



GEA Tianjin / 中国民航大学中欧航空工程师学院

Presented by

Vincent de LABORDERIE

Airbus

HANDLING QUALITIES

Part 1 - Flight balance and stability

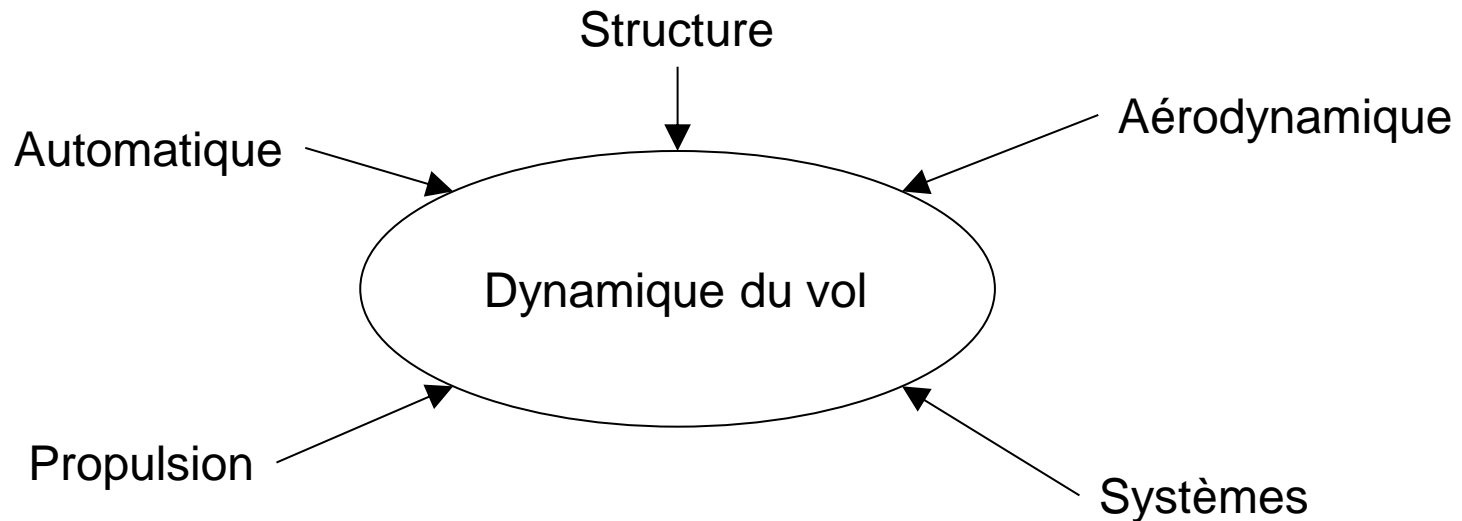


- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

Introduction

- La dynamique du vol est une discipline de synthèse qui étudie le mouvement de l'avion dans l'air.
- Elle est constituée des :
 - Performances (Performance)
 - Conception avions (Aircraft design)
 - Qualités de vol (Handling qualities)



Introduction

- L'avion dans la grande famille des aéronefs...

Aérostats : aéronefs *moins lourds* que l'air (ballons, dirigeables)

Aérodynes : aéronefs *plus lourds* que l'air

AILES MOBILES

Giravions : ailes tournantes (hélicoptère, autogyre)

Ornithoptères : ailes battantes

AILES FIXES

Avion : motorisé

Planeur : sans moteur

Introduction

- Les aérodynes à aile mobile : autogyre et ornithoptères



Sommaire

- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

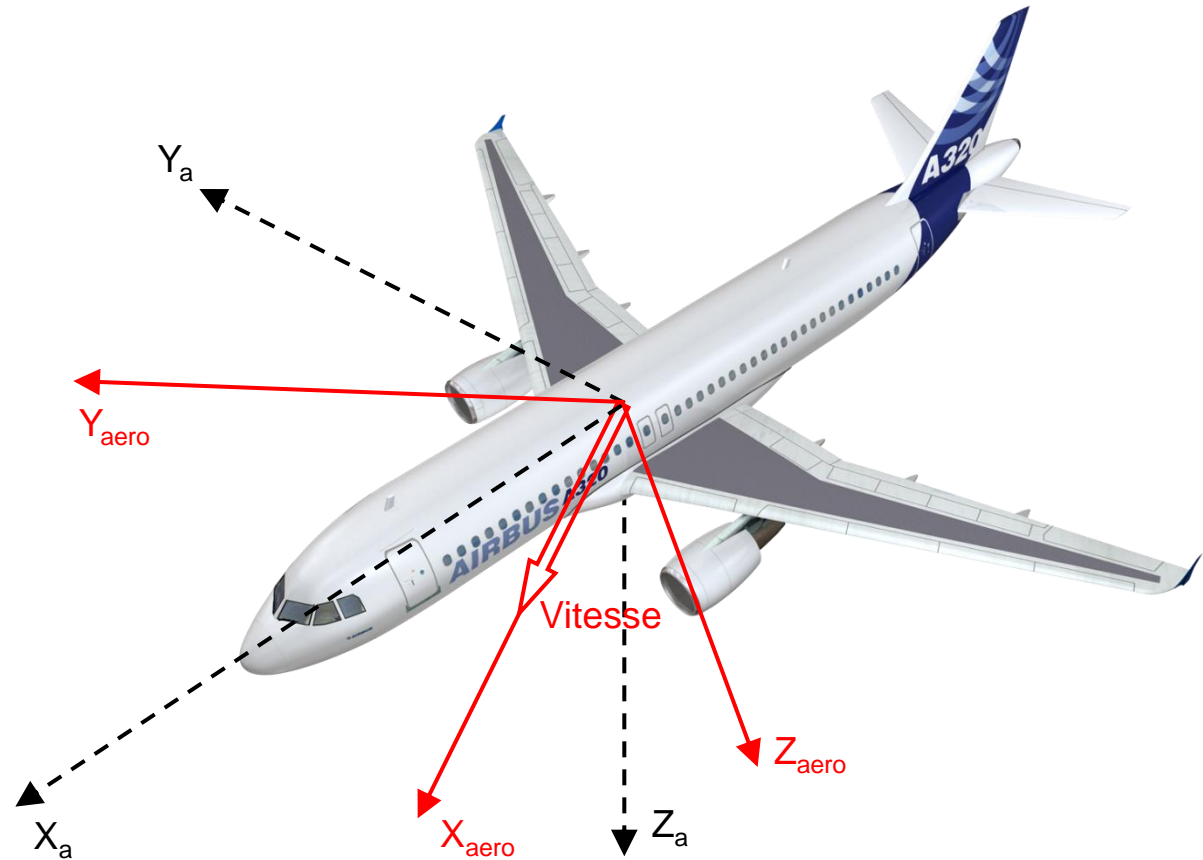
Angles et repères

- Le repère avion :
 - ▶ Axe de roulis X_a
 - ▶ Axe de tangage Y_a
 - ▶ Axe de lacet Z_a



Angles et repères

- Le repère aérodynamique :
 - Lié à la vitesse de l'avion dans l'air



Angles et repères

Angles longitudinaux :

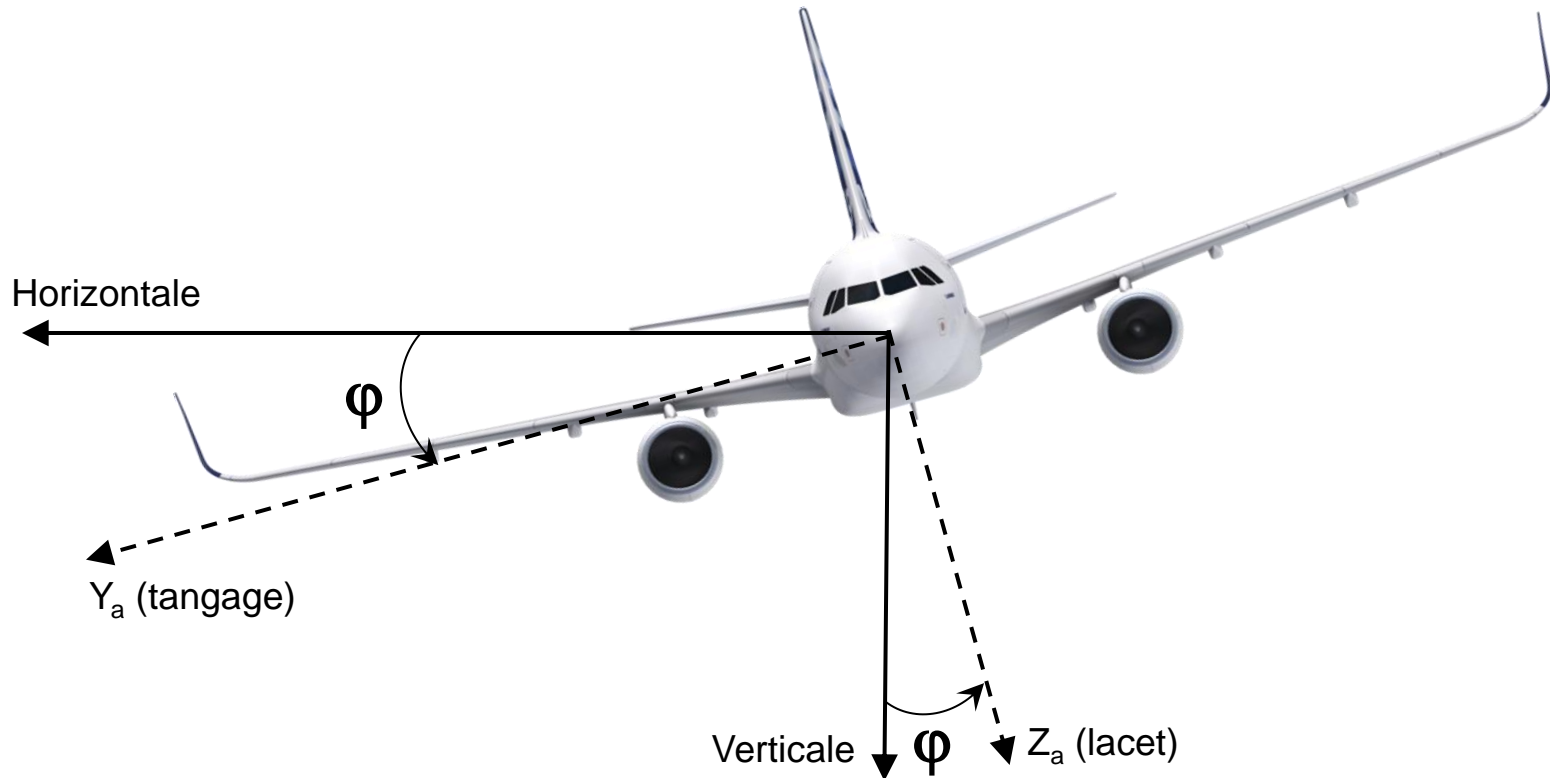
- Pente γ : entre vitesse et horizontale
- Incidence α : entre vitesse et avion
- Assiette θ : entre avion et horizontale



Angles et repères

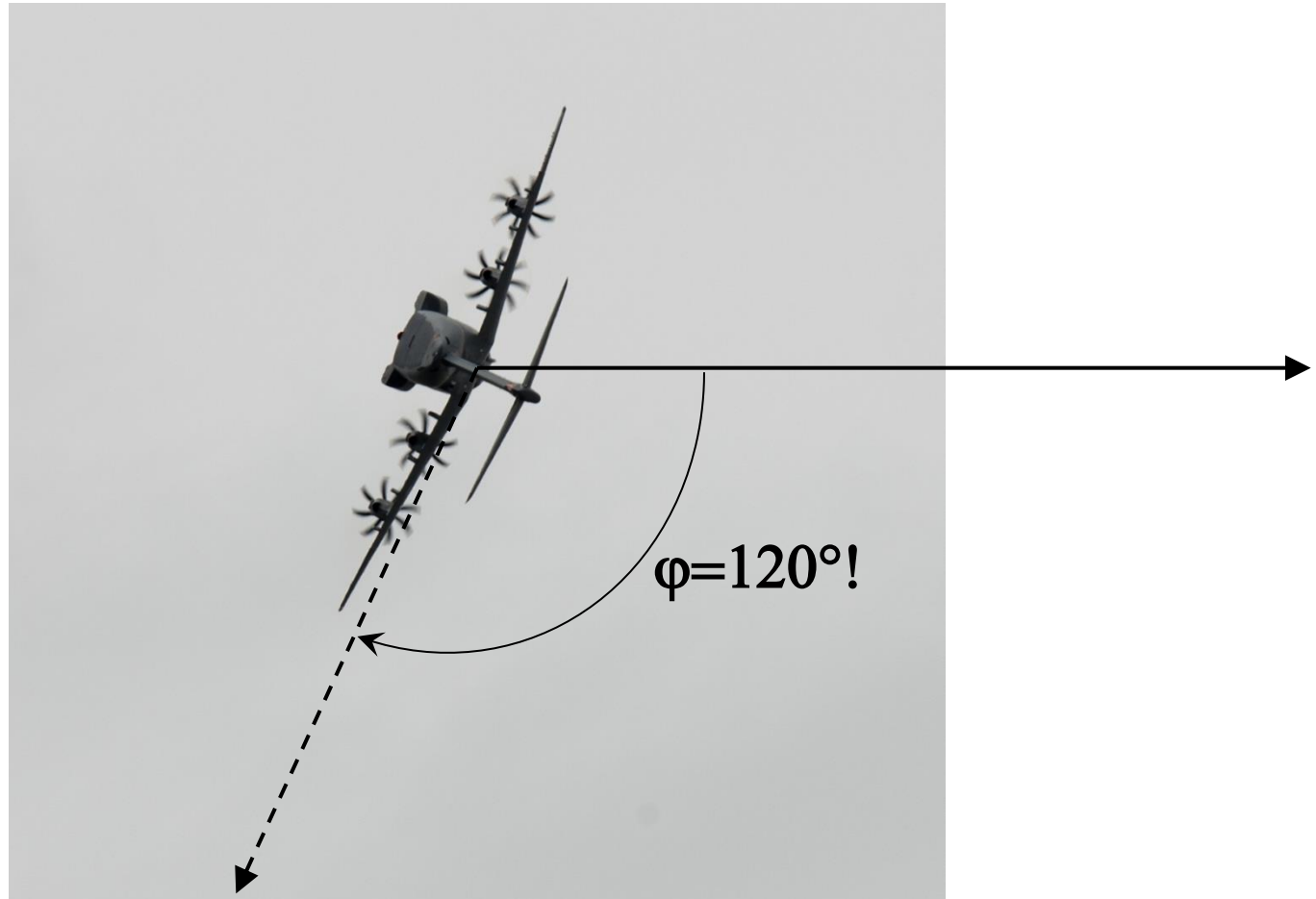
Angles latéraux :

