

E X P O S I T I O N

# un avion, comment ça marche ?



Exposition conçue et réalisée par Science Animation, en partenariat avec Aerospatiale. Avec le concours de : Sup'Aéro ; l'École Nationale de l'Aviation Civile ; l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace ; l'Institut Universitaire pour la Formation des Maîtres ; l'Aérothèque ; et l'aide financière du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et du Conseil Régional Midi-Pyrénées.





# Comment vole un avion ?

## La montée

Quel que soit le moyen de transport utilisé (même à pied), le principe de la montée reste le même : on doit dépenser plus d'énergie. En vélo, on doit pédaler plus fort. En voiture, on appuie sur l'accélérateur pour donner plus de puissance au moteur.

Pour un avion, c'est la même chose : on met les gaz plus fort, on augmente la poussée.

C'est donc l'augmentation de la poussée qui permet à l'avion de monter, il faut utiliser plus de carburant pour gagner de l'altitude.



## La descente

À l'inverse, lors d'une descente, on dépense moins d'énergie et on est parfois amené à freiner pour éviter une vitesse trop excessive.

En vélo, on ne pédale plus lors d'une descente et on peut s'aider des freins.

En voiture, on réduit l'accélération ou on cesse même complètement d'accélérer ; on peut s'aider des freins.

Pour un avion, on réduit la poussée, et si nécessaire, on utilise les aérofreins, pour augmenter la traînée. Ceci permet à l'avion de descendre.



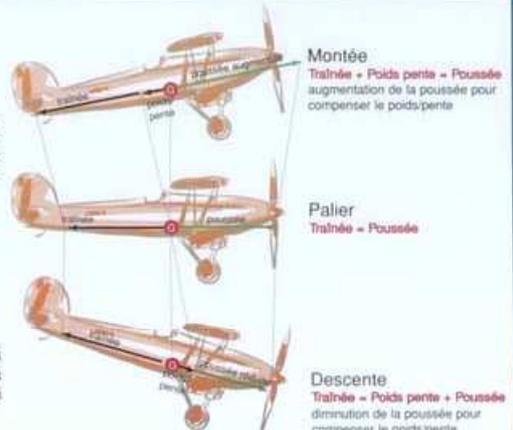
### La montée et la descente

#### La montée

La poussée est augmentée pour compenser le "poids-pente" provoqué par la montée. Le poids-pente est la projection du poids sur l'axe de la vitesse. C'est donc la poussée qui permet à l'avion de monter : il faut utiliser plus de carburant pour gagner de l'altitude.

#### La descente

À l'inverse, c'est la réduction de poussée qui permet à l'avion de descendre. Pour accentuer la réduction de la poussée, on peut augmenter la traînée en utilisant, si nécessaire, les aérofreins.

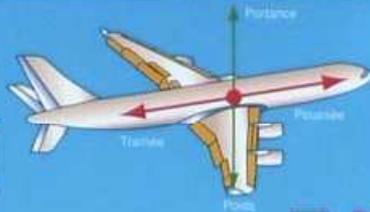




# Comment vole un avion ?

## La portance

Écoulement de l'air autour des ailes qui provoque principalement une dépression au dessus de l'aile, entraînant un effet de sustentation.



Un avion en vol, est soumis à 3 sortes de forces :

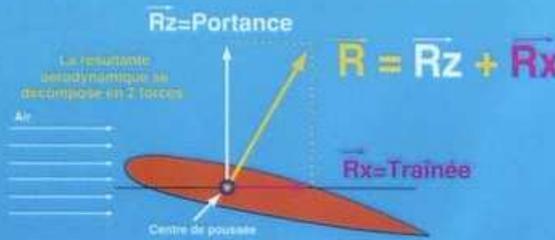
- les forces aérodynamiques : la portance et la traînée,
- la poussée,
- le poids.

L'avion est donc essentiellement sustenté, en raison de l'aspiration qu'il subit sur le dessus de l'aile.

## La traînée

La traînée est la résistance de l'air qui retient, qui freine l'avion. Il existe 2 sortes de traînée :

- la traînée créée par le frottement de l'air sur les surfaces de l'avion
- la traînée liée à la portance.

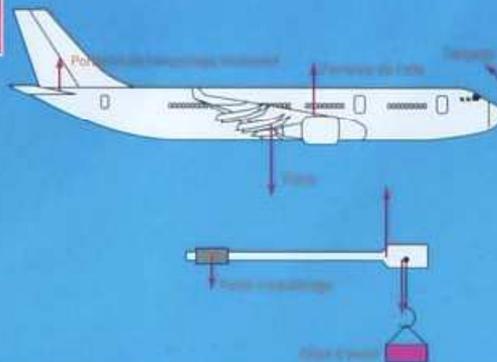


Pour réduire la traînée due au frottement de l'air, on réduit les irrégularités de la surface de l'avion. Pour réduire la traînée liée à la portance, on augmente l'allongement des ailes au maximum (ex. des planeurs).

## L'équilibre

La majeure partie des phases de vol correspond à des vols équilibrés (par exemple le palier), c'est-à-dire que la somme des forces est nulle.

Portance = poids  
Traînée = Poussée  
La vitesse est constante, il n'y a pas d'accélération.



Au niveau de la "queue de l'avion", on trouve l'empennage horizontal doté d'une gouverne commandée par le manche, qui permet d'équilibrer l'avion en tangage (rotation piqué/cabré).

