

# Étude des Aéronefs et Engins Spatiaux



## Cellules

1/223



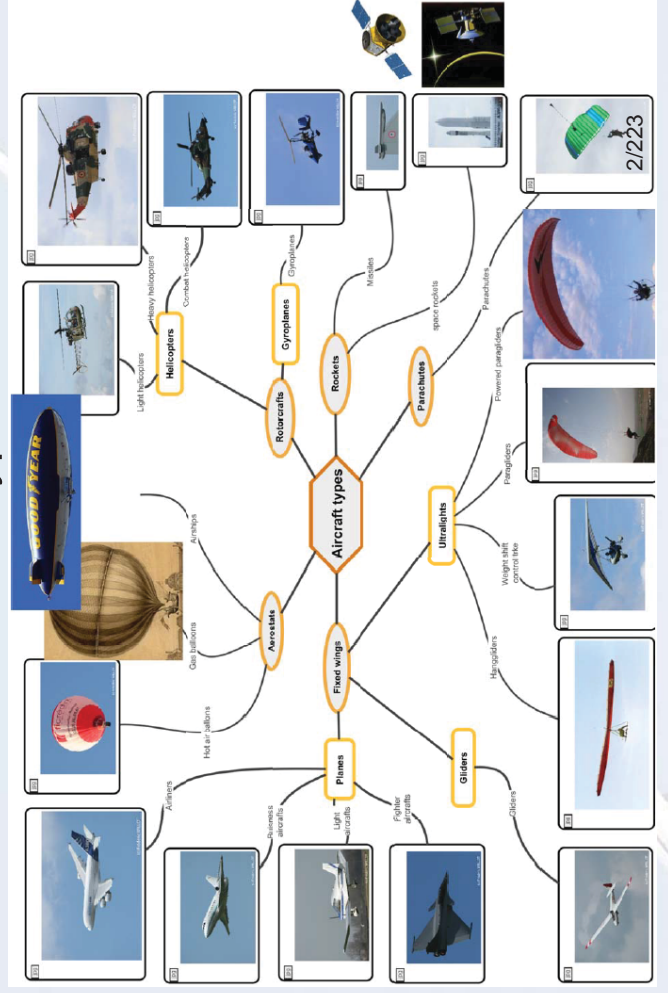
Mongolfière ( hot air balloon)



Fusées Ariane IV et V (space Rocket)

3/223

## Introduction: les types d'aéronefs:



2/223



Planeur  
Glider

Parachute  
Parachute

Motoplanneur

4/223



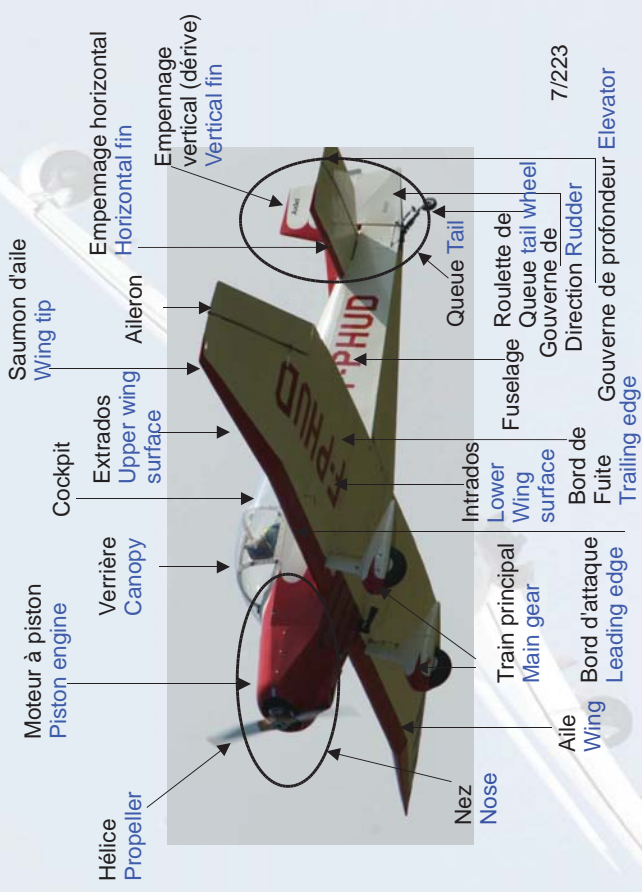
Avion léger  
(DR400)  
Light plane



Hélicoptère  
EC145  
Helicopter

5/223

# I. Composition générale des aéronefs



7/223

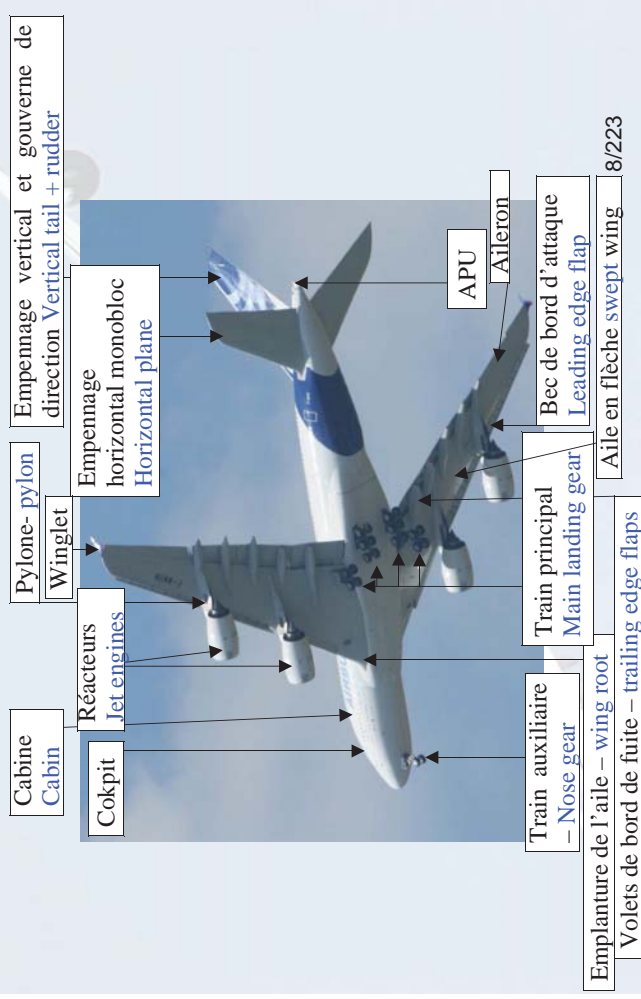
# Connaissance des aéronefs:

## Cellules

- I. Composition générale des aéronefs
- II. L'aérodynamique des cellules
- III. Les dispositifs hypersustentateurs
- IV. Le train d'atterrissage
- V. Les commandes de vol
- VI. Structure d'une cellule

6/223

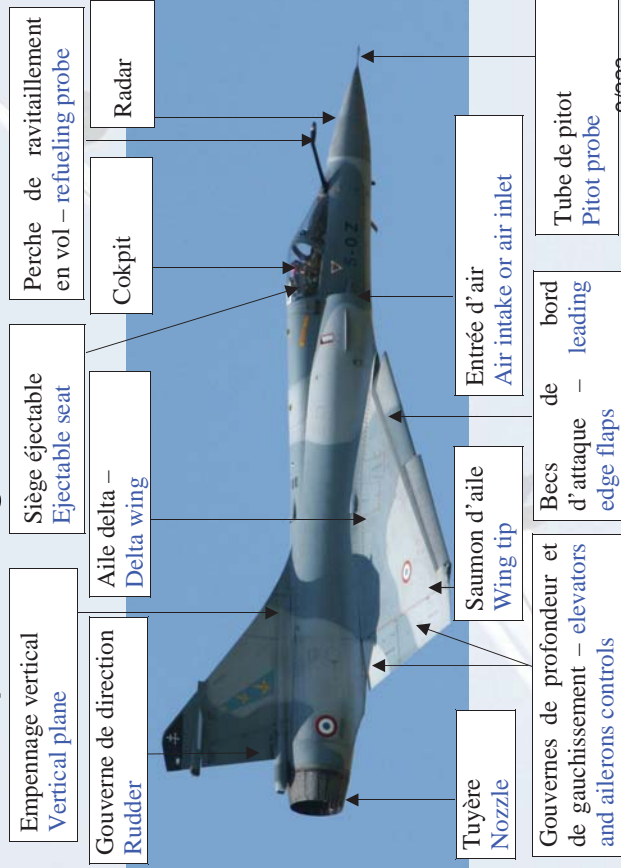
# I. Composition générale des aéronefs



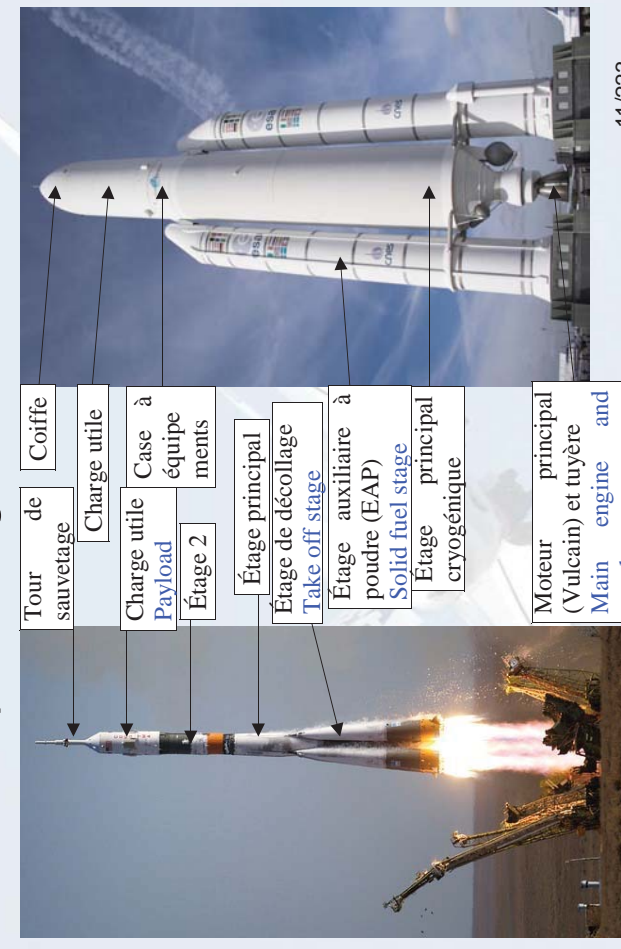
8/223



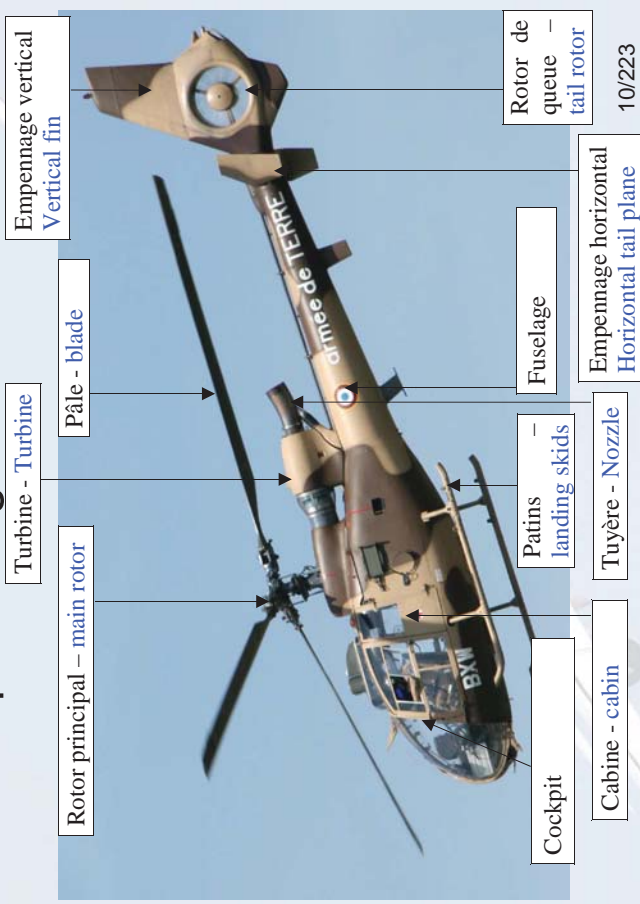
# I. Composition générale des avions



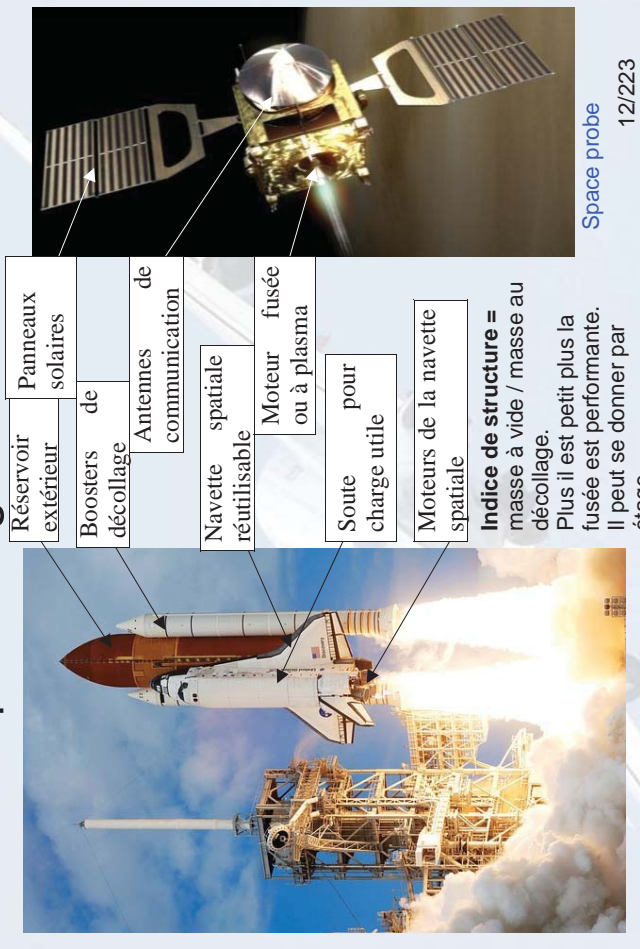
# I. Composition générale des avions



# I. Composition générale des hélicoptères



# I. Composition générale des avions



## Histoire de la conquête spatiale

- Dans les années 1930 en Allemagne, les clubs de conception et de fabrication de fusées se développent.
- Pendant la Seconde Guerre mondiale, les allemands développent les premiers missiles balistiques : les V2 (V pour Vergeltungswaffe = arme de représailles).
- Ces armes, conçues par Wernher Von BRAUN (1912-1977) furent mises en service en 1942 et causèrent des dégâts en Grande Bretagne.



13/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Premier objectif : placer un satellite en orbite.
- 4 octobre 1957, les russes placent Spoutnik en orbite avec une fusée R7
- Les américains n'y parviendront que le 1 février 1958 avec Explorer 1

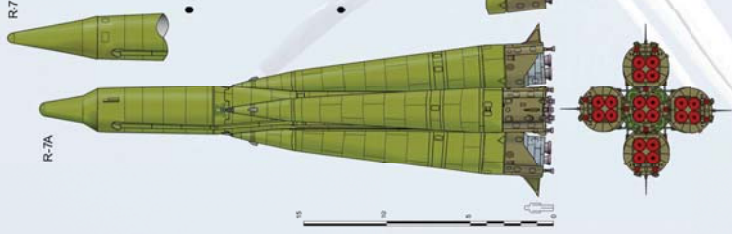


15/223

## Histoire de la conquête spatiale

- A la fin de la guerre les américains récupèrent Von Braun et d'autres ingénieurs pour développer les missiles nucléaires intercontinentaux Redstone puis Minuteman
- Du côté des russes, c'est Sergueï KOROLEV (1906-1966) qui dirige les études des missiles R7.

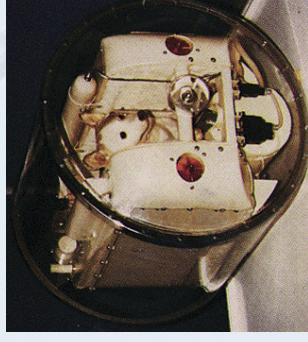
La course à l'espace peut alors commencer.



14/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Deuxième objectif : envoyer un homme
- 3 novembre 1957: Laïka vole à bord de Spoutnik II mais meure au bout de quelques heures.
- 12 avril 1961, Youri Gagarine (1934 – 1968) est le premier **cosmonote** dans l'espace à bord d'une capsule Vostok.