- Inclinaison φ : entre avion et horizontale



Angles et repères

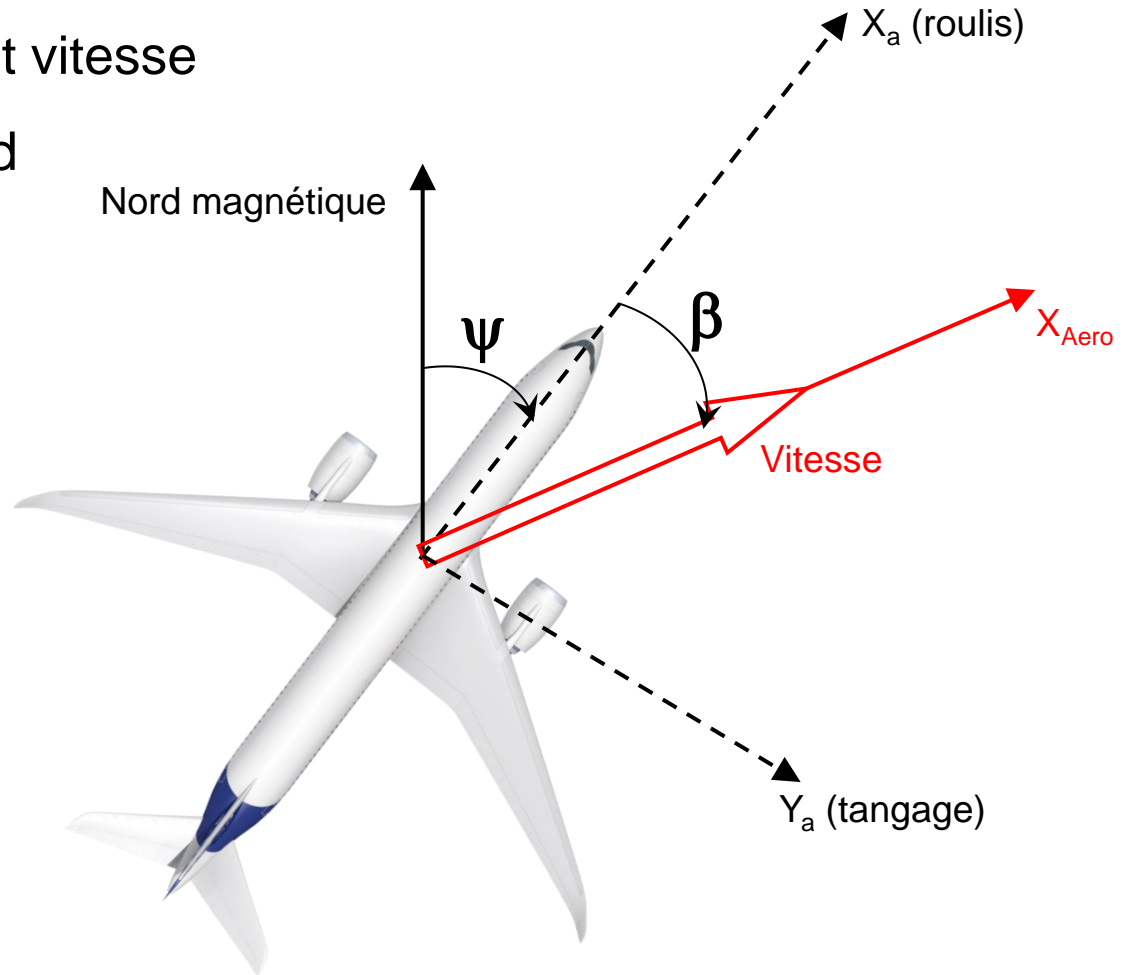
A400M à Farnborough :



Angles et repères

Angles latéraux :

- Dérapage β : entre avion et vitesse
- Cap ψ : entre avion et Nord

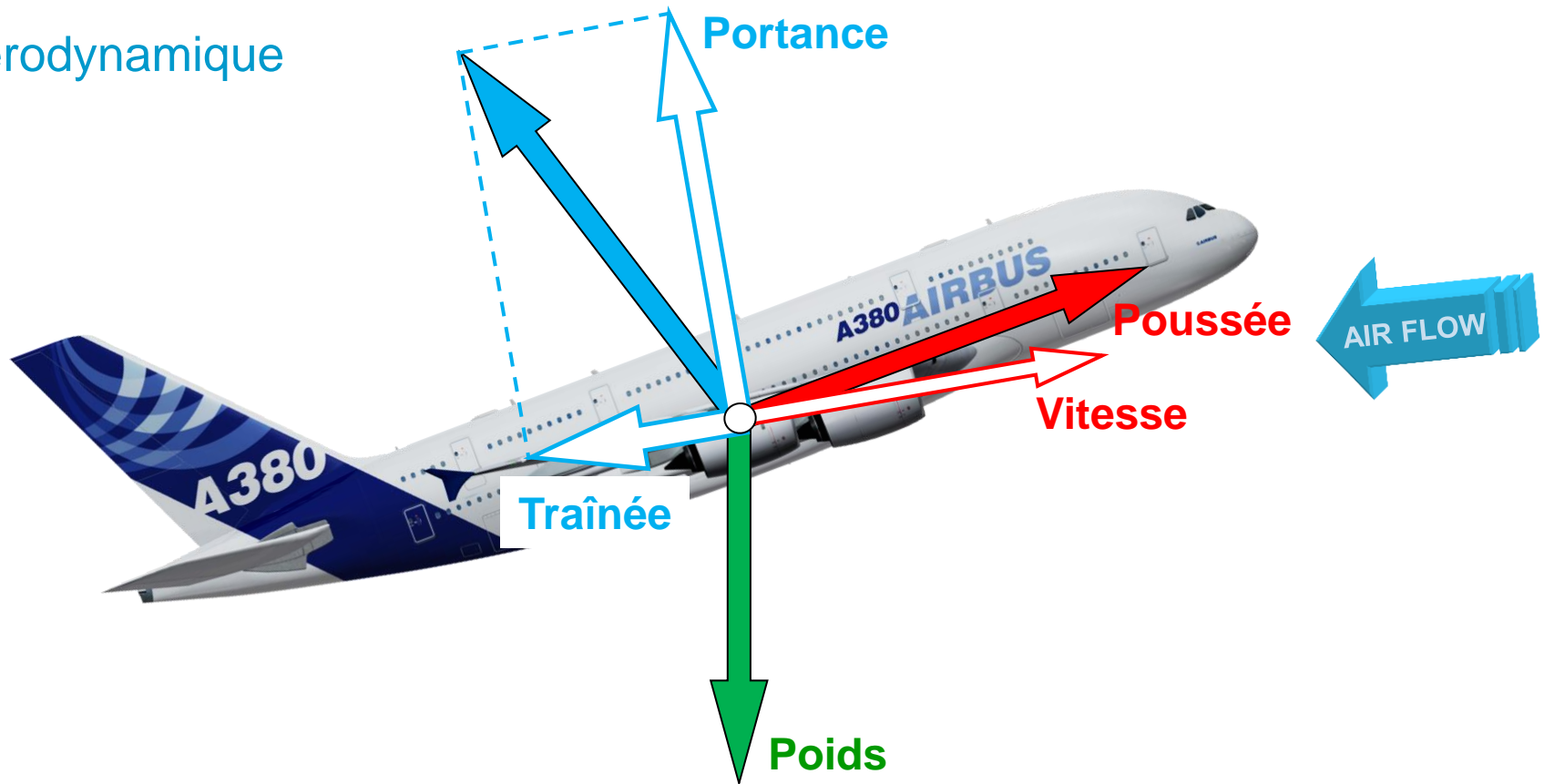


- Introduction
- Angles et repères
- **Forces**
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

Forces

3 types de force agissent sur l'avion :

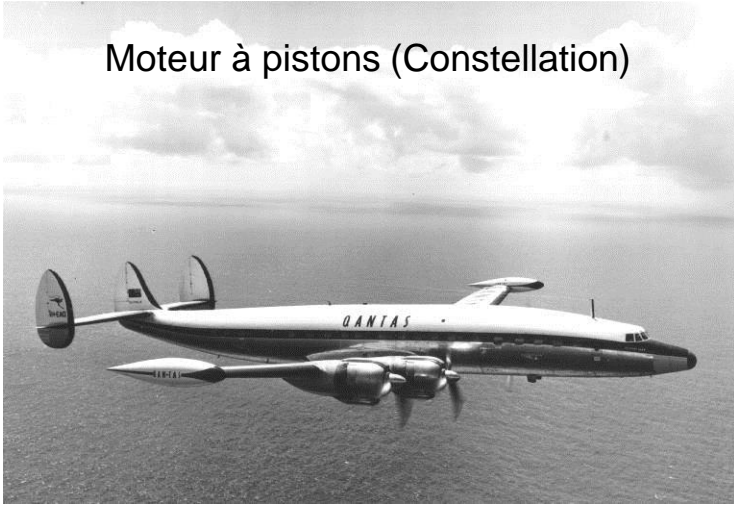
- Poids
- Propulsion
- Aerodynamique



Forces

Propulsion classique

Moteur à pistons (Constellation)



Turboréacteur + PC (Mirage 2000)



Turbofan (A330)

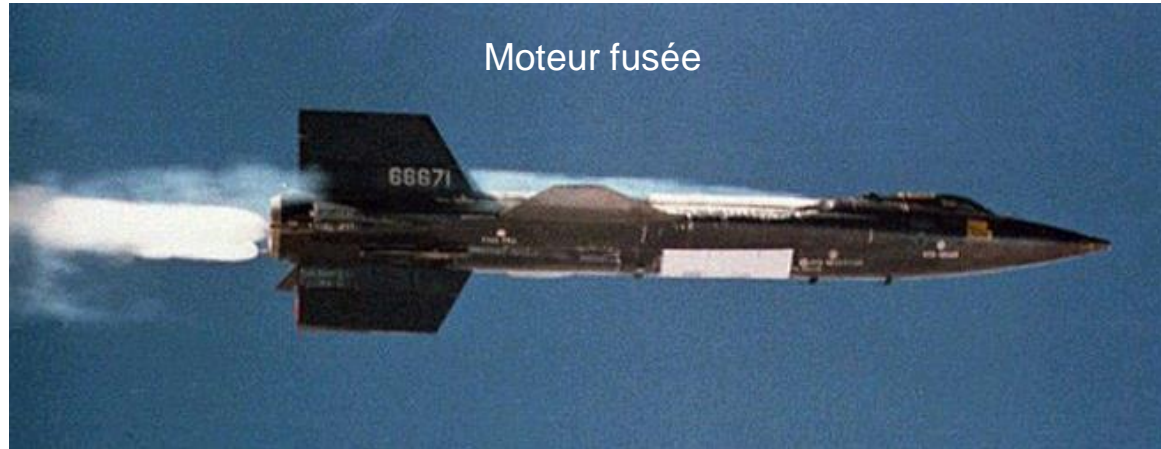


Turboprop (Hercules TP400 FTB)



Forces

Propulsion non conventionnelle



Forces

Aérodynamique : ailes



Flèche



Delta



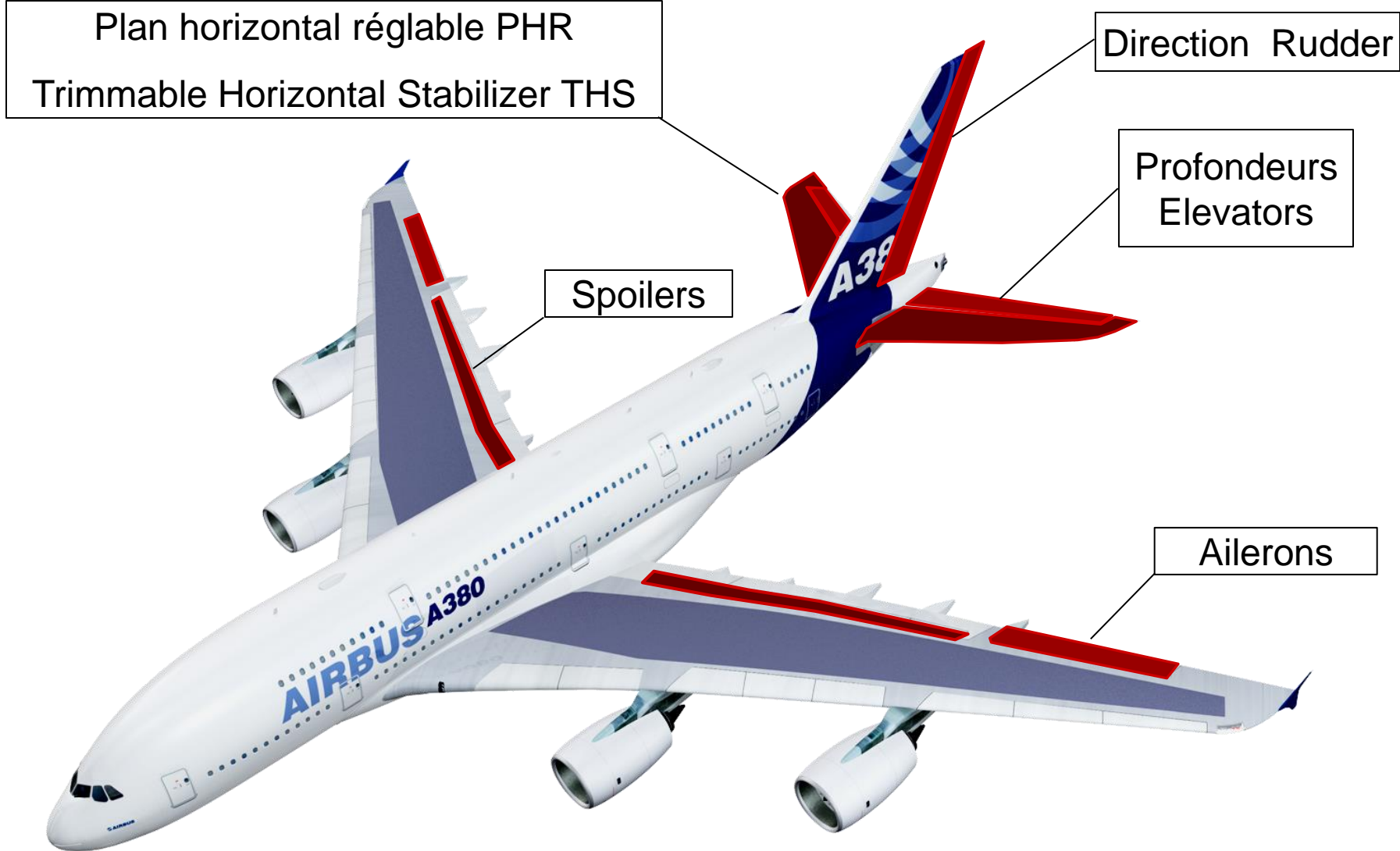
Flèche inverse



Oblique

- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- **Gouvernes**
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

Gouvernes



Gouvernes

- Gouvernes classiques (avion de ligne)