L'empennage correspond au poids sur une balance romaine.

### De quoi dépend la portance ?

La portance ou sustentation peut varier suivant, entre autre, 4 éléments :

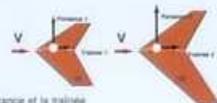
- La vitesse relative de l'air par rapport à l'avion
- Sur l'aile de l'avion, plus la vitesse de l'air augmente, plus les effets de compression et de dépression augmentent. Au décollage, par exemple, l'avion doit accélérer pour atteindre une vitesse suffisante pour que sa portance équilibre au moins le poids.



Par ailleurs, la portance et la traînée augmentent en fonction du carré de la vitesse :  $(V^2)$  alors (portance et traînée  $\times 4$ ).

#### - La surface de l'aile

La portance et la traînée sont proportionnelles à la surface de l'aile.



#### - La densité de l'air

Plus l'avion monte, plus la portance et la traînée diminuent avec la densité de l'air.

#### - L'incidence

Plus l'incidence est grande, plus la portance augmente, jusqu'à ce que l'aile "microchoue" (sa portance va chuter considérablement).

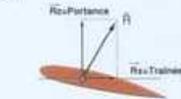


### L'aérodynamique

La résultante aérodynamique, que nous noterons  $\vec{R}$ , est provoquée par le déplacement relatif de l'avion dans l'air. Elle se décompose ainsi :  $\vec{R} = \vec{R}_z + \vec{R}_x$  ( $\vec{R}_z =$  portance,  $\vec{R}_x =$  traînée).

#### La portance

La portance est l'effet de sustentation, principalement dû à l'effet d'aspiration au dessus de l'aile (à l'intrados).



$$\text{Portance} = 1/2 \rho S V^2 C_z$$

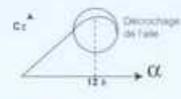
$\rho$  = masse volumique (1,2 kg/m<sup>3</sup>)

$S$  = surface de l'aile

$V$  = vitesse de l'avion

$C_z$  = coefficient de portance

$\alpha$  = angle d'incidence. L'incidence est l'angle entre la ligne de référence du profil de l'aile et la direction de la vitesse de l'avion.



$$\text{Traînée} = 1/2 \rho S V^2 C_x$$

Résistance de l'air qui retient, qui freine l'avion. Il existe plusieurs sortes de traînée.





# Comment vole un avion ?

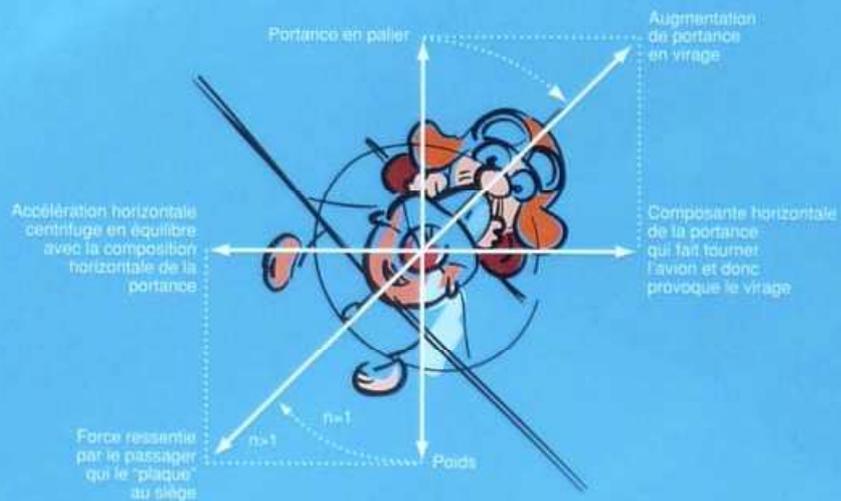
## Le virage

Pour incurver la trajectoire rectiligne d'un avion, il faut créer une force perpendiculaire à la trajectoire.

Sur un avion, cette force perpendiculaire est obtenue en créant une composante horizontale de la portance, qui s'obtient en inclinant l'avion, en le "faisant pencher" et qui exige une augmentation de la poussée.

Trajectoire rectiligne  
Nouvelle trajectoire

Force



### Le virage

Le facteur de charge lors du virage ( $n$ ).

En virage, les passagers d'un avion ressentent une force qui les "plaque" à leur siège. C'est le facteur de charge qui est dû à l'augmentation de la portance. On peut résumer ainsi cet effet :

$n = 1$  : situation normale ; portance = poids

$n = 1,2$  : inclinaison de l'avion à  $30^\circ$  ; le passager pèse 20% de plus !

$n = 2$  : inclinaison de l'avion à  $60^\circ$  ; le passager pèse 100% de plus, c'est-à-dire 2 fois son poids !

Lors de son exploitation commerciale, un avion civil ne doit pas dépasser  $n = 2,5$ . Il y a une marge de 50% avant la rupture de l'avion. En fait, en utilisation normale, on utilise rarement  $n = 1,2$ .

Un avion de combat peut voler à des facteurs de charge de l'ordre de  $n = 7$  à  $10$ . Le pilote dispose alors de protections particulières (combinaisons anti-g.) pour supporter cette charge.