16/223



## Histoire de la conquête spatiale

- Toujours en tête, les soviétiques seront les premiers à :

- Envoyer une femme dans l'espace: Valentina TERECHKOVA (1937) du 16 au 19 juin 1963
- Réaliser une sortie extravéhiculaire : Alexeï LEONOV (1934) le 18 mars 1965



18/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Programme GEMINI (1964-1966) : maîtrise du vol spatial et des sorties extravéhiculaires.
  - 3 au 7 juin 1965 : Edward White réalise la première sortie extra-véhiculaire américaine au cours du vol Gemini 4
  - Les américains rattrapent leur retard
  - La technique du rendez-vous spatial est mise au point



19/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Les américains réagissent :
  - Programme Mercury (1959-1963) : envoyer un américain dans l'espace.
    - Fusées Mercury-Redstone puis Atlas
    - Alan Shepard premier **astronaute** dans l'espace le 5 mai 1961
    - Scott Glenn premier américain à faire des orbites le 20 février 1962



18/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Programme APOLLO (1966-1975) : objectif lune!
  - 21 juillet 1969 : Neil ARMSTRONG pose le pied sur la lune, Buzz ALDRIN l'accompagne dans le LEM et Michael COLLINS les attends en orbite dans le module APOLLO
  - La mission est réalisée grâce à la fusée Saturn V, au module Apollo et au LEM



20/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Depuis les technologies évoluent dans la continuité.
- Seule rupture : la navette spatiale américaine mise en service le 12 avril 1981 (Columbia) et retirée en juillet 2011 (Atlantis) – 135 missions avec 5 navettes
- Navette russe BURAN ( un seul vol le 15 novembre 1988).



21/223

## Histoire de la conquête spatiale

- L'espace scientifique: les laboratoires
  - La station MIR :
    - Station soviétique utilisée par de nombreuses nations (1986-2001)
  - L'International Space Station (1998)
  - Ces stations comprennent des laboratoires permettant de réaliser des expériences non faisables sur terre (en microgravité)



23/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Les nations spatiales :
  - La Russie : lanceurs (satellites et hommes) - **Cosmonautes**
  - Les Etats Unis : lanceurs (satellites et hommes) - **Astronautes**
  - L'Europe : lanceurs Ariane (satellites) - **Spationautes**
  - La Chine : lanceurs Longue Marche (satellites et hommes) – **Taïkonautes**
  - L'Inde : lanceurs

22/223

## Histoire de la conquête spatiale

- L'espace scientifique:
  - les sondes sont envoyées pour comprendre l'origine de l'univers:
    - Vers la lune puis les planètes du système solaire
    - Au delà : Voyager I sort su système solaire le 25/08/2012
    - Les comètes et astéroïdes : Rosetta dépose Philae sur la comète 67P
  - Les télescopes spatiaux permettent d'explorer le passé (Hubble – 24/04/1990)



24/223



## Histoire de la conquête spatiale

- L'espace commercial: les satellites
  - Télécommunications (radios, télévision, données....)
  - Météorologie (METEOSAT...) : les images satellites permettent d'améliorer grandement la qualité des prévisions qui ont une importance commerciale (agriculture, aviation...)
  - Imagerie (SPOT) : des images de différentes natures permettent une observation très précise de la surface de la terre (urbanisation, évolution de la végétation...)
  - Navigation: la navigation par satellite permet un guidage de grande précision pour de nombreuses activités professionnelles ou de loisir ( GPS/NAVSTAR ; Glonass ; Galiléo)

25/223

## Histoire de la conquête spatiale

- Le tourisme spatial :
  - voler avec les russes dans l'ISS est possible depuis 2001 pour 20 à 30 M\$
  - Virgin Galactic :
    - propose des vols suborbitaux à bord de Space Ship Two pour 250 000 \$
    - 700 réservations
    - Premier vol non encore fixé



27/223

## Histoire de la conquête spatiale

- L'espace militaire:
  - Les satellites espion
    - Interception de communication radio ou téléphoniques
    - Images dans le visible et l'IR
  - Les armes dans l'espace
    - Des traités internationaux interdisent les armes dans l'espace

26/223

## II. L'aérodynamique des cellules

### Airframe aerodynamics

Forme des ailes: wing shape  
Droites (straight)



- Trapézoïdales



28/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Forme des ailes:  
En flèche (swept wings) – Delta (delta wings)

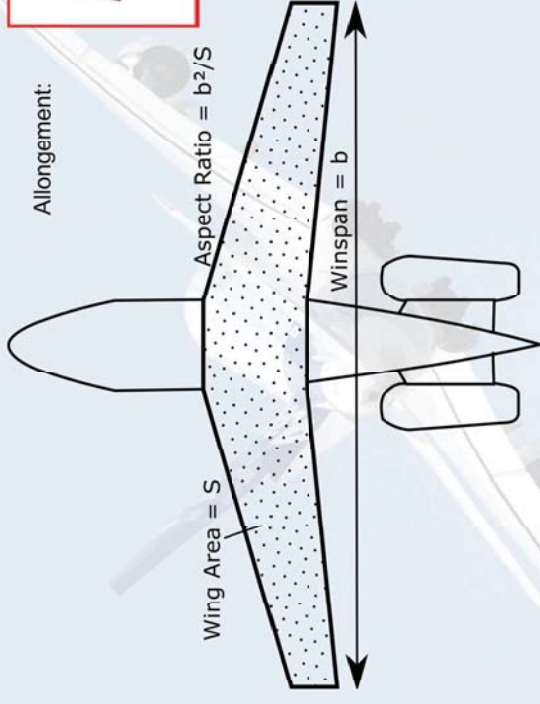


29/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Allongement:

$$\lambda = \frac{b^2}{S}$$



31/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Forme des ailes:  
Elliptiques - Biplan (Biplane)



30/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Dièdre nul



**Dièdre:** angle entre le plan d'une aile et l'horizontale.  
Généralement un dièdre positif stabilise l'appareil

Dièdre positif



Dièdre négatif



32/223



## II. L'aérodynamique des cellules

Position des ailes:  
Hautes (shoulder wings)  
Basses (low wings)  
Médianes (mid wings)



33/223

## II. L'aérodynamique des cellules

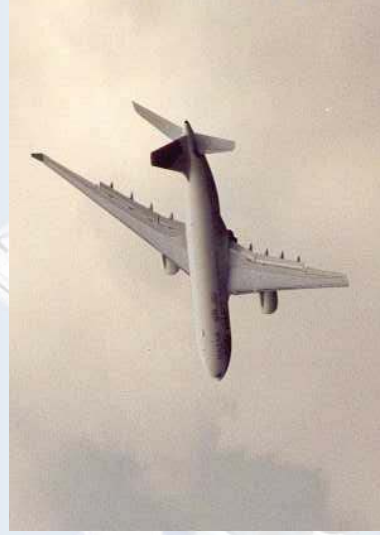
Formes de fuselages:  
En coque de bateau – en 8  
Elle peut être adaptée à des usages très spécifiques.



35/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Formes de fuselages:  
Carré - Cylindrique

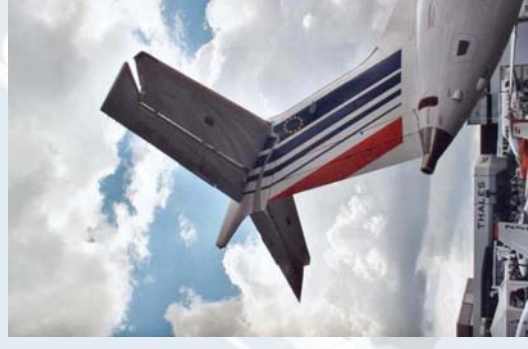


34/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Différentes géométries d'empennages:

Classique (classical) - en T (T tail)



36/223

## II. L'aérodynamique des cellules



Différentes géométries d'empennages:

Double dérive (**double fin**) de F18 pour éviter une dérive unique trop grande et sans empennage horizontal pour un M2000 à aile delta.



37/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Les ailes de vol libre n'ont pas d'empennage ce qui les rend assez instables en lacet et impose un pilotage 2 axes (lacet et roulis sont toujours conjugués).



Praglider  
Hang-glider



39/223

## II. L'aérodynamique des cellules

Différentes géométries d'empennages:

Papillon (**V tail**) d'un CM170 (profondeur et direction mixées)  
Cruciforme d'un CL415T



38/223

## IV. Les trains d'atterrissage.

Landing gear



Train classique.  
Tail wheel gear



Train tricycle.  
Tricycle gear

Angle de garde

40/223



## IV. Les trains d'atterrissage.



Train simple.



Diabolo.

41/223

## IV. Les trains d'atterrissage.



Vérin actionneur Hydraulic jack  
Jambe de train  
Triangle de guidage  
Roues Wheels

43/223

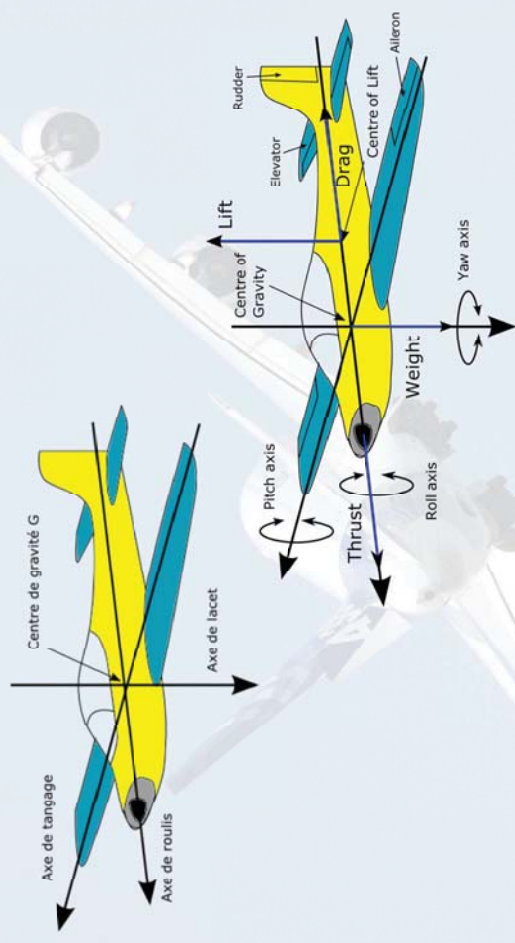
## IV. Les trains d'atterrissage.



Boggie

42/223

## V. Les commandes de vol.



Les axes du mouvement – Motion axis

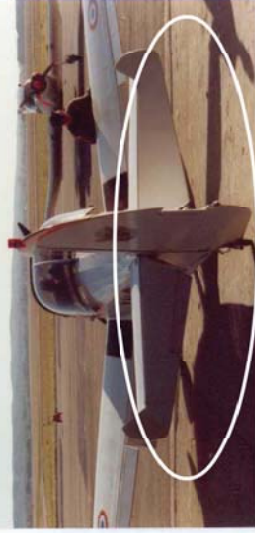
44/223

## V. Les commandes de vol.

Le contrôle en tangage. - Pitch control



Commande de profondeur (manche) et gouvernes de profondeur.

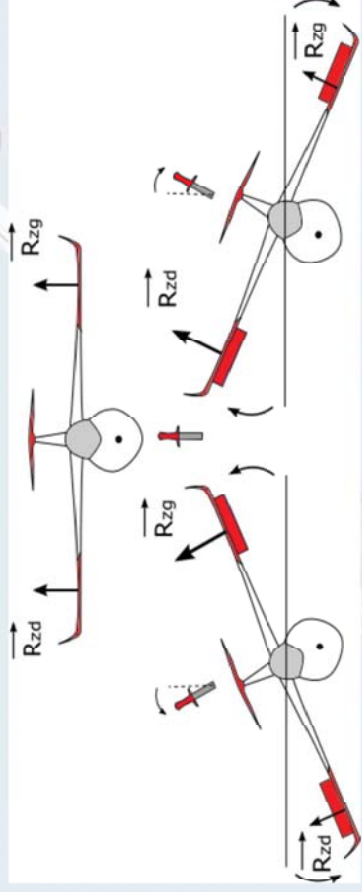


Command : the stick aft and forward ; Controls : elevators

45/223

## V. Les commandes de vol.

Le contrôle en roulis – roll control



Commande de gauchissement (manche).  
Effet secondaire: lacet inverse.

Command : the stick left and right ; Controls : ailerons

47/223

## V. Les commandes de vol.

Elévateurs ou gouvernes de profondeur.



46/223

## V. Les commandes de vol.

Ailerons.

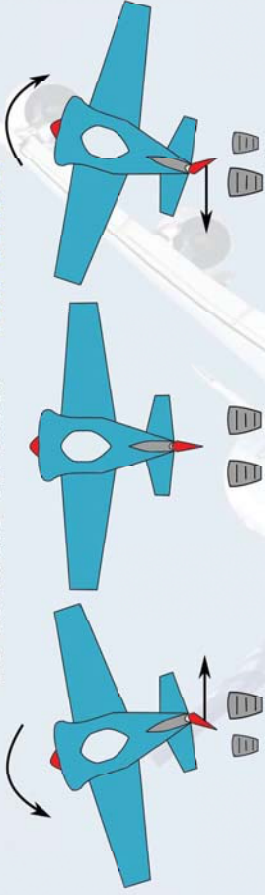


48/223



## V. Les commandes de vol.

Le contrôle en lacet – Yaw control



La commande (palonnier) et la gouverne de direction.  
Effet secondaire: roulis induit.

Command : the rudder pedals ; Controls : rudder

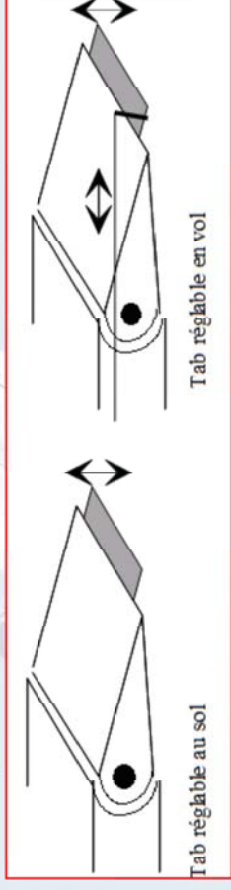


49/223

## V. Les commandes de vol.

La compensation des gouvernes:

- Les compensateurs d'évolution: les TAB
- Limiter les efforts du pilote pour bouger les gouvernes
- Fixes (en général)
- Les compensateurs de régime : les TRIM
- Annuler les efforts en vol stabilisé
- Réglables en vol



51/223

## V. Les commandes de vol.



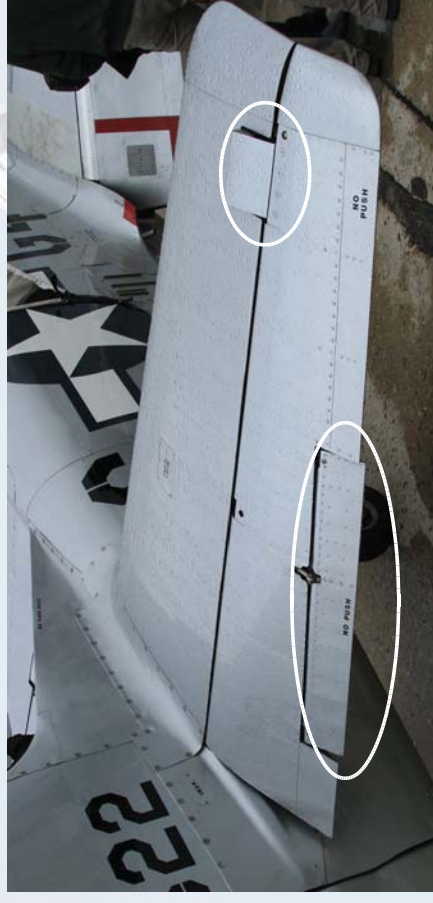
Les gouvernes hybrides.



Flaperons = volets + ailerons  
Élevons = élévateurs + ailerons  
...

50/223

## V. Les commandes de vol.



TRIM

TAB

52/223

## V. Les commandes de vol.

Il existe 3 dispositifs de transmission:

- Par câbles (prise directe sur les commandes pour les avions légers et lents).
- Par bielles (transmission comme pour les câbles ou action sur des servocommandes hydrauliques pour des avions plus lourds ou plus rapides).
- Par câbles électriques (transmission de commandes électriques vers des servos hydrauliques ou des moteurs électriques. CDVE = Commandes De Vol Electriques ou **FBW = Fly By Wire**).
- Dans le futur il est possible que l'on remplace les câbles par des fibres optiques: **FBO = Fly by Optics**

53/223

## V. Les commandes de vol.

Principe de fonctionnement d'un gauchissement par câbles:

- Incliner le manche à droite permet de lever l'aileron droit et baisser l'aileron gauche.
- L'aile droite s'abaisse et l'aile gauche se lève.
- L'avion s'incline à droite et part en virage.
- Incliner le manche à gauche provoque l'effet inverse.

55/223

## V. Les commandes de vol.

Principe de fonctionnement d'une profondeur par câbles:

- tirer sur le manche permet de lever les gouvernes de profondeur.
- la queue de l'avion s'abaisse et le nez se lève.
- l'avion monte.
- pousser sur la profondeur provoque l'effet inverse

Avec des bielles on peut actionner des servocommandes hydrauliques.

