



## Description Physique de la Portance. Pourquoi et comment un avion vole.

Par David Anderson et Scott Eberhardt,  
traduction par P. Marbaise

### Avertissement.

Le contenu de cette page n'est pas "La vérité Universelle" elle est simplement scientifiquement correcte, bien rédigée et abordable sans autre connaissance par le plus grand nombre. La traduction des notes de David Anderson et Scott Eberhardt vers le français a été réalisée par Phillippe Marbaise sur le site du VDP3F (Vol De Pente Des 3 Frontières). Elle est présentée ci-dessous avec l'aimable autorisation de son rédacteur. Presque tout le monde aujourd'hui a déjà pris l'avion. Beaucoup posent la simple question "Qu'est-ce qui permet à l'avion de voler"? La réponse qu'ils reçoivent le plus fréquemment est déroutante quand elle n'est pas carrément erronée. Nous espérons que les réponses fournies ici corrigeront beaucoup d'idées fausses à propos de la portance et que vous adopterez notre explication quand vous devrez l'expliquer à d'autres.



Bernoulli

Nous allons vous montrer qu'il est plus facile de comprendre la portance quand on démarre avec Newton plutôt qu'avec Bernoulli. Nous allons aussi vous montrer que l'explication la plus populaire que la plupart d'entre nous ont appris, est déroutante au possible et que la portance est due au fait que l'aile dévie l'air vers le bas. Commençons par définir les trois descriptions de la portance les plus utilisées dans les livres et les manuels.



Newton

La première consiste en ce que nous appellerons la Description Aérodynamique Mathématique utilisée par les ingénieurs en aéronautique. Cette description utilise des opérations complexes et/ou des simulations par ordinateur pour calculer la portance générée par une aile. Il s'agit d'outils de conception efficace lorsqu'il s'agit de calculer la portance mais qui ne permettent pas d'avoir une compréhension intuitive du vol.

La seconde description, que nous appellerons la Description Populaire, s'appuie sur le principe de Bernoulli. Le premier avantage de cette description est qu'elle est facile à comprendre et qu'elle a été enseignée pendant des années. A cause de sa simplicité, elle est utilisée pour décrire la portance dans la plupart des manuels. Son principal désavantage est qu'elle repose sur le "principe des temps de transitions égaux" qui est faux. Cette description se concentre sur la forme de l'aile et empêche la compréhension d'importants phénomènes tel que le vol inversé, la puissance, l'effet de sol et la dépendance de la portance avec l'angle d'incidence de l'aile.

La troisième définition que nous défendons ici, nous l'appelons la Description Physique de la portance. Cette description est basée principalement sur les lois de Newton. La description

physique est utile pour comprendre le vol et est accessible à tous ceux qui veulent en savoir plus. Un peu de mathématique est nécessaire pour effectuer une estimation des nombreux phénomènes associés au vol. Cette description apporte une compréhension claire et intuitive des phénomènes tel que la courbe de puissance, l'effet de sol, et les décrochages à haute vitesse. Cependant, contrairement à la description aérodynamique mathématique, la description physique ne donne pas des possibilités de conception ou de simulation.

### La description populaire de la portance

On enseigne aux étudiants en Physique et en Aérodynamique qu'un avion vole par application du principe de Bernoulli, qui dit que si la vitesse de l'air augmente la pression diminue. Donc une aile génère de la portance parce que l'air se déplace plus vite sur le dessus créant ainsi une zone de basse pression et donc de la portance. Cette explication satisfait généralement les curieux et peu sont ceux qui osent remettre ces conclusions en question. Certains se demandent pourquoi l'air se déplace plus vite sur le dessus de l'aile et c'est à ce moment que l'explication populaire se démonte.

Afin d'expliquer pourquoi l'air se déplace plus vite sur l'extrados de l'aile, nombreux sont ceux qui s'appuient sur l'argument géométrique qui veut que la distance que l'air doit parcourir est directement liée à sa vitesse. L'argument habituel étant que quand l'air se sépare au bord d'attaque, la partie qui passe par l'extrados doit correspondre avec la partie qui parcourt l'intrados. C'est le fameux "principe des temps de transition égaux".

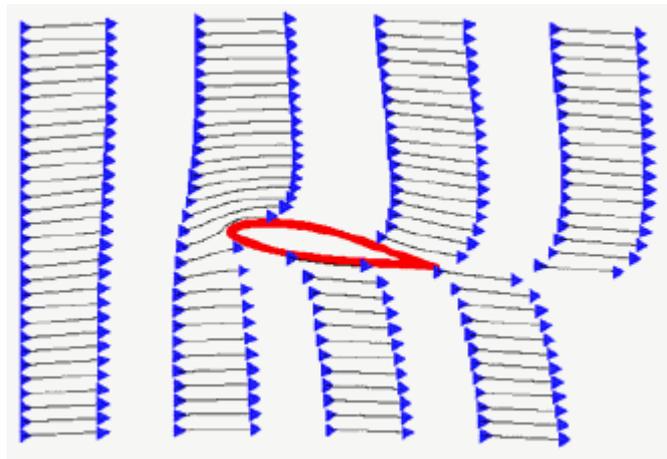
Comme argumenté par Gail Craig (Stop Abusing Bernoulli! How Airplanes Really Fly, Regenerative Press, Anderson, Indiana, 1997), supposons que cette hypothèse soit vraie. La vitesse moyenne de l'air sur et sous l'aile peut aisément être déterminée parce que nous pouvons mesurer les distances, donc calculer les vitesses. Du théorème de Bernoulli, nous pouvons déterminer les forces de pression et donc la portance. Si nous effectuons un calcul simple, nous trouvons que pour générer la portance nécessaire pour un petit avion normal, la longueur de l'extrados devrait être 50% plus longue que la longueur de l'intrados. La Figure 1 montre à quoi ressemblerai le profil de l'aile dans ce cas. Maintenant, imaginez ce à quoi une aile de Boeing 747 devrait ressembler!