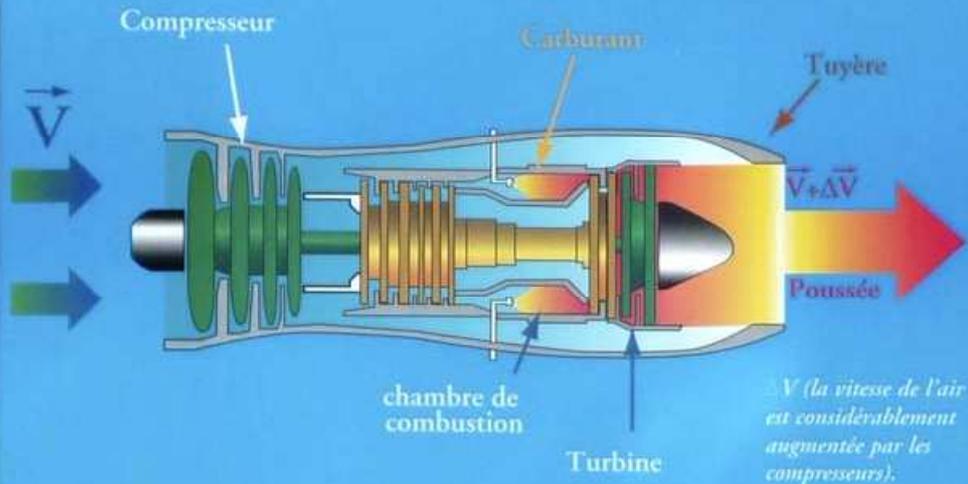


# Comment vole un avion ?

## La poussée

Ensemble de forces dirigé vers l'avant, créé par le moteur. Le moteur prélève une masse d'air qu'il accélère vers l'arrière. C'est cette accélération qui produit la poussée et permet à l'avion d'avancer.

Sur les avions à hélices, un moteur entraîne une hélice qui permet l'accélération. Sur les avions à réaction, c'est le réacteur qui permet l'accélération.



$\Delta V$  (la vitesse de l'air est considérablement augmentée par les compresseurs).

## Qu'est-ce-qu'un réacteur ?

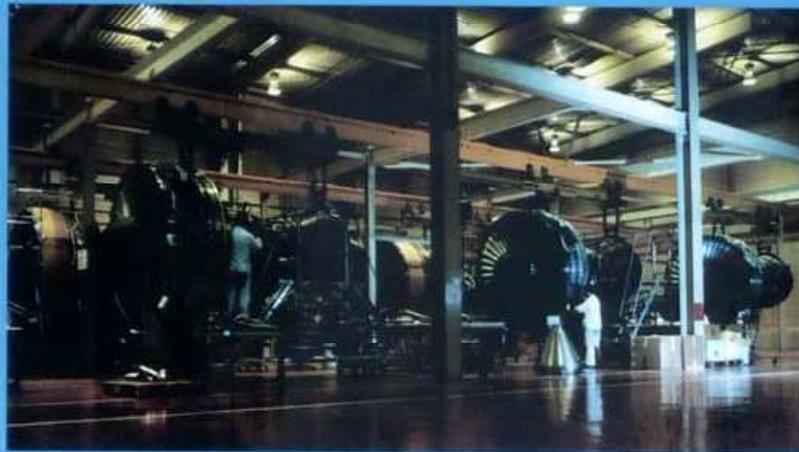
1- Une entrée d'air capte une certaine masse d'air.

2- À l'avant du réacteur, les ailettes du compresseur injectent l'air sous pression dans la chambre de combustion.

3- Dans la chambre de combustion, le carburant est injecté et mélangé à l'air comprimé, pour une proportion de 97% d'air pur et de 3% de carburant. Ce mélange est brûlé, donc son énergie augmente.

4- La turbine prélève une partie de l'énergie pour entraîner les compresseurs. Tout le reste est utilisé pour la propulsion.

5- L'air propulsé est évacué par la tuyère.



### La poussée

La poussée est fonction du débit d'air\* ( $V$  sortie -  $V$  entrée)

Deux exemples de moteur :

#### Le réacteur double-flux

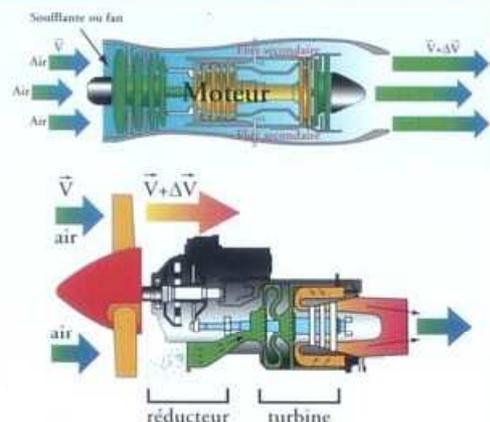
le plus communément utilisé (pour améliorer la consommation de carburant et réduire le bruit).

La turbine entraîne le compresseur et le fan ou soufflante, qui est une hélice carénée, propulsant vers l'arrière un flux d'air secondaire (environ 5 fois plus grand que le flux primaire).

#### Le turbopropulseur

pour les avions de moindre vitesse.

La turbine récupère la majeure partie de l'énergie pour entraîner l'hélice.