54/223

## V. Les commandes de vol.

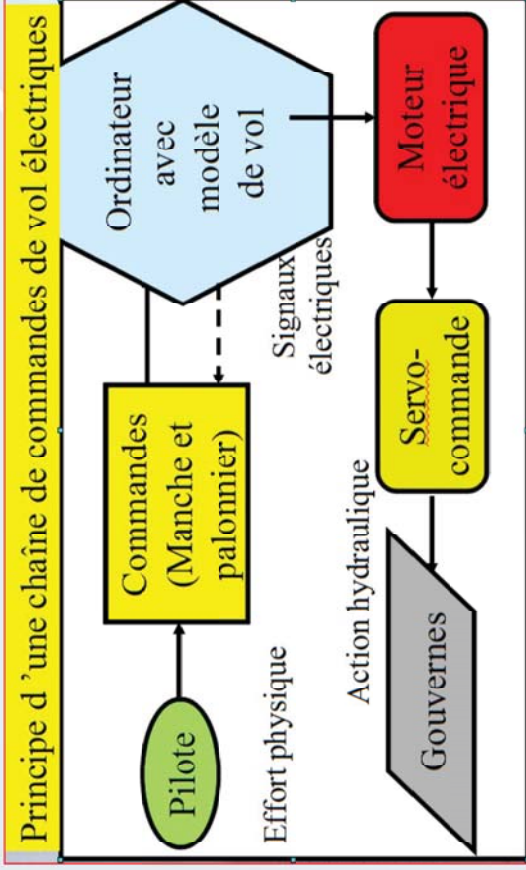
Principe de fonctionnement d'une direction par câbles:

- Enfoncer la pédale de gauche fait dévier la gouverne de direction vers la gauche.
- Une force se crée alors sur la dérive qui entraîne du lacet à gauche.
- Enfoncer la pédale de droite provoque l'effet inverse.

56/223



## V. Les commandes de vol.



Dans les commandes de vol électriques, il n'y a pas de liaison directe entre les commandes et les gouvernes. Le pilote utilise les commandes pour indiquer à l'ordinateur ce qu'il veut suivre. Celui-ci choisit ce qu'il déplace, comme les gouvernes et avec quelle amplitude.

59/223

## VI. Structure d'un avion.

- Matériaux de construction:
  - Bois (épicéa, acajou, frêne, sapin)
  - Toile (dacron, lin, coton)
  - Tube métallique (duralumin: aluminium + cuivre)
  - Tôle métallique (duralumin)
  - Poutres métalliques (alliages de titane)
  - Composites (carbone et polymères)

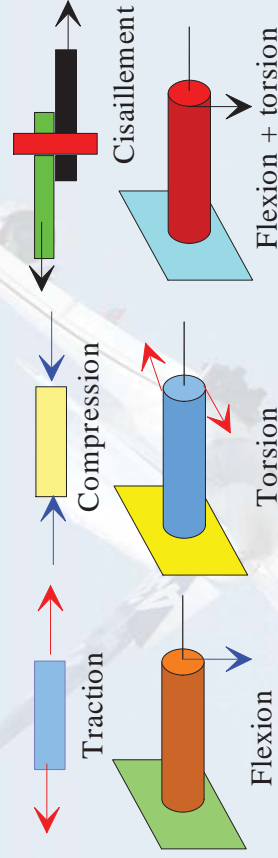
## VI. Structure d'un avion.

Structure bois et toile.



60/223

Efforts s'appliquant sur la structure des aéronefs.



58/223

## VI. Structure d'un avion.

Structure bois et contre-plaqué.



61/223

## VI. Structure d'un avion.

Structure composite.



63/223

## VI. Structure d'un avion.

Structure métallique.



62/223

## VI. Structure d'un avion.

- Structures de fuselage:
  - Treillis
  - Géodésique
  - Monocoque
  - Semi-monocoque
- Structures des ailes et empennages:
  - Monocoque
  - Semi-monocoque
  - Caisson

64/223



## VI. Structure d'un avion.

Semi-monocoque

Cadre - Frame



Longeron  
Spar

Revêtement non travaillant  
Non working skin

65/223

## VI. Structure d'un avion.

Structure en treillis



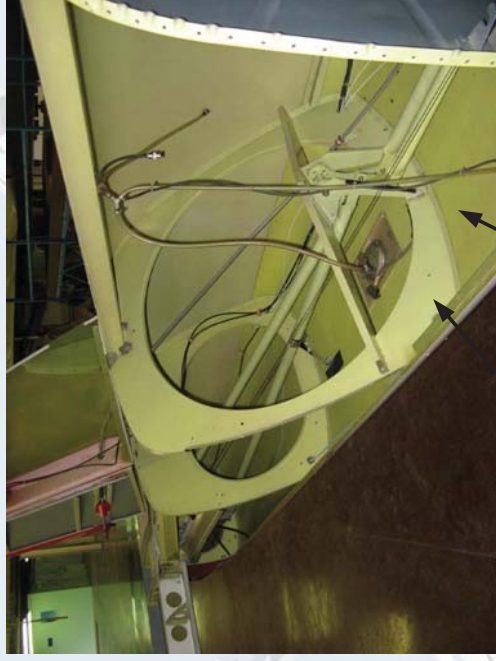
traverse

Longeron  
Spar

67/223

## VI. Structure d'un avion.

Monocoque



Cadre  
Frame

Revêtement travaillant  
Working skin

66/223

## VI. Structure d'un avion.

Structure d'une aile.



Longeron

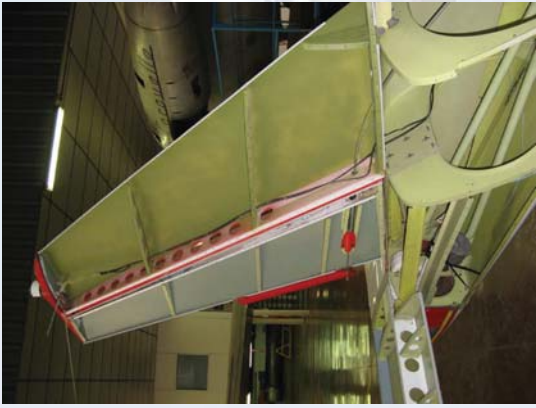
Spar

Nervure

Rib

68/223

## VI. Structure d'un avion.



Structure d'un empennage.



69/223

## Développement de l'aéronautique.

### 1914 à 1918 : un développement rapide lié à la guerre

• Les missions et leurs exigences :

- La reconnaissance : les avions doivent avoir une bonne autonomie pour aller loin en territoire ennemi. Ils doivent aller vite pour éviter d'être interceptés et voler haut pour se mettre à l'abri de l'artillerie anti-aérienne.
- Le bombardement tactique : les avions doivent emporter une charge de bombes correcte et pouvoir la larguer avec précision.
- Le bombardement stratégique : les avions doivent avoir une grande autonomie pour pénétrer loin en territoire ennemi. Ils doivent emporter une charge très importante de bombes et voler haut pour éviter l'artillerie anti-aérienne et les chasseurs.
- La chasse : Il faut des avions très rapides et avec un bon plafond pour intercepter les avions ennemis. Ils doivent être très maniables pour pouvoir manœuvrer autour de leur cible et être bien armés de mitrailleuses à cadence de tir rapides munies de nombreuses munitions.

71/223

## Connaissance des aéronefs



Moteurs

70/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les moteurs progressent vite pour répondre à la demande de puissance :
- Les progrès du moteur à piston sont les garants du progrès
- 1914 puissance de 100 CV sur des moteurs en ligne, en V, en étoile et rotatifs.
- 1918 puissance de 200 à 400 CV
- La fiabilité augmente



72/223



## Développement de l'aéronautique.

- L'aérodynamique des cellules aussi :
- Les fuselages prennent une forme arrondie et sont recouverts de toile
- Les profils d'aile s'épaississent
- Le biplan reste de mise
- L'hélice se perfectionne (hélice éclair)



Blériot XI  
et  
Morane Type H  
utilisés au début  
des hostilités.

73/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les performances suivent :
- La vitesse passe de 120 à 220 km/h
- Le plafond passe de 1200 à plus de 6000 m
- La charge utile passe de 250 à 2500 kg



Airco DH2  
Vickers VIMY



75/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'aérodynamique des cellules aussi :



Royal Factory SE5A  
Fokker Dr I



SPAD XIII  
Fokker D VII



74/223

## Développement de l'aéronautique.

1918 à 1939 : L'aviation commerciale se développe

- Avec le transport du courrier, notamment en France et aux États Unis
- Lignes Aériennes Latécoère (1919-1927) → la Compagnie Générale Aéropostale (1927-1933)
  - Ligne Toulouse – Casablanca – Dakar
  - Rio – Recife
- 1930 la ligne est aérienne y compris au dessus de l'Atlantique
- Extension du réseau en Amérique du Sud



76/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les balbutiements du transport de passagers :
  - 1<sup>ère</sup> ligne régulière en 1914 entre St. Petersburg et Tampa (Floride) avec 1 passager (dure 3 mois)
  - 1918 développement de lignes avec des bombardiers convertis (2 à 3 passagers)
  - 1919 apparition d'avion dédiés avec une cabine pour les passagers (10 à 12)
  - Dans les années 1930 de nombreuses compagnies exploitent des lignes plus ou moins régulières en avion ou hydravion
  - Les appareils emportent peu de passagers (- de 20) et le vol, qui se fait à vue, dépend beaucoup de la météorologie.

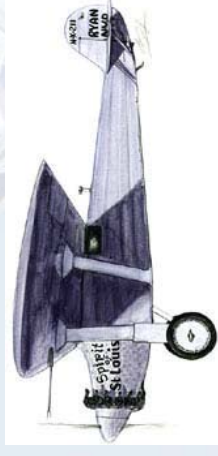


De Havilland Dragonfly

77/223

## Développement de l'aéronautique.

- La traversée de l'Atlantique :
  - 1<sup>ère</sup> traversée en juin 1919 par ALCOCK et BOWN sur Vickers VIMY entre Terre-Neuve et l'Irlande
  - New York - Paris le 21 mai 1927 par Charles Lindbergh sur le Ryan « Spirit of Saint-Louis ».
  - Paris – New York le 3 septembre 1930 par COSTES et BELLONTE sur Breguet 19 « Point d'interrogation » après la disparition de NUNGESSER et COLIS sur « l'Oiseau Blanc » en 1927.



79/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les grands raids nourrissent l'imaginaire et aident au développement des machines :
  - Le franchissement des montagnes :
    - Les Alpes le 23 septembre 1910 par Jorge CHAVEZ en Blériot XI



- Les Andes le 1<sup>er</sup> avril 1921 par Adrienne BOLLAND en Caudron G3



- Les traversées de continents avec ou sans escales se succèdent

78/223

## Développement de l'aéronautique.

- La traversée de l'Atlantique :
  - La première traversée féminine fut réalisée par Amelia EARHART le 20 mai 1932 seule en Lockheed Vega 5B.
  - L'Atlantique Sud est franchi le 15 octobre 1927 Par COSTES et Le BRIX sur Bréguet 19 « Nungesser et Colis ».
  - Cette route sera empruntée par les Latécoères 28 de l'Aéropostale à partir du 13 mai 1930.



Lockheed VEGA



80/223



## Développement de l'aéronautique.

- La traversée du Pacifique :
- Les premières traversées sont effectuées par des hydravions
- La première traversée sans escale par un avion est réalisée le 4 octobre 1931 par PANGBORN et HERNDON sur le « Miss Veedol ».
- Amélia Hearhart disparut en 1937 lors de sa traversée après avoir rencontré une météo défavorable et des ennuis mécaniques à bord de son Lockheed Electra.



Bellanca Miss Veedol

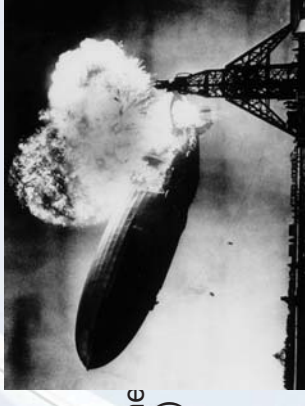


Lockheed L12 Electra

81/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les dirigeables lancent le mouvement
- Dès 1910, les allemands développent des dirigeables capables d'emporter un nombre de passagers plus élevé que les avions et sur de plus grandes distances
- Des traversées transatlantiques régulières sont organisées
- Mais les espoirs s'envolent en fumée :
- Les aéronefs gonflés à l'hydrogène s'avèrent dangereux et l'Hélium qui peut le remplacer est rare et cher.
- 6 mai 1937, l'Hindenburg (New Jersey) à l'arrivée à Lakehurst (New Jersey) faisant de nombreuses victimes.
- D'autres sont perdus en raison de leur fragilité sous la tempête.
- Ils seront alors abandonnés.



83/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les compétitions de vitesse participent aussi aux progrès :
- La coupe Schneider, destinée aux hydravions, encourage le développement d'avions rapides. La dernière est remportée en 1931 par un avion de la firme britannique Supermarine, dessiné par l'ingénieur Reginald MITCHELL, qui préfigure le célèbre Spitfire qu'il en a extrapolé.



Supermarine S6B

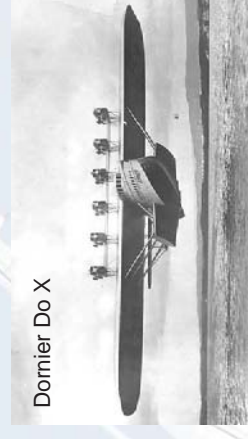
84/223

## Développement de l'aéronautique.

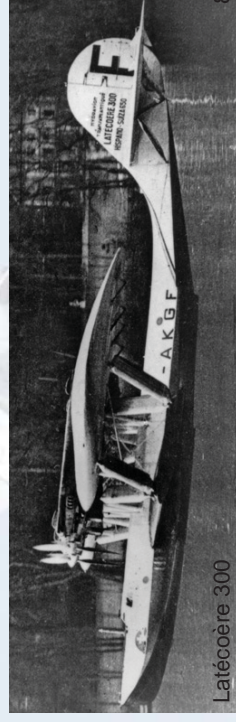
- Le transport des passagers au dessus des océans se développe avec les hydravions à partir de 1919 et restera bien en avance sur l'avion terrestre qui manque d'autonomie et ne trouve pas toujours d'escalas adaptées.



Boeing Clipper



Dornier Do X



Latécoère 300

84/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'avion est en retrait par son manque d'autonomie et de charge utile.
- Mais progresse : la puissance des moteurs augmente, l'aérodynamique progresse, la construction aussi et des perfectionnements font leur apparition (train rentrant...)
- A la veille de la seconde guerre mondiale les avions de ligne emportent de 15 à 20 passagers à une vitesse de 300 à 350 km/h

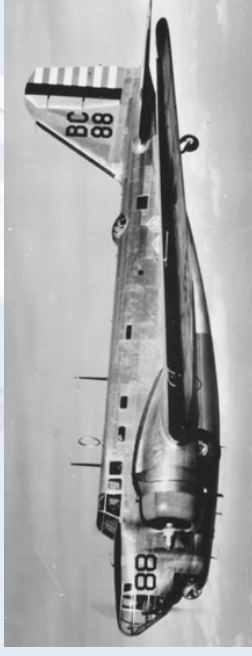


85/223

## Développement de l'aéronautique.

### Le développement de l'aviation militaire :

- Chez les américains : les progrès sont importants
- L'industrie aéronautique américaine n'a véritablement commencé que pendant la Première Guerre mondiale en produisant des modèles sous licence.
- Elle a su progresser et développer ses propres modèles, notamment grâce à la création du NACA en 1915 (future NASA)



Douglas B18  
P = 2 x 1000CV  
Vmax = 346km/h  
Plafond = 7280m  
Charge utile = 2600kg

87/223

## Développement de l'aéronautique.

### Les premières grandes compagnies aériennes naissent :

- Pan American (1926 à 1991) :
- développée par Juan TRIPPE
- transport de fret et de passagers
- étend son réseau à l'ensemble du monde



### Trans World Airlines (1925) :

- développée par le milliardaire Howard HUGUES
- grande concurrente de Pan American à leurs débuts



### Lufthansa (1926)

- compagnie nationale allemande
- développement rapide car l'état allemand qui ne peut pas développer d'armée de l'air entre les deux guerres l'utilise pour préparer ses futures forces de la Luftwaffe



**Lufthansa**

86/223

## Développement de l'aéronautique.

### Le développement de l'aviation militaire :

- Les états unis développent beaucoup leur flotte de portes-avions et leur aviation embarquée



Curtiss P36 Hawk  
P = 950CV  
Vmax = 520km/h  
Plafond = 10000m  
Charge utile = 550kg

Grumman F4F Wildcat  
P = 1200CV  
Vmax = 530km/h  
Plafond = 11430m  
Charge utile = 550kg