Si on considère l'aile d'un petit avion standard, dont la surface supérieure n'est plus longue que de 1.5 à 2.5% par rapport à sa surface inférieure, nous découvrons qu'un Cessna 172 devrait voler à plus de 600 km/h pour générer suffisamment de portance. Il est évident que quelque chose dans cette description de la portance ne va pas.



Mais, qui a dit qu'il fallait que les deux flux d'air devaient absolument se rejoindre au bord de fuite en même temps? La Figure 2 montre le flux d'air sur une aile dans une soufflerie simulée. Dans la simulation, de la fumée colorée est introduite régulièrement. On remarque que l'air passant sur l'extrados arrive bien avant celui qui passe en dessous de l'aile. En fait, une inspection minutieuse montre que l'air passant sous l'aile est ralenti du "courant libre" de l'air. C'en est trop pour le principe des temps de transition égaux.



Simulation du flux d'air sur une aile en soufflerie, avec "fumée" colorée pour montrer l'accélération et la décélération de l'air."



L'explication populaire implique l'impossibilité du vol inversé. Elle s'applique encore moins aux avions de voltige avec des ailes à profil symétrique (La surface supérieure et inférieure ont la même longueur), ou comment une aile réagit pendant les grands changements de charge tel qu'un piqué ou pendant un virage serré.

Alors, pourquoi l'explication populaire a-t-elle prévalu pendant si longtemps? Une réponse est que le principe de Bernoulli est facile à comprendre. Il n'y a rien de faux dans le principe de Bernoulli en ce qui concerne le fait que l'air se déplace plus vite sur le dessus de l'aile. Mais, comme le suggère l'explication précédente, notre compréhension ne peut être complète avec cette explication. Le problème est qu'il nous manque un élément vital quand nous appliquons le principe de Bernoulli. Nous pouvons calculer la pression autour de l'aile si nous connaissons la vitesse de l'air au dessus et en dessous de l'aile, mais comment déterminer la vitesse?

Un autre raccourci de l'explication populaire est que la notion de travail est ignorée. La portance réclame de la puissance (qui est un certain montant de travail par unité de temps). Comme nous le verrons plus tard, la compréhension de la puissance est la clé qui permet de comprendre beaucoup des phénomènes intéressants de la portance.

### Les Lois de Newton et la Portance

Alors, comment une aile génère-t-elle de la portance? Pour commencer à comprendre la portance, nous devons retourner dans nos cours de physique du collège et réviser les première et troisième lois de Newton. (Nous introduirons la deuxième loi un petit peu plus tard). La première loi de Newton stipule qu'un corps au repos reste au repos, et qu'un corps en mouvement continue en suivant un mouvement rectiligne à moins qu'il soit soumis à l'application d'une force extérieure. Cela signifie que si l'on observe une déviation dans le flux

de l'air, ou que si l'air à l'origine au repos est accéléré en mouvement, une force y a donc été imprimée. La troisième loi de Newton stipule que pour chaque action il existe une réaction opposée de force égale. Par exemple, un objet qui repose sur une table exerce une force sur cette table (son poids) et la table applique une force égale et opposée sur l'objet qu'elle soutient. De façon à générer de la portance, l'aile doit faire quelque chose à l'air. Ce que fait l'aile sur l'air est l'action tandis que la portance est la réaction.

Comparons les deux Figures utilisées pour montrer les flux d'air (lignes de courants) autour d'une aile. Sur la Figure 3 l'air arrive en ligne droite sur l'aile, la contourne, et continue en ligne droite derrière l'aile. Nous avons tous déjà vu des images similaires, et ce même dans des manuels de vol. Mais, l'air quitte l'aile dans le même état qu'il était à l'avant de l'aile. Il n'y a donc pas d'action nette sur l'air donc il ne peut y avoir de portance! La figure 4 montre les lignes de flux comme elle devraient être dessinées. L'air passe au dessus de l'aile et est dévié vers le bas. La déviation de l'air est l'action. La réaction est la portance de l'aile.

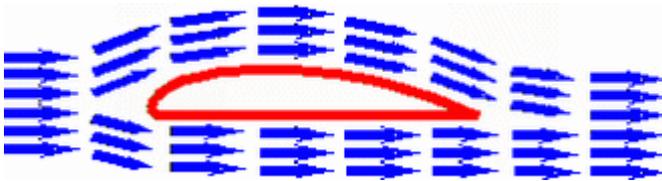


Fig. 3 Illustration commune du flux d'air autour d'une aile. Cette aile ne porte pas (très peu).

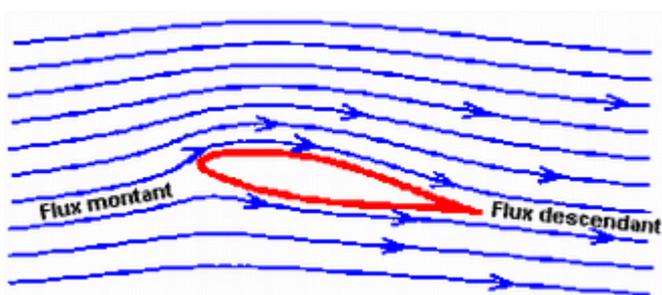


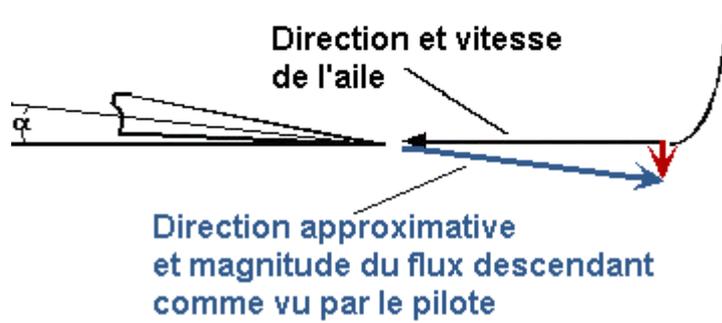
Fig. 4 Véritable flux d'air autour d'une aile générant de la portance, montrant le flux montant et le flux descendant.