Spoilers

Ailerons



Direction



Profondeur

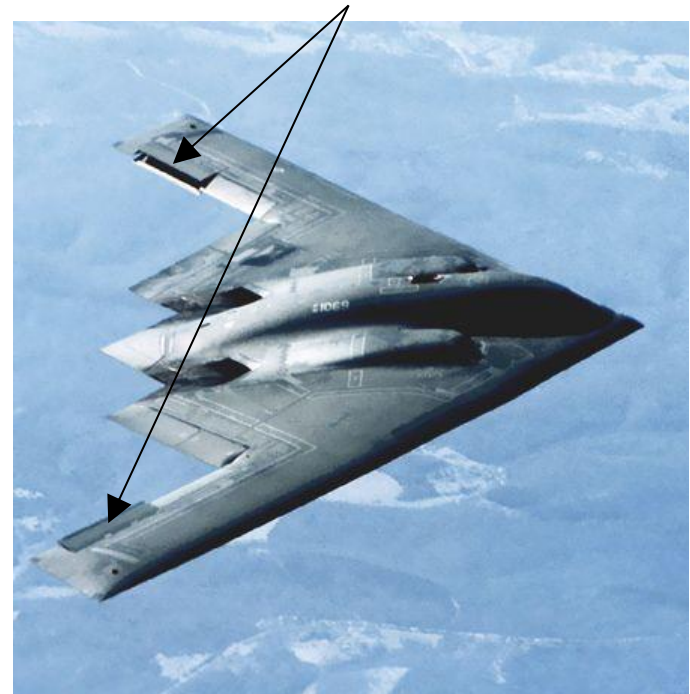
Gouvernes

- Autres types de gouvernes

Elevons (elevator+aileron)



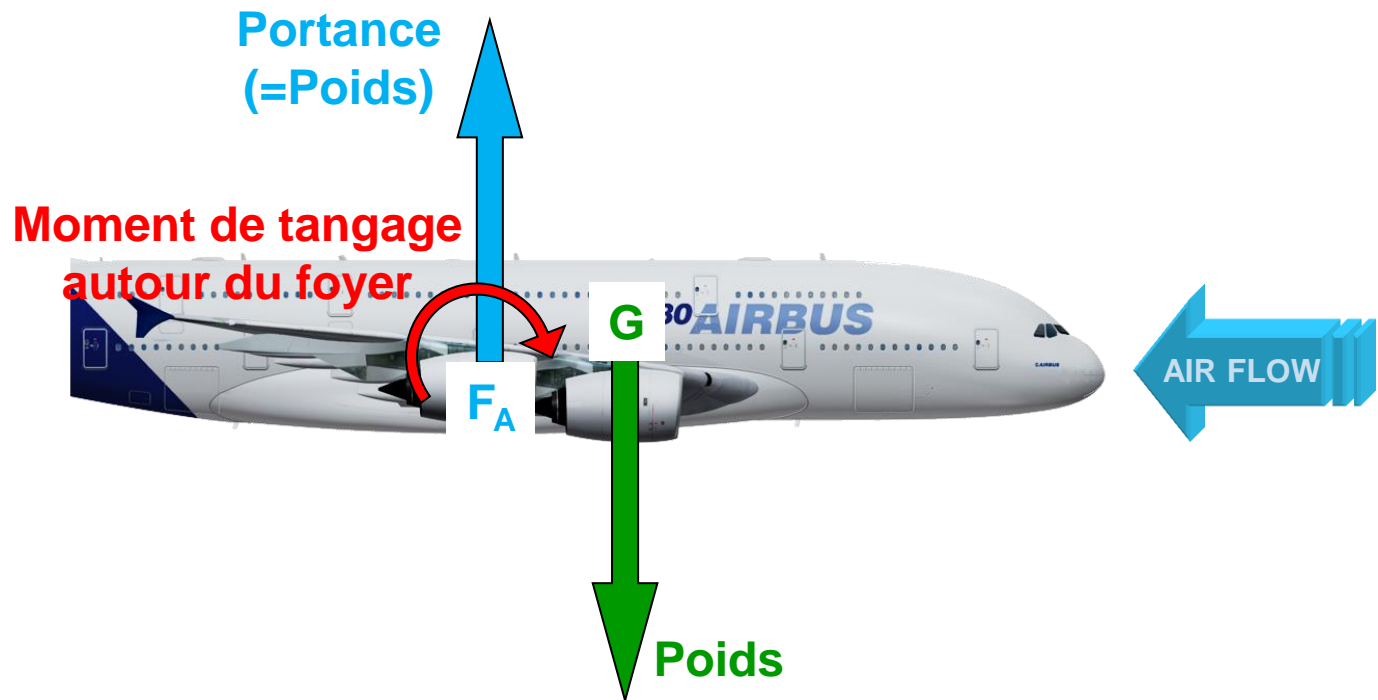
« Crocodiles » (direction+aileron)



- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- **Equilibre longitudinal**
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

Equilibre longitudinal

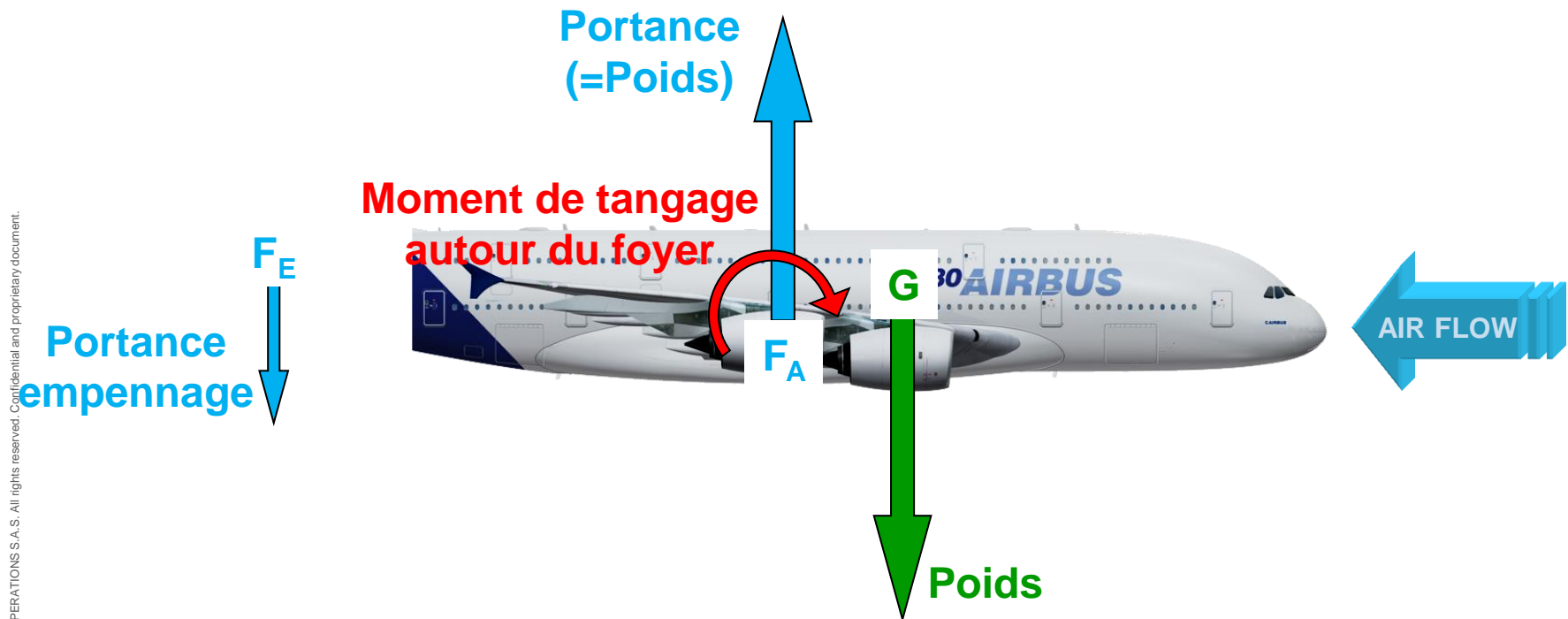
- Avion sans empennage :
 - Le poids s'applique au centre de gravité G
 - La portance est égale au poids et s'applique au foyer de l'aile F_A
 - Moment de tangage « pur » autour du foyer de l'aile



Equilibre longitudinal

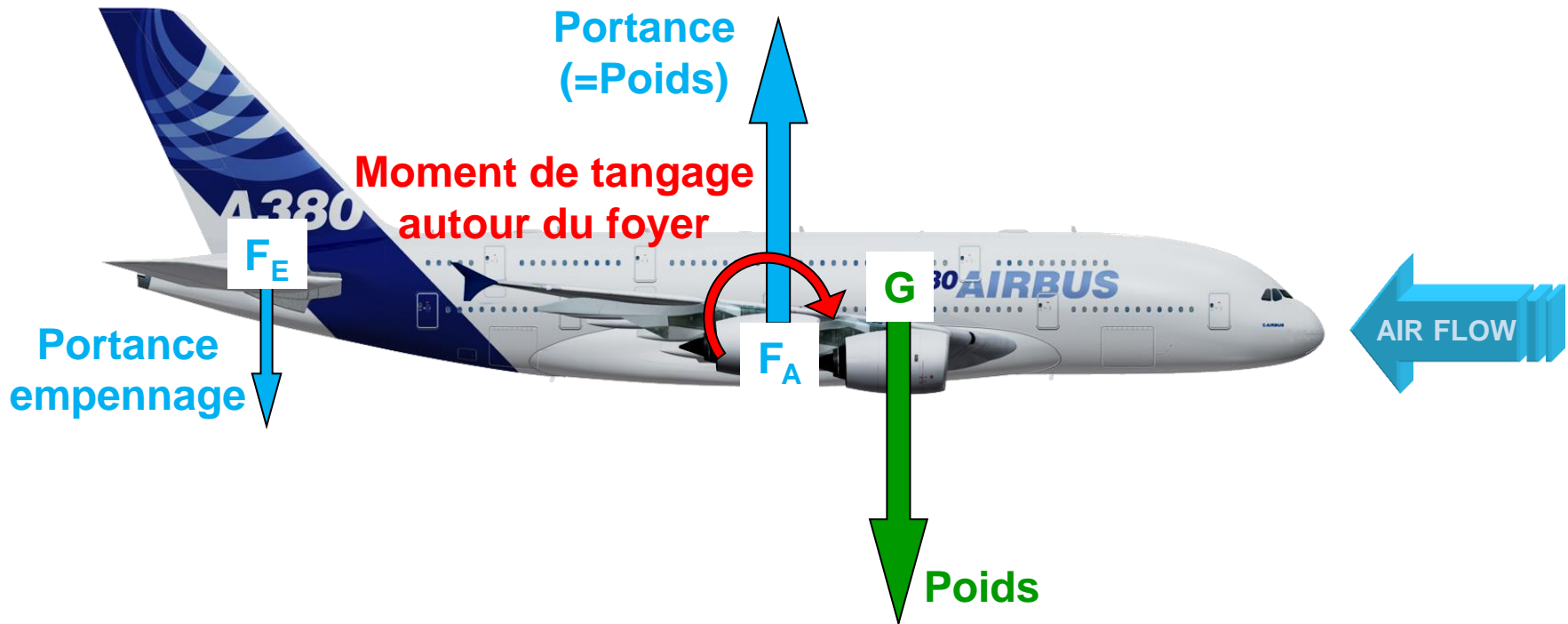
- Conséquences :

- ▶ L'avion sans empennage ne peut être équilibré en tangage autour du centre de gravité G
- ▶ L'empennage horizontal sert à créer un moment de tangage supplémentaire d'équilibrage (ici à cabrer)



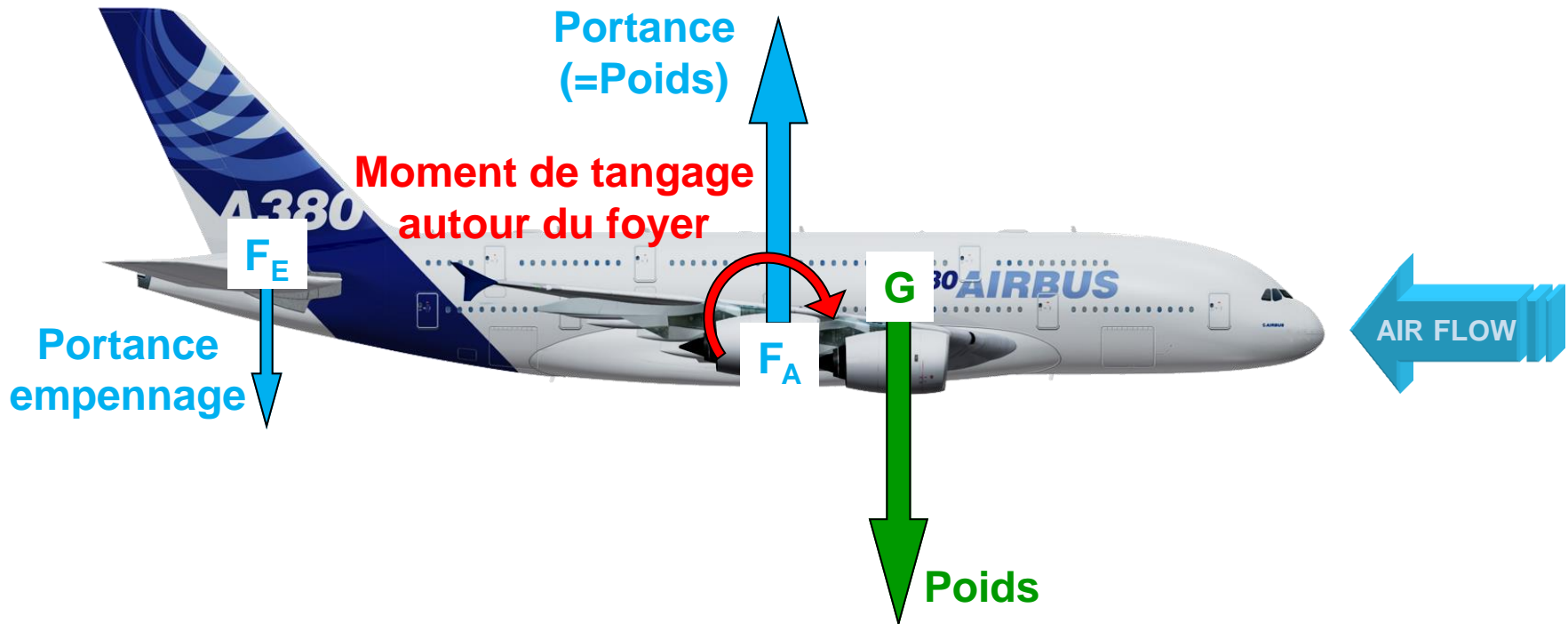
Equilibre longitudinal

- Rôle de l'empennage horizontal : cas nominal
 - Portance = poids
 - Moment de tangage = 0 / au centre de gravité



