



Menu

Histoire de

Pourquoi un

Aérodynamique

Mécanique du vol

Cellule des

Cellule Cessna

Cellule Jodel 112

Trains

Turbomachines

Moteurs à pistons

Hélices

Instruments de

Instruments

Instruments

Instruments

EFIS Fokker 100

EFIS Cessna 172

Phénomènes

Normes de

Opérations

Aires de

Aérostats

Spinning / Fan-

Codes météo

# AÉRODYNAMIQUE

## AILE EN FLÈCHE ET AILE DELTA

- [Cloisons ou Fences](#)

- [Vortilon et Pylon](#)

- [Fentes du bord d'attaque](#)

- [Décrochements du bord d'attaque](#)

- [Générateurs de Vortex d'ailes](#)

- [Générateurs de Vortex de fuselage](#)

- [Générateurs de Vortex de carénage](#)

- [Vortex d'apex](#)

- [Aile à flèche inverse](#)

- [Plan canard](#)

### Aile en flèche

L'angle de flèche désigne l'angle formé entre le lieu des points situés au quart avant des cordes de profil et le plan transversal de l'appareil. [Cellule des avions - La flèche](#)

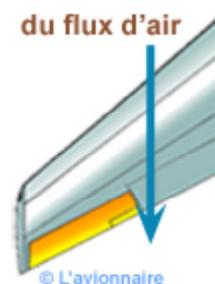
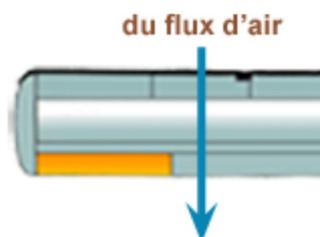
La plupart des difficultés du vol transsonique sont associés au décollement de l'écoulement du flux d'air induit par les ondes de choc. Par conséquent, tous les moyens pour retarder ou atténuer ce décollement améliorent les performances aérodynamiques. L'une des méthodes est l'aile en flèche. Cette théorie de flèche est basée sur le concept que c'est seulement la composante du flux d'air perpendiculaire au bord d'attaque de l'aile qui affecte la distribution de pression et la formation d'ondes de choc.

Sur un aéronef à voilure droite, le flux d'air frappe le bord d'attaque de l'aile à  $90^\circ$  (schéma à gauche), et son plein impact produit une pression et une portance. Une aile avec une flèche est heurtée par le même flux d'air sous un angle plus petit que  $90^\circ$  (schéma à droite).

Circulation

Circulation



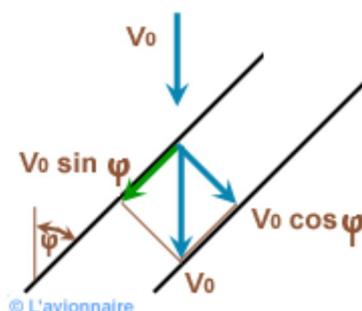
  
 Recherche sur site L'avionnaire


Sur une aile en flèche le flux d'air circule du bord d'attaque au bord de fuite, mais aussi de l'emplanture vers l'extrémité de l'aile (saumon). Considérons une aile d'envergure infinie.

On peut décomposer  $V_0$  en  $V_0 \sin \varphi$  qui n'engendre aucune survitesse et  $V_0 \cos \varphi$  qui détermine le champ des survitesses et de la sustentation.



Contact  
Webmaster

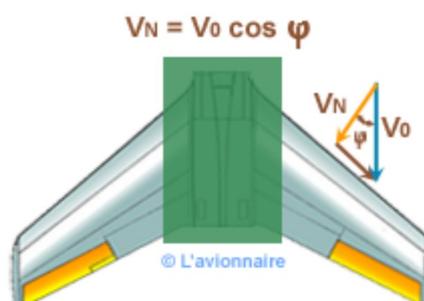


Nous aurons : 
$$\frac{M_{cr.\varphi}}{M_{cr.\varphi=0}} = \frac{1}{\cos \varphi}$$

- $\varphi$  angle de la flèche
- $M_{cr.\varphi=0}$  nombre du Mach critique de l'aéronef
- $M_{cr.\varphi}$  nombre du Mach critique de l'aile en flèche.

Cette relation est basée sur l'hypothèse que le Mach critique d'une aile est dû uniquement par le flux perpendiculaire au bord d'attaque, qui est indépendant du Mach parallèle au bord d'attaque. Ainsi, le Mach de l'aéronef se décompose en une composante perpendiculaire et une composante parallèle au bord d'attaque de l'aile. L'hypothèse de l'indépendance de ces deux éléments du Mach est strictement vraie dans le cas d'une aile infinie.

En réalité sur une aile réelle d'envergure limitée, le profil de l'aile varie de l'emplanture à l'extrémité (saumon), et cette décomposition ne peut s'appliquer dans la partie centrale de l'aile, la relation avec le cosinus surestime donc l'ampleur de l'effet de la flèche sur le Mach critique.