### L'aile en tant que pompe

Comme le suggère les lois de Newton, l'aile doit modifier quelque chose dans l'air pour obtenir de la portance. Des modifications du moment de l'air résultera des forces sur l'aile. Pour générer de la portance, l'aile doit dévier de l'air vers le bas, une grande quantité d'air.

La portance d'une aile est égale à la modification du moment de l'air qu'elle dévie vers le bas. Le moment est le produit de la masse par la vitesse. La portance d'une aile est donc proportionnelle à la quantité d'air dévié vers le bas multipliée par la vitesse verticale de cet air. C'est aussi simple que cela. (Ici nous avons utilisé une version dérivée de la seconde loi de Newton qui lie l'accélération d'un objet à sa masse ainsi qu'à la force qui y est appliquée,  $F=m.a$ ) Pour obtenir plus de portance, l'aile peut soit dévier plus d'air (masse) ou augmenter la vitesse verticale de cet air. Cette vitesse verticale derrière l'aile est appelée " flux descendant ". La figure 5 montre comment le flux descendant apparaît du point de vue du pilote.(ou dans une soufflerie) la figure montre aussi comment le flux descendant pourrait être visualisé par un observateur au sol qui regarde l'aile avancer. Pour le pilote, l'air quitte l'aile en suivant en gros son angle d'attaque. Pour l'observateur au sol, s'il était capable de voir l'air, l'air semblerait quitter l'aile presque verticalement vers le bas. Plus l'angle d'attaque augmente, plus la vitesse verticale est élevée. De même, si pour le même angle d'attaque la vitesse de l'aile augmente, la vitesse verticale est aussi augmentée. Ainsi schématiquement, aussi bien l'augmentation de vitesse que l'augmentation de l'angle d'attaque participent à l'allongement de la flèche représentant la vitesse verticale. C'est cette vitesse verticale qui donne à l'aile sa portance.

Direction approximative  
et magnitude du flux descendant  
comme vu par un observateur au sol

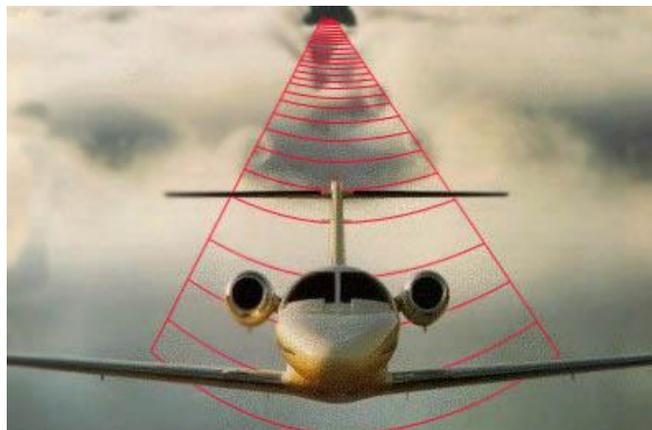


Comme établi précédemment, un observateur au sol verrait l'air descendre derrière l'avion. Cela peut être aisément démontré en observant l'étroite colonne d'air formée derrière une hélice, un ventilateur domestique ou sous le rotor d'un hélicoptère, qui ne sont rien d'autres que des ailes en rotation. Si l'air sortait des pales avec un certain angle, l'air en mouvement aurait la forme d'un cône plutôt qu'une étroite colonne. Si l'avion venait à survoler une balance géante, la balance enregistrerait le poids de l'avion.



Si nous estimons la moyenne de la composante verticale du flux descendant pour un Cessna 172 qui se déplace à 110 noeuds comme étant égale à plus ou moins 9 noeuds, alors pour générer les 1000 kg de portance nécessaire l'aile devrait pomper un paquet de 2.5 tonnes d'air à chaque seconde! En fait, comme nous en parlerons plus tard, cette estimation s'avérera trop faible selon un facteur de deux. La quantité d'air dévié vers le bas par un Boeing 747 pour générer assez de portance pour son poids au décollage de 362000 kg est réellement incroyable.

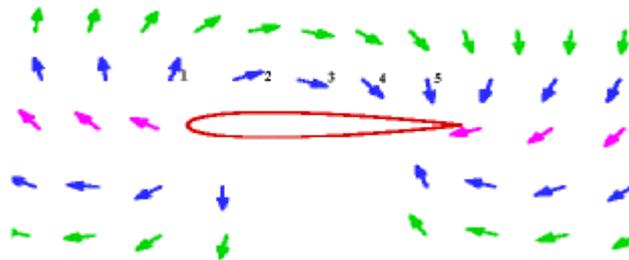
Pomper ou dévier autant d'air vers le bas est un argument fort contre une portance résultant seulement d'un effet de surface comme sous-entendu par l'explication populaire. En fait, afin de pouvoir dévier 2,5 tonnes /sec, l'aile du Cessna 172 doit accélérer l'air compris au dessus de l'aile jusqu'à 2m75 de celle-ci. (L'air pèse +/- 1 kg par mètre carré au niveau de la mer) La Figure 6 illustre l'effet de la déviation de l'air vers le bas exercé par une aile. Un trou béant est embouti dans le brouillard par le flux descendant généré par l'avion qui le survole.



Mais comment une aile aussi fine peut-elle dévier autant d'air ? Quand l'air contourne le sommet de l'aile, il tire sur l'air se situant au dessus de lui et accélère cet air vers le bas, sinon il y aurait des vides au dessus de l'aile. L'air est tiré d'en haut pour éviter les vides. Cette traction entraîne la diminution de la pression au dessus de l'aile. C'est l'accélération de l'air au dessus de l'aile en direction du flux descendant qui génère la portance. (Pourquoi l'aile dévie l'air avec assez de force sera discuté dans la prochaine section).

Comme nous avons vu sur la Figure 4, une complication dans l'image de l'aile est l'effet de " flux montant " au bord d'attaque de l'aile. Comme l'aile se déplace, l'air est non seulement dévié vers le bas à l'arrière de l'aile mais est aussi attiré vers le haut au bord d'attaque. Ce flux montant contribue à une portance négative et plus d'air doit être dévié vers le bas pour compenser. Nous aborderons ce point à nouveau lorsque nous considérerons l'effet de sol.

