qui dépend notamment du profil de l'objet et de son angle d'attaque ou angle d'incidence. C'est la force de portance qui permet à un avion de se maintenir en vol. Ainsi dans



l'aviation, le but des aérodynamiciens sera-t-il toujours de rendre la portance maximale. La traînée quant à elle travaille dans le plan « horizontal » et s'oppose au mouvement. Elle symbolise la résistance de l'objet placé dans le courant d'air et l'aérodynamicien n'aura de cesse de tenter de la réduire. Les autres forces agissant sur un corps placé dans un courant d'air sont le poids et la poussée. Le poids, vertical et dirigé vers le bas, résiste naturellement à la portance. La poussée agit dans le plan horizontal et permet à l'objet d'avancer. Dans le cas d'un avion à réaction par

Sans en avoir l'air

340 m/s

Vitesse du son dans l'air, à 15 °C et au niveau de la mer, vitesse qui correspond à Mach 1.

19,4.10⁻⁶ Pa.s

Viscosité de l'air à 50 °C. À la même température, la viscosité de l'eau est de 0,55.10⁻³ Pa.s.

Plus de 20 %

C'est à 120 km/h la hausse de consommation de carburant que peut induire l'installation d'un coffre de toit sur une voiture, coffre de toit venant briser l'aérodynamisme du véhicule.

Moins de 30 %



C'est la diminution de traînée enregistrée sur les ballons de football entre 1970 et nos jours.

Le X-43A



L'avion le plus rapide

Mach 9,8

soit près de 12 000 km/h

exemple, c'est l'air qui s'échappe des tuyères qui est à l'origine de la poussée qui propulse l'avion.

L'APPROCHE NUMÉRIQUE

La complexité de l'équation de Navier-Stokes rend presque impossible sa résolution manuelle. Du moins s'agissant de systèmes réels. Et encore plus de systèmes turbulents. Les scientifiques font alors appel à la simulation numérique. Prenant en compte les approximations habilement choisies par les opérateurs, des programmes informatiques ultra-performants se chargent de la résolution des équations. Cette approche est désignée sous le nom de Mécanique des fluides numérique (MFN). Méthode tout d'abord qualifiée de curieuse, elle est aujourd'hui un outil essentiel à la compréhension des phénomènes et à l'amélioration des aérodynamiques. Dans l'avenir, les spécialistes estiment que, grâce aux progrès des méthodes et à l'évolution des moyens informatiques, la part des calculs prendra une part de plus en plus prépondérante. Aujourd'hui, les phénomènes turbulents restent bien sûr les plus difficiles à appréhender. En l'an 2000, le Clay Mathematics Institute proposait une récompense d'un million de dollars à qui proposerait une avancée dans la compréhension de ces phénomènes et dans leur description mathématique.

LES ESSAIS

LES SOUFFLERIES

Pour mettre à l'épreuve de la réalité les résultats fournis par les ordinateurs, les aérodynamiciens réalisent des essais en souffleries. Ces instruments, parfois



imposants, permettent de recréer à moindre coût mais surtout dans des situations de mesure idéales, les

conditions réelles de déplacement de l'objet étudié. Car un corps placé dans un courant d'air réagit de la même façon que s'il était en mouvement dans l'atmosphère. Dans les souffleries, les ingénieurs testent donc les différents **maquettes ou prototypes** d'un



véhicule afin de faire le choix le plus judicieux et de lancer ensuite sereinement la fabrication en série. Pour que leurs expériences aient de la valeur, ils doivent toutefois s'assurer de respecter la loi de similitude. Les mesures sur modèles réduits doivent se faire à des nombres de Reynolds et de Mach égaux à ceux que l'objet rencontrera ensuite en situation réelle. Pour recréer les différentes conditions de déplacement d'un corps dans l'atmosphère, les ingénieurs ont mis au point différents types de souffleries. Les souffleries dites continues simulent des écoulements allant jusqu'à quelques Mach. Les souffleries à rafales quant à elles, principalement utilisées pour simuler des déplacements à très grandes vitesses, permettent d'atteindre Mach 20.

LES ESSAIS PLEINE ÉCHELLE

Lorsque les possibilités des simulations numériques et des essais en souffleries ne suffisent plus à apporter les réponses aux scientifiques et aux ingénieurs, ils passent aux essais dits pleine échelle. Des essais réalisés dans l'environnement de l'objet testé. En vol ou sur route par exemple. Ils permettent de valider définitivement le comportement aérodynamique du corps.

LES APPLICATIONS

LES TRANSPORTS : PREMIER DOMAINE D'APPLICATION

Si à ses débuts, l'aérodynamique a principalement été appliquée à

l'aviation, les ingénieurs de tous les secteurs du transport lui portent aujourd'hui une certaine attention. Une bonne aérodynamique permet en effet à un véhicule, quel qu'il soit, de diminuer sa résistance à l'air au cours de son déplacement. Principaux bénéfices : l'augmentation de la vitesse ou la diminution de la consommation de carburant. Pour ce faire, les ingénieurs doivent trouver le revêtement de surface et la forme qui permettent de réduire la traînée et/ou d'améliorer la portance. Ainsi posé, le problème paraît simple mais, concernant les ailes d'avion par exemple, il est autrement plus complexe. En effet, les avions ont la fâcheuse tendance à voler à des vitesses, des altitudes et avec des inclinaisons variables. Pour que la forme de leurs ailes soit optimale tout au long d'un vol, il faudrait donc imaginer des ailes à géométries variables et rapidement ajustables. Une idée actuellement explorée dans quelques laboratoires et souffleries dont ceux travaillant sur les **ailes de l'A380**. Autre idée explorée en la



matière, celle d'inclure dans le profil des ailes, de minuscules dispositifs produisant des jets d'air destinés à interagir avec les écoulements d'air autour de l'avion.