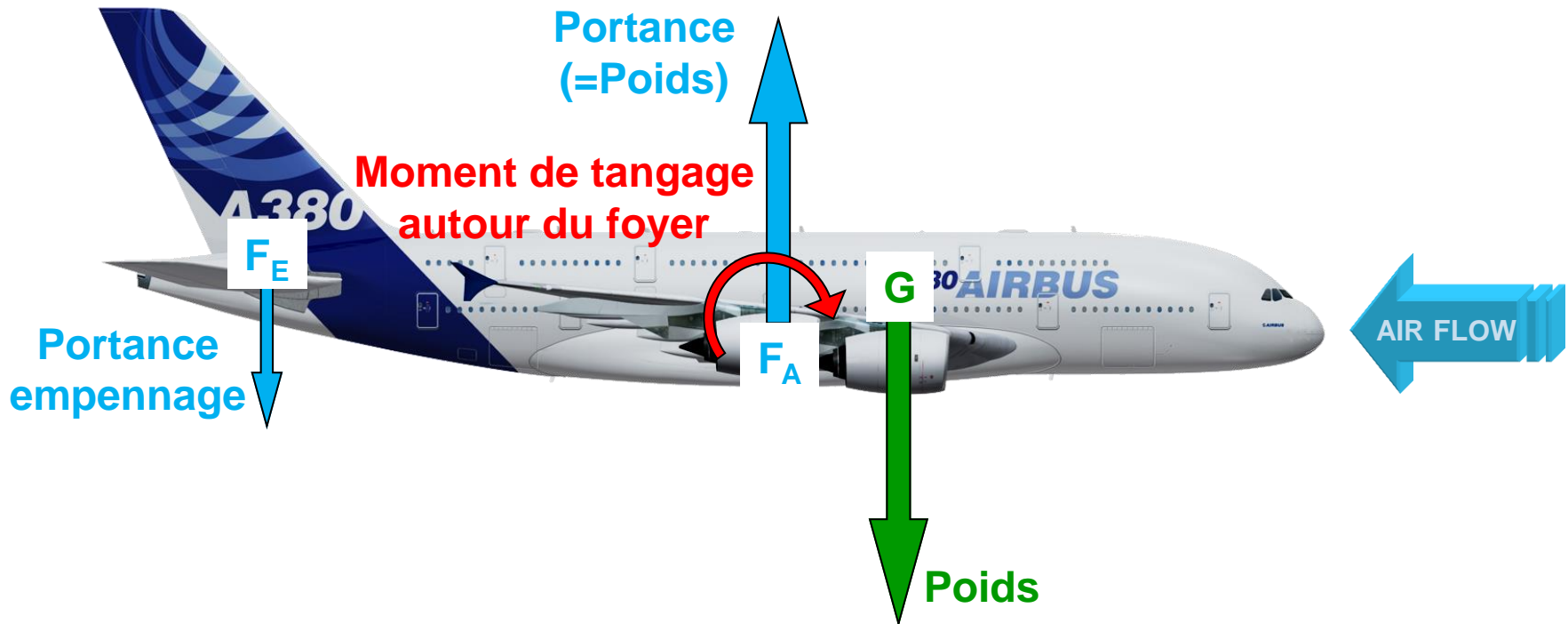
Equilibre longitudinal

- Rôle de l'empennage horizontal : diminution de masse
 - Diminution de la portance et de son moment à piquer
 - Diminution du moment à cabrer de l'empennage



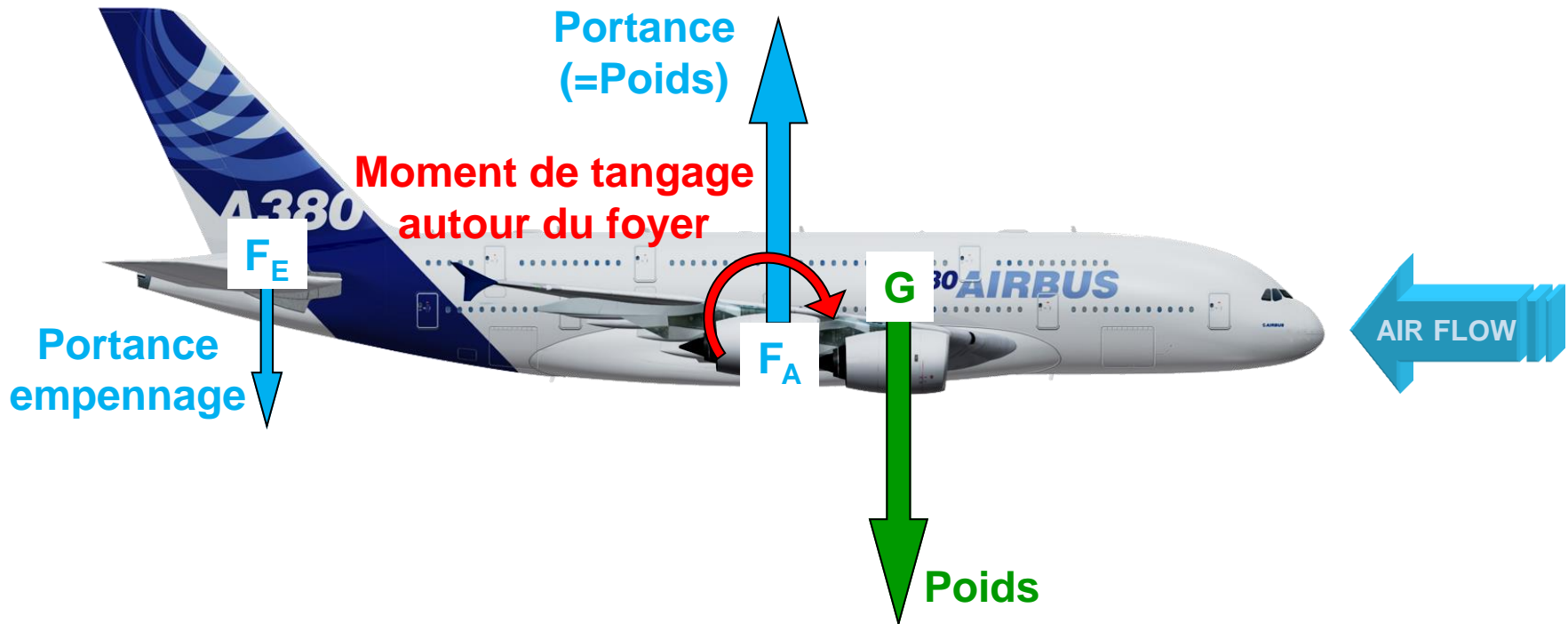
Equilibre longitudinal

- Rôle de l'empennage horizontal : avancement du CG
 - Augmentation du moment à piquer de la portance
 - Augmentation du moment à cabrer de l'empennage



Equilibre longitudinal

- Rôle de l'empennage horizontal : recul du CG
 - Diminution du moment à piquer de la portance
 - Diminution du moment à cabrer de l'empennage



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - En fonction du point de vol l'empennage doit plus ou moins déporter voire porter.
 - Plan Horizontal Fixe : braquage de la profondeur



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - En fonction du point de vol l'empennage doit plus ou moins déporter voire porter.
 - Plan Horizontal Fixe : braquage de la profondeur



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - En fonction du point de vol l'empennage doit plus ou moins déporter voire porter.
 - Plan Horizontal Fixe : braquage de la profondeur



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - La même fonction peut être réalisée par le « Plan Horizontal Réglable » (THS)
 - Braquage de la profondeur puis du plan



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - La même fonction peut être réalisée par le « Plan Horizontal Réglable » (THS)
 - Braquage de la profondeur puis du plan



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - La même fonction peut être réalisée par le « Plan Horizontal Réglable » (THS)
 - Braquage de la profondeur puis du plan



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - La même fonction peut être réalisée par le « Plan Horizontal Réglable » (THS)
 - Braquage de la profondeur puis du plan



Equilibre longitudinal

- Fonctionnement du « Trim »
 - La même fonction peut être réalisée par le « Plan Horizontal Réglable » (THS)
 - Braquage de la profondeur puis du plan



Equilibre longitudinal

- Exemples de THS :



Boeing 777 (airliner)



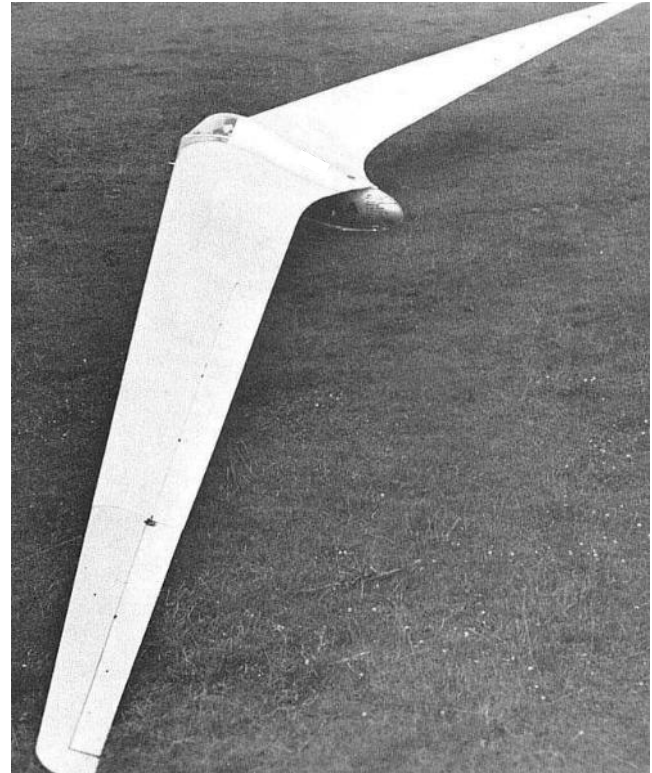
Super Etendard (assaut à la mer)

Equilibre longitudinal

- Cas particulier de l'aile volante :
 - L'équilibre longitudinal sans empennage est obtenu grâce à la forme du profil ou du vrillage de bout d'aile



Fauvel

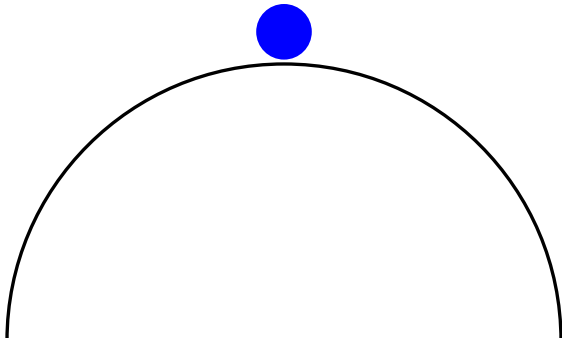


Horten

- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- **Stabilité longitudinale**
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

Stabilité longitudinale

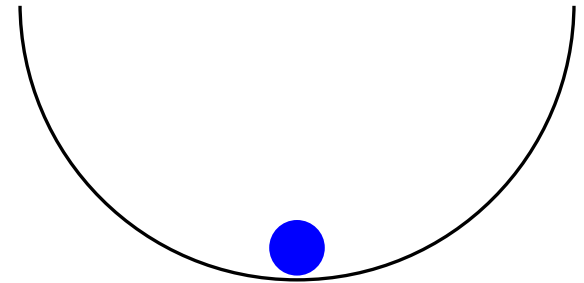
- Stabilité :
 - Un système est stable s'il tend à retourner naturellement vers sa position d'équilibre s'il en est écarté.