88/223



## Développement de l'aéronautique.

- Chez les français et les anglais :
  - Abandon tardif des biplans trop lents
  - Résistance aux progrès (cockpits fermés, instrumentation moderne, radio embarquée...)
  - Mais des progrès importants à la veille de la guerre



Morane Saulnier MS406  
P = 860CV  
Vmax = 486km/h  
Plafond = 9850m  
Charge utile = 700kg

89/223

## Développement de l'aéronautique.

- Chez les français et les anglais :

Hawker Hurricane  
P = 1300CV  
Vmax = 510km/h  
Plafond = 11000m  
Charge utile = 800kg



Supermarine spitfire  
P = 1040CV  
Vmax = 557km/h  
Plafond = 9300m  
Charge utile = 600kg

91/223

## Développement de l'aéronautique.

- Chez les français et les anglais :

Dewoitine D250  
P = 935CV  
Vmax = 540km/h  
Plafond = 11000m  
Charge utile = 580kg



Lioré et Olivier LeO 45  
P = 2 x 1060CV  
Vmax = 495km/h  
Plafond = 9000m  
Charge utile = 3600kg



90/223

## Développement de l'aéronautique.

- Chez les français et les anglais :

Vickers Wellington  
P = 2 x 1055CV  
Vmax = 410km/h  
Plafond = 6700m  
Charge utile = 2040kg



Bristol Blenheim  
P = 2 x 840CV  
Vmax = 450km/h  
Plafond = 8500m  
Charge utile = 450kg

92/223

## Développement de l'aéronautique.

- Chez les allemands :
  - La guerre se prépare avec le développement d'avion modernes et adaptés à leur mission :
  - Le Messerschmitt 109
  - Le Heinkel 111



Heinkel 111  
P = 2 x 1350CV  
Vmax = 435km/h  
Plafond = 8500m  
Charge utile = 2000kg

Messerschmitt Bf109  
P = 1175CV  
Vmax = 560km/h  
Plafond = 10500m  
Charge utile = 600kg



93/223

## Connaissance des aéronefs : Moteurs

- I. L'hélice
- II. Les moteurs à pistons
- III. Les turbo réacteurs
- IV. Les statoréacteurs et les pulsoréacteurs
- V. Les turbopropulseurs
- VI. Les moteurs fusée
- VII. Les moteurs électriques

95/223

## Développement de l'aéronautique.

- Chez les allemands :
  - La guerre se prépare avec le développement d'avion modernes et adaptés à leur mission :
  - Le junker 87 Stuka



Junkers 87 Stuka  
P = 1200CV  
Vmax = 310km/h  
Plafond = 8000m  
Charge utile = 500kg

94/223

## I. L'hélice – The propeller

- Extrapolée de l'hélice navale.
- Constituée de plusieurs pales (blades)
  - 2 = bipale
  - 3 = tripale
  - 4 = quadripale ...
- La forme des pales est plus ou moins complexe
- Construction en :
  - Bois
  - Métal
  - Matériau composite



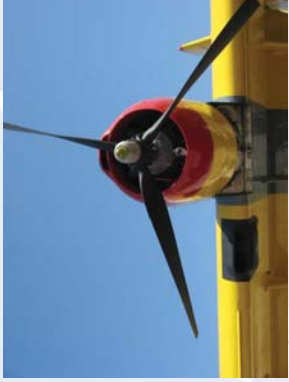
96/223



## I. L'hélice



Bipale



Tripale



Quadrupale



2 hélices contrarotatives couplées

97/223

## I. L'hélice

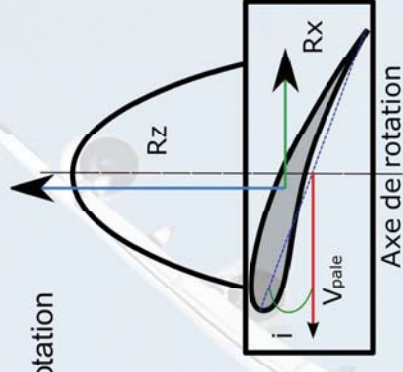
- Cr donne incidence  $i$  dans l'air pendant rotation
  - => résultante forces aérodynamiques
    - Rz équivalent d'une portance
    - Rx traînée
- => force de traction.

- La casserole d'hélice permet d'améliorer l'écoulement sur les pales.

$$r = \frac{P_{utile}}{P_{absorbée}}$$

- Rendement de l'hélice :
- Pour un calage donné le rendement dépend de la vitesse.

99/223



## I. L'hélice

- Le profil d'une pale est similaire à un profil d'aile.

- L'angle de calage Cr

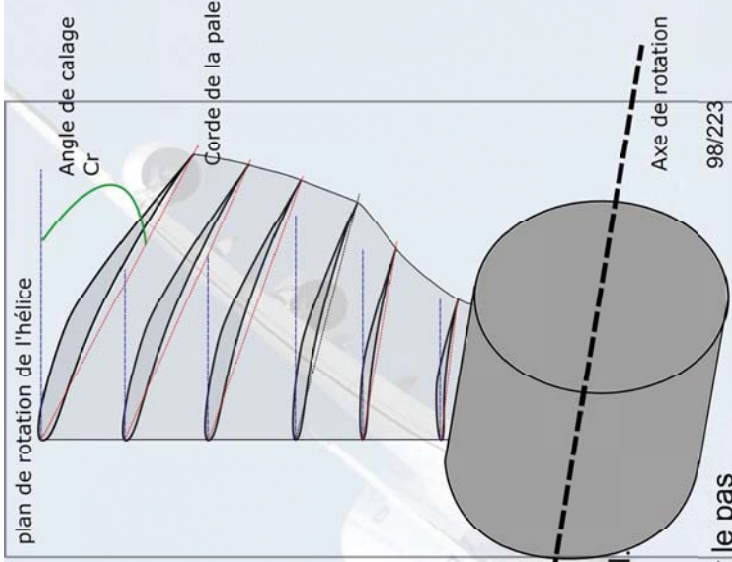
évolue depuis l'axe vers l'extrémité de la pale.

- Pas de l'hélice = avance dans l'air en un tour.

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \tan(Cr)$$

$r$  = distance de l'axe au profil.

- Hélice vrillée pour conserver le pas



98/223

## I. L'hélice

- Calage fixe => optimisé pour la croisière.

- Pas variable :

- Petit pas = grande puissance

=> décollage, atterrissage et manoeuvre

- Grand pas = grande efficacité

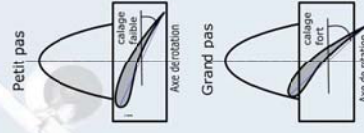
=> croisière

- L'hélice peut être :

- Tractrice si placée à l'avant
- Propulsive si placée à l'arrière

- Pour freiner on peut réaliser un changement de pas pour obtenir une inversion de traction.

100/223





## I. L'hélice

- Les régimes de l'hélice :
  - Normal : fournit une traction mais consomme de la puissance pour vaincre sa traînée.
  - Transparence : à une certaine vitesse avion, pour un calage et une vitesse de rotation donnés, la traction devient nulle ( $i=0$ ). L'hélice ne fournit plus de traction mais consomme de la puissance en raison de sa traînée.
  - Freinage : mêmes conditions, si  $V_a \uparrow$ ,  $i$  devient  $<0$  l'hélice freine l'avion et consomme de la puissance en raison de sa traînée.
  - Moulinet : rotation hélice par la vitesse aérodynamique (moteur arrêté) mais l'hélice freine toujours l'avion.
  - Inversion de poussée : calage  $< 0 \Rightarrow$  freinage important (au sol). L'hélice fournit un freinage important et consomme de l'énergie pour vaincre sa traînée.
  - Drapeau : calage à  $90^\circ \Rightarrow$  très peu de traînée et pas de traction. C'est la position la moins pénalisante en cas de panne moteur.

101/223

## II. Les moteurs à pistons.

- Constitution du moteur : + animation YouTube
- Un mélange d'air et de carburant vaporisé est introduit dans le cylindre.
- Le piston comprime le mélange.
- Une bougie fournit une étincelle qui enflamme le mélange.
- La combustion fournit de l'énergie pour renvoyer le piston et faire tourner l'arbre moteur.

103/223

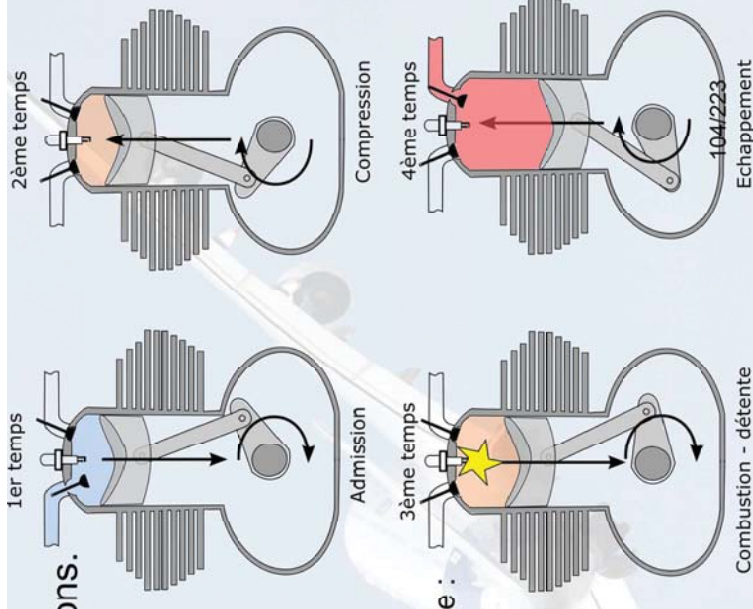
## II. Les moteurs à pistons.

- 1: pipe d'admission
- 2: soupape d'admission
- 3: bougie
- 4: soupape d'échappement (exhaust valve)
- 5: pipe d'échappement
- 6: chambre de combustion
- 7: ailettes de refroidissement
- 8: piston
- 9: bielle (connecting rod)
- 10: vilebrequin (crankshaft)
- 11: carter (crankcase)

102/223

## II. Les moteurs à pistons.

- 1. Admission :
- 2. Compression :
- 3. Combustion – détente : temps moteur du cycle
- 4. Echappement :



104/223

Combustion - détente

Echappement



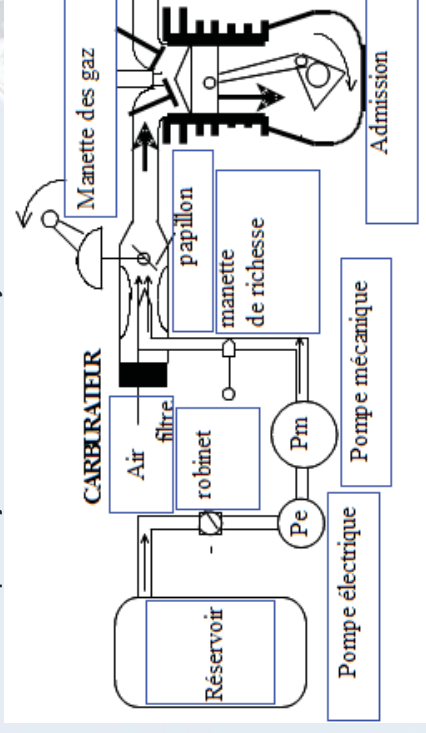
## II. Les moteurs à pistons.

- Même principe que les moteurs de voiture mais en alliages plus légers.
- 4 à 8 cylindres en général. Jusqu'à 24.
- Disposition des cylindres :
  - A plat
  - En V
  - En étoile
- L'allumage est assuré par un double circuit de magneto
- Les moteurs plus puissants sont turbocompressés pour maintenir la puissance en altitude.

105/223

## II. Les moteurs à pistons.

- Le mélange air – carburant peut se faire par un carburateur ou directement par injection dans le cylindre.



- La manette de richesse permet de régler le mélange air – carburant (1g pour 15g en proportions stoechiométriques).
- Le mélange est réglé pour être riche (1,25).

107/223

## II. Les moteurs à pistons.



4 cylindres à plat diesel - 7 cylindres rotatifs en étoile



Écorché d'un cylindre.  
12 cylindres en V

106/223

## II. Les moteurs à pistons.

- Les essences :
  - pouvoir calorifique élevé
  - bonne résistance à la détonation
- Pour qualifier les essence on utilise un « indice d'octane » :
  - indice 0 : extrêmement détonant
  - indice 100 : très peu détonant

indice d'octane de 80 = pouvoir antidétonnant d'un mélange de 80% d'octane et 20% d'heptane.

- Le plomb permet de diminuer le pouvoir détonnant d'un mélange et sert de lubrifiant
- Grades = indices d'octane mélanges pauvres et mélanges riches.

La couleur des essences est révélatrice de leurs grades :

- 80/87 : rose (aviation)
- 100LL : bleue (aviation)
- 100/130 : verte (aviation)
- 115/145 : violette
- sans plomb : blanche

108/223

## II. Les moteurs à pistons.

- Certains moteurs d'avion sont réglés pour fonctionner au carburant automobile et même au diesel.
- L'essence doit être adaptée au moteur : un indice d'octane plus élevé entraîne un encrassement du moteur par mauvaise combustion et un indice plus faible peut détruire le moteur par une augmentation excessive de la température et une détonation trop violente.
- Lorsque la température d'admission augmente, la puissance diminue (1% pour 6°C)
- A température constante l'augmentation de l'humidité de l'air diminue la puissance (+1g d'eau pour 100g d'air => -4% de P)
- Avec l'altitude, la densité de l'air et la pression d'admission diminuent => la puissance moteur diminue, il faut ajuster la richesse en diminuant l'admission de carburant. (z = 5000m => P/2)
- Pour maintenir la densité de l'air on utilise un compresseur (suralimentation) et on peut parfois aller au delà (surcompression) pour augmenter le rendement.

109/223

## II. Les moteurs à pistons.

- Performances :
  - Puissances de 60 à + de 3000ch (2,2MW)
  - Vitesses jusqu'à + de 700 km/h
- Utilisation :
  - Aviation de tourisme
  - Par le passé également avions de combat et avions de ligne

111/223

## II. Les moteurs à pistons.

- Contrôle du fonctionnement :
  - Tachymètre
  - T° et P d'huile
  - P carburant ou débit et p admission



## II. Les moteurs à pistons.

- Les effets secondaires de l'hélice :
  - Le souffle hélicoïdal : l'écoulement hélicoïdal de l'air derrière l'hélice a tendance à entraîner l'avion en lacet du côté de la pale montante (vue depuis le pilote).
  - Le couple de renversement : par réaction à la rotation de l'hélice, l'avion a tendance à partir en roulis dans le sens opposé. Cet effet n'est sensible que sur les moteurs de forte puissance.
  - Le couple gyroscopique : toutes les masses en rotation ont tendance à s'opposer aux mouvements pour conserver la direction de leur axe de rotation (toupie). Cela entraîne un mouvement parasite; Pour une hélice en rotation dans le sens des aiguilles d'un montre (vue depuis le pilote):
    - Une action à piquer entraîne un déviation à gauche
    - Une action à cabrer entraîne une déviation à droite
    - Une action à gauche sur le palonnier cabre l'avion
    - Une action à droite sur le palonnier fait piquer l'avion

112/223



## Développement de l'aéronautique.

### 1935 – 1945 La Seconde Guerre mondiale accélère de nouveau le développement de l'aviation :

- L'utilisation massive du bombardement stratégique impose de développer des appareils à très long rayon d'action, avec une capacité d'emport très importante et volant à très haute altitude, donc pressurisés.
- Les moteurs doivent donc progresser en puissance et en fiabilité.
- Les chasseurs doivent progresser pour pouvoir intercepter les bombardiers stratégiques.
- La nécessité de transporter des quantités très importantes d'hommes et de matériels sur tous les fronts impose le développement d'avions de transport de troupes et de fret performants.

11/3/223

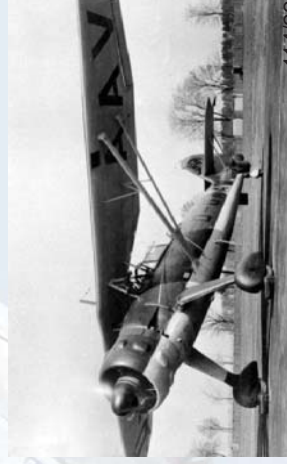
## Développement de l'aéronautique.

- Le développement du bombardement stratégique :
  - Les allemands bombardent massivement l'Angleterre pour préparer l'invasion.
  - Les anglais répliquent par le bombardement stratégique des villes allemandes la nuit.
  - Les allemands déclenchent le Blitz sur Londres et les grandes villes anglaises.
- Le 7 décembre 1941, les Japonais attaquent Pearl Harbor. Les américains entrent en guerre.
- Ils bombardent l'Allemagne de jour.
- Et les grandes villes japonaises dès que leurs bombardiers stratégiques le permettent.