DANS L'AVIATION

L'un des problèmes qui se pose aux ingénieurs aérodynamiciens responsables de la conception d'avions est celui de la traînée, génératrice de bien des perturbations et source potentielle d'accidents. La traînée d'un avion se décompose en réalité en trois grandes catégories. La traînée induite par la portance est proportionnelle au coefficient de portance et inversement proportionnelle à l'allongement de l'aile. Elle est donc maximale pour une vitesse faible et/ou une altitude élevée.

Elle se caractérise par l'apparition de tourbillons à l'extrémité de l'aile, tourbillons qui peuvent être dangereux et imposent une distance de séparation minimale entre les avions. C'est pour réduire un maximum cette traînée induite que les planeurs ont des ailes à grand allongement, que les avions rapides ont des **ailes trapézoïdales**



ou elliptiques ou encore que les ailes des Airbus portent des ailettes verticales ou winglet. La traînée dite parasite quant à elle, se décompose principalement en une traînée de frottement et en une traînée de forme. La traînée de frottement ralentit l'écoulement du fluide au voisinage de la surface de contact. Les scientifiques nomment couche limite l'épaisseur du fluide ainsi freiné. Si pour des écoulements laminaires, elle ne dépasse pas quelques dixièmes de millimètres, elle peut atteindre dix millimètres dans le cas d'un écoulement turbulent. Ce ralentissement se traduit par une perte d'énergie qui devra être compensée par la propulsion de l'avion. D'autre part, un décollement de cette couche limite peut entraîner un décrochage de l'appareil qui risque alors de s'écraser. Concernant la traînée de forme, les ingénieurs ont depuis longtemps établi que la résistance aérodynamique d'un corps dépend aussi de sa géométrie. Ainsi, un objet en forme de goutte d'eau présente seulement 5 % de la résistance que présenterait un plan placé perpendiculairement à l'écoulement. Car, de brutales variations de section mènent à l'émergence d'une importante traînée de forme. Pour la réduire, il est donc bon de « profiler » l'engin volant en question. La traînée de compressibilité enfin est générée par des phénomènes rencontrés lorsque les écoulements deviennent compressibles. Elle ne touche donc que les avions en vol trans-, super- ou hypersonique.

DANS L'AUTOMOBILE

Si dans le domaine de l'aviation, les ingénieurs cherchent à accroître au maximum la portance, dans celui de l'automobile, ils souhaitent plutôt rendre maximale la déportance, c'est à dire l'appui aérodynamique qui améliore la tenue de route. L'autre différence par rapport au domaine de l'aviation se situe du côté de la traînée. La surface frontale du véhicule est également à prendre en compte. Ainsi, l'aérodynamique d'une voiture est très complexe. La moindre excroissance, un joint de pare-brise par exemple, est susceptible de perturber l'écoulement de l'air et de dégrader le coefficient de pénétration du véhicule. La traînée étant proportionnelle à la vitesse au carré, c'est surtout aux

grandes vitesses qu'une aérodynamique défaillante devient pénalisante, en termes de consommation notamment. Car, meilleure est la pénétration dans l'air, moins le moteur aura besoin de puissance pour faire avancer la voiture. Autre conséquence d'une mauvaise aérodynamique : le bruit. À grande vitesse, des tourbillons d'air viennent frapper la carrosserie générant des bruits aérodynamiques. Pour les réduire, les chercheurs travaillent actuellement sur le design bien sûr mais aussi à la multiplication des joints d'étanchéité destinés à améliorer l'isolation acoustique.

LES AUTRES APPLICATIONS

Si les plus connues des applications de l'aérodynamique se situent bien sûr dans le domaine des transports, cette science se préoccupe aussi du domaine du bâtiment, de la propulsion aérienne et de la production d'énergie. Elle se penche même sur des questions bien plus légères comme peut l'être celle de l'élaboration d'un nouveau ballon de football ! Lorsqu'il s'agit de bâtir des ponts, par exemple, l'aérodynamique peut prendre une grande importance. Ainsi, à la fin du ^{XX} siècle, le pont de Brooklyn est ouvert à la circulation sans que son profil aérodynamique n'ait pu être testé, les essais en soufflerie n'ayant pas encore été popularisés. Par mesure de prudence, le concepteur du pont opte alors pour des armatures six fois plus résistantes que ce que préconisent ses calculs. Une précaution qui ne fut pas prise par tous les architectes. En effet, c'est une catastrophe qui mena en 1940 à la généralisation des tests de maquettes de ponts en souffleries. Cette année là, un pont jeté au-dessus du détroit de **Tacoma** aux États-Unis, s'effondra sous



l'effet de vents violents. Aérodynamiquement instable, il n'a pas pu résister aux vibrations induites par le vent.

D'autres ingénieurs utilisent quant à eux le phénomène de décrochage aérodynamique, si fâcheux pour l'aviation, pour concevoir les pales des rotors d'éoliennes. Lorsqu'un avion s'incline trop en arrière, l'écoulement sur le dessus de l'aile devient turbulent et la portance, résultant de la dépression à l'extrados de l'aile, se réduit dangereusement. Un phénomène appelé décrochage. Dans le cas des éoliennes, ce phénomène permet de contrôler l'impact des vents sur les pales. En effet, les éoliennes sont conçues pour atteindre leur performance maximale avec des vents d'environ 15 mètres par seconde. Pour éviter tout endommagement en cas de vents plus forts, les ingénieurs ont imaginé des architectures permettant de mettre à profit le décrochage aérodynamique.

Écoulement de l'air sur différentes formes