### Avantage de l'aile en flèche

L'aile en flèche est extrêmement intéressante en transsonique et supersonique puisqu'elle permet

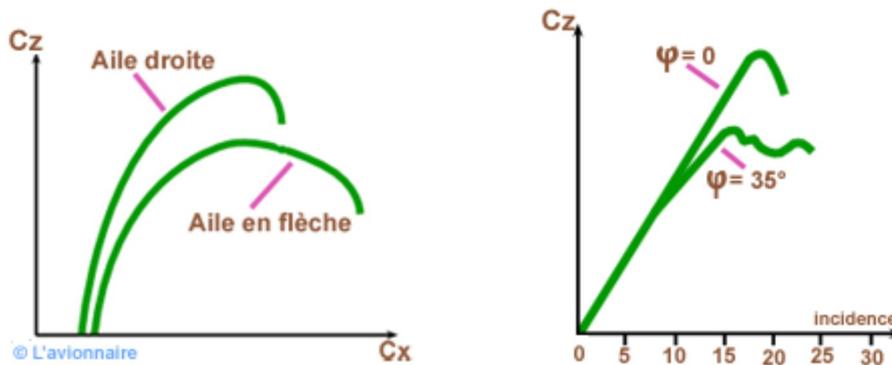
de retarder les effets de compressibilité.

En prenant une aile dont le Mach critique est de 0.8 et que l'on désire repousser le Mach critique de vol de l'aéronef à Mach 0.92, il suffit de choisir une flèche telle que :

$$\frac{0.8}{\sqrt{\cos \varphi}} \approx 0.92 \text{ soit une flèche de } 30^\circ$$

La flèche retarde les effets de compressibilité sans les atténuer.

Ci-dessous à gauche différence entre la polaire d'une aile droite et la polaire d'une aile en flèche. A droite différence entre le coefficient  $C_z$  d'une aile droite et le coefficient  $C_z$  d'une aile en flèche de  $35^\circ$ .



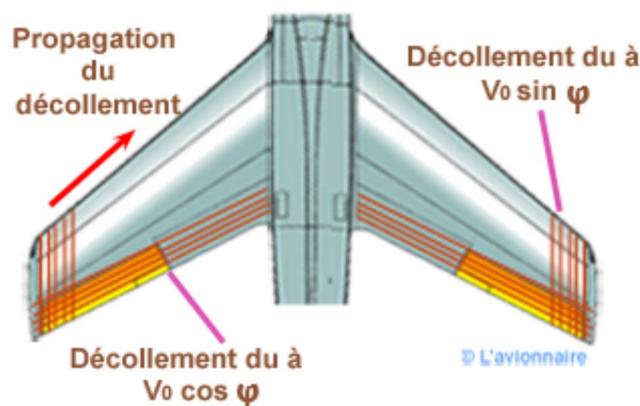
Les ailes en flèche donnent des polaires plates qui retardent les phénomènes d'autorotation. De plus, si le décrochage de l'aile en flèche apparaît plus tôt que celui de l'aile droite, il n'existe plus de décrochage franc mais un enfoncement de l'avion ce qui peut représenter certains avantages.

### Inconvénients de l'aile en flèche

Une forte flèche présente de nombreux inconvénients à basse vitesse. Toutes choses égales par ailleurs, une aile en flèche a un  $C_{z_{\max}}$  plus faible qu'une aile droite puisque  $V_0 \sqrt{\cos \varphi}$  participe seulement à la sustentation.

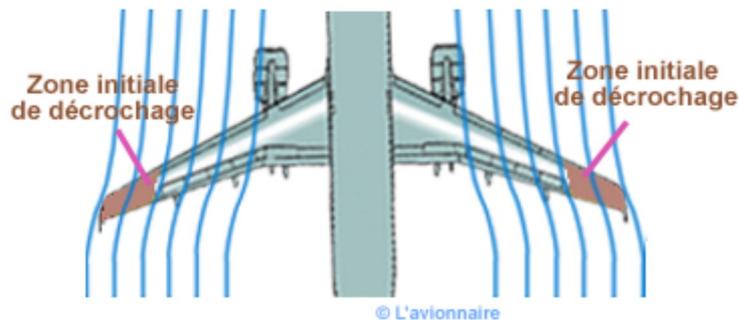
L'hypersustentation d'une aile en flèche est un problème difficile. L'efficacité des hypersustentateurs décroît avec la flèche.

Sur une aile en flèche le décollement aux fortes incidences commence aux extrémités.



Ce phénomène est très gênant d'une part à cause des dissymétries de décollement sur chaque

demi-aile, d'autre part, à cause de la présence des ailerons dans la zone qui décolle la première. Il est d'autant plus gênant que l'aile en flèche donne naissance à des moments de roulis importants quand elle est attaquée obliquement par un effet différentiel de flèche, celle-ci est accrue sur l'aile qui recule et diminuée sur l'aile qui avance.