Instable



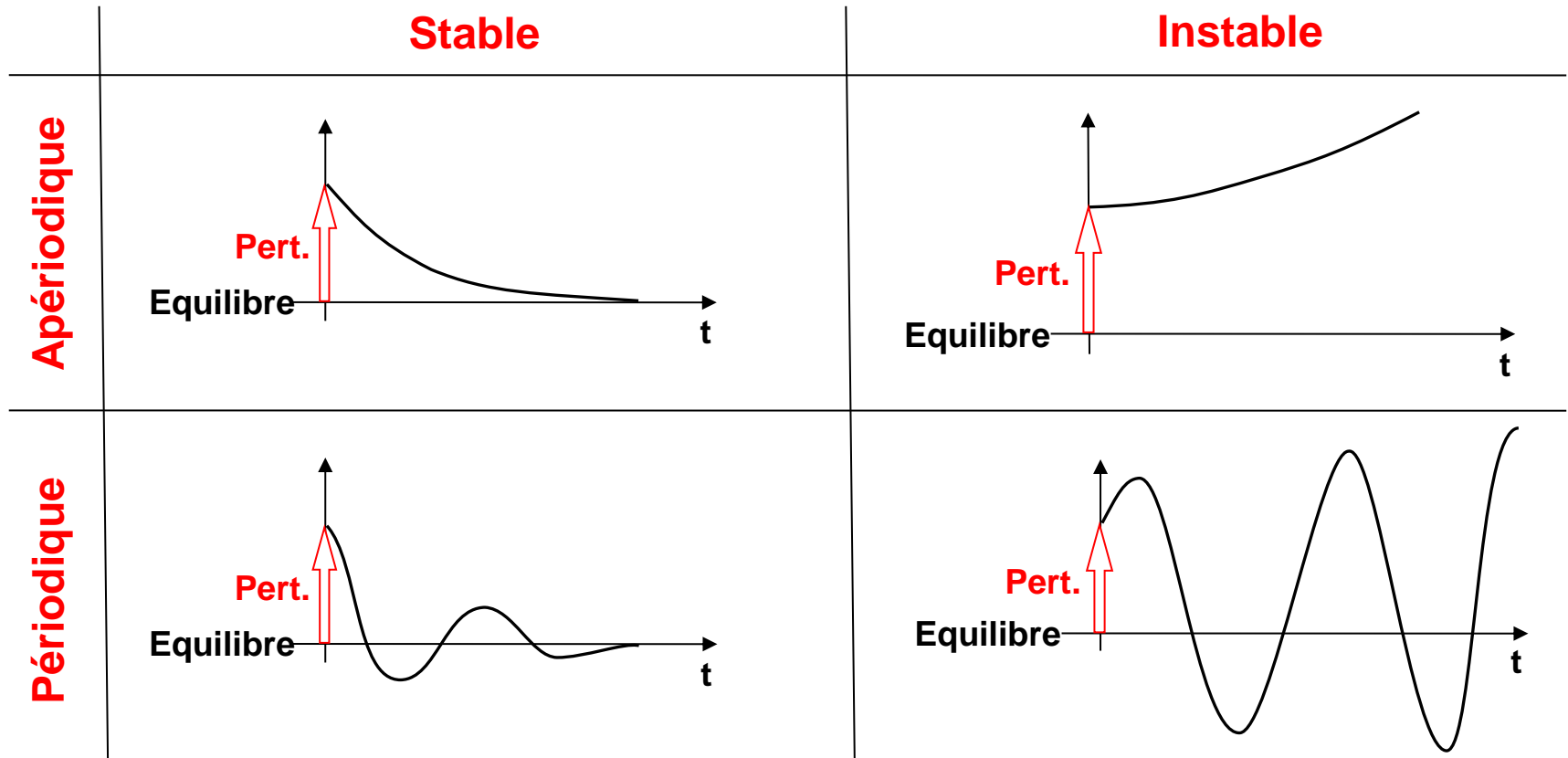
Indifférent



Stable

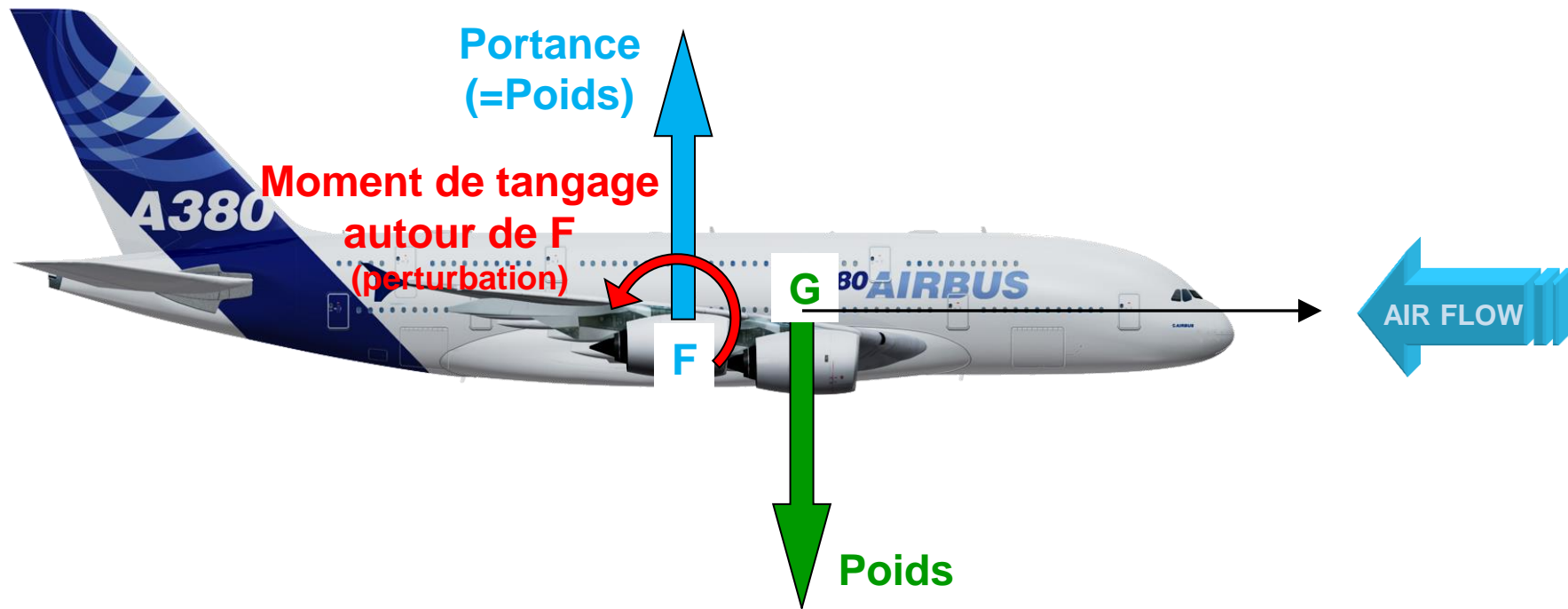
Stabilité longitudinale

- Stabilité :
 - Réponses temporelles à une perturbation :



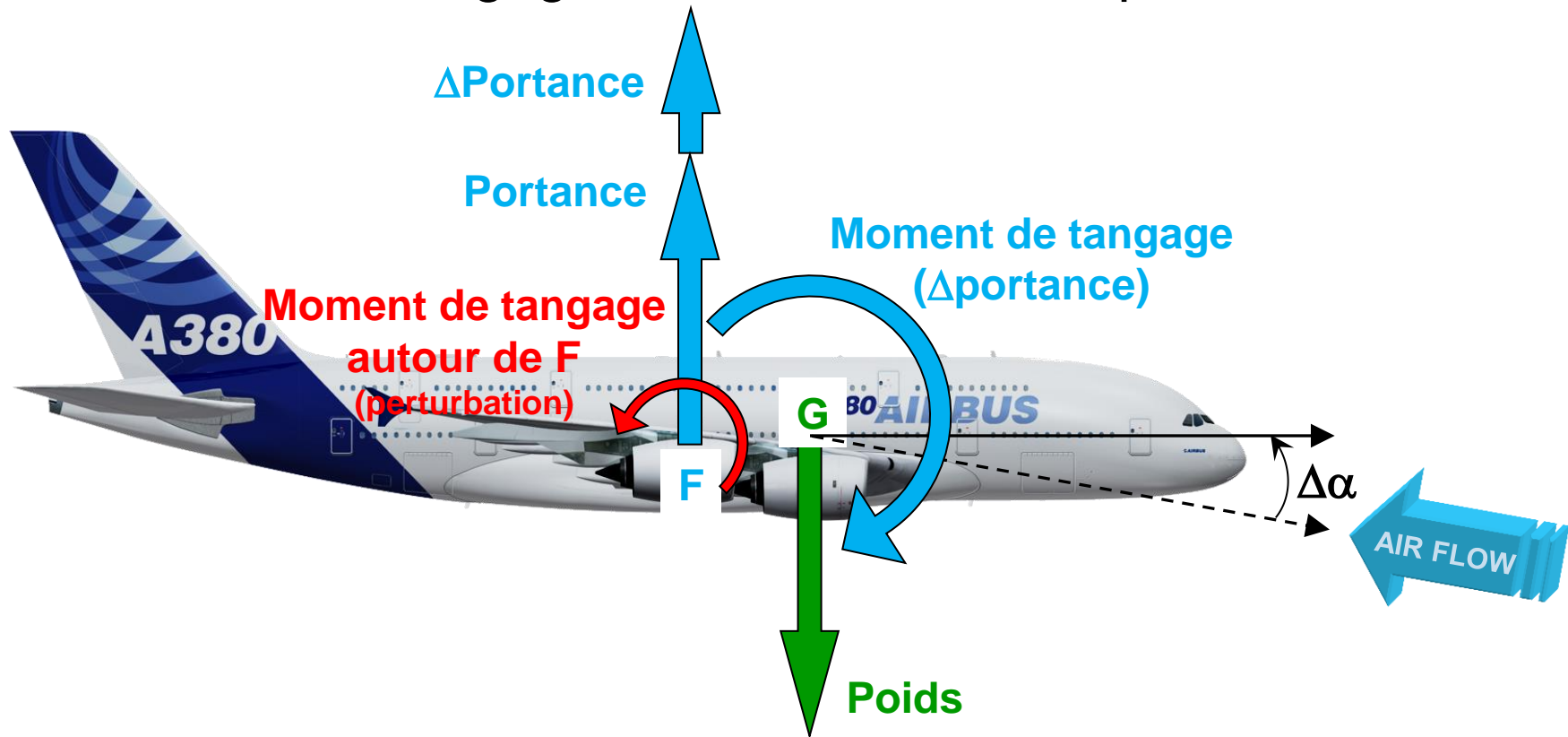
Stabilité longitudinale

- A l'équilibre longitudinal :
 - La portance totale équilibre le poids
 - La portance s'applique au foyer avion complet



Stabilité longitudinale

- Augmentation de l'incidence (action pilote, rafale...)
 - Incrément de portance au foyer avion complet
 - Moment de tangage dû à l'incrément de portance



Stabilité longitudinale

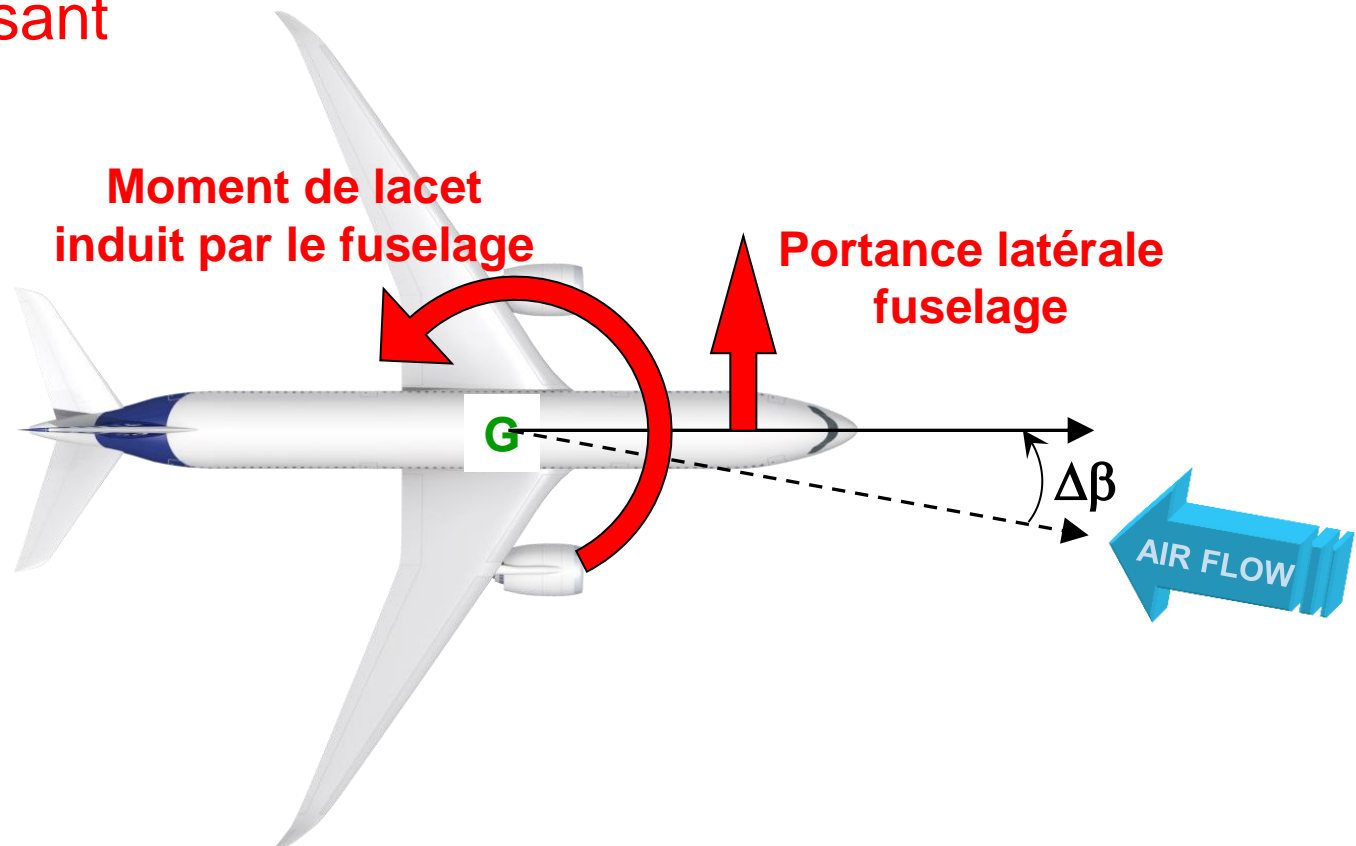
- Conséquences :
 - Si le centre de gravité est devant le foyer avion alors le moment de tangage produit tend à faire revenir l'avion vers son incidence d'équilibre : l'avion est stable longitudinalement
 - Si le centre de gravité est derrière le foyer avion alors le moment de tangage produit tend à écarter encore plus l'avion de son incidence d'équilibre : l'avion est instable longitudinalement

Le foyer avion marque la limite arrière du centrage pour la stabilité longitudinale de l'avion dit « naturel »

- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- **Stabilité latérale**
- Introduction à la dynamique longitudinale
- Introduction à la dynamique latérale

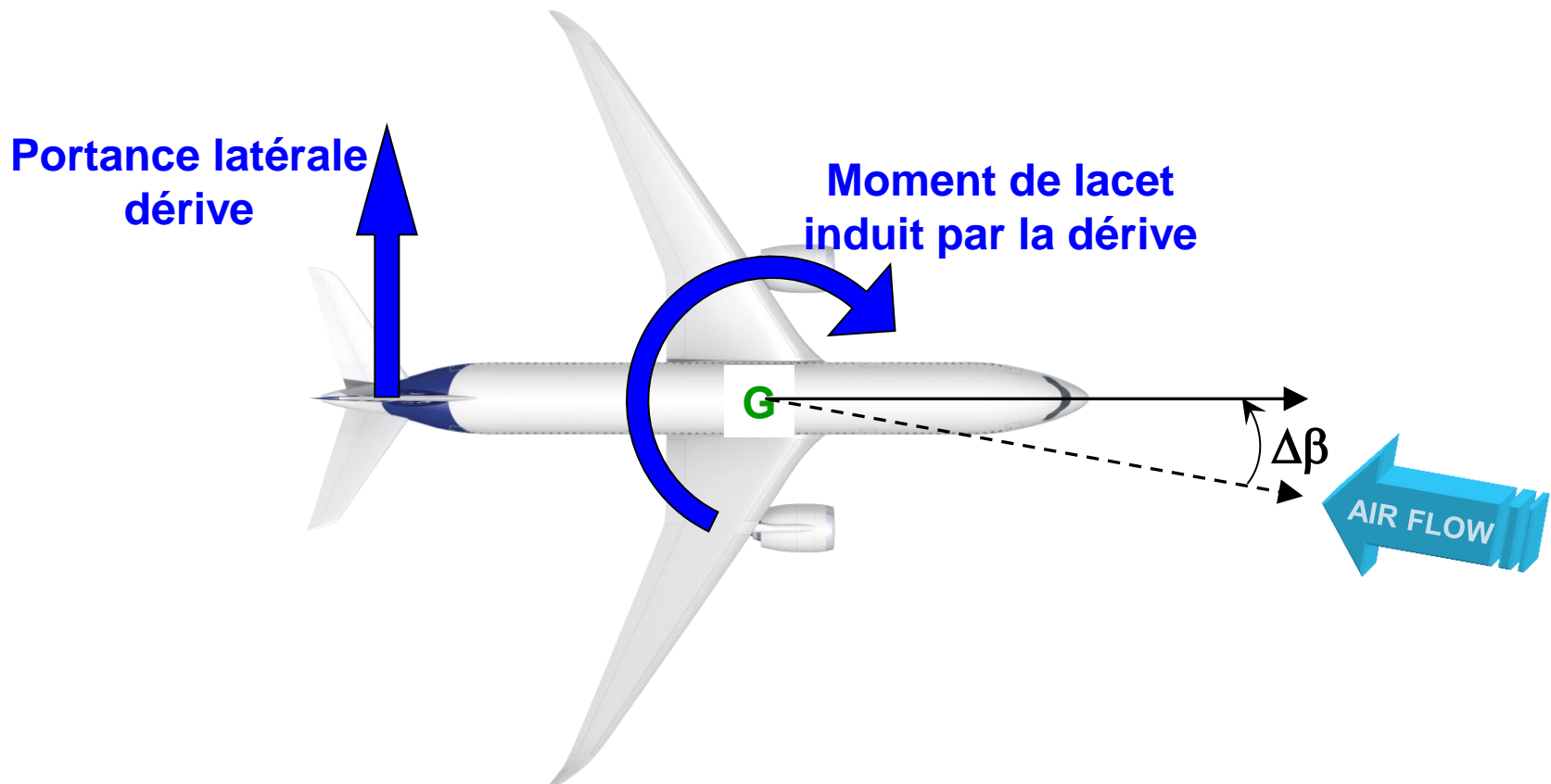
Stabilité latérale

- Prise de dérapage (action pilote, rafale...)
 - Portance latérale due au **fuselage** à l'avant
 - Moment induit qui tend à augmenter le dérapage : **déstabilisant**