11/5/223

## Développement de l'aéronautique.

- La blitzkrieg :
  - En mai 1940 les allemands passent à l'attaque et mettent en pratique la Blitzkrieg qu'ils ont mise au point lors de la guerre d'Espagne de 1936 à 1939.
  - Pour la première fois les armes aériennes et terrestres sont utilisées en complète intégration : bombardements d'interdiction préparatoires (infrastructures et voies de communications) par les He 111 couverts par les Bf 109 suivis d'une offensive terrestre appuyée par les Ju 87 alors que les Hs126 reconnaissent les cibles.



11/4/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les bombardiers stratégiques américains et britanniques :

Boeing B17 Flying Fortress 1938  
4 x 1200CV – 460km/h - 10850m  
2750kg de bombes



Consolidated B24 Liberator 1941  
4 x 1200CV – 470km/h - 8500m  
2300kg de bombes



Avro Lancaster 1942  
4 x 1280CV – 450km/h - 6500m  
6500kg de bombes

11/6/223

## Développement de l'aéronautique.

- Le développement massif du transport aérien :
  - Les fronts sont vastes et très éloignés des territoires nationaux (Afrique, Asie, îles du Pacifique...)
  - Il faut transporter des troupes vers les fronts rapidement.
  - Il faut ravitailler les troupes en vivres et munitions.
  - Instauration de ponts aériens des États Unis vers l'Europe et en Asie au dessus de l'Himalaya.

Douglas C47 Skytrain  
2 x 1200CV – 360km/h - 6500m  
Capacité de 28 passagers



Junkers Ju52 Tante Ju  
3 x 715CV – 265km/h - 5500m  
Capacité de 18 passagers

117/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les chasseurs américains de la fin de la guerre :

North american P51D Mustang  
P = 1700CV  
Vmax = 703km/h  
Plafond = 11280m  
Charge utile = 900kg



Lockheed P38 Lightning  
P = 2 x 1725CV  
Vmax = 712km/h  
Plafond = 13400m  
Charge utile = 2000kg

119/223



## Développement de l'aéronautique.

- L'amélioration des chasseurs :
  - Au début de la guerre la vitesse des chasseurs est aux alentours des 530km/h, leur plafond est d'environ 8000m et leur rayon d'action de 800km.
  - A la fin de la guerre la vitesse des chasseurs est aux alentours des 700km/h, leur plafond est d'environ 12000m et leur rayon d'action de 1500km.
  - La puissance des moteurs est passée de 1000CV à plus de 2500CV.
  - Les chasseurs ont dû gagner en plafond pour intercepter les bombardiers stratégiques, en autonomie pour les escorter en territoire ennemi et en vitesse pour affronter les chasseurs ennemis.

118/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les chasseurs britanniques de la fin de la guerre :

Supermarine Spitfire MkXIV  
P = 2080CV  
Vmax = 715km/h  
Plafond = 11000m  
Charge utile = 1000kg



Hawker tempest  
P = 2500CV  
Vmax = 700km/h  
Plafond = 11300m  
Charge utile = 1000kg



120/223



## Développement de l'aéronautique.

- Les chasseurs soviétiques de la fin de la guerre :

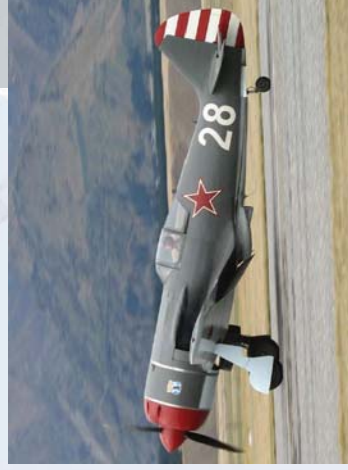
Yakovlev Yak 3

P = 1220CV

Vmax = 650km/h

Plafond = 11000m

Charge utile = 500kg



Lavotchine La 7

P = 1850CV

Vmax = 680km/h

Plafond = 11000m

Charge utile = 500kg

121/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'avènement des missiles balistiques :

- La guerre tourne en la défaveur de l'Allemagne et ses bombardiers subissent de lourdes pertes en bombardant la Grande Bretagne.

- Hitler veut raser Londres et compte sur de nouvelles armes : les V1 et V2.

Vergeltungswaffe V2



Vergeltungswaffe V1



3

## Développement de l'aéronautique.

- Les chasseurs allemands de la fin de la guerre :

Messerschmitt Bf109 K-4

P = 1550CV

Vmax = 730km/h

Plafond = 12500m

Charge utile = 1000kg



Focke Wulf Fw190D9 Dora

P = 1730CV

Vmax = 690km/h

Plafond = 10300m

Charge utile = 1000kg

122/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'avènement de l'arme nucléaire :

- Pour mettre fin à une guerre qui s'éternise les belligérants cherchent à mettre au point une arme de destruction massive : la bombe atomique.

- La physique nucléaire s'est développée peu avant guerre avec les premières avancées significatives (découverte des types de radioactivité, modèle de l'atome, physique quantique...).

- Les américains mettent en place le projet MANATHAN qui aboutit à la mise au point de la bombe A.

- Le 06 août 1945 la première bombe atomique, baptisée « Little Boy », explose au dessus d'Hiroshima et le 09 août, la seconde, baptisée « Fat Man », au dessus de Nagasaki. La reddition des japonais sera signée le 11.

124/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les deux bombes furent larguées par des Boeing B29 Superfortress : l'« Enola Gay » et le « Bockscar »



Little Boy  
Fat Man

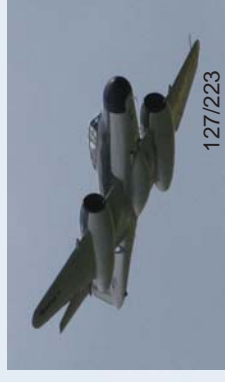


Boeing B29 superfortress

125/223

## Développement de l'aéronautique.

- Le Messerschmitt 262 Schwalbe :
  - plus rapide que n'importe quel chasseur allié (870km/h - 11500m) mais ses réacteurs manquent de fiabilité et la suprématie aérienne des alliés sur le territoire allemand les empêchent d'opérer correctement.
  - sa mission principale fut l'interception des bombardier alliés.
- Le Gloster Meteor :
  - moins rapide que le Me262 (768km/h) mais avec un très grand plafond (13100m)
  - s'est illustré dans la lutte contre les V1



## Développement de l'aéronautique.

- L'avènement du turbo réacteur :
  - La recherche de toujours plus de puissance amène les ingénieurs à rechercher de nouvelles idées.
  - En grande Bretagne Frank Whittle (1907-1996) met au point le turbo réacteur (W2/700) et le premier chasseur allié équipé de ce moteur, le Gloster Meteor entre en service ...
  - Mais les allemands ont pris de l'avance avec les réacteurs BMW Jumo qui équipent le Messerschmitt 262, premier chasseur à réaction opérationnel.



## Développement de l'aéronautique.

- **La guerre froide gonfle les budgets militaires :**
  - Après la guerre le monde se bipolarise.
  - Les 2 grands blocs se préparent à un affrontement et tentent de dissuader l'autre d'attaquer par une course aux armements conventionnels et nucléaires.
  - Les flottes d'avions de combat sont importantes :
    - Intercepteurs rapides
    - Bombardiers stratégiques
    - Bombardiers d'interdiction
    - Avion d'appui tactique et de lutte antichar
    - Avions de reconnaissance stratégique
  - Les missiles balistiques nucléaires sont une priorité.

128/223



## Développement de l'aéronautique.

- Les intercepteurs se développent :
  - plus vite et plus haut : le mur du son est franchi avec le Bell X1 le 14 octobre 1947
  - La poussée des réacteurs croît rapidement pour passer de 400 DaN à plus de 10 000 DaN
  - Les intercepteurs atteignent Mach 2 (Mirage III , F104 Starfighter, Mig 21...)
  - Et parfois même plus : Mach 3 (Mig 25 et Mig 31)
  - Ils s'équipent de missiles air – air et de radar embarqué



Bell X1

129/223

## Développement de l'aéronautique.



Mirage 2000

Mig 29



131/223

Su27 Flanker



F15 Eagle

## Développement de l'aéronautique.



F4 Phantom II



Mirage III



Mig 21

Su25 Frogfoot



A10 Thunderbolt II

Mig 31

130/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les avions d'appui et de lutte antichar se perfectionnent :
  - Des avions dédiés sont développés dans l'esprit de l'I112 Sturmovik et du Ju87 Suka : l'A10 Warthog et le Su25 Frogfoot
  - Leurs capacités de survie sont augmentées : blindage et leurres IR et EM contre les missiles.
  - Leur armement se perfectionne : missile à guidage TV ou laser et récepteur bombes à guidage GPS



132/223

## Développement de l'aéronautique.



Sepecat Jaguar

Su22 fitter



F16 Falcon



Tomado IDS



F117 Nighthawk

133/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les avions de reconnaissance stratégique amènent le renseignement :
- Les américains développent le U2 des « skunk works » de Lockheed puis le TR1
- Mais aussi le SR71 Blackbird.
- Les satellites amènent aujourd'hui une capacité de renseignement plus élevée.



SR71



U2  
TR1



135/223

## Développement de l'aéronautique.



Sepecat Jaguar

Su22 fitter



F16 Falcon



Tomado IDS



F117 Nighthawk

133/223

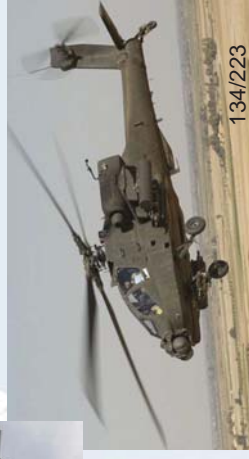
## Développement de l'aéronautique.

- Les hélicoptères de combat se développent dans les années 1980-90

Tigre HAP



Mi35 Hind



AH64 Apache

134/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les bombardiers stratégiques garantissent la dissuasion nucléaire :
- Les américains développent une lignée de bombardiers stratégiques qui aboutira au B52 et au bombardier furtif B2 Spirit.
- Les soviétiques développent aussi ce type d'appareils Tu95 Bear, Tu22M, Tu160 Blackjack.
- Les anglais et les français ne sont pas en reste avec les bombardiers V et le Mirage IV ( suivi du Mirage 2000N et du



B52 Stratofortress



Tu 95 Bear

136/223



## Développement de l'aéronautique.



B1 Lancer



Mirage IV



Tu22M Backfire



Tu160 Blackjack

137/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les avions AWACS de détection et de contrôle se développent :
  - Ils permettent de détecter des avions volant très bas.
  - Ils offrent une capacité de détection à grande distance lors d'opérations hors du territoire national



E3 Sentry  
E2 Hawkeye



139/223

## Développement de l'aéronautique.

### Développement de l'aéronautique.

- Le ravitaillement en vol s'impose :
  - Dès 1921 le ravitaillement en vol a été testé mais sans grand succès.
  - La guerre froide amène à le développer pour assurer la dissuasion nucléaire (permanence en vol, augmentation de l'autonomie des bombardiers).
  - Son intérêt s'étend aux intercepteurs qui assurent de longues missions de CAP (Combat Air Patrol).
  - Puis à tous les appareils de combat et même de transport pour assurer des missions à grande distance des bases de départ et avec une longue présence sur zone de combat.



138/223

### Développement de l'aéronautique.

- Face au développement des missiles sol-air et à la complexification des missions, l'avionique se perfectionne :
  - Années 60 : développement des radars aéroportés pour l'interception et le suivi de terrain
  - Années 70 : développement des systèmes de navigation inertiels et apparition des contre mesures électroniques
  - Années 80 : développement des leurres et du brouillage électronique et apparition de la furtivité (F117 Nighthawk)
  - Années 90 : perfectionnement de moyens de guerre électronique et apparition de la navigation par GPS
  - Années 2000 : les chasseurs sont de plus en plus discrets et équipés de capteurs optronique passifs

140/223

## Développement de l'aéronautique.

- Aux avions spécialisés comme l'intercepteur F22 Raptor et le bombardier stratégique B2 Spirit...



- ... succèdent des avion polyvalents comme le Rafale ou le Typhoon.



141/223

## Développement de l'aéronautique.

- Depuis la fin de la guerre froide :
  - Des guerres classiques :
    - La guerre de Malouines en 1981 voit la Grande Bretagne déployer une Task Force à des milliers de kilomètres des îles britanniques pour reprendre les Falklands envahies par l'Argentine.
    - Les 2 guerres du Golfe en 1991 et 2001 voient les américains mener une coalition pour libérer le Koweït puis envahir l'Irak afin de provoquer la chute de Saddam Hussein.
  - Des conflits asymétriques :
    - Les interventions russe puis américaine en Afghanistan dans les années 1980 puis 2000 ont lutté contre un ennemi moins équipé mais rompu à la guérilla dans un territoire très hostile.
    - Les interventions contre ISIS au moyen orient mettent en œuvre des bombardements tactiques contre un ennemi sans arme aérienne.

143/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les générations en phase de mise en service ou à venir augmentent leur polyvalence et leur furtivité.
- Un nouvel acteur semble émerger : la Chine.



Sukhoi T50



F35 Lightning II

Chengdu J20



142/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les drones se développent :
  - Développement rapide depuis le début des années 2000 :
    - Drones de surveillance (Global Hawk, Watchkeeper...)
    - Drone de renseignement tactique (Sprewer...)
    - Drone de combat tactique (Reaper...)
    - Drones de combat stratégique furtifs en développement aux États Unis (X47), y compris pour un emploi sur porte avion et avec capacité de ravitaillement en vol, et en Europe (NEURON)



RQ11 Raven



MQ9 Reaper

144/223



## Développement de l'aéronautique.

- Les drones de reconnaissance stratégique complètent les satellites : RQ4 Global Hawk



- Les drones de combat furtifs se dessinent comme le futur de l'aviation de combat : X45 et X47 (naval)



145/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les passagers :
  - Le transport massif de troupes des états unis vers l'Europe et le Pacifique devait parfois se faire plus rapidement et avec moins de risques que par la voie maritime.
  - Les opérations aéroportées se sont beaucoup développées.
  - Il a fallu des avions aux performances et à la fiabilité en conséquence.
- La nécessité de réguler et d'organiser le trafic aérien au niveau mondial est apparue :
  - L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale est créée le 7 décembre 1944 à Chicago.
  - Son existence officielle commence le 04 avril 1947.

147/223

## Développement de l'aéronautique.

La guerre lance véritablement le transport aérien en masse :

- Le Fret :
  - L'augmentation de la charge utile des avions cargo permet d'envisager un transport rapide de charges importantes
  - En 1945 le Douglas DC3 emporte 4t de fret à 300 km/h sur .
  - Dans les années 60 : le Boeing 707 cargo emporte 40t de fret à 800 km/h.
  - Dans les années 70 : apparition du Boeing 747 en version cargo il transporte 108t de fret à 900km/h sur 7500km.
  - Aujourd'hui : le B747-8F transporte 140t de fret sur 8000km.



146/223

## Développement de l'aéronautique.

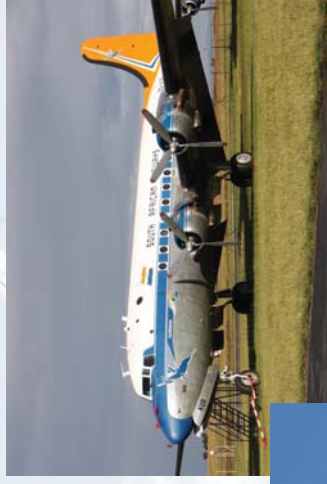
- Le Douglas C47 Dakota devient le DC3 :
  - Avion de transport standard de l'armée américaine.
  - 1er vol le 17 décembre 1935
  - Performances : croise à 330 km/h à 7000m d'altitude avec 20 à 30 passagers
  - En service jusque dans les années 70 dans certains pays d'Afrique



148/223

## Développement de l'aéronautique.

- Qui donne une lignée célèbre : DC4 et DC6 :
  - L'autonomie augmente
  - Le confort s'améliore (pressurisation)



149/223

## Développement de l'aéronautique.

- Les turbo réacteurs civils accélèrent le développement :
  - Les performances s'améliorent : plus de poussée, plus de fiabilité.
  - La consommation diminue : amélioration des chambres de combustion et des taux de compression, apparition des réacteurs double flux.
- De Havilland Comet : le précurseur malheureux
  - Performance : 40 à 80 passagers à la vitesse de 740 à 840 km/h sur 2500 à 5000 km selon les versions.
  - Mais un défaut structurel au niveau des hublots entraîne la perte de plusieurs appareils par décompression brutale.



151/223

## Développement de l'aéronautique.

- Lockheed développe le Constellation et le Super Constellation :
  - L'aérodynamique est poussée au maximum et le luxe s'installe à bord
  - Performances : croise à 470km/h avec 60 passagers
  - Couchettes disponibles pour les traversées transatlantiques.