Normalement, si on regarde l'air s'écouler sur l'aile dans le cadre de référence de l'aile. En d'autres mots comme le pilote, l'air se déplace et l'aile est fixe. Nous avons déjà établi que pour un observateur au sol l'air semble sortir de l'aile presque verticalement. Mais que fait l'air au dessus et en dessous de cette aile? La Figure 7 montre un instantané des mouvement des molécules d'air au moment où l'aile passe. Rappelez vous que c'est l'air qui était au repos au départ et que c'est l'aile qui se déplace. En avant du bord d'attaque, l'air se déplace vers le haut (flux montant). Au bord de fuite, l'air est dévié vers le bas (flux descendant). Au dessus de l'aile, l'air est accéléré vers le bord de fuite. En dessous, l'air est à peine accéléré vers l'avant voire pas du tout.



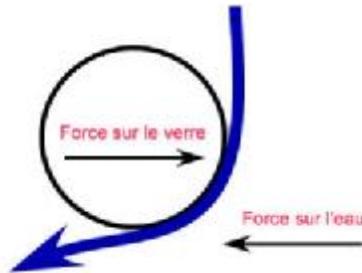
Dans la description aérodynamique mathématique de la portance cette rotation de l'air autour de l'aile donne naissance au modèle dit du "vortex intégré " ou de " circulation ". Les origines de ce modèle, et les opérations mathématiques complexes qui y sont associées, conduisent à une compréhension immédiate des forces agissant sur une aile. Cependant, les mathématiques employées exigent des étudiants en aérodynamique un certain temps avant d'être maîtrisées.

Ce que nous observons à partir de la figure 7 est que la surface supérieure de l'aile fait beaucoup plus pour déplacer l'air que l'inférieure. La surface supérieure est donc la surface la plus critique. Ainsi, les avions peuvent transporter des charges extérieures, telles que des réservoirs largables, sous les ailes mais pas au dessus car elle interférerait avec la portance. C'est aussi pour cela que les haubans en dessous des ailes sont courants alors que les haubans au dessus de l'aile ont été si rares dans le passé. Un hauban, ou n'importe quelle obstruction, sur le sommet de l'aile interférerait avec la portance.



## L'air a une viscosité

La question évidente est " comment l'aile dévie l'air vers le bas ? ". Quand un fluide en mouvement, tel que l'air ou l'eau, entre en contact avec une surface courbe il aura tendance à suivre cette surface. Pour démontrer cet effet, tenons un verre d'eau horizontalement en dessous d'un robinet de telle façon qu'un mince filet d'eau touche juste le côté du verre. Au lieu de continuer de couler vers le bas, la présence du verre conduit l'eau à s'enrouler autour du verre comme illustré par la figure 8. Cette tendance des fluides à suivre une surface courbe est connue comme étant l'effet Coanda. De la première loi de Newton nous savons que pour que le fluide s'enroule il doit y avoir une force qui agit dessus. De la troisième loi de Newton, nous savons que le fluide doit exercer une force égale et opposée sur l'objet qui cause la déviation du fluide.

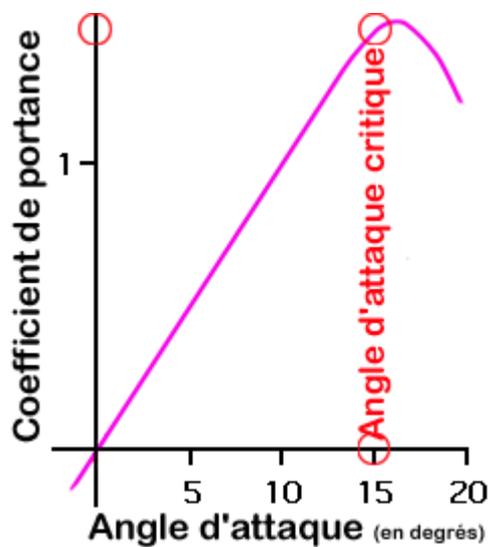


Pourquoi un fluide devrait-il suivre une surface courbe ? La réponse est la viscosité : la résistance à l'avancement qui donne à l'air une sorte d' " adhérence ". La viscosité de l'air est très faible mais est suffisante pour que les molécules d'air se collent à la surface. La vitesse relative entre la surface et les molécules d'air les plus proches est absolument nulle. ( C'est pour cette raison que la poussière reste sur les voitures et pourquoi il y a de la poussière sur l'arrière des pales d'un ventilateurs dans une soufflerie.) Un peu au-dessus de la surface, le fluide a un peu de vitesse. Plus on s'éloigne de la surface, plus la vitesse du fluide s'élève jusqu'à atteindre la vitesse du flux extérieur.

## La portance comme fonction de l'angle d'attaque

Il y a beaucoup de type d'aile : conventionnelle, symétrique, conventionnelle en vol inversé, les ailes des premiers biplans qui ressemblent à des plaques tordues, et même la très connue "porte de grange". Dans tous les cas, l'aile dévie l'air vers le bas ou plus exactement tire l'air du dessus vers le bas. Ce que toutes les ailes ont en commun est leur angle d'attaque par rapport à l'air qu'elles traversent. C'est cet angle d'attaque qui est le premier paramètre déterminant de la portance. La portance d'une aile inversée peut être expliquée grâce à son angle d'attaque, et ce malgré l'apparente contradiction avec l'explication populaire s'appuyant sur le principe de Bernoulli. Le pilote ajuste l'angle d'attaque pour ajuster la portance à la vitesse et à la charge. L'explication populaire de la portance qui se concentre sur la forme de l'aile ne donne au pilote que la possibilité d'adapter la vitesse.