Stabilité latérale

- Prise de dérapage (action pilote, rafale...)
 - Portance latérale due à la **dérive** à l'arrière
 - Moment induit qui tend à diminuer le dérapage : **stabilisant**



Stabilité latérale

- Conséquences :
 - La stabilité latérale résulte de l'effet déstabilisant dû au fuselage contré par l'effet stabilisant de dérive à l'arrière de l'avion



Boeing 747 SCA



Airbus A300-600ST

Stabilité latérale

- La stabilité latérale se règle par la position et la taille de la dérive sur l'avion naturel
- Exemple : Evolution du F100 « Super Sabre »



F100-A

Instabilité latérale à haut Mach



F100-D

- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- **Introduction à la dynamique longitudinale**
- Introduction à la dynamique latérale

Introduction à la dynamique longitudinale

- L'étude de la dynamique consiste à regarder la réponse temporelle de l'avion suite à une perturbation (rafale, entrée pilote). Cette réponse temporelle est ensuite décomposée en « modes ».
- Les évolutions temporelles de certains paramètres sont presque exclusivement composées d'un seul mode.
- En longitudinal on distingue 2 modes, du plus rapide au plus lent :
 - L'oscillation d'incidence (incidence, vitesses de tangage)
 - La phugoïde (vitesse, pente)

Introduction à la dynamique longitudinale

- Equation fondamentale de la Dynamique:

$$\begin{cases} \sum \vec{F}_{ext} = d(m\vec{V}) / dt \\ \sum \vec{M}_{ext} = d(I_G \vec{\Omega}) / dt \end{cases}$$

Portance:

$$-mV\dot{\gamma} = -mg \sin\gamma - \frac{1}{2}\rho SV^2 C_Z - F \sin(\alpha + \tau)$$

Trainée:

$$m \dot{V} = -mg \sin\alpha - \frac{1}{2}\rho SV^2 C_X + F \cos(\alpha + \tau)$$

Tangage:

$$I_y \dot{q} = \frac{1}{2}\rho SlV^2 (C_m + C_{mF})$$

Introduction à la dynamique longitudinale

4 inconnues.

Une quatrième équation vient de $\theta = \alpha + \gamma$ en longi pur.

$$\dot{\alpha} = q - \dot{\gamma}$$

Pour de petits mouvements, on peut linéariser ces équations

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \alpha \\ \gamma \\ q \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V \\ \alpha \\ \gamma \\ q \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \delta m \\ F \end{bmatrix}$$

$$dX/dt=AX+BU$$

La résolution de ce système d'équations différentielles permet de distinguer 2 mouvements oscillatoires :

- un **mode rapide** : l'**oscillation d'incidence**
- un **mode lent** : la **phugoïde**.

Introduction à la dynamique longitudinale

- Simplification pour vol longitudinal pur:

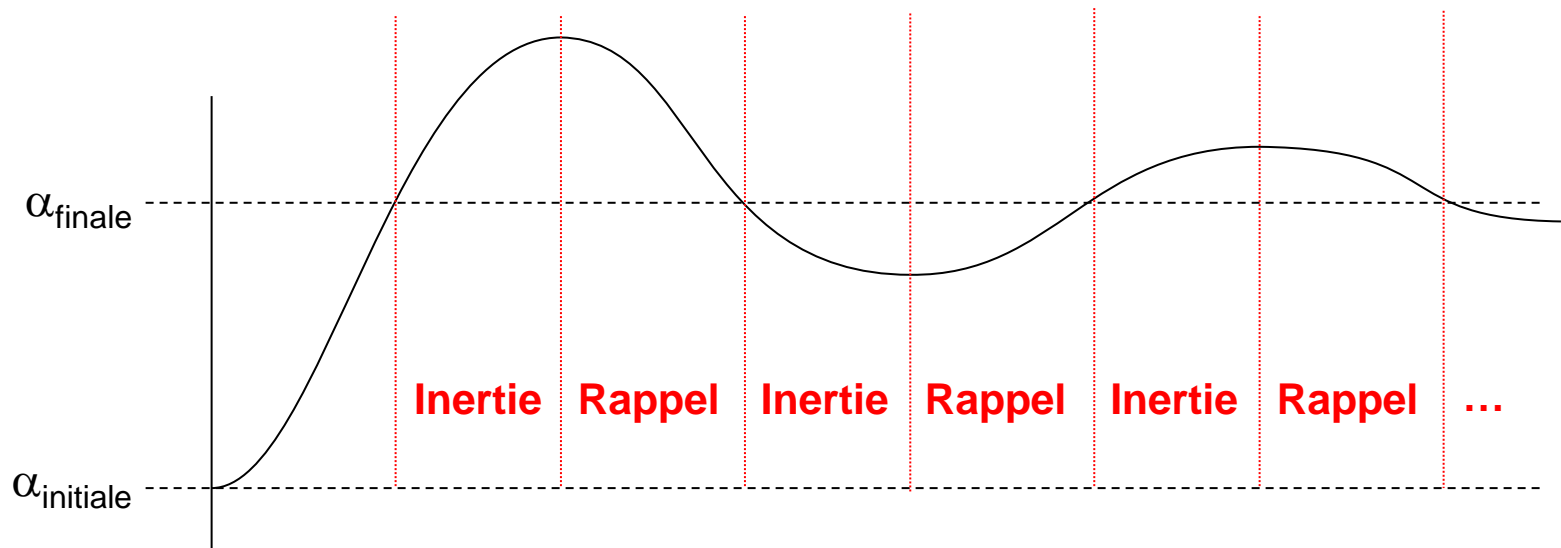
n : facteur de charge

Portance:

$$n \, mg = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_Z$$

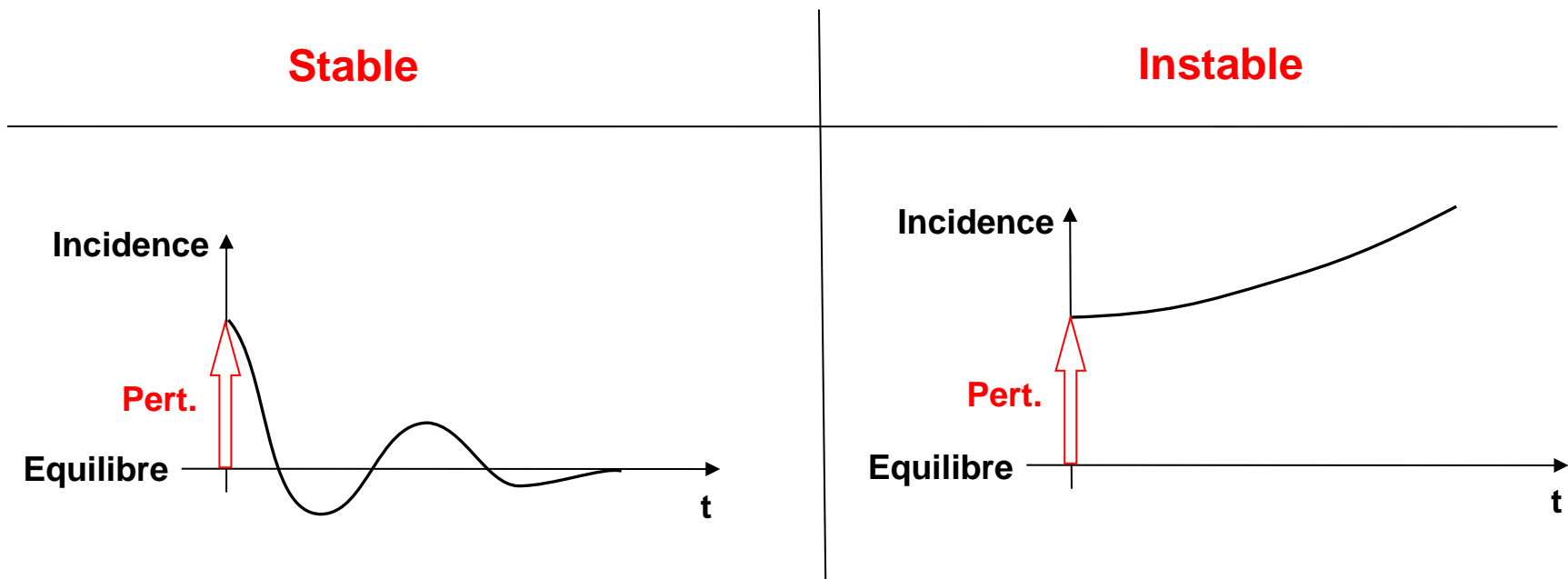
Introduction à la dynamique longitudinale

- L'oscillation d'incidence (périodique-rapide) :
 - Manche à cabrer \Rightarrow moment de tangage \Rightarrow augmentation de l'incidence
 - L'avion est embarqué par son inertie vers une incidence plus forte que son incidence d'équilibre finale
 - Mais un moment de rappel vient ramener l'avion vers une incidence plus faible
 - L'avion est embarqué par son inertie vers une incidence plus faible que son incidence d'équilibre finale...



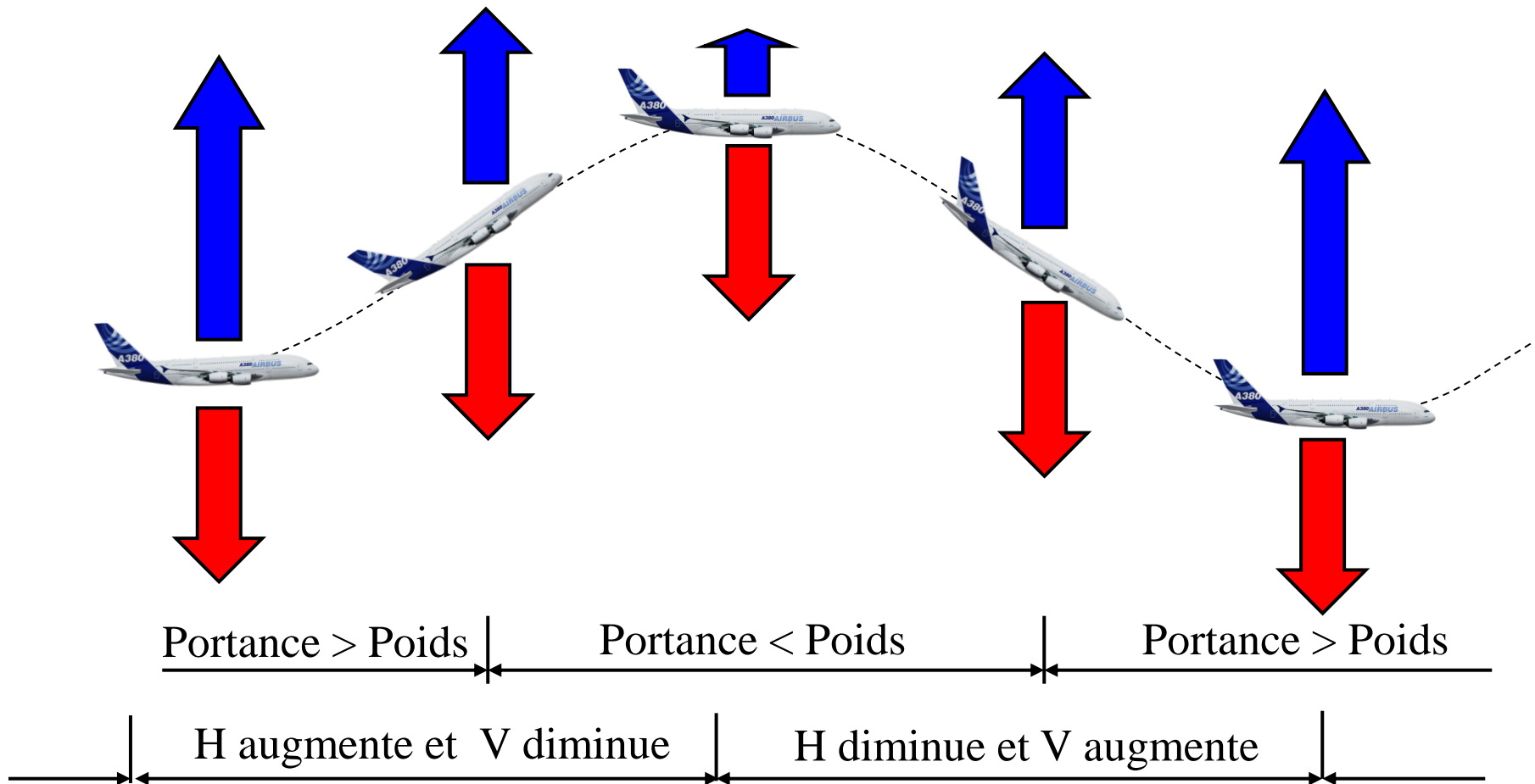
Introduction à la dynamique longitudinale

- La stabilité longitudinale se caractérise en partie par l'amortissement du mode « oscillation d'incidence »
- Lorsqu'il est stable ce mode est amorti-périodique et rapide (quelques secondes)
- Mais lorsqu'il est instable ce mode devient apériodique



Introduction à la dynamique longitudinale

- La phugoïde (périodique – lent) :