150/223

## Développement de l'aéronautique.

- Boeing 707 : le grand gagnant
  - Premier avion à réaction civil fiable et performant entré en service en 1958.
  - Performances : 140 à 220 passagers sur 4600 à 10650 km à la vitesse de 900km/h
  - Produit à 1010 exemplaires
  - Certains exemplaires sont encore en service comme ravitailleurs en vol (KC-135)



152/223



## Développement de l'aéronautique.

- Les concurrents se réveilleront :
  - Douglas DC10 (1) et Mc Donnell Douglas MD11 (2)
  - Lockheed L1011 Tristar (4)
  - Sud-Ouest Aviation Caravelle (3)



1-2  
3-4



153/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'Europe développe le transport supersonique avec Concorde :
  - 1969: l'Europe mise sur la vitesse : Paris → New-York en 3h30
  - Mais les États Unis interdisent le survol supersonique de leur territoire et « tuent » l'avion qui a été mis en service le 21 janvier 1976.
  - Performances : Mach 2 avec 92 à 128 passagers sur 7200km.
  - Nombre d'avions produits : 20
  - Dernier vol le 26 novembre 2003.



155/223

## Développement de l'aéronautique.

- Le premier très gros porteur : le Boeing 747 Jumbo Jet
  - Sa mise en service en 1970 amène une nouvelle étape dans le transport aérien : le transport de masse.
  - Performances : 480 à 605 passagers à 900 km/h sur 9800 à 15000km selon les versions.
  - Nombre commandés (produits) : 1537 (1515)
  - Dernière version mise en service en 2011.



154/223

## Développement de l'aéronautique.

- Puis AIRBUS vient concurrencer Boeing sur les moyens porteurs avec l'A300 :
  - L'Europe s'organise en créant un consortium : Airbus prend naissance à la fin des années 60.
  - Un mécano industriel qui laisse perplexe au début mais fera ses preuves.
  - L'A300, qui entre en service en 1974 est un succès et donne naissance à l'A310 en 1983.



156/223

## Développement de l'aéronautique.

- Et sur tout le reste de la gamme :
  - L'A320 est une révolution que les compagnies attendaient et propulse Airbus au sommet au détriment du Boeing 737 qui détenait un quasi monopole dans sa catégorie
  - Cet avion mis en service en 1988 intègre les derniers développements de la technologie (commandes de vol électriques notamment) et apporte un gain considérable en performances.



A320

B737



157/223

## Développement de l'aéronautique.

- Et sur tout le reste de la gamme :
  - L'A380 devient le plus gros avion de transport civil du monde quand Boeing renonce à remplacer le 747.
  - Airbus possède désormais une gamme complète d'avions de ligne performants.



159/223

## Développement de l'aéronautique.

- Et sur tout le reste de la gamme :
  - L'A330 et l'A340 renforcent la position d'Airbus en apportant des longs courriers de grande capacité.
  - Airbus développe un concept de cockpits communs à toute sa gamme qui facilite le passage d'un avion à l'autre pour les équipages.



A330

A340-600



158/223

## Développement de l'aéronautique.

- Le duopole Boeing – Airbus :
  - Ils représentent la quasi totalité du marché des avions de ligne moyen et long courrier.
  - Entreprises réparties sur tous les continents ou presque.
  - Aucun concurrent possible à court ou moyen terme
  - Ils sont au sommet de la technologie avec leurs derniers nés : le B787 Dreamliner et l'A350 XWB



A350 XWB

B787 Dreamliner



160/223



## Développement de l'aéronautique.

- La concurrence tente d'exister :
  - Sur le continent américain :
  - Embraer avec la série des ERJ175 et 195



- Bombardier avec les CS100 et CS300 en développement



161/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'avenir proche :
  - Le développement des moteurs permet des gains en consommation et en performances qui rendent l'utilisation des avions récents plus rentables.
  - L'utilisation de carburants « verts » permet de limiter l'utilisation des carburants fossiles.
  - L'optimisation des cellules (aérodynamique et matériaux) améliore encore l'efficacité énergétique des avions mais les avionneurs atteignent les limites des concepts utilisés actuellement.

163/223

## Développement de l'aéronautique.

- La concurrence tente d'exister :
  - En Asie :
  - Comac avec des avions inspirés de l'A320 en développement.
  - Mitsubishi avec des jets régionaux



- En Europe :
  - Sukhoï avec le SSJ100

162/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'avenir à long terme : l'attente d'une rupture technologique



164/223

## Développement de l'aéronautique.

- L'avenir à long terme : l'attente d'une rupture technologique



## III. Les Turboréacteurs.

- La poussée est donnée par le théorème d'EULER:

$$F = Dm \cdot V_{air}$$

- F est la poussée brute (en New ton N)
- Dm et le débit d'air (en kg/s). c'est à dire la masse d'air éjectée chaque seconde
- Vair est la vitesse de l'air éjecté (en m/s)

167/223

## III. Les Turboréacteurs – Jet engines

- Des gaz sous pression dans une enveloppe s'échappent vers la zone de plus basse pression.
- Le surcroît de pression se transforme en vitesse conformément au théorème de BERNOULLI:

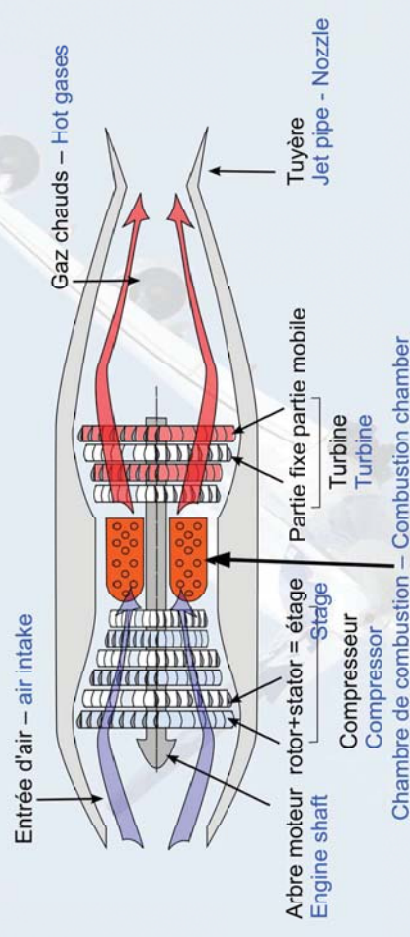
$$p' = p + \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

- La masse d'air expulsée avec une vitesse Vair crée une force sur l'enveloppe, c'est la poussée par réaction.

166/223

## III. Les Turboréacteurs.

- Principe d'un turboréacteur monocoque monoflux :



$$F = Dm \cdot (V_{sortie} - V_{entrée})$$

- La poussée résulte de la masse de gaz expulsée et de la différence de vitesse des gaz entre l'entrée et la sortie:

168/223



### III. Les Turboréacteurs.

- Entrée d'air :
  - L'air est ralenti et sa pression et sa température augmentent
- Compresseur :
  - L'air est encore comprimé et monte en température.
  - Si la compression est très importante, le compresseur est divisé en plusieurs ensembles appelés corps.
- Chambre de combustion :
  - L'injection du carburant et la combustion du mélange y sont réalisés.
  - Cela produit une quantité très importante de gaz à haute température et haute pression qui s'échappent par l'arrière du moteur.
- Turbine :
  - Elle récupère une partie de l'énergie des gaz brûlés pour faire tourner le compresseur.
- Tuyère :
  - Les gaz s'y détendent en accélérant pour produire la poussée.

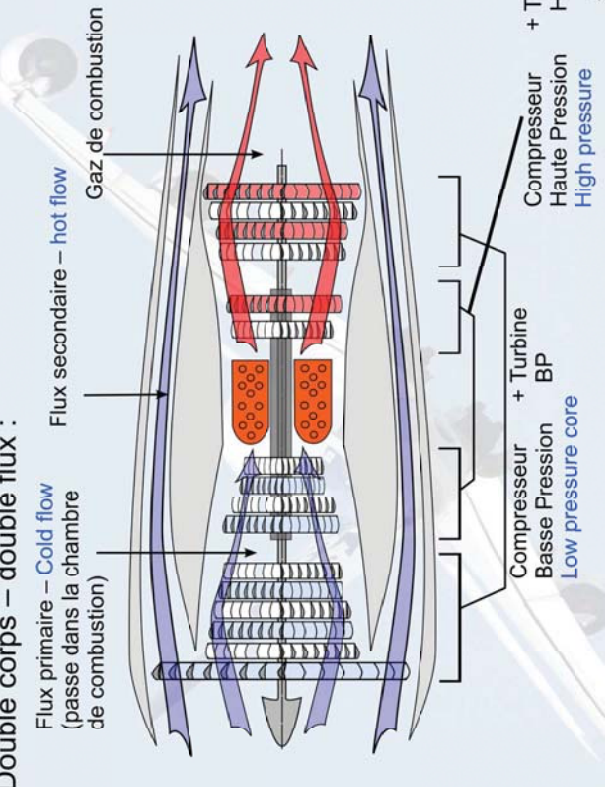
169/223

### III. Les Turboréacteurs.

- Entrée d'air :  $V_{air} \downarrow, p \uparrow$  et  $T \uparrow$
- Compresseur :
  - Roues constituées d'aubes ou ailettes
  - roues mobiles (compression) et roues fixes (redressement)
  - Ensemble 1 roue mobile + 1 roue fixe = 1 étage
  - Ensemble d'étages solidaires (2 à 15) = 1 corps
- Chambre de combustion :
  - Injection du carburant
  - Combustion du mélange
- Turbine :
  - Même constitution que le compresseur
  - Prend de l'énergie aux gaz (rotation compresseur, génération hydraulique, électrique...) =>  $p \downarrow$
  - Un corps de turbine est solidaire d'un corps de compresseur
- Tuyère :  $P_{gaz} \downarrow \Rightarrow V_{gaz} \uparrow \Rightarrow$  Poussée

170/223

### III. Les Turboréacteurs.

- Double corps – double flux :
    - Flux primaire – Cold flow (passe dans la chambre de combustion)
    - Flux secondaire – hot flow
    - Gaz de combustion
- 
- The diagram illustrates a double-core turbojet engine. It shows two parallel compressor and turbine sections. The primary flow (cold flow) passes through the primary compressor and turbine. The secondary flow (hot flow) passes through the secondary compressor and turbine. The exhaust gases from the secondary turbine are shown exiting through a nozzle. Labels include: Flux primaire – Cold flow (passe dans la chambre de combustion), Flux secondaire – hot flow, Gaz de combustion, Compresseur Basse Pression BP Low pressure core, + Turbine BP, Compresseur Haute Pression High pressure, + Turbine HP, and 171/223.

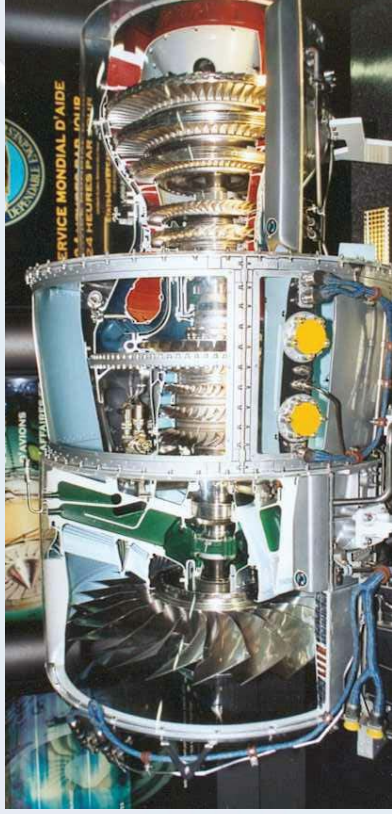
171/223

### III. Les Turboréacteurs.

- Permet de diminuer la consommation spécifique.
- Augmente de façon importante la poussée à peu de frais (grand fan des réacteurs civils).
  - Taux de dilution :
    - Rapport entre le débit massique du flux secondaire et celui du flux primaire
    - Grand : civils (jusqu'à 15 : 1 => 80% de la poussée sur le Fan)
    - Petit : militaires
- Tuyère :
  - Convergente en écoulement subsonique
  - Convergente – Divergente en écoulement supersonique car il faut élargir la tuyère au point où l'écoulement devient supersonique pour qu'il continue à accélérer.

172/223

### III. Les Turboréacteurs.



Réacteurs double corps – double flux : civil de chez PW et militaire (LARZAC –  $\alpha$  jet).



173/223

### III. Les Turboréacteurs.



Entrées d'air d'un Su 30  
Anneaux de PC d'un Mirage 2000

Paupières de tuyères d'un Typhoon (contrôle de la géométrie en sortie de tuyère) et dispositif de poussée vectoriel et contrôle des paupières pour le même appareil.



175/223

### III. Les Turboréacteurs.



Entrée d'air et Fan B787



Tuyère A380

Réacteurs en nacelle et tuyère APU

- Il reste assez d'oxygène dans la tuyère pour brûler du carburant = POSTCOMBUSTION
- Employée sur les avions militaires
- Surcroît de poussée (20-30%)
- Augmentation de consommation (+ 100 à 500%)

174/223

### III. Les Turboréacteurs.

• Contrôle du fonctionnement:

- tachymètre gradué en % indique le régime de fonctionnement (50 à 110%).
- T° tuyère (ou EGT)
- T° et p huile de lubrification

• Puissances de 500 daN à 30 000 daN.

• Utilisations:

- Avions de ligne
- Jet d'affaires
- Avions de combat

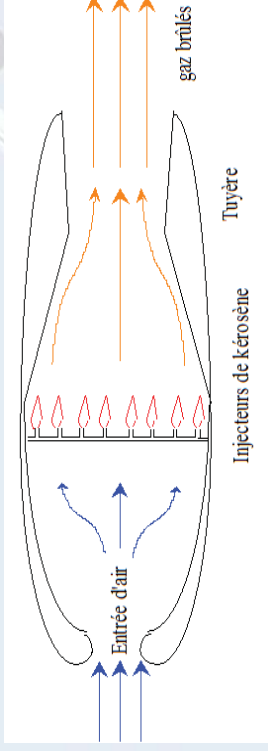
• Le carburant utilisé est du kérosène.

176/223



#### IV. Les Statoréacteurs et pulsoréacteurs.

- Un statoréacteur est un réacteur sans parties mobiles :

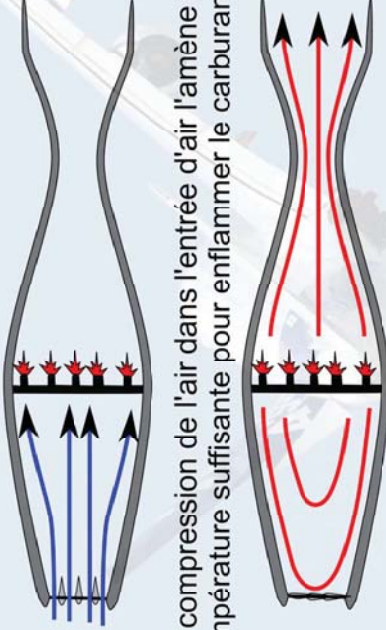


- La compression de l'air dans l'entrée d'air l'amène à une température suffisante pour enflammer le carburant injecté.
- Il nécessite une vitesse initiale pour pouvoir être allumé.
- Il est utilisé pour les missiles.

177/223

#### IV. Les Statoréacteurs et pulsoréacteurs.

- Un pulsoréacteur est un réacteur sans parties mobiles autres que des volets d'entrée d'air:

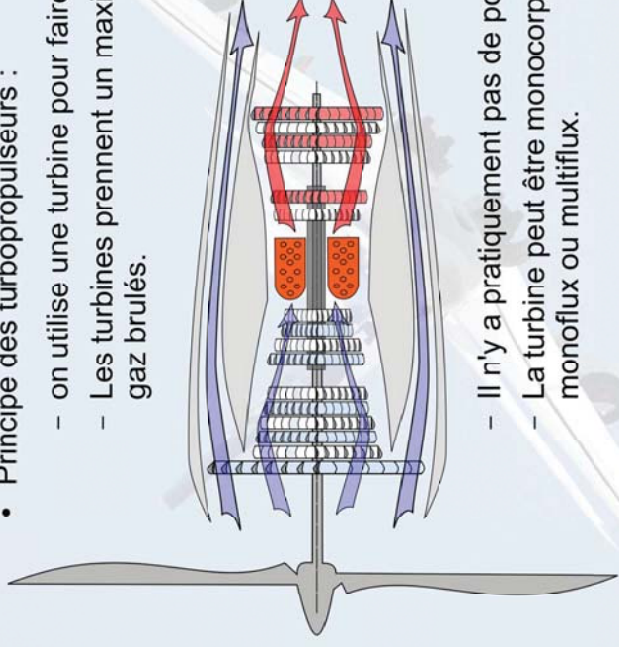


- La compression de l'air dans l'entrée d'air l'amène à une température suffisante pour enflammer le carburant injecté.
- La surpression due à la combustion ferme les volets; La pression augmente encore et les gaz sont éjectés par la tuyère.
- Lorsque la pression a suffisamment diminué les volets s'ouvrent et le cycle recommence.