# Comment se pilote un avion ?

## L'évolution des postes de pilotage

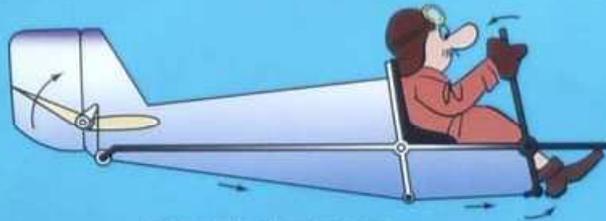
**Commandes de vol mécaniques :**  
c'est la force musculaire du pilote qui actionne le manche et par un système de transmission mécanique, les gouvernes.

Ces commandes étaient utilisées avant la Caravelle (sur le Languedoc, par ex.)  
UN cadran à aiguille = UNE information.

**Commandes de vol avec servocommandes :**  
- le manche du pilote actionne des vérins hydrauliques ;  
- les vérins actionnent les gouvernes ;  
- la force musculaire du pilote est donc suppléée par l'action des vérins.  
1<sup>ère</sup> utilisation sur la CARAVELLE (1955)  
UN cadran à aiguille = UNE information.

**Commandes de vol avec servocommandes :**  
Apparition des tubes cathodiques :  
UN cadran = plusieurs informations qui varient selon les phases de vol :  
carte de navigation, schémas de système ou d'équipement...  
1<sup>ère</sup> utilisation sur l'A 310 (1982).

**Commandes de vol électriques :**  
- le manche envoie les informations de pilotage à des ordinateurs ;  
- les ordinateurs calculent le mouvement des gouvernes, qui sont ensuite actionnées par des vérins.  
1<sup>ère</sup> utilisation sur le CONCORDE (1969).  
Utilisées aussi sur l'A 320 (1985) et l'A 340 (1992) avec un manche latéral (ou mini-manche).



Commandes de vol mécaniques



Cadran à aiguilles



Servo-commandes



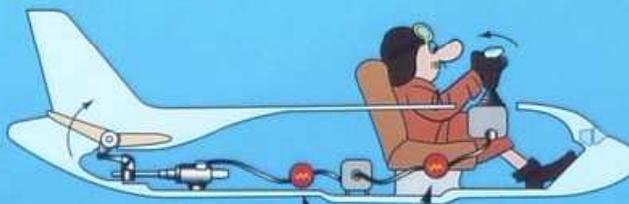
Cadran à aiguilles



Servo-commandes



Écrans cathodiques



ordinateurs

Commandes de vol électriques (CDVE)



Écrans cathodiques



# Comment se pilote un avion ?

## La visualisation du trafic aérien

L'avion dispose lui-même de ses propres moyens de navigation mais la gestion de l'ensemble du trafic aérien est effectué par des contrôleurs au sol disposant de moyens de visualisation et de communication.

Les radars permettent de fournir aux organismes de contrôle aérien :  
- une image du trafic  
- des informations sur la position, l'altitude ou la vitesse des aéronefs.

Les radars sont reliés à des ordinateurs et transmettent leurs informations à des calculateurs. Les moyens de navigation utilisant les satellites permettent une couverture globale de l'espace aérien.

L'utilisation des satellites se développe aujourd'hui. Elle permet de fournir des positions aux aéronefs équipés de moyens de réception.

Ces informations sont particulièrement utiles dans les zones désertiques ou de haute mer, où les radars n'existent pas.

La communication entre satellites et organismes de contrôle pourrait conduire, à long terme, à s'affranchir des radars.

### Le système radar (et ses limites)



### Un des avantages du satellite



Installation des radars "mono-impulsion"

La surveillance par un grand nombre de radars permet de visualiser l'ensemble du trafic aérien

### L'installation des radars "mono-impulsion"

## La circulation aérienne

### Pourquoi ?

- Vitesse des aéronefs
  - Densité importante sur les voies aériennes
  - Influence de la météorologie
  - Etat de la technologie...
- sont quelques paramètres conduisant au besoin d'organiser la circulation aérienne en vue d'un écoulement sûr et efficace.

### Quoi ?

- Services variant selon la densité du trafic aérien et sa nature. Ces services sont les suivants :
- Service du contrôle : espacer les aéronefs les uns des autres, ou les informer mutuellement de leur présence afin de les aider à se voir,
  - Service d'information de vol : donner aux aéronefs les informations utiles ou nécessaires afin d'assurer leur sécurité.
  - Service d'alerte : alerter les organismes de

recherche et sauvetage lorsque la sécurité d'un aéronef est précaire.

### Où et quand ?

- Dans tout l'espace aérien
- Sur les aéroports.

### Comment ?

- Dépôt préalable ou communication d'un plan de vol
- Liaison radiotéléphonique permanente entre les aéronefs et les organismes de la circulation aérienne
- Surveillance de la circulation aérienne au moyen de radars, ces derniers transmettant leurs informations à des calculateurs
- Navigation des aéronefs selon des routes radio-balisées (balises implantées au sol, donnant des indications de distance ou d'azimut).
- Moyens particuliers et très précis d'aide à l'atterrissage.