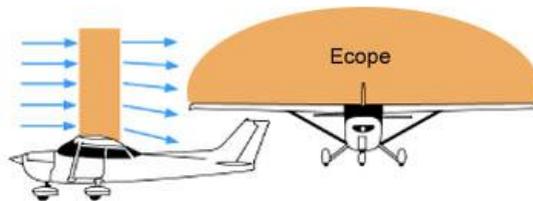
Pour mieux comprendre le rôle de l'angle d'attaque il est utile d'introduire un " véritable " angle d'attaque, défini de telle façon que l'angle de l'aile par rapport à l'axe du vent donnant une portance nulle soit défini comme étant zéro degrés. Si on change l'angle d'attaque aussi bien vers le haut ou vers le bas, on remarque que la portance est proportionnelle à cet angle. La Figure 9 montre le coefficient de portance (portance normalisée à la taille de l'aile) pour une aile standard en fonction de l'angle d'attaque effectif. Une relation similaire entre portance et angle d'attaque peut être trouvée pour toutes les ailes, indépendamment de leur conception. C'est aussi vrai pour une aile de 747 que pour une porte de grange. Le rôle de l'angle d'attaque est plus important que les détails de la forme du profil dans la compréhension de la portance.



Généralement, la portance commence à décroître à partir d'un angle d'attaque de 15 degrés. Les forces nécessaires pour dévier l'air à un angle aussi grand sont plus grandes que ce que la viscosité de l'air peut supporter, et l'air commence à se séparer de l'aile. Cette séparation du flux d'air du dessus de l'aile est un décrochage.

### L'aile agit comme une " écope " à air

Nous voudrions introduire une nouvelle image mentale de l'aile. Nous sommes habitués à imaginer l'aile comme une fine lame qui découpe l'air et développe de la portance comme par magie. La nouvelle image que nous voudrions vous faire adopter est celle d'une aile comme une écope déviant une certaine quantité d'air de l'horizontale à plus ou moins l'angle d'attaque, comme montrer à la figure 10. Cette écope peut être décrite comme une structure invisible montée sur l'aile à la fabrication. La longueur de cette écope est égale à la longueur de l'aile et sa hauteur plus ou moins égale à la corde de l'aile (distance du bord d'attaque au bord de fuite de l'aile). La quantité d'air interceptée par cette écope est proportionnelle à la vitesse de l'avion et à la densité de l'air, et rien d'autre.



Comme établi précédemment, la portance d'une aile est proportionnelle à la quantité d'air déviée vers le bas multiplié par la vitesse verticale de cet air. Si l'avion augmente sa vitesse, l'écope dévie plus d'air. Tant que la charge sur l'aile, c'est-à-dire le poids de l'avion, n'augmente pas la vitesse verticale de l'air dévié doit être diminuée proportionnellement. Ainsi, l'angle d'attaque est diminué pour maintenir une portance constante. Quand l'avion prend de l'altitude, l'air devient moins dense et l'écope dévie moins d'air pour une vitesse identique. Donc pour compenser l'angle d'attaque doit être augmenté. Les principes de cette section vont être utilisés pour comprendre la portance d'une manière non réalisable avec l'explication populaire.

### La portance a besoin de puissance

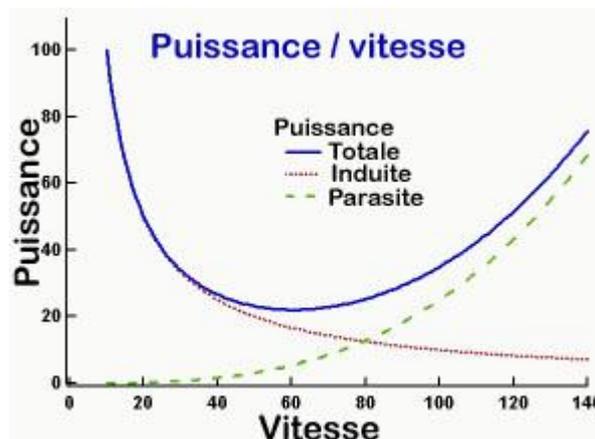
Quand un avion passe au travers d'un air précédemment calme il se retrouve avec une vitesse verticale négative. Ainsi, l'air se trouve en mouvement après le passage de l'avion. L'air a donc reçu de l'énergie. La puissance est de l'énergie, ou travail par unité de temps. Donc la portance doit avoir besoin de puissance. Cette puissance est fournie par le moteur de l'avion ( ou par la gravité et les thermiques pour un planeur ).

Combien de puissance avons nous besoin pour voler ? La puissance nécessaire pour la portance est le travail ( énergie ) par unité de temps et est proportionnel à la quantité d'air

dévié vers le bas multipliée par la vitesse de cet air dévié au carré. Nous avons déjà établi que la portance d'une aile est proportionnelle à la quantité d'air dévié vers le bas multiplié par la vitesse verticale de cet air. Ainsi, la puissance nécessaire pour porter l'avion est proportionnelle à la charge (ou poids) multipliée par la vitesse verticale de l'air. Si la vitesse de l'avion est doublée, la quantité d'air déviée vers le bas double. L'angle d'attaque doit alors être diminué pour obtenir une vitesse verticale équivalente à la moitié de l'angle original pour obtenir la même portance. La puissance nécessaire pour la portance a été divisée par deux. Cela montre que la puissance nécessaire à la portance diminue quand la vitesse de l'avion augmente. En fait, nous avons montré que la puissance nécessaire pour créer la portance est proportionnelle à un divisé par la vitesse de l'avion.

Cependant, nous savons tous que pour aller plus vite (en vitesse) nous devons appliquer plus de puissance. Donc il doit y avoir plus à alimenter que la puissance nécessaire à la portance. La puissance associée à la portance, comme décrit précédemment, est souvent appelé la puissance " induite ". La puissance est aussi nécessaire pour contrecarrer ce que nous appelons la traînée " parasite ", qui est la traînée associée au déplacement des roues, haubans, antennes, etc... dans l'air. L'énergie que l'avion transmet à une molécule d'air à l'impact est proportionnelle à la vitesse au carré. Le nombre de molécules atteinte en une fois est proportionnelle à la vitesse. Ainsi la puissance parasite nécessaire pour vaincre la traînée parasite augmente avec la vitesse au cube.