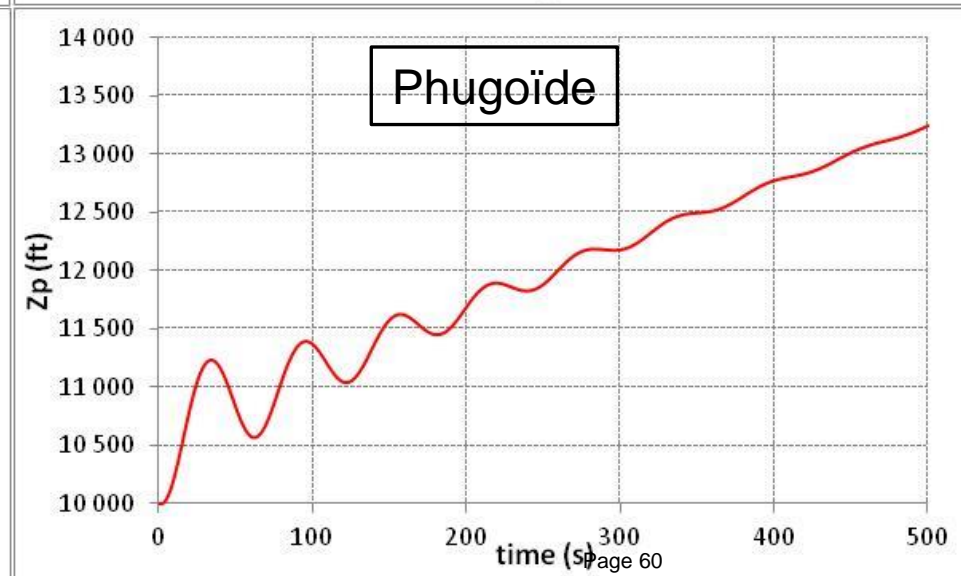
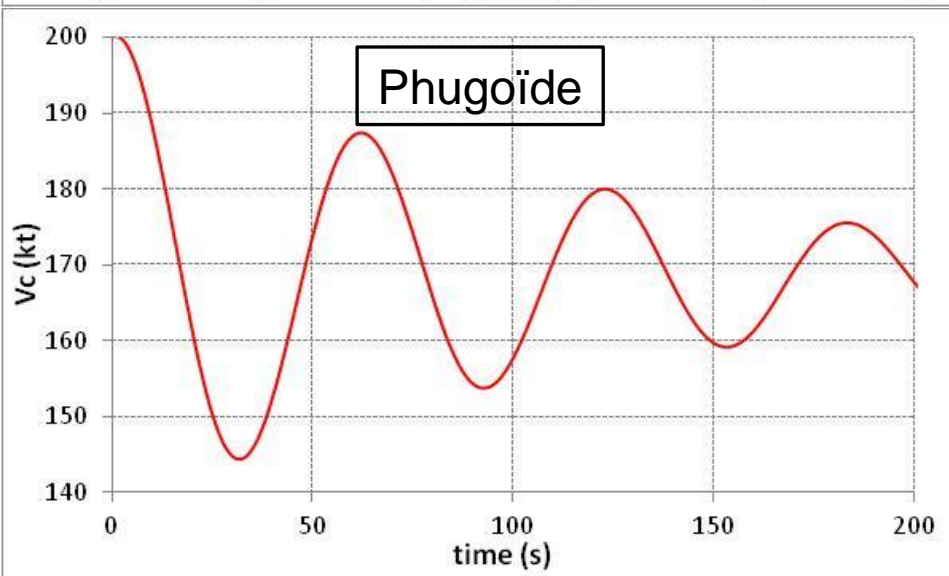
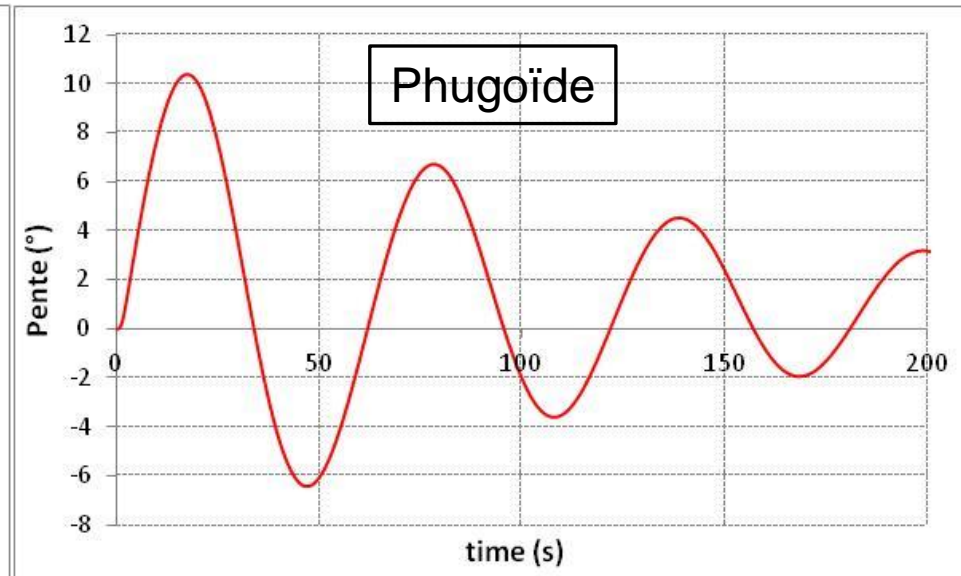
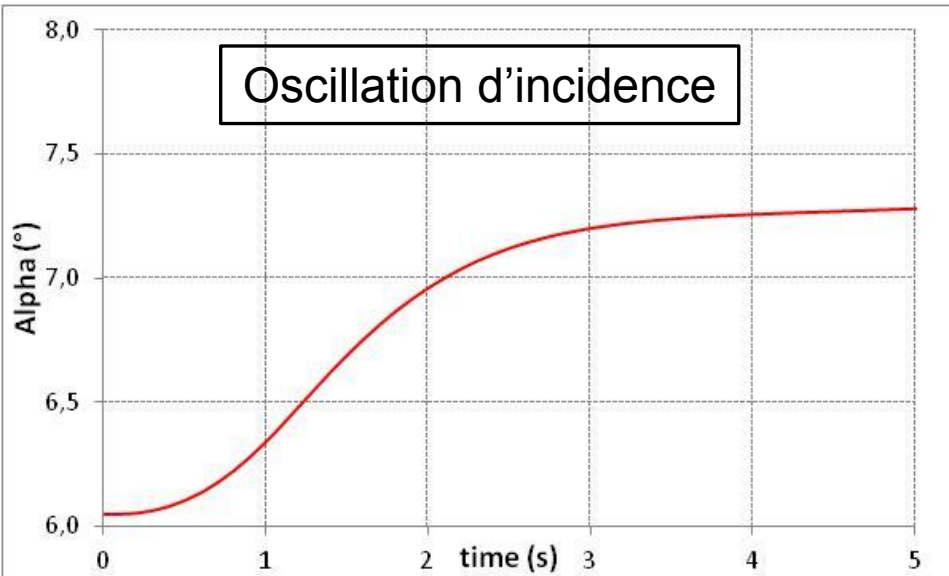


Introduction à la dynamique longitudinale

- La phugoïde (périodique – lent) :
 - Après l'OI, l'avion à une portance plus élevée qu'à l'équilibre initial. La portance est supérieure au poids \Rightarrow l'avion monte
 - Comme l'avion monte, la composante du poids sur la pente fait diminuer sa vitesse
 - Comme la vitesse diminue, la portance diminue jusqu'à ce que la portance redevienne $<$ au poids \Rightarrow la pente diminue et l'avion descend
 - Comme l'avion descend, la composante du poids sur la pente fait augmenter sa vitesse
 - Comme la vitesse augmente, la portance augmente jusqu'à ce que la portance redevienne $<$ au poids \Rightarrow la pente augmente et l'avion monte...

Introduction à la dynamique longitudinale

- Synthèse : entrée gouverne à cabrer (Avion réel)



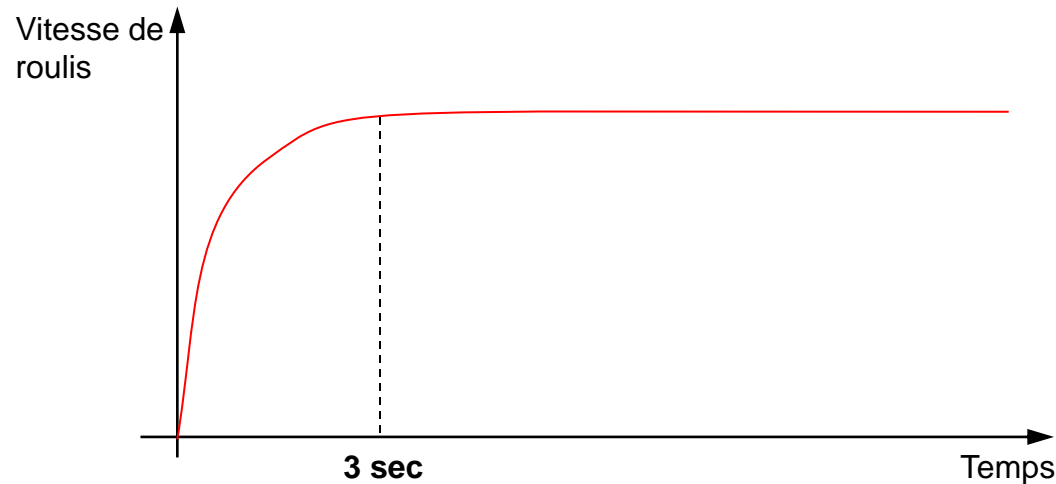
- Introduction
- Angles et repères
- Forces
- Gouvernes
- Equilibre longitudinal
- Stabilité longitudinale
- Stabilité latérale
- Introduction à la dynamique longitudinale
- **Introduction à la dynamique latérale**

Introduction à la dynamique latérale

- Comme pour le longitudinal, la réponse temporelle de l'avion à une perturbation (pilote, rafale...) est décomposée en « modes ».
- Les évolutions temporelles de certains paramètres sont presque exclusivement composées d'un seul mode.
- En latéral on distingue 3 modes, du plus rapide au plus lent :
 - Roulis pur (vitesses de roulis)
 - L'oscillation de dérapage (dérapage, vitesse de lacet)
 - Spiral (inclinaison)

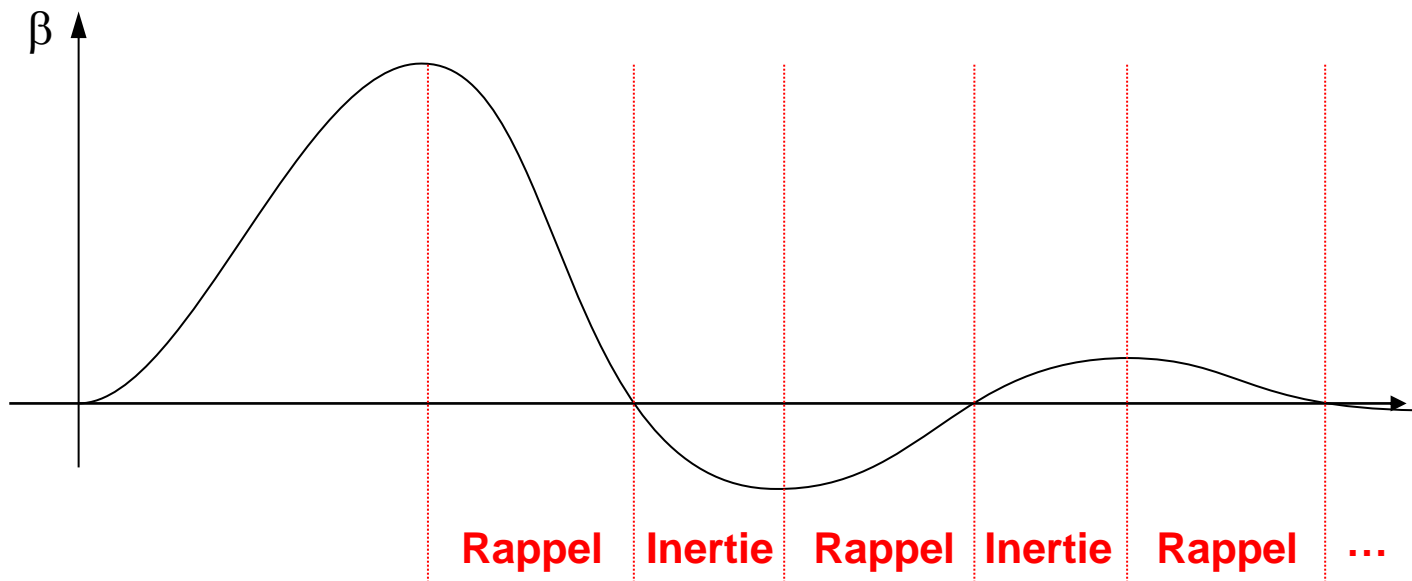
Introduction à la dynamique latérale

- Mode roulis pur (apériodique – très rapide) :
 - L'avion est mis en roulis sur une entrée manche
 - La vitesse de roulis produit une augmentation de l'incidence sur l'aile qui descend et une diminution de l'incidence sur l'aile qui monte
 - L'augmentation de la portance sur l'aile qui descend crée un moment de roulis qui s'oppose au mouvement (et de même sur l'aile qui monte)
 - Ce moment de roulis tend à amortir fortement la vitesse de roulis qui se stabilise très rapidement vers sa valeur finale.



Introduction à la dynamique latérale

- Mode oscillation de dérapage (périodique – rapide) :
 - Entrée au palonnier \Rightarrow moment de lacet \Rightarrow prise de dérapage
 - Un moment de rappel vient ramener l'avion vers un dérapage nul
 - L'avion est embarqué par son inertie vers le dérapage opposé...