# Comment se pilote un avion ?

## À quoi ressemble un centre de contrôle du trafic aérien ?

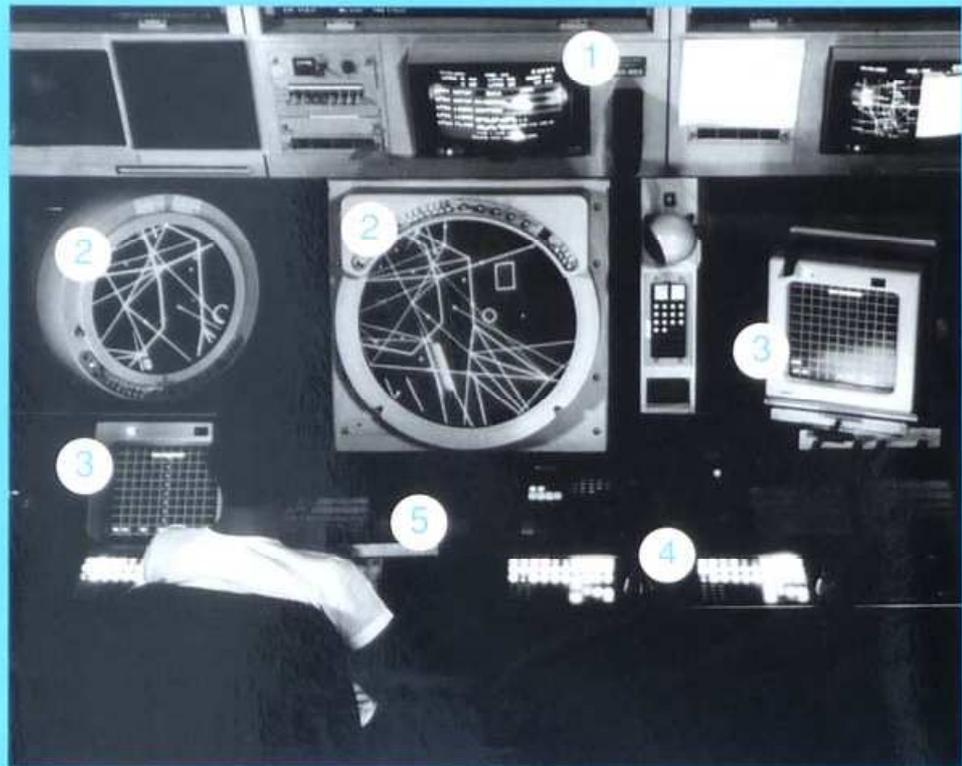
1- Informations météo, informations zones militaires.

2- Ecrans de visualisation des informations radars.

3- Ecran, avec calculateurs, permettant d'établir un dialogue contrôleur / calculateurs.

4- Ensemble téléphonique.

5- Tableau de strip : informations sur papier qui permettent au contrôleur d'identifier chaque avion présent dans son espace de contrôle, et décrivant l'itinéraire prévu par le plan de vol.



## À quoi ressemblera, d'ici quelques années un poste de contrôle du trafic aérien ?

Au-delà de la qualité de l'image, les traitements informatiques évoluent pour mieux aider le contrôleur à organiser un trafic aérien de plus en plus dense.





# Comment se pilote un avion ?

## TROIS EXEMPLES DE TRAJETS ALLER / RETOUR Paris / Nice Paris / Strasbourg Paris / Toulouse

N.B. : On a pris le parti de faire décoller les avions d'Orly de la piste 25 et de les faire atterrir, toujours à Orly, sur la piste 26.

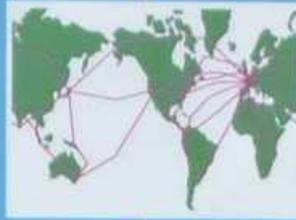
- Un avion ne va pas forcément tout droit !
- Un avion ne prend pas le même trajet aller ou retour !
- Comme pour les voitures, il existe des "itinéraires bis" pour les week-end et jours fériés.



# Comment se con

## Études de marché

Janvier 1984



## Choix de configuration



Réalisation de  
premières pièces  
24 avril 1988

## Études aérodynamiques

Lancement du  
programme  
A340  
juin 1987

Essais en soufflerie



84

85

86

87

8

# struit un avion ?



Assemblage  
tronçon central  
coque  
janvier 1991



Assemblage  
tronçon avant-  
centre-arrière  
février 1991



Installation des  
moteurs  
avril 1991



## Essais d'intégration

Mai 1989



1<sup>er</sup> vol sur  
simulateur  
juillet 1990



Peinture  
septembre 1991



## Essais de fatigue

Transport de la cellule  
d'essai au C.E.A.T.