Les ailes en flèche et les ailes delta auront donc tendance à décrocher aux extrémités de chaque aile, puis par "contagion" le décrochage s'étendra à toute l'aile. Pour remédier à ce phénomène, les ingénieurs ont inventé plusieurs techniques, dont les principales sont expliquées ci-après.



## Cloisons - Fences

Cette barrière à couche limite appelée également fence (en anglais) évite le glissement de l'air dans le sens latéral de l'emplanture vers le bout d'aile (saumon) en re-dirigeant le flux vers l'arrière du bord de fuite. Ce dispositif simple permet de limiter les risques de perte de vitesse et d'augmenter la stabilité. Un autre avantage de cette cloison est qu'elle peut être utilisée pour créer un tourbillon afin d'augmenter la vitesse de l'écoulement et de retarder le décollement.

Ci-dessous la cloison (en rouge) couvrant uniquement le bord d'attaque de l'aile d'un Fokker 28



Source : [Http://www.fokker-aircraft.info](http://www.fokker-aircraft.info)

Ci-dessous les cloisons (en rouge) couvrant toute l'aile de SE 210 Caravelle.



V.Pirad/AviaScribeCollection

Sur la photo ci-dessous du MIG 17F, on voit nettement les trois cloisons sur chaque aile.



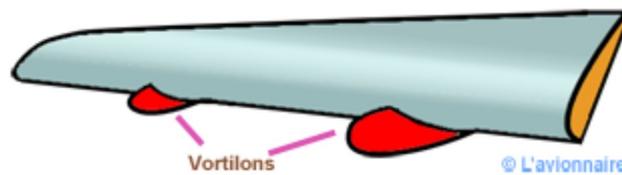
Source: Wikimedia Commons / Auteur: Robert Lawton



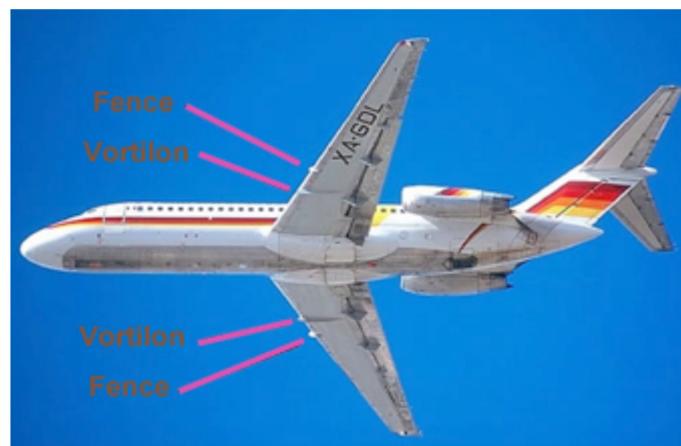
## Vortilon et Pylon

Le vortilon est une contraction de vortex et de pylône. Les vortilons se composent d'une ou plusieurs plaques planes attachées à la face inférieure de l'aile à proximité de son bord d'attaque. Cette barrière en-dessous des ailes a sensiblement le même but que les cloisons (fences) et peuvent être utilisées comme une alternative à ces cloisons. Le vortilon peut être utilisé pour créer un tourbillon sur la face inférieure de l'aile à faible angle d'attaque, mais son rôle principal est lorsque l'avion vole à vitesse réduite et à angles d'attaque élevés. Le vortilon crée alors un vortex transmis en continu autour de la surface supérieure, ce qui dynamise la couche limite et retarde la séparation de l'écoulement d'air local.

A noter que les mâts pour soutenir les réacteurs sous les ailes produisent un effet similaire.



Ci-dessous les vortilons du DC-9-10



Source : <http://www.airlinercafe.com>

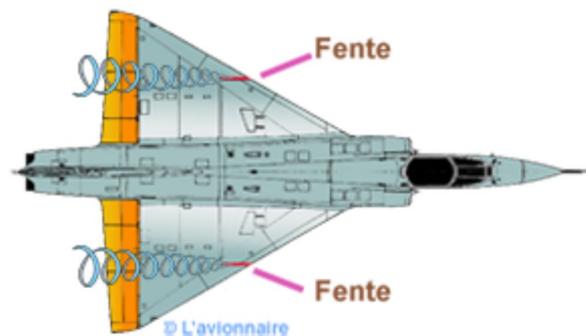
Placés également sous les ailes les pylons peuvent générer le même genre de tourbillons que les vortilons à condition que la jonction entre le pylon et la voilure soit située à l'arrière du bord

d'attaque de l'aile. Sur certains avions comme les chasseurs-bombardiers les pylons servent de support à l'armement ou aux réservoirs supplémentaires.