178/223

#### V. Les Turbopropulseurs – Turbo prop engines

- Principe des turbopropulseurs :
  - on utilise une turbine pour faire tourner une hélice
  - Les turbines prennent un maximum d'énergie aux gaz brûlés.

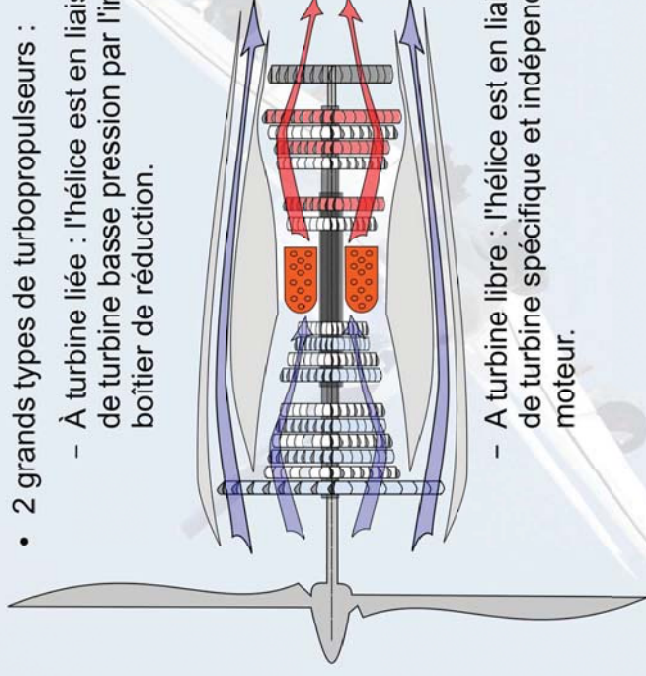


- Il n'y a pratiquement pas de poussée
- La turbine peut être monocorps ou multicorps et monoflux ou multiflux.

179/223

#### V. Les Turbopropulseurs.

- 2 grands types de turbopropulseurs :
  - À turbine liée : l'hélice est en liaison avec le corps de turbine basse pression par l'intermédiaire d'un boîtier de réduction.



- A turbine libre : l'hélice est en liaison avec un étage de turbine spécifique et indépendant du reste du moteur.

180/223

## V. Les Turbopropulseurs.

- Turbine pour hélicoptère :
- TP400 de l'A400M



181/223

## V. Les Turbopropulseurs.

- Performances :
  - Puissances de 300 à 11 000 ch
  - Vitesses de prédilection : 300 à 800 km/h
- Utilisations :
  - Avions de transport régionaux
  - Avions de transport militaires
  - Avions de servitude (épandage, largage para, brousse...)
  - Avions d'affaires
  - Hélicoptères (tous sauf hélicoptères légers)

183/223

## V. Les Turbopropulseurs.

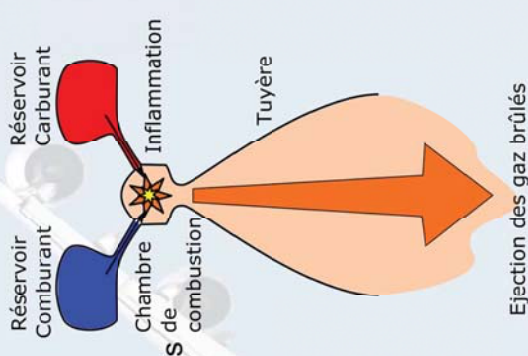
- Contrôle du fonctionnement:
  - régime de rotation de la turbine N1 et N2 en %
  - couple hélice
  - T° turbine (ITT)
  - débit carburant (FF)
- Le contrôle du pas de l'hélice peut être manuel ou automatique selon les appareils.



182/223

## VI. Moteurs fusée – rocket engine

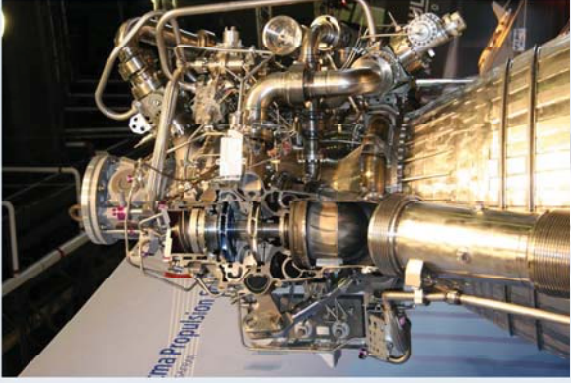
- Propulseur par réaction.
  - Pas d'admission d'air.
  - Carburant et comburant dans 2 réservoirs séparés.
  - Mise en contact => combustion.
  - Brûle des :
    - Ergols
    - Propergols
    - Hypergols
- Liquides, solides ou gazeux.



184/223



## VI. Moteurs fusée



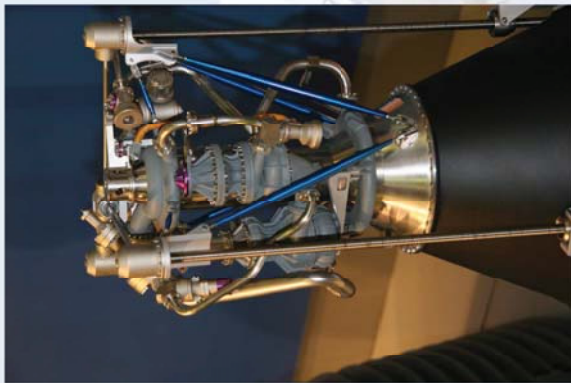
185/223

## VI. Moteurs fusée

- Performances : poussées pouvant dépasser les 100 000 daN.
- Utilisations:
  - Lanceurs spatiaux
  - Missiles

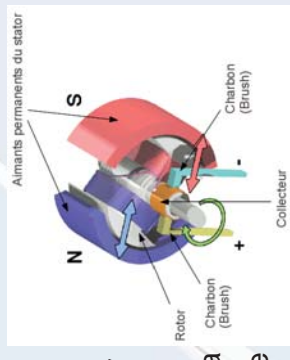
187/223

## VI. Moteurs fusée



186/223

## VII. Moteurs électriques



- Principe:
  - une bobine est placée dans l'entrefer d'un aimant.
  - un courant circulant dans la bobine la met en mouvement pour se placer de telle sorte qu'elle minimise le flux magnétique qui la traverse.
  - Une inversion périodique du courant dans la bobine permet d'entretenir le mouvement.
- Utilisations:
  - Expérimentale en aviation légère
  - Possiblement l'avenir d'une partie de l'aviation légère

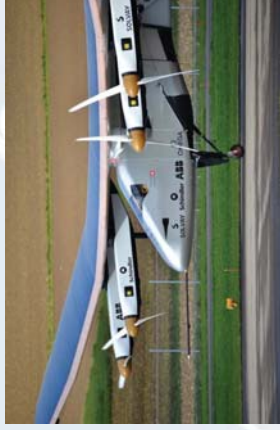
188/223

## VII. Moteurs électriques



### E-Fan:

- Développé en collaboration avec AIRBUS
- 1er vol le 1 mars 2014
- 2 turbines électriques de 1,5kN de poussée
- Masse : 550kg
- Vitesse : 160 km/h en croisière
- Autonomie: 1h + 15 min de réserve
- A traversé la manche le 10 juillet 2015

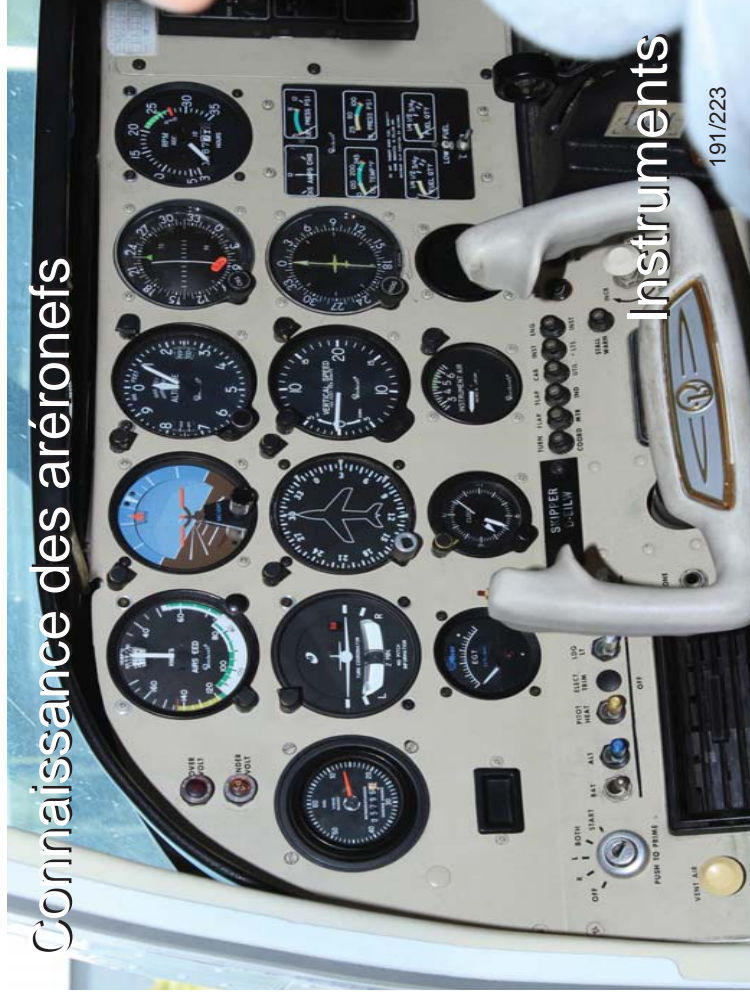


### Solar Impulse 2:

- Envergure : 63,40 m
- Longueur : 21,85 m
- Hauteur : 6,40 m
- Masse : 1600kg
- 4 moteurs électriques de 10ch chacun alimentés par batteries chargées par les cellules photovoltaïques disposées sur l'avion (11628 cellules)
- Vitesse de croisière : 70km/h
- Plafond : 12 000m

189/223

## Connaissance des aréronefs



## VII. Moteurs électriques

- Les moteurs électriques se développent assez rapidement pour l'aviation légère.
- Le constructeur slovène Pipistrel propose déjà 5 modèles d'avion et motoplaneurs électriques dans sa gamme.
- Airbus industrie se lance dans la course avec un plan industriel important pour l'E-Fan.
- Les chinois aussi se lancent dans l'aventure.
- L'augmentation des performances des batteries pourrait encore progresser plus rapidement avec l'accroissement de la part de l'électrique dans les avions de ligne et ainsi profiter à la motorisation électrique des avions légers.
- Avec les moteurs électriques il est possible de concevoir les avions différemment en utilisant un nombre important de moteurs de faible puissance entraînant des petites hélices.

190/223

## Connaissance des aéronefs : Instruments

- I. Les instruments barométriques
- II. Les instruments gyroscopiques
- III. Les instruments de radionavigation
- IV. Exemples de panneaux d'instruments

192/223



## I. Les instruments barométriques. Altimètre – altitude indicator

- La pression atmosphérique ↓ quand z ↑.

- La mesure de p donne z.

- Altimètre = baromètre gradué en z.

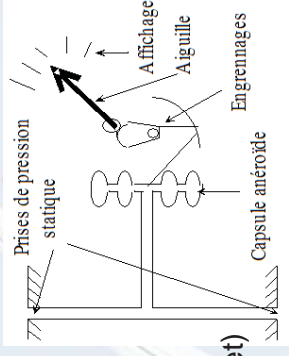
- L'altimètre peut être calé en pression.

- L'altitude z se donne en m ou en ft (feet)

$$Z(m) = \frac{z(ft) \times 3}{10} \quad z(ft) = \frac{Z(m) \times 10}{3}$$

ft en standard, m dans les pays de l'ex URSS et pour le planeur

- Exemple : 500ft = 150m      2000m = 6700ft



193/223

## I. Les instruments barométriques. Altimètre

- Lecture :
  - + petite aiguille = x10000ft
  - Moyenne = x1000ft
  - Grande = x100ft  
ici: 2410ft

- Calages :

- Ajuste la référence
- QFE = 0m piste (hauteur)
- QNH = 0m mer (altitude)
- 1013hPa = STD (FL)

- Erreurs instruments

- Température (z surestimée par temps froid).
- Z réelle ≠ z indiquée.



194/223

## I. Les instruments barométriques. Variomètre – Vertical speed Indicator

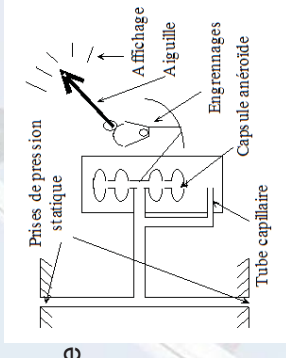
- Baromètre différentiel : mesure  $\Delta p$  sur un temps  $\Delta t$ .

- Un tube capillaire permet un retard entre pression dans et hors de la capsule.

- Vitesse verticale :

$$V_z = \frac{\Delta p}{\Delta t} \times \text{facteur conversion}$$

- Erreurs :
  - $\Delta T$  du boîtier
  - Temps de réponse (3 à 5 s)
  - Surestime Vz en altitude (30% à 11 000m)



195/223

## I. Les instruments barométriques. Variomètre

- Partie supérieure du cadran :  
 $V_z > 0$

- Partie inférieure du cadran :  
 $V_z < 0$

- Graduation en ft/min ou m/s

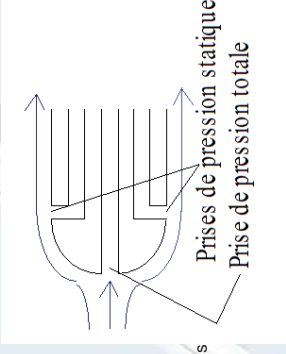
- ft/min en standard
- m/s pour les pays de l'ex URSS et les planeurs



196/223

## I. Les instruments barométriques. Anémomètre – airspeed Indicator

- Baromètre différentiel entre :
  - Pression totale  $p_t$  ou pression d'impact  $p_i$
  - Pression statique  $p_s$
- Mesure de  $p_t$  par sonde de Pitot et de  $p_s$  par les prises statiques ou mesure par sonde de Pitot double (schéma)



• Théorème de BERNOULLI :

$$p_t = p_s + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

- Calcul de la vitesse :

$$v = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{p_t - p_s}{\rho} \right)}$$

197/223

## I. Les instruments barométriques. Anémomètre

- Les vitesses particulières :
  - VNE : **Velocity Never Exceed**  
vitesse à ne pas dépasser sous peine de déformation ou rupture de la cellule
  - VNO : **Velocity Normal Operating**  
vitesse maximale en opérations normales
  - VFE : **Velocity Flaps Extended**  
vitesse maximale volets sortis
  - VLE – VLO : **Velocity Landing gear Extended** (sorti et verrouillé) et **Velocity Landing gear Operating** (en mouvement)

199/223

## I. Les instruments barométriques. Anémomètre

- Les vitesses de l'avion :
  - $V_i$ ,  $V_c$  ou CAS : Vitesse Indiquée ou Vitesse (Calibrée (**Calibrated Air Speed**)) = vitesses lues sur l'instrument avec les corrections de position des prises d'air.  
Les écarts à l'atmosphère standard ne sont pas corrigés.  
CAS = Calibrated Air Speed
  - $V_v$  ou TAS : Vitesse Vraie (**True Air Speed**). C'est la vitesse réelle de l'avion dans l'air (corrigée des écarts de l'atmosphère à l'atmosphère standard). Pour  $V_i$  fixée,  $V_v$  augmente avec l'altitude.
  - $V_p$  : Vitesse Propre = composante horizontale de la  $V_v$ .  
Utile pour la navigation.
  - $V_s$  ou GS : vitesse sol. C'est la  $V_p$  corrigée de la vitesse du vent.  
Essentielle en navigation.  
**GS = Ground Speed**

198/223

## I. Les instruments barométriques. Anémomètre

- Anémomètre = Badin
- Arcs de couleur :
  - Blanc : volets
  - Vert : vol normal
  - Orange: entre VNO et VNE
  - Trait rouge : VNE
- Unités :
  - Km/h
  - M.p.h (1,609 km/h)
  - Knots = Kt (1,852 km/h)



$$V_{kmh} = V_{kt} \times 2 - 1/10^{ème}$$

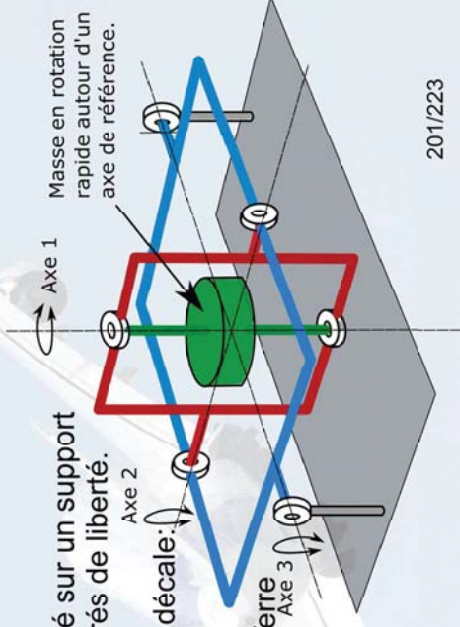
$$V_{kt} = \frac{V_{kmh}}{2} + 1/10^{ème}$$

200/223



## II. Les instruments gyroscopiques. Le gyroscope

- Gyroscope = masse en rotation rapide autour d'un axe = toupie (démonstration).
- Par inertie l'axe de rotation se conserve quand la masse est en mouvement.
- Le gyroscope est monté sur un support autorisant de 1 à 3 degrés de liberté.
- L'axe du gyroscope se décale:
  - Par précession
  - par frottements
  - par la rotation de la Terre
  - par les mouvements de l'avion
 => Il faut le recalibrer régulièrement.