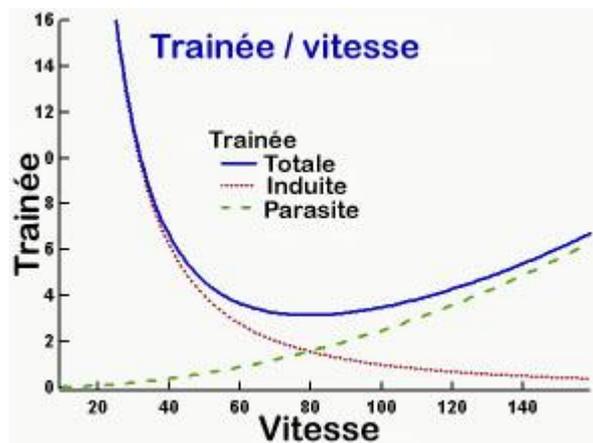
La Figure 11 montre la courbe de puissance induite, de puissance parasite et le total de puissance qui est la somme de la puissance induite avec la puissance parasite. De nouveau, la puissance induite est égale à un sur la vitesse et la puissance parasite est égale à un sur la vitesse au cube. A basse vitesse, les besoins en énergie nécessaire au vol sont dominés par la puissance induite. Plus lent est le vol, plus faible est la quantité d'air dévié et donc plus l'angle d'attaque doit être augmenté pour maintenir la portance. Les pilotes pratique le vol sur " l'arrière de la courbe de puissance ", de fait, ils reconnaissent que l'angle d'attaque et la puissance nécessaire pour rester en l'air à basse vitesse est considérable.



En vitesse de croisière, les besoins en puissance sont dominés par la puissance parasite. Comme cela évolue en fonction de la vitesse au cube,

**une augmentation de la taille du moteur permettra un taux de montée plus rapide mais n'améliorera que peu la vitesse de croisière de l'avion.**

Depuis que nous savons comment les besoins en puissance varie avec la vitesse, nous pouvons comprendre la traînée qui est en réalité une force. La traînée est simplement fonction de la puissance divisée par la vitesse. La Figure 12 montre la puissance induite, parasite et totale en fonction de la vitesse. Ici la traînée induite varie en fonction de un sur la vitesse au carré et la traînée parasite en fonction de la vitesse au carré. En regardant ces courbes, on peut déduire certaines choses à propos de comment les avions sont conçus. Les avions plus lents, comme les planeurs, sont conçus pour diminuer la traînée induite (ou puissance induite), qui domine à basse vitesse. Les avions plus rapides sont plus concernés par la traînée parasite (ou puissance parasite).



### L'efficacité de l'aile.

En vol de croisière, une quantité non négligeable de la traînée d'une aile moderne est de la traînée induite. La traînée parasite d'une aile de Boeing 747, qui domine en vol de croisière, est seulement égale à celle d'un câble de 1 cm de diamètre de la même longueur.

Nous pouvons nous demander ce qui affecte l'efficacité d'une aile.

Si la longueur de l'aile venait à être doublée, la taille de notre écope doublerait aussi, déviant deux fois plus d'air. Donc, pour la même portance, la vitesse verticale (et donc l'angle d'attaque) devrait être réduit de moitié.

#### **L'efficacité de la portance est proportionnelle à un sur la longueur de l'aile.**

Plus l'aile est longue, moins nous avons besoin de puissance induite pour produire la même portance, malgré que cela soit obtenu avec une augmentation de la traînée parasite. Les avions lents sont plus affectés par la traînée induite que les avions rapides et donc dispose de plus longue ailes. C'est pourquoi les planeurs, qui évoluent à basse vitesse, ont de si longues ailes. Les chasseurs supersoniques, d'un autre côté, subissent les effets de la traînée parasite plus que nos avions d'entraînements lents. De ce fait, les avions rapides ont des ailes plus courtes pour diminuer la traînée parasite.

Une fausse croyance soutenue par certains dit que la portance n'a pas besoin de puissance. Cela vient de l'aéronautique dans les études sur la théorie des tronçons d'ailes idéaux (profils). Quand on parle d'un profil, c'est dans le cas d'une aile avec une envergure infinie. Comme nous avons vu que la puissance nécessaire à la portance est proportionnelle à un sur la longueur de l'aile, une aile de longueur infinie n'a pas besoin de puissance pour porter. Si la portance n'avait pas besoin d'énergie, les avions auraient la même portée à plein comme à vide. De plus, les hélices (qui ne sont que des ailes rotatives) n'auraient besoin d'aucune énergie pour fournir la traction. Malheureusement, nous vivons dans le monde réel où aussi bien la portance que la propulsion demande de la puissance.

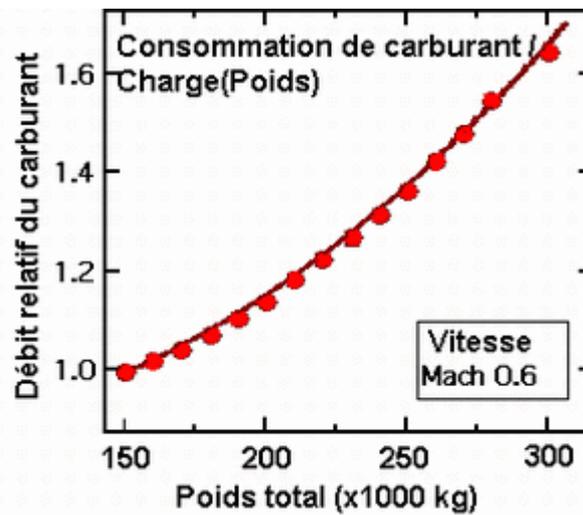
### Puissance et charge alaire.

Considérons maintenant la relation entre charge alaire et puissance. Avons nous besoin de plus de puissance pour transporter plus de passager et de cargo? Et, est-ce que la charge affecte la vitesse de décrochage? A vitesse constante, si la charge alaire augmente, la vitesse verticale doit être augmentée pour compenser. Cela est fait par l'augmentation de l'angle d'attaque. Si le poids total de l'avion était doublé (disons dans un virage sous 2-g) la vitesse verticale de l'air est doublée pour compenser l'augmentation de la charge alaire. La puissance induite est proportionnelle à la charge multipliée par la vitesse verticale de l'air dévié, qui ont tous deux doublés.