## Fente bord d'attaque

La fente de bord d'attaque ou Notched leading edge (en anglais) placée aux environs des deux tiers de la longueur de l'aile, s'étend vers l'arrière du bord d'attaque de quelques centimètres. Elle agit en induisant un tourbillon derrière elle. Ce tourbillon agit de manière similaire à une clôture structurelle (une barrière aérodynamique), en empêchant la propagation du glissement de l'air dans le sens latéral de l'emplanture vers le bout d'aile (saumon).



Sur la photo ci-dessous on peut apercevoir la fente du bord d'attaque au-dessus du réservoir supplémentaire.



Source : inconnue

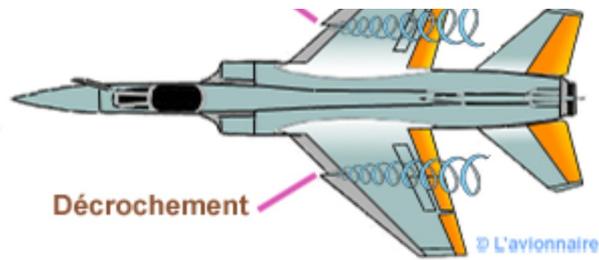


## Décrochements du bord d'attaque

Ce décrochement au bord d'attaque ou dogtooth (en anglais) crée une barrière que l'air tente de contourner en provoquant l'apparition d'un vortex particulièrement important aux fortes incidences empêchant la propagation des décollements de migrer vers l'emplanture.

Ci-dessous les décrochements sur Mirage F1





Les décrochements du MIG 23 sont beaucoup plus important.



Source: <http://defensetech.org>



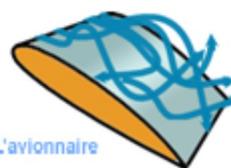
## Générateurs de vortex d'ailes

Un générateur de vortex est une surface aérodynamique, constituée d'une arête vive placée dans l'écoulement du flux et générant ainsi un, ou plusieurs tourbillons, co-rotatifs ou contre-rotatifs. Lorsque les incidences augmentent la couche limite devient tourbillonnaire et la portance diminue fortement (dessin droit) jusqu'à provoquer le décrochage. [Voir Ecoulement de l'air - Le décollement](#)

Angle d'incidence faible



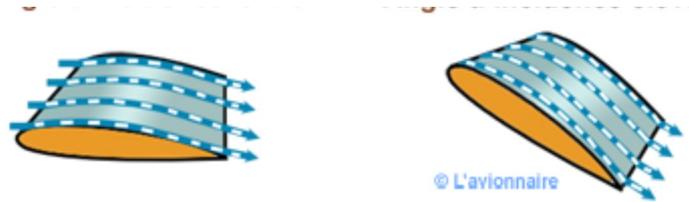
Angle d'incidence élevé



L'objectif de ces générateurs de vortex consiste à créer des tourbillons d'une manière contrôlée et prévisible. Ces tourbillons ajoutent de l'énergie à la circulation de l'air. Cette dynamique favorise la circulation de l'air et retarde le décollement de l'aile à des angles d'attaque plus élevés. En conséquence, l'aile est en mesure de continuer de générer une portance dans des conditions où elle aurait, sans ces générateurs décroché. Ce comportement est particulièrement avantageux sur aéronefs à haute performance militaire qui ont besoin d'être extrêmement maniables à angles d'attaque importants en combat. Pour les avions commerciaux, ces générateurs augmentent la sécurité car l'avion est moins susceptible de subir un décrochage de l'aile pendant les phases critiques du vol comme le décollage et l'atterrissage.

Angle d'incidence faible

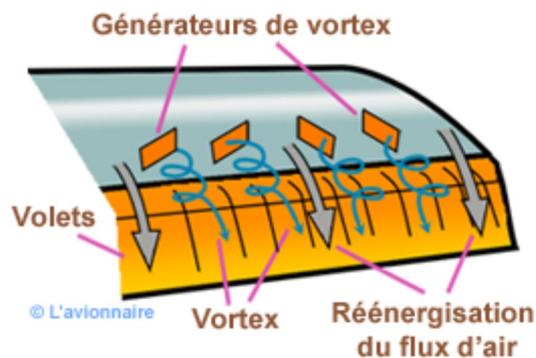
Angle d'incidence élevé



Ci-dessous les générateurs de vortex situés derrière le bord d'attaque de l'aile de Boeing 777.



Le procédé dont ces dispositifs de vortex travaillent peut être mieux compris par l'étude du schéma ci-dessous. Un générateur de vortex est un peu comme une aile miniature perpendiculaire à l'aile principale. Ces générateurs sont montés à un angle d'attaque de l'écoulement d'air sur le côté de sorte que chacun crée un vortex large à l'extrémité exposée. L'exemple ci-dessous montre les générateurs de tourbillons alignés dans des directions opposées de sorte que les tourbillons tournent en sens inverse l'un de l'autre. Ces tourbillons servent à réenergiser le flux d'air en aval afin qu'il puisse suivre la forte courbure du volet déployé et de rester attaché à sa surface.