Essais de flexion  
maximum des  
ailes au C.E.A.T.  
18 octobre 1991



1<sup>er</sup> vol  
25 octobre 1991



## Production

8

89

90

91



# Comment se construit un avion ?

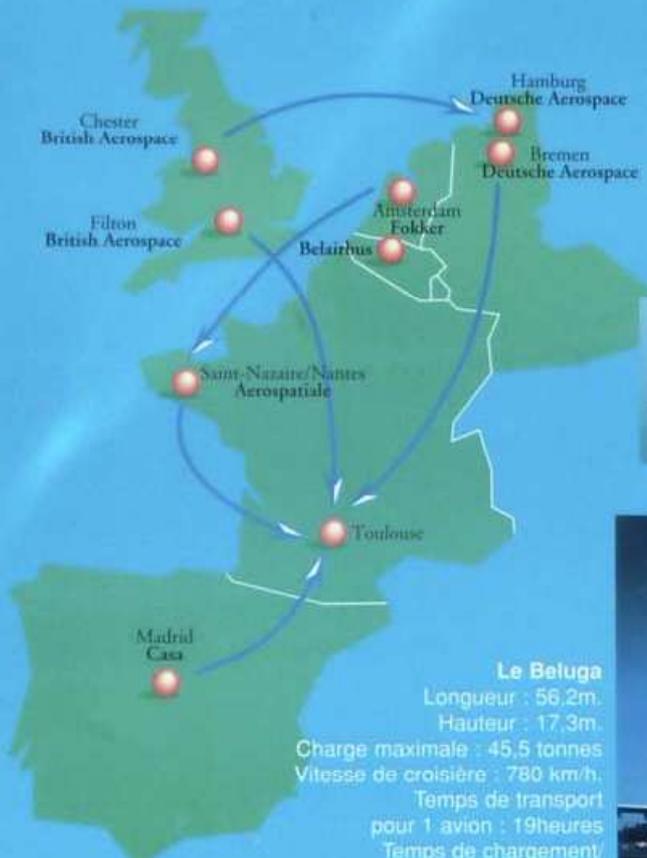
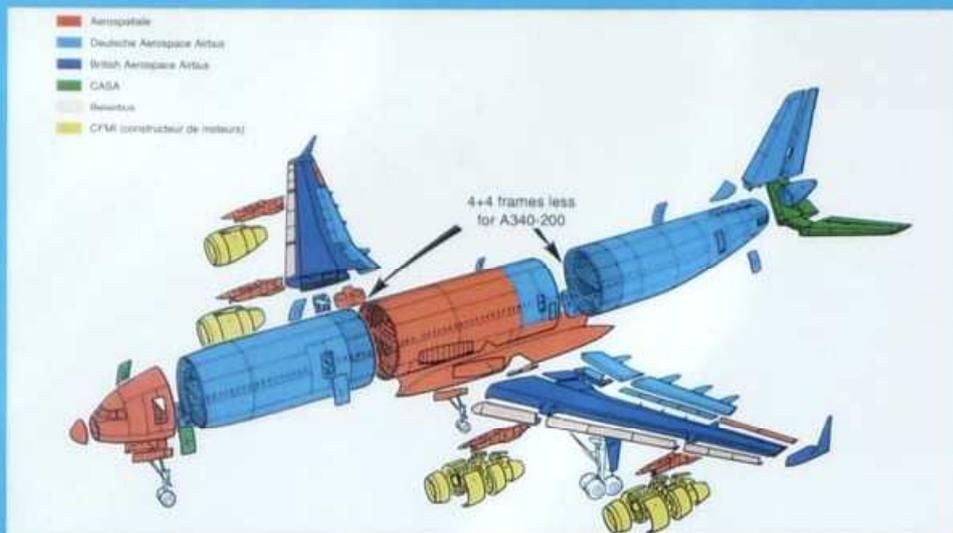
## Un travail en commun : AIRBUS

Tous les types d'appareil AIRBUS résultent d'une coopération entre 4 constructeurs européens :

- AEROSPATIALE (France) : 37,9%
- DEUTSCHE AEROSPACE (Allemagne) : 37,9%
- BRITISH AEROSPACE (Royaume-Uni) : 20%
- C.A.S.A. (constructeur espagnol) : 4,2%

Sont aussi associés BELAIRBUS et FOKKER, constructeurs belge et hollandais.

Les différentes pièces des A330 et A340 sont acheminées de leur lieu de production jusqu'à l'AEROSPATIALE à l'usine Clément ADER, près de Toulouse par le SUPER-GUPPY, que remplacera, progressivement, le BELUGA.



**Le Super Guppy**  
 Longueur : 43,84m.  
 Hauteur : 14,85m.  
 Charge maximale : 22,7 tonnes  
 Vitesse de croisière : 450 km/h.  
 Temps de transport pour 1 avion : 54 heures  
 Temps de chargement/déchargement : 90mn.



**Le Beluga**  
 Longueur : 56,2m.  
 Hauteur : 17,3m.  
 Charge maximale : 45,5 tonnes  
 Vitesse de croisière : 780 km/h.  
 Temps de transport pour 1 avion : 19heures  
 Temps de chargement/déchargement : 45 mn.





# Comment se construit un avion ?

## Un exemple d'usine de production : "Clément Ader" à Colomiers

1-Chaque jour, un avion cargo livre des tronçons d'Airbus dans le hall de déchargement.

2-Ce matériel est acheminé dans le hall de stockage.

3-L'assemblage commence par l'équipement sur le fuselage central de la voilure (ailes).

4-Assemblage des parties avant et arrière.

5-Installation des systèmes informatiques et électroniques.

6-Installation des 4 moteurs et de l'équipement de la cabine.

7-Postes de vérification d'essais au sol.

8-Halls de peinture permettant d'"habiller" l'avion aux couleurs des compagnies clientes.

9-Essais des moteurs.

10-Essais en vol.

11-Livraison à la compagnie aérienne cliente.



La capacité de production mensuelle de l'usine "Clément Ader" est de 7 appareils (A330 et A340).