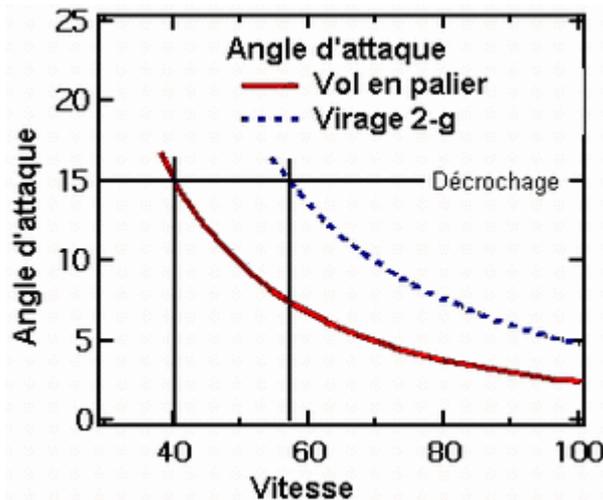
La puissance induite nécessaire à été augmentée par un facteur de quatre ! La même chose serait vraie si le poids de l'avion était doublé par l'ajout de carburant, etc...

Une façon de mesurer la puissance totale est de regarder le taux de consommation de carburant. La Figure 13 montre la consommation en carburant par rapport au poids total pour un gros avion de transport se déplaçant à vitesse constante (obtenue à partir de données récentes). Comme la vitesse est constante, la modification de la consommation est due à la modification de la puissance induite. Les données sont affectées d'une constante (puissance

parasite) et par un terme qui évolue en suivant le carré de la charge. Ce second terme est juste ce que nous avons prédit dans notre discussion Newtonienne à propos de l'effet de la charge sur la puissance induite.



L'augmentation de l'angle d'attaque lorsqu'il y a augmentation de la charge à une conséquence autre que juste le besoin de puissance supplémentaire. Comme illustré par la Figure 9, une aile pourra décrocher quand l'air ne pourra plus suivre la surface supérieure, c'est-à-dire, lorsque l'angle d'attaque critique sera atteint. La figure 14 montre l'angle d'attaque auquel une aile décroche en fonction de la vitesse pour une charge fixe lors d'un virage à 2-g. L'angle d'attaque auquel l'avion décroche est constant et ne dépend pas de la charge de l'aile. La vitesse de décrochage augmente comme la racine carrée de la charge. Ainsi augmenter la charge dans un virage à 2-g augmente la vitesse à laquelle l'avion décrochera de presque 40%. Une augmentation d'altitude augmentera encore plus l'angle d'attaque lors d'un virage à 2-g. C'est pourquoi les pilotes s'entraînent au " décrochage accéléré " qui démontre qu'un avion peut décrocher à n'importe quelle vitesse. Quelque soit la vitesse il y a une charge qui pourra conduire à un décrochage.



### Les vortex d'ailes.

Certains peuvent se demander à quoi peut bien ressembler le flux descendant d'une aile. Le flux descendant " sort " de l'aile comme une feuille et sa forme est liée à la distribution de la charge sur l'aile. la Figure 15 illustre, via la condensation, la distribution de portance d'un avion pendant une manoeuvre à haut facteur de charge. De l'illustration, nous pouvons voir que la distribution de portance évolue de l'emplanture de l'aile jusqu'au saumon. Ainsi, la quantité d'air dans le flux descendant doit aussi évoluer le long de l'aile. La portion d'aile située près de l'emplanture " écope " plus d'air que celle située à l'extrémité. Comme l'emplanture dévie autant d'air, l'effet évident est que la feuille de flux descendant va

commencer à s'enrouler vers l'extérieur autour d'elle même, tout comme l'air s'enroule autour du sommet de l'aile à cause du changement de vitesse de l'air.

C'est le vortex de l'aile. L'épaisseur de l'enroulement du vortex de l'aile est proportionnel au taux de modification de la portance le long de l'aile. A l'extrémité de l'aile la portance devient rapidement nulle causant l'enroulement le plus étroit.

C'est le vortex d'extrémité d'aile qui est juste une petite partie (la plupart du temps visible) du vortex de l'aile.

Revenons à la Figure 6, nous pouvons remarquer clairement le développement des vortex d'ailes ainsi que les vortex d'extrémités.



Les Winglets (ces petites extensions verticales à l'extrémité de certaines ailes) sont utilisés pour améliorer l'efficacité d'une aile en augmentant la longueur effective de l'aile. La portance sur une aile normale doit atteindre zéro à l'extrémité parce que le dessous et le dessus se rejoignent autour du bout. Les winglets empêchent cette communication de telle façon que la portance peut s'étendre plus loin sur l'aile. Comme l'efficacité d'une aile augmente avec sa longueur, cela contribue à augmenter l'efficacité. Le piège est que la conception de winglets est difficile et qu'ils peuvent faire plus de mal que de bien lorsqu'ils ne sont pas bien conçus.

### L'effet de sol.

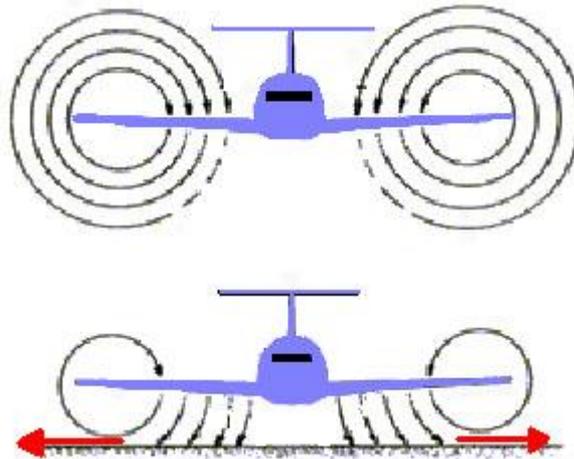
Un autre phénomène commun mal compris est l'effet de sol. Il s'agit de l'augmentation de l'efficacité d'une aile quand elle vole à une altitude inférieure à la longueur de sa corde par rapport au sol. Un avion à aile basse va subir une diminution de traînée de 50% juste avant de toucher le sol. Il y a un certain nombre de confusions à propos de l'effet de sol. Beaucoup

de pilotes ( et l'Exam-O-Gram n°47 de la FAA VFR) croient à tort que l'effet de sol résulte de la compression de l'air entre l'aile et le sol.