Ci-dessous les générateurs de vortex placés devant les ailerons sur l'avion Embraer EMB-120.



Source : inconnue

## Générateurs de fuselage

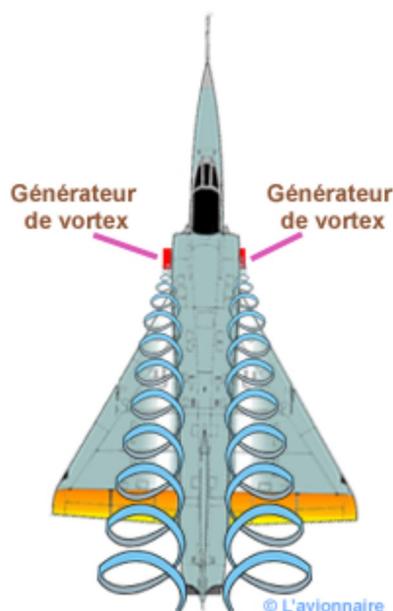
Appelées aigrettes ou strake (en anglais) et placées sur le fuselage de part et d'autre des entrées d'air avec un fort dièdre positif ( $+19^\circ$  sur Mirage 2000), ces petites voilures participent à l'amélioration de la stabilité et du contrôle en lacet à hauts angles d'attaque. Les tourbillons ainsi générés prennent la dérive en "sandwich" et lui conserve toute son efficacité. Par contre ces aigrettes ne participent pratiquement pas à une génération de portance supplémentaire, ne dynamisant le flux d'air qu'à l'emplanture de l'aile.

Ainsi avec ses aigrettes et ses becs hypersustentateurs automatiques sur toute la longueur du bord d'attaque le Mirage 2000 a une maniabilité à faible vitesse grandement améliorée par rapport au Mirage III et sa vitesse d'approche tombe désormais sous les 150kt contre 190Kt pour son aîné.

Ci-dessous les aigrettes et les vortex du Mirage 2000



Source: Wikimedia Commons / Auteur:Arpingstone



Ci-dessous les becs hypersustentateurs automatiques sur toute la longueur du bord d'attaque sont sortis.





Source : [http:// www.militaryimages.net](http://www.militaryimages.net)



## Générateurs des carénages moteurs

Ce type de générateur de tourbillons utilisé sur une nacelle de moteur est généralement beaucoup plus grand que ceux qui sont placés sur une aile, ils peuvent être montés soit sur un côté, soit sur les deux côtés des carénages des réacteurs. Ils apportent de l'énergie cinétique (tourbillons) à l'écoulement aval de leurs implantations et retardent ainsi les décollements sur l'extrados de l'aile qui apparaissent au delà d'un certain angle d'attaque.

Sur la photographie ci-dessous on distingue nettement le vortex qui contourne le bord d'attaque.



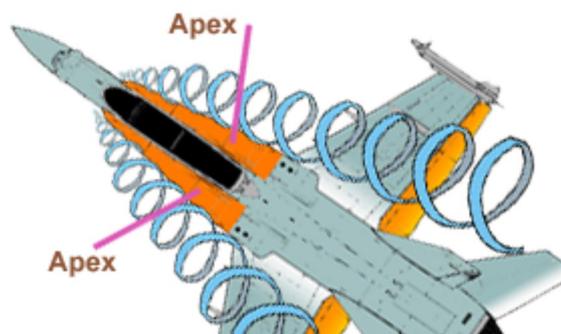
Source : Copyright Brad Harris / AIRLINERS.NET



## Vortex d'apex

Afin d'améliorer la portance à forte incidence et accroître ainsi le domaine de vol, certains appareils voient l'emplanture de leurs ailes prolongées par des surfaces fixes appelées APEX ou LERX (en anglais pour Leading Edge Racine Extension). Ces surfaces sont portantes et vont donc générer des tourbillons puissants d'air ou Vortex qui augmentent la vitesse de l'air sur l'emplanture des ailes et autour de l'empennage vertical. Cela permet de contrôler l'avion à angles supérieurs de  $30^\circ$ . Par contre en vol de croisière l'effet de l'Apex est minime.

L'APEX permet également l'alimentation correcte en air des moteurs au cours des vols à des angles d'attaque élevés.