# Icare en a rêvé,

## Évolution technologique générale



1829  
Photo



1876  
Téléphone

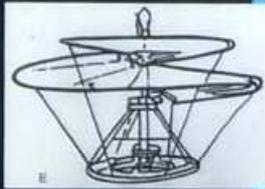
1889  
Automobile

1890  
Avion

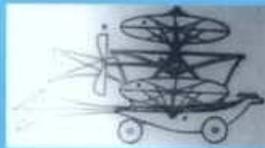


1902  
Radio

## Les hommes et l'aéronautique



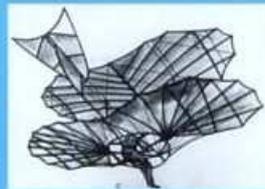
1452  
Léonard de Vinci  
études scientifiques  
sur le vol des oiseaux  
et son imitation mécanique



1796/1855  
Cayley  
préconisation de l'aile fixe  
et d'un moteur actionnant  
une hélice



1890  
Ader  
et le premier avion vole sur  
50 mètres.  
Inventeur du mot avion.



1890/1896  
Lilienthal  
expérience avec des planeurs  
sur la voilure et l'équilibre



1903  
Les frères  
Wright  
1<sup>er</sup> vol en cercle  
sur un aéroplane  
expérimental

### Propulsion

Hélice



Moteur à vapeur



Moteur

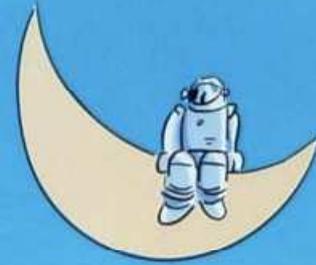
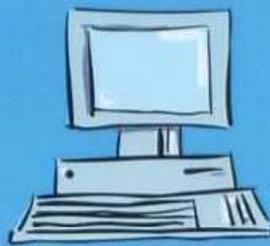
### Structure

Toile,  
bois

### Navigation

Navigation  
à vue

# les hommes l'ont fait

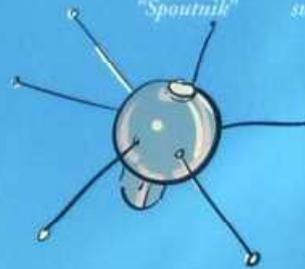


1927  
Télévision

1942  
Ordinateur

1957  
1<sup>er</sup> satellite  
"Spoutnik"

1969  
1<sup>er</sup> homme  
sur la lune



1903  
Wright  
1<sup>er</sup> vol  
à moteur à  
avion

1909  
Blériot  
1<sup>er</sup> traversée de la manche :  
Calais/Douvre  
38km. en 37mn.

1927  
Charles Lindbergh  
l'année de l'Atlantique :  
New-York/Paris en 33h.30

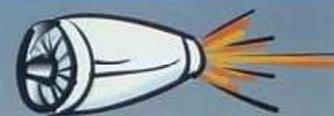
1949  
Le Comet  
1<sup>er</sup> avion civil à réaction

1969  
Concorde  
1<sup>er</sup> avion civil supersonique



à explosion

Réacteur  
1941/1947  
Franchissement du  
mur du son



1920  
Train  
d'atterrissage  
retrant

1921  
Cabine  
pressurisée

1922  
Premiers  
avions  
métalliques

1955  
Alliages légers  
+ titane

1970  
Alliages légers  
+ matériaux  
composites

1914  
Pilote  
automatique

1920  
Radio com-  
munications

1929  
Horizon arti-  
ficiel

1924  
Radar

1962  
Atterrissage  
automatique

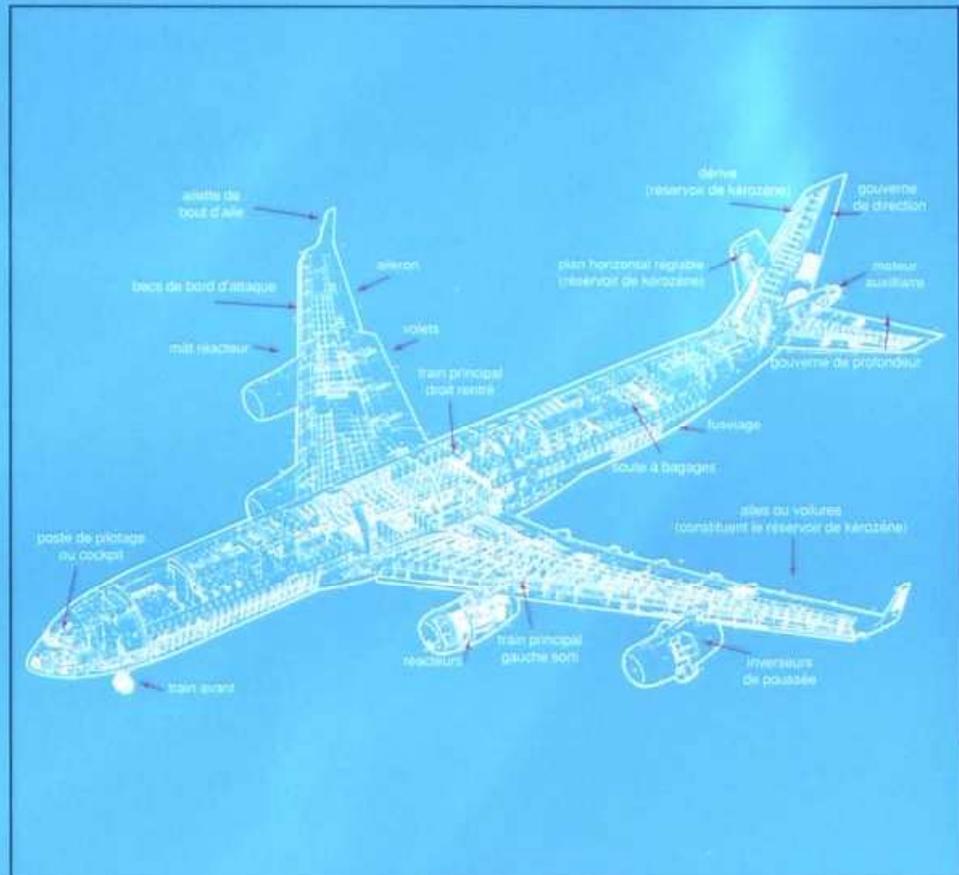
1980  
Navigation  
par  
satellite

1986  
Commandes  
de vol  
électriques  
(minimanche)



# Qu'est ce qu'un avion ?

Un AIRBUS A340 est un immense puzzle qui comprend quelque :  
25000 pièces mécaniques différentes,  
800 disjoncteurs,  
100 000 points de contact électriques,  
6000 connecteurs tous types,  
3000 types de vis,  
140 km. de câbles électriques