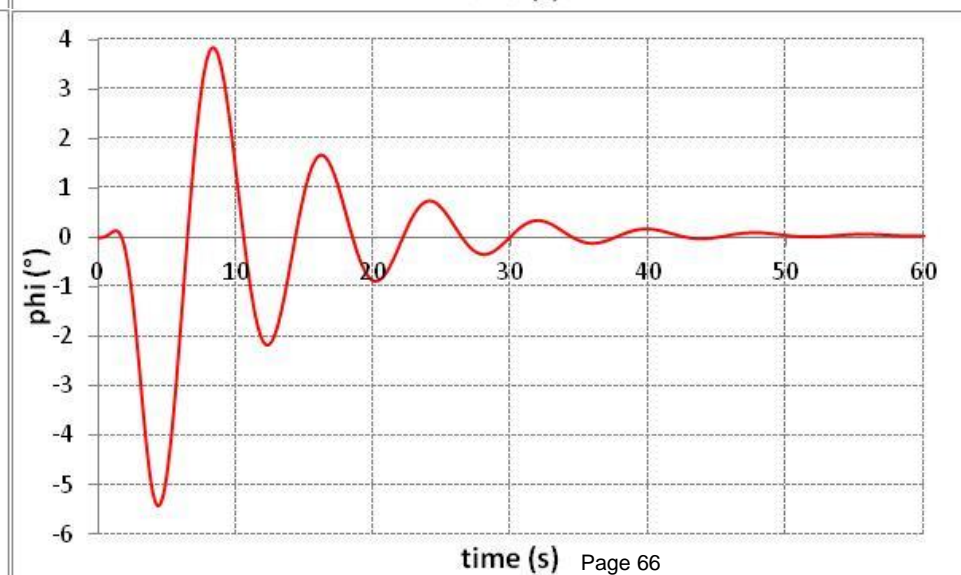
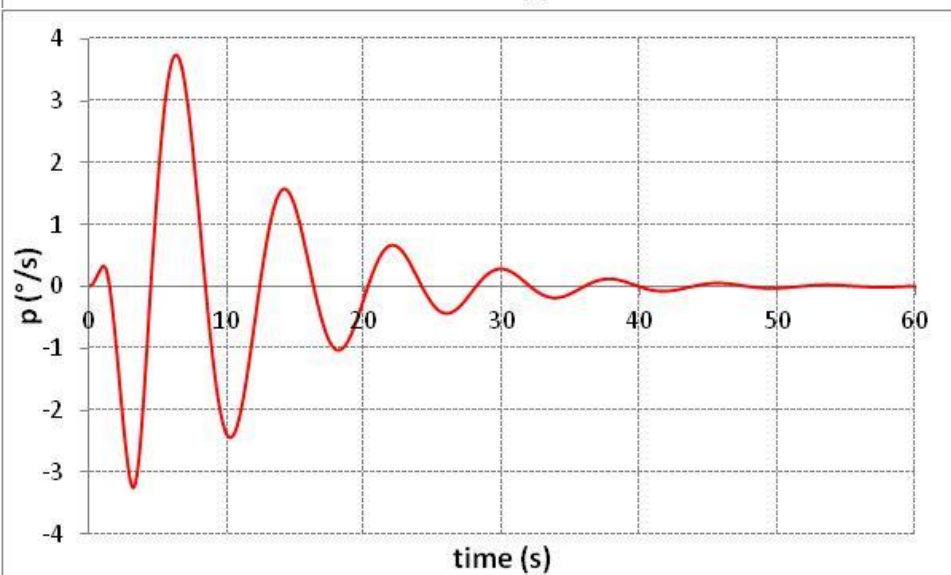
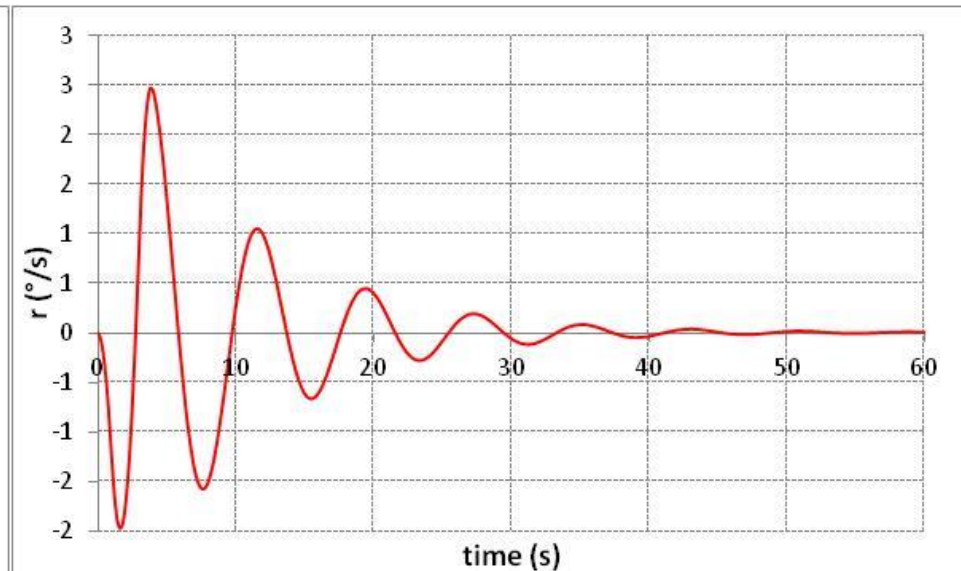
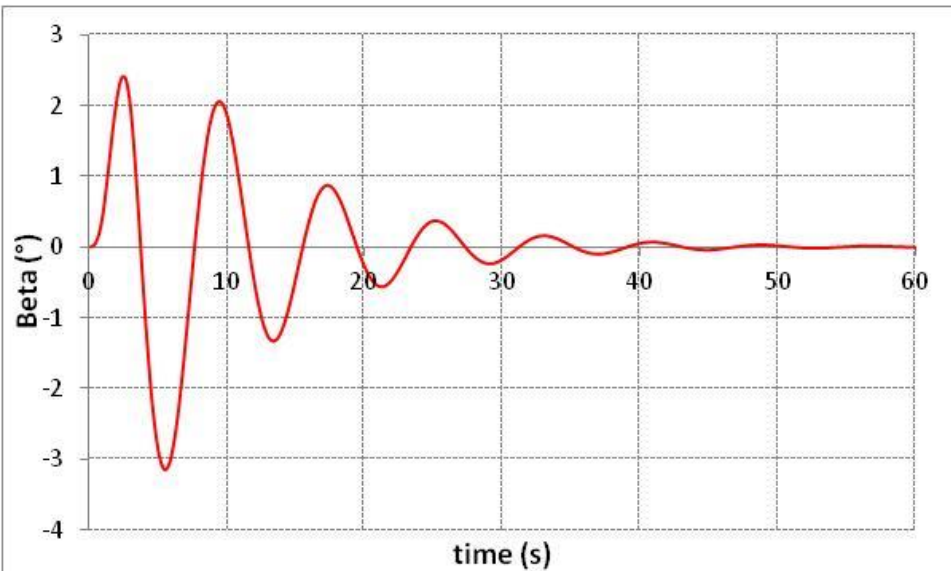
Introduction à la dynamique latérale

- Similitude entre le mode oscillation d'incidence en longitudinal et oscillation de dérapage en latéral
- Il y a cependant un couplage des mouvements de roulis et de lacet sur l'oscillation de dérapage.
- C'est le Roulis Hollandais ou « Dutch roll »



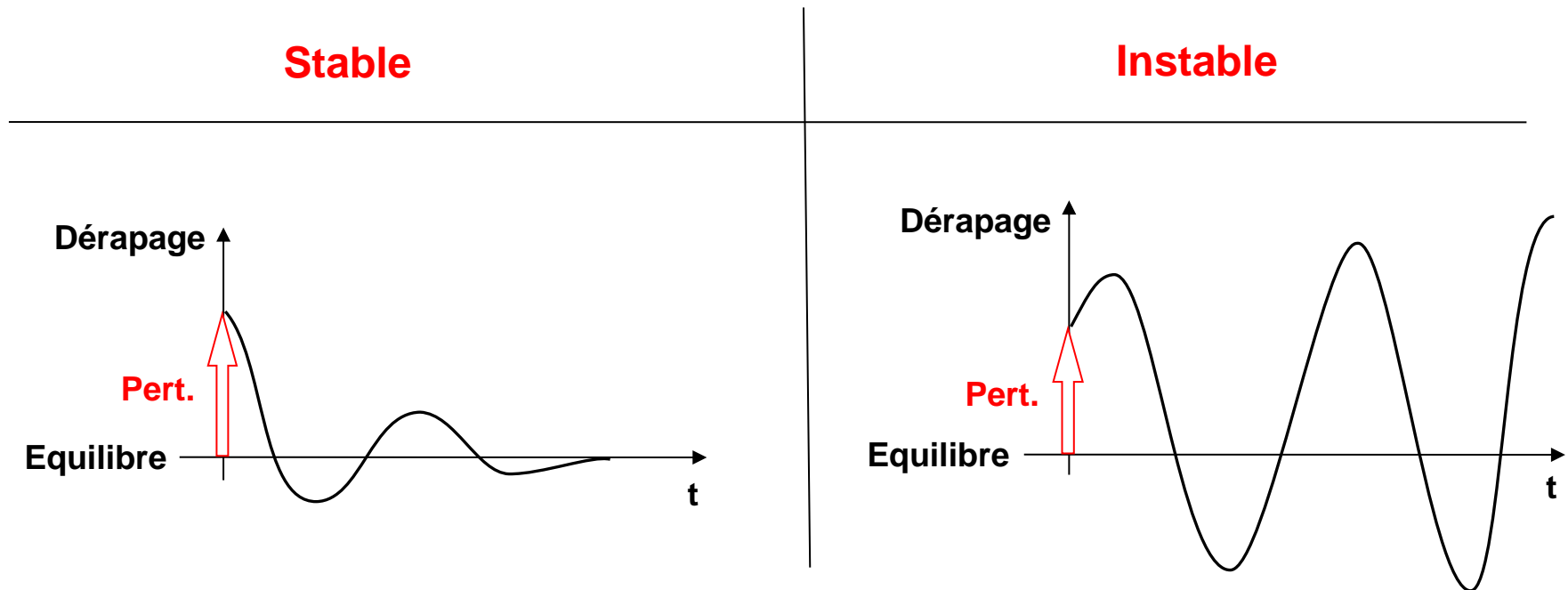
Introduction à la dynamique latérale

- Exemple : oscillation de dérapage sur un doublet dérive



Introduction à la dynamique latérale

- La stabilité latérale se caractérise en partie par l'amortissement du mode « oscillation de dérapage »
- Lorsqu'il est stable ce mode est périodique
- Et lorsqu'il devient instable ce mode reste périodique, contrairement à l'oscillation d'incidence

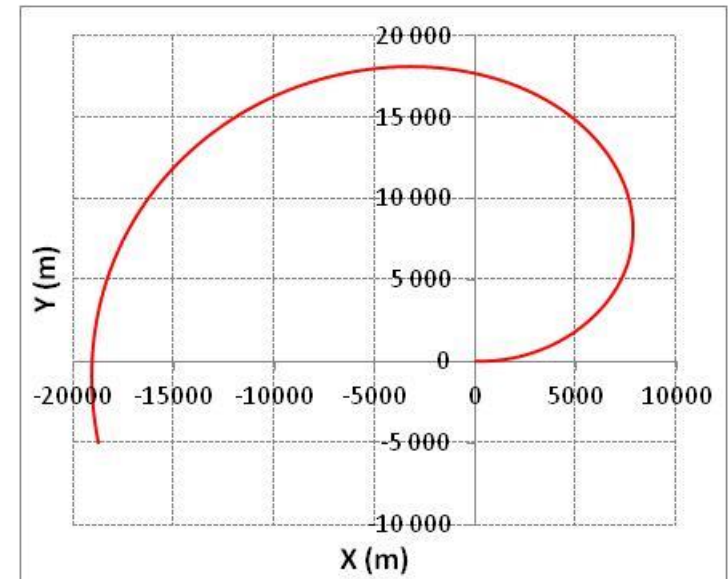
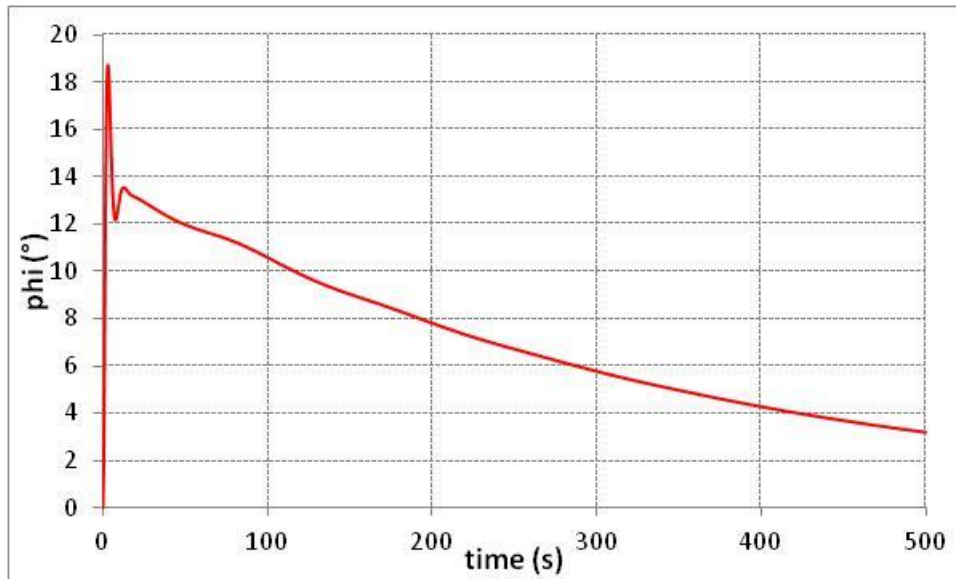


Introduction à la dynamique latérale

- Mode spiral (apériodique – très lent) : L'avion est incliné et les commandes remettent au neutre
 - La composante du poids sur l'aile basse fait glisser l'avion sur sa trajectoire \Rightarrow l'avion prend du dérapage
 - Le dérapage augmente la portance sur la dérive \Rightarrow la stabilité de route de l'avion tend à annuler ce dérapage et embarquer l'avion dans le virage
 - Le dérapage augmente la portance sur l'aile basse et diminue celle sur l'aile haute \Rightarrow l'effet dièdre tend à ramener les ailes à plat et faire sortir l'avion du virage
 - Deux effets contradictoires apparaissent :
 - La stabilité de route qui embarque l'avion dans le virage
 - L'effet dièdre qui fait sortir l'avion du virage
 - Selon la prépondérance d'un des 2 effets l'avion est stable ou instable spiral

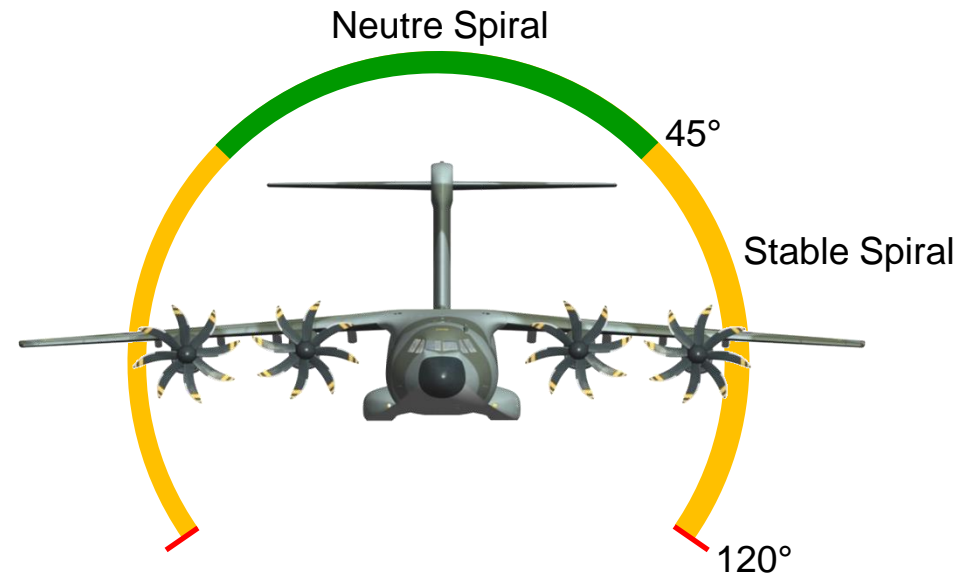