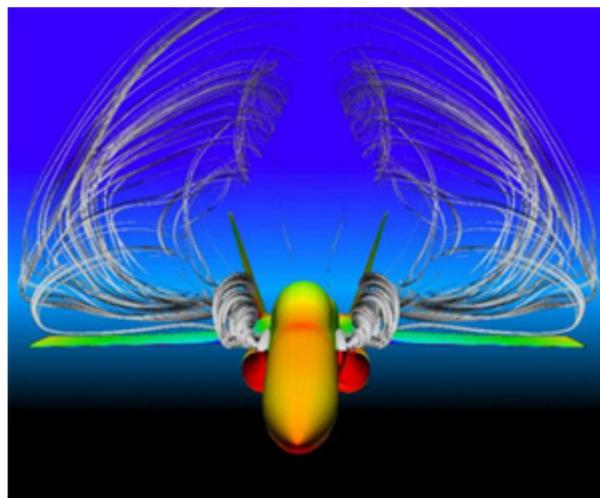


La photographie ci-dessous du McDonnell Douglas F/A-18 Hornet montre les deux vortex d'apex.



Source : <http://inter.action.free.fr/labo-aero/>

Photographie informatique des vortex McDonnell Douglas F/A-18 Hornet



<http://www.aerospaceweb.org/>



## Aile en flèche inverse

Le concept de l'aile en flèche inverse Forward Swept Wing en anglais a été mis au point par les allemands pendant la seconde guerre mondiale avec l'avion Junker 287. Les chercheurs américains et russes ont ensuite effectués plusieurs études sur l'aile en flèche inverse en soufflerie, sans déboucher sur des projets concrets. Ce n'est qu'en 1964, qu'un jet d'affaire à aile en flèche inverse est construit par la Hamburger Flugzeugbau à Hambourg. Le HFB-320 « HansaJet » ne fut produit qu'en 50 exemplaires.

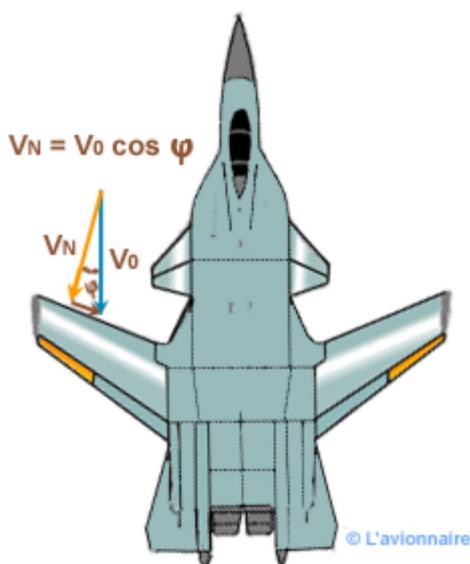
Le constructeur Grumman lance la production de deux prototypes en 1981. Le X-29 volera en 1984, les avantages aérodynamiques de cette voilure seront confirmés, mais jugés peu intéressants. Il faut attendre 1997 pour voir apparaître le Sukhoi S-37 « Berkout », mais après de nombreux essais en vol, cet avion restera au stade de prototype. Ci-dessous le Grumman X29



Source : Photo / NASA

### Effet de flèche inverse

On pourrait s'attendre à ce qu'une aile à flèche arrière et une aile à flèche avant donne les mêmes résultats. En première approximation, cela peut paraître vrai; mais bien d'autres considérations comme le rapport portance/traînée, la manoeuvrabilité sont différents. Comme pour une aile en flèche arrière on peut décomposer  $V_0$  en  $V_0 \sin \varphi$  qui n'engendre aucune survitesse et  $V_0 \cos \varphi$  qui détermine le champ des survitesses et de la sustentation.