201/223

## II. Les instruments gyroscopiques. Le conservateur de cap – Heading Indicator

- = Directionnel. Basé sur un gyroscope à 2 degrés de liberté.
- Axe de référence = direction locale du Nord magnétique (Nm) dans le plan horizontal.
- Couplé à un compas magnétique (boussole) pour le calage initial et le recalage en vol.
- Le compas magnétique n'est pas fiable en virage : jusqu'à 180° d'erreur sur le cap!
- Le directionnel présente une erreur beaucoup plus faible :
  - 4° max à 20° d'inclinaison
  - 10° max à 45° d'inclinaison
  - 18° max à 60° d'inclinaison



203/223

## II. Les instruments gyroscopiques. L'indicateur de virage – Turn and Slip Indicator

- Gyroscope à un degré de liberté (axe de tangage de l'avion lorsque les ailes sont à plat)
- En virage la maquette avion (ou l'aiguille) est inclinée dans le sens du virage et l'inclinaison donne le taux de virage (en °/min).
  - 1 grad = taux standard = taux 1 = 180°/min
  - 1/2 grad = taux 1/2 std = taux 1/2 = 90°/min
- Couplé à la bille (indicateur de dérapage) :
  - La bille indique la symétrie (ou dissymétrie)
  - Elle se décale du côté du vent relatif.
  - Les vélioles utilisent un fil de laine collé au milieu de la verrière



202/223

## II. Les instruments gyroscopiques. L'horizon artificiel – Attitude Indicator

- L'horizon artificiel est basé sur un gyroscope à 2 degrés de liberté asservi à un pendule.
- La masse est en rotation autour de la verticale locale.
- Une maquette représentant l'horizon est solidaire de la masse en rotation et une représentant l'avion est solidaire du tableau de bord.
- L'horizon précessionne et se décale sous l'effet des accélérations. => il faut le recalibrer régulièrement.

204/223

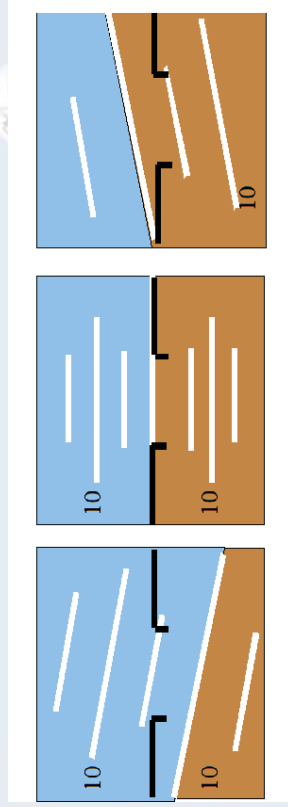
## II. Les instruments gyroscopiques. L'horizon artificiel.

- Maquette de l'horizon :
  - Bleu = ciel (ou blanc)
  - Marron = terre (ou noir)
  - Position fixe dans l'espace bouge par rapport à l'avion
  - Graduations pour lire l'assiette de l'avion
- Maquette de l'avion :
  - Fixe par rapport à l'avion
  - Index solide en haut pour lire l'inclinaison
- Bouton de recalage.



205/223

## II. Les instruments gyroscopiques. L'horizon artificiel.



- Position 1 :  
L'avion a 5° à cabrer et 10° d'inclinaison à gauche
- Position 2 :  
l'avion est à l'horizontale et sans inclinaison
- Position 3 :  
L'avion a 5° à piquer et 10° d'inclinaison à droite

206/223

## Les instruments digitaux.

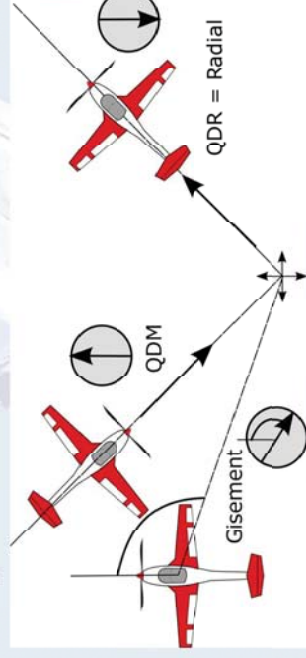
regroupement des principaux instruments de pilotage sur un unique écran digital : HA, Conservateur de cap, Anémomètre, Altimètre, Variomètre ...



207/223

## III. Les instruments de Radionavigation. Le Radiocompas ou ADF.

- ADF Automatic Direction Finder = balise sol +- récepteur embarqué.
- Une aiguille indique la direction de la balise sur une rose des cap :
  - Fixe => donne un gisement entre l'axe de l'avion et la direction de la balise.
  - Directionnelle (= RMI) => donne un QDM pour atteindre la balise.



208/223



### III. Les instruments de Radionavigation. Le Radiocompas ou ADF.

- 2 types : L et NAV
- L pour guider les avions sur l'axe de piste en finale
- NAV pour faire de la radionavigation

Type	Fréquences	Puissance (W)	Portée (Nm)	Précision
L	200-1750 kHz (MF)	< 50	30	± 2°
NDB	idem	50 à 5000	50 à 200	± 3 à 5°

- Avantages :
  - Bonne portée et information permanente
  - Robuste, répandu, simple et bon marché
- Inconvénients :
  - Précision moyenne
  - Sensible aux orages et la nuit

209/223

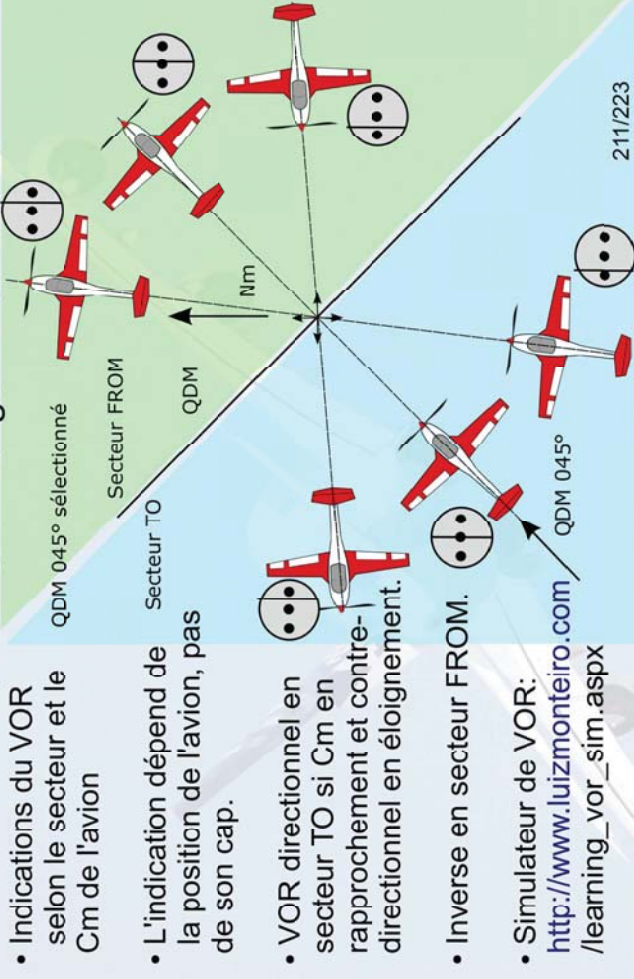
### III. Les instruments de Radionavigation. Le VHF OmniRange = VOR



- VOR = balise sol + récepteur embarqué.
- Parfois l'indication se présente comme un RMI.
- Pour plus de précision d'affichage, OBS à barre verticale:
  - un bouton permet d'afficher le QDM à suivre.
  - si la barre est centrée, l'avion est sur le QDM choisi.
  - l'écart entre la barre et le centre représente l'écart angulaire entre le QDM actuel et celui désirée (pour +/- 10°)
  - Un indicateur TO / FROM indique le secteur dans lequel se positionne l'avion par rapport à la balise et au QDM sélectionné.

210/223

### III. Les instruments de Radionavigation. Le VHF OmniRange = VOR



- Indications du VOR selon le secteur et le Cm de l'avion
- L'indication dépend de la position de l'avion, pas de son cap.
- VOR directionnel en secteur TO si Cm en rapprochement et contre-directionnel en éloignement.
- Inverse en secteur FROM.
- Simulateur de VOR: [http://www.luizmonteiro.com/learning\\_vor\\_sim.aspx](http://www.luizmonteiro.com/learning_vor_sim.aspx)

211/223

### III. Les instruments de Radionavigation. Le VHF OmniRange = VOR

- 2 types : T et NAV
- T (terminal) pour guider les avions sur l'axe de piste en finale
- NAV pour faire de la radionavigation

Type	Fréquences	Puissance (W)	Portée (Nm)	Précision
NAV	112-118 MHz (VHF)	100	200	± 2 à 3°
T	108-112 MHz (10 ièmes pairs)	10 à 50	25	± 2°

- Avantages :
  - Fiable et précis
  - Insensible aux perturbations météo
- Inconvénients :
  - Portée limitée
  - Précision insuffisante pour un ATR en mauvaises conditions.

212/223

### III. Les instruments de Radionavigation. Le **Distance Measuring Equipment** = DME

- Le DME est apparié à un VOR et donne la distance oblique entre l'aéronef et la balise.

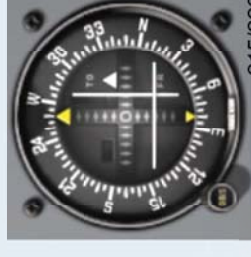
Type	Fréquences	Puissance (W)	Portée (Nm)	Précision
DME	1025-1215 MHz (UHF)	100	200 à 400	1/10 Nm + 0,2 % D

- Avantages:
  - Bonne portée
  - Capacité de 100 appareils simultanément
  - Précision correcte
  - Pas sensible à la météo
- Inconvénient :
  - Donne une distance oblique

213/223

### III. Les instruments de Radionavigation. L'**Instrument Landing System** = ILS

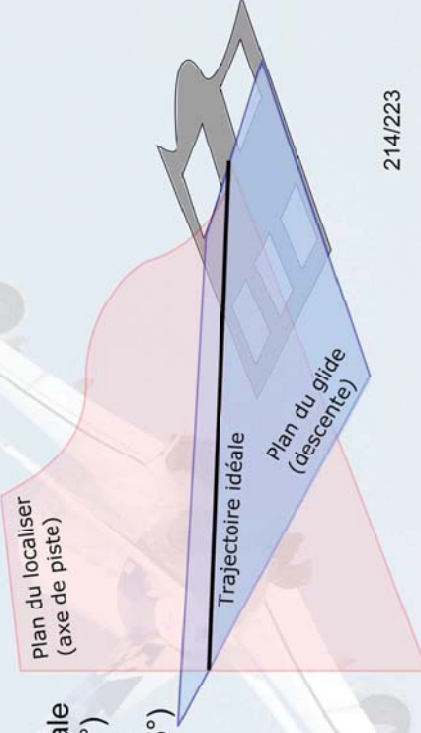
- Barre verticale = axe de piste
  - Centrée = dans l'axe
  - A gauche = trop à droite
  - A droite = trop à gauche
- Barre horizontale = plan de descente
  - Centrée = sur le bon plan
  - En haut = trop bas (danger)
  - En bas = trop haut
- Corrections pour centrer les aiguilles.
  - Attention à ne pas "tricoter"!



215/223

### III. Les instruments de Radionavigation. L'**Instrument Landing System** = ILS

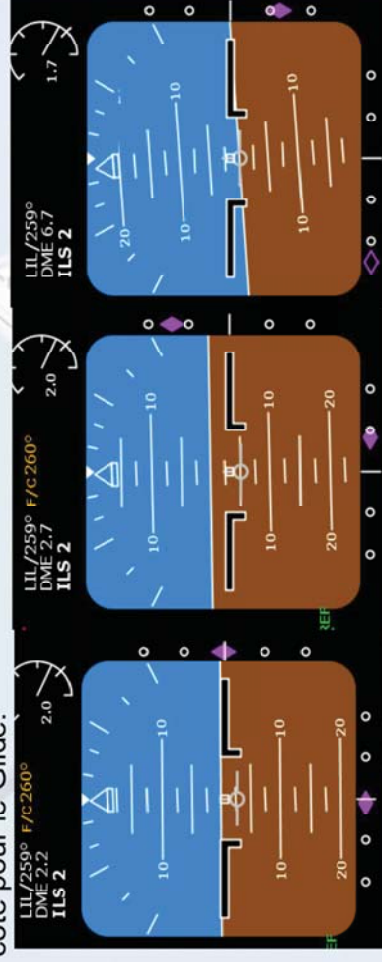
- 2 balises sol et 1 récepteur embarqué.
- Balises:
  - Localizer = LOC : donne l'axe de la piste; précision > VOR
  - Glide : donne la pente idéale de descente (à 2,5°).



214/223

### III. Les instruments de Radionavigation. L'**Instrument Landing System** = ILS

- Sur les instruments digitaux, l'ILS est couplé à l'horizon artificiel, au badin, à l'altimètre, au variomètre ...
- Il se limite à de simples indexes sous l'horizon pour le LOC et sur le côté pour le Glide.



On glide on track 216/223

slightly to the left and below

slightly above and far to the right



### III. Les instruments de Radionavigation. L'Instrument Landing System = ILS

- ILS:

Type	Fréquences	Puissance (W)	Portée (Nm)	Précision
ILS	108-112MHz (10 èmes impairs)	Loc : 100/Glide : 30	25/10 à ± 10° axe	1/10° / 1/100°

- Avantages :
  - Fiable et précis
  - Peu coûteux
  - Couplage au PA possible
- Inconvénients :
  - Nécessite un calibrage régulier
  - 1 seule piste et 1 seul QFU par ILS

217/223

### III. Les instruments de Radionavigation. Le Global Positioning System = GPS

- Système de navigation par satellites. Donne la position en 3 dimensions.
- Couplé aux instruments de l'avion il permet de déterminer précisément le vent et les heures estimées d'arrivée.
- C'est une aide précieuse pour la navigation IFR et VFR.
- Les modèles les plus précis permettent des approches de précision
- Seuls les GPS intégrés au tableau de bord et couplés aux autres instruments et moyens de radionavigation sont homologués.
- **Attention** : les GPS portables ont une précision et une fiabilité souvent bien moindre que ce qu'imaginent les pilotes.

219/223

### III. Les instruments de Radionavigation. Le transpondeur.

- Le transpondeur ou IFF (**Identification Friend or Foe**) est un émetteur repéré par un radar secondaire.

- L'IFF émet un code qui est affiché sur les écrans radar.

- Le code est donné par un contrôleur ou correspond à des situations particulières:

- 7700 = Emergency
- 7600 = Panne radio
- 7500 = Détournement
- 1300 = Vol militaire en basse altitude
- 7000 = Vol en VFR

- Certains "modes" sont réservés aux militaires.

218/223

### IV. Exemples de panneaux d'instruments

- Planche de bord d'un DA 40 :



(c) 220/223

#### IV. Exemples de panneaux d'instruments

- Planche de bord d'un EMB 145 :



#### Sources documentaires

- Chroniques de l'aviation aux éditions chroniques
- Le grand livre des chasseurs éditions CELIV
- Divers sites internet dont Wikipedia
- Manuel du pilote d'avion Vol à vue , SFACT, éditions Cépaduès

Les illustrations ont été réalisées par l'auteur ou ont été trouvées sur divers sites internet avec une recherche mentionnant une réutilisation autorisée sans but commercial.

Ce document a été réalisé par Monsieur Frédéric WILLOT avec l'aide de Messieurs Marc COPPIN, Laurent BUISSYNE et Olivier SEYS. Tous enseignent le Brevet d'Initiation Aéronautique dans l'Académie de LILLE. Il peut être utilisé librement par quiconque le souhaite, modifié ou non, sous condition que l'utilisation soit faite à des fins pédagogiques et non lucratives.

#### IV. Exemples de panneaux d'instruments

- Simulateur de vol IFR :