## CHIFFRES

Un AIRBUS A340 coûte 100 millions de dollars soit 10 000 voitures (4/5 cv).  
La répartition du coût se fait ainsi :  
1/3 la motorisation,  
1/3 la cellule,  
1/3 l'équipement,  
Consommation/passager aux 100 km. :  
3,1 litres.





# Les progrès de l'aviation de transport

## Une meilleure sécurité

Ce résultat est obtenu grâce :

- aux leçons tirées de l'expérience acquise, sous forme de règlements à appliquer aux nouveaux avions et observés par toutes les compagnies aériennes ;
- aux moyens d'essais au sol et en vol qui accompagnent chaque nouveau programme.

Pour un même nombre de kilomètres parcourus, le risque d'accident est 20 fois plus faible qu'en voiture. L'avion est un moyen de transport très sûr.

Ainsi, tout nouvel avion, répondant à la réglementation obtient son "certificat de navigabilité".

Ce document officiel autorise la compagnie à transporter des passagers.



### Les performances

- un avion bimoteur (Airbus, ATR) doit pouvoir décoller et franchir les obstacles sur la trajectoire de montée avec un moteur en panne ;
- le système de freinage doit être capable d'arrêter l'avion lors d'un décollage interrompu ou de tout atterrissage, sur une piste mouillée, glissante.

### Les qualités de vol

- l'avion doit démontrer une bonne stabilité, manœuvrabilité, manœuvrabilité dans tout le domaine de vol.

### Les systèmes de bord

- l'ensemble des systèmes (commandes de vol, moteur et carburant, pilote automatique, navigation et communication, pressurisation de la cabine, trains d'atterrissage et frein,...) doit être conçu, analysé et essayé pour que l'équipage puisse maîtriser la situation lors d'une panne éventuelle.

### La structure

- la structure doit être capable de résister aux charges les plus élevées : turbulences atmosphériques, manœuvres de l'avion, pannes de commandes de vol.



### L'aménagement de la cabine passagers

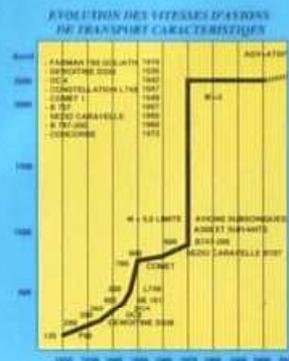
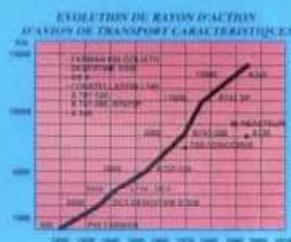
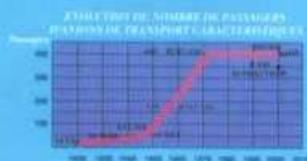
- l'évacuation d'urgence des passagers doit s'effectuer en moins de 90 secondes ;
- les matériaux de revêtement de la cabine doivent réduire au maximum les risques liés au feu.



# Les avancées technologiques

## En 50 ans d'aviation, on a pu observer

- une évolution des vitesses d'avions de transport,
- une évolution du nombre de passagers,
- une évolution du rayon d'action des avions de transport



## Quels avions pour demain

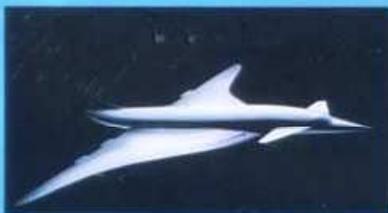
De véritables paquebots volants qui seront utilisés principalement sur les régions Asie-Pacifique

### Le très gros porteur



**EA 3xx**  
 500 à 800 passagers sur 2 étages.  
 Longueur : 76 mètres  
 Envergure : 77 mètres  
 Hauteur : 22 mètres  
 Possibilité d'installer 10 sièges de front en classe économique.

### Le supersonique et l'hyperphonique



**Le P.E.R.S.**  
 (Projet Européen de Recherche Supersonique)  
 Successeur du Concorde  
 250 à 300 passagers  
 Rayon d'action : 12 000 km.  
 Vitesse : Mach 2  
 (2 fois la vitesse du son)  
 Paris/Singapour en 8 heures  
 Mise en service prévue pour 2005.



**L.A.G.V.**  
 (L'Avion à Grande Vitesse)  
 Hypersonique  
 150 passagers  
 Rayon d'action : 12 000 km.  
 Vitesse : Mach 5 = 5 fois la vitesse du son  
 Mise en service éventuelle : 2030  
 Ce projet fait appel à des technologies nouvelles autant dans le domaine des matériaux que dans celui des moteurs.