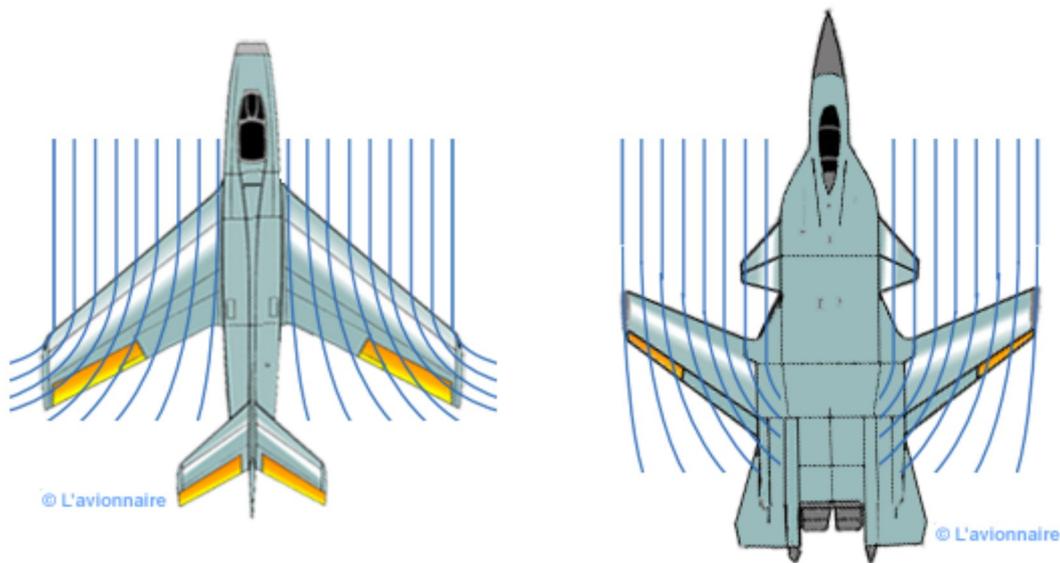


On constate sur le dessin ci-dessus que le vecteur  $V_0 \sin \varphi$  est dirigé vers l'emplanture de l'aile et non vers l'extrémité de l'aile comme sur une aile en flèche arrière.

Pour une aile à flèche arrière (dessin ci-dessous à gauche) nous voyons que l'écoulement de l'air tend à se déplacer de l'emplanture vers l'extrémité de l'aile, et à angle d'attaque élevé le décrochage commence aux extrémités de l'aile pour ce propager ensuite vers l'emplanture, d'où la nécessité de concevoir des cloisons ou autres artifices pour éviter cette propagation.

Pour une aile à flèche inverse (avant) (dessin ci-dessous à droite) nous voyons que l'écoulement

de l'air tend à se déplacer de l'extrémité de l'aile vers l'emplanture.



### Avantages de l'aile en flèche inverse

- Du à l'écoulement inverse de l'air (des extrémités des ailes vers l'emplanture) le décollement de la couche limite commence à la racine de l'aile, ce qui permet de conserver plus de portance, donc plus de contrôle aux bouts des ailes, là où se trouvent les ailerons. On comprend alors que l'aile en flèche inverse permet aux ailerons d'améliorer la manoeuvrabilité à angles d'attaque élevés ou à faible vitesse.
- La manoeuvrabilité est encore amélioré par l'utilisation de plan canard pour le contrôle en tangage, et de LERX.
- L'écoulement inverse diminue les tourbillons marginaux en bout d'aile, donc à forte incidence l'aile a une rapport portance/trainée plus favorable que les ailes conventionnelles.
- Le nombre de mach critique recule ce qui fait que la trainée transsonique est bien moins élevée.
- De plus l'air s'écoulant vers le fuselage, permet à l'empennage horizontal de garder également une meilleure efficacité.

### Inconvénients de l'aile en flèche inverse

Dans le cas de la flèche inverse, la torsion s'exerce dans le sens inverse. Les forces de portance engendrent un moment de flexion intendant à relever le bord d'attaque en bout d'aile. Ce relèvement se traduit par une augmentation de la portance à cet endroit (augmentation de l'angle d'attaque), provoquant, à son tour une augmentation de la contrainte sur l'aile qui fléchit d'avantage, et ainsi de suite jusqu'à la rupture.

Du point de vue de la torsion, une aile en flèche inverse est donc instable et la structure est soumise à des efforts intenses.

C'est la raison pour laquelle les propriétés aérodynamiques de l'aile en flèche inverse n'ont pas été étudiées que récemment, grâce à l'apparition des matériaux composites qui allient une très grande résistance aux efforts en traction et en torsion pour un faible poids.

La stabilité du Grumman X 29 devait être contrôlée en permanence, en détectant les conditions de vol telles que l'attitude et la vitesse, par traitements informatiques et d'adapter en permanence les gouvernes de vol.

Si l'aile en flèche inverse est une solution originale, il reste encore beaucoup de problèmes à résoudre pour qu'elles deviennent opérationnelles.



## Plan canard

Lorsque l'empennage horizontal est placé à l'avant de l'appareil, on parle alors de plan canard ou d'empennage canard. L'avantage d'un plan canard est que sa surface produit normalement une portance positive (vers le haut) qui s'ajoute à celle produite par les ailes alors qu'un empennage classique produit une déportance (portance vers le bas). Bien sûr ce système a aussi des inconvénients.

Ils existent 3 sortes de plans canard:

- plan canard fixe
- plan canard avec volets
- plan canard mobile

### Plan canard fixe

Les plans canard fixes se comportent comme de grosses aigrettes. Et comme les aigrettes ils génèrent de puissants vortex qui permettent de contrôler l'avion à des angles d'attaque élevés. Ci-dessous un Mirage III suisse



Source : <http://www.flyfighterjet.name>

### Plan canard avec volets

Le Saab J37 Viggen suédois a un empennage canard qui lui confère des qualités de décollage et d'atterrissage courts. Les plans canard ont été placés derrière les orifices d'entrée d'air des réacteurs et légèrement supérieurs à l'aile principale, mais ne sont pas mobile comme surfaces de commande. Le but de ces plans canards est d'agir en tant que générateurs de tourbillons de la voilure principale et donc de fournir plus de portance.