Pour comprendre l'effet de sol il est nécessaire d'avoir bien compris ce qu'est le flux montant. Pour les pressions concernées par le vol à basse vitesse, l'air est considéré comme incompressible. Quand l'air est accéléré au dessus de l'aile et dévié vers le bas, il doit être remplacé. Donc une certaine quantité d'air doit se déplacer autour de l'aile (en dessous et vers l'avant puis vers le haut) pour compenser, de la même façon que l'eau autour d'une pagaïe de canoë quand on rame. C'est ce qui est la cause du flux montant.

Comme établi précédemment, le flux montant accélère l'air dans le mauvais sens pour la portance. Donc une plus grande quantité de flux descendant est nécessaire pour compenser le flux montant en même temps qu'il produit la portance nécessaire. Ainsi plus de travail est fait et donc plus d'énergie est nécessaire. Près du sol, le flux montant est réduit car le sol atténue la circulation de l'air autour de l'aile. Donc moins de flux descendant est nécessaire pour fournir la portance. L'angle d'attaque est réduit et donc la puissance induite, rendant l'aile plus efficace.

Précédemment, nous avons estimé qu'un Cessna volant à 200 km/h doit dévier à peu près 2.5 tonnes d'air par seconde pour obtenir sa portance. Dans nos calculs, nous avons négligé le flux montant. De l'importance de l'effet de sol, il est clair que la quantité d'air est probablement plus proche de 5 tonnes d'air dévié par seconde.



## Conclusions.

Révisons ce que nous avons appris et faisons nous une idée de comment la description physique nous a donné une plus grande capacité à comprendre le vol. D'abord, ce que nous avons appris:

La quantité d'air dévié par l'aile est proportionnelle à la vitesse et à la densité de l'air.

La vitesse verticale de l'air dévié est proportionnelle à la vitesse de l'aile et à l'angle d'attaque.

La portance est proportionnelle à la quantité d'air dévié multiplié par la vitesse verticale de cet air.

La puissance nécessaire pour la portance est proportionnelle à la portance multipliée par la vitesse verticale de l'air.

Examinons maintenant certaines situations du point de vue physique et du contexte de l'explication populaire.

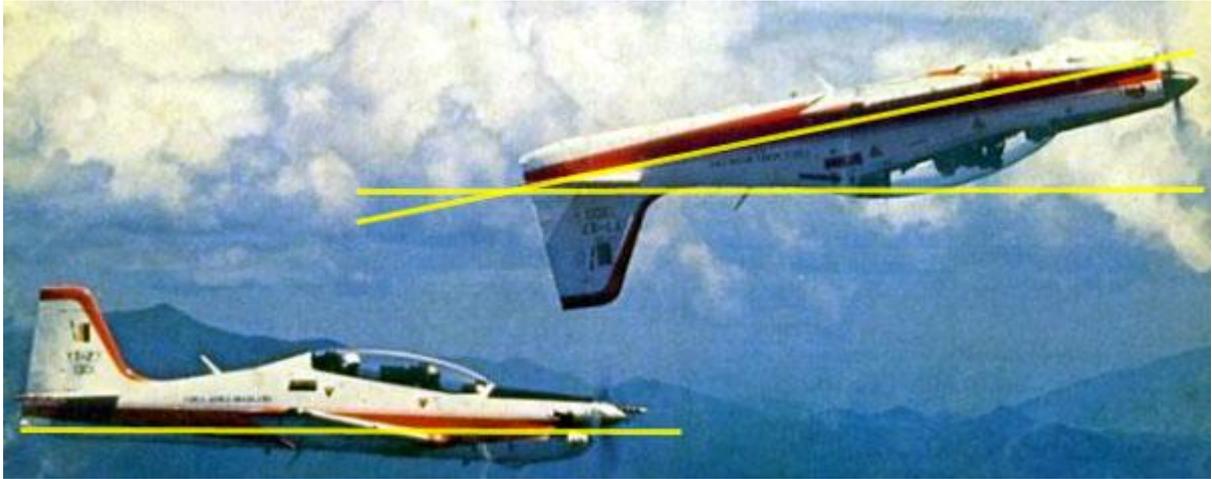
La vitesse de l'avion est réduite. La vue physique dit que la quantité d'air dévié est diminuée donc l'angle d'attaque doit être augmenté pour compenser. La puissance nécessaire à la portance a aussi augmenté.

L'explication populaire ne peut justifier cela. (aspiration sur l'extrados (Bernouilli))

La charge de l'avion est augmentée. La vue physique dit que la quantité d'air déviée est la même mais l'angle d'attaque doit être augmenté pour obtenir la portance supplémentaire. La puissance nécessaire pour la portance a aussi augmenté.

De nouveau, l'explication populaire ne peut le justifier.

Un avion vole sur le dos. L'explication physique n'a pas de problème avec cela. l'avion ajuste son angle d'attaque pour obtenir la portance nécessaire. L'explication populaire implique que le vol inversé est impossible.



Comme nous pouvons le voir, l'explication populaire, qui se concentre sur la forme de l'aile, peut contenter certains mais ne fournit pas les outils pour réellement comprendre le vol. La description physique de la portance est simple à comprendre et est beaucoup plus efficace.

Le texte original en anglais de cet article est disponible sur le site de Scott Eberhardt à l'adresse suivante : <http://home.comcast.net/%7Eclipper-108/lift.htm>