Sur la photo ci-dessous le Saab J37 Viggen avec les volets du plan canard abaissés.





Source : Wikimedia Commons : Auteur Alan Wilson

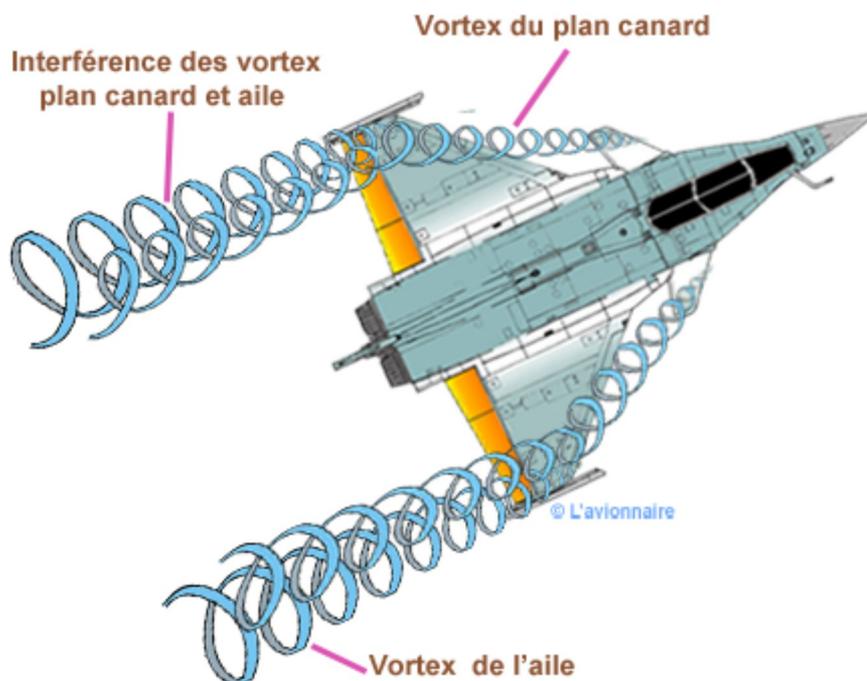
## Plan canard mobile

Sur le Rafale ci-dessous le plan canard mobile appelé également canard actif est utilisé comme gouverne de profondeur. La gouverne de profondeur se trouvant à l'avant, pour cabrer l'avion, elle doit pivoter vers le haut (augmentation de l'angle d'attaque).



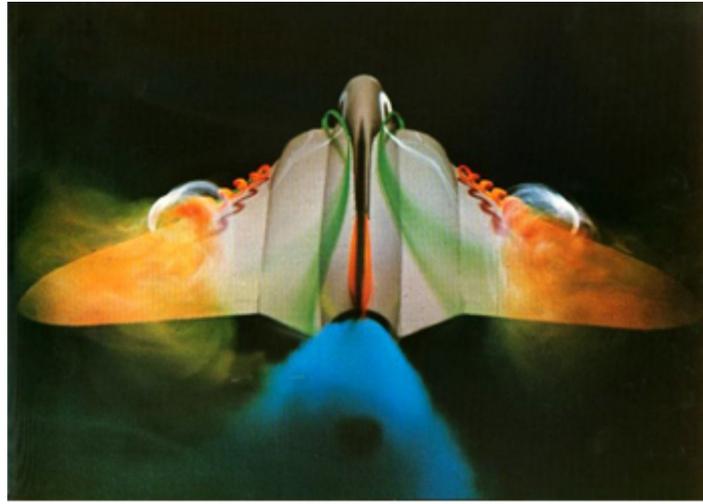
Source : @Marinenationale

Qu'ils soient fixes, avec volets ou mobiles les plans canard remplissent le même rôle, fournir plus de portance à angles d'attaque élevés afin de diminuer la vitesse soit dans les phases de décollage ou d'atterrissage, soit en évolution lors de combats aériens.



Le dessin ci-dessus montre l'interférence entre les vortex du plan canard et les vortex des ailes.

Sur une aile delta, les tourbillons (vortex) éclatent naturellement à forte incidence et une chute de portance consécutive à ce phénomène est observée sur la partie de la voilure affectée, pouvant compromettre la stabilité en tangage (apparition de vibrations, tremblement), en particulier à des angles d'attaque supérieur à celui normalement utilisé pour l'atterrissage.



Source ONERA : Henri Werlé

Ci-dessus éclatement de vortex sur une aile delta à forte incidence. Cette visualisation faite dans un tunnel à eau est assez similaire à celle observée par la NASA au cours des essais en vol.

*Fin du chapitre*

  
*Haut de page*

G+1

Tweeter



J'aime 436

[Accueil](#) [Liens](#) [Historique](#) [Copyright © 2010-2017](#)

[Copyright © 2010-2017](#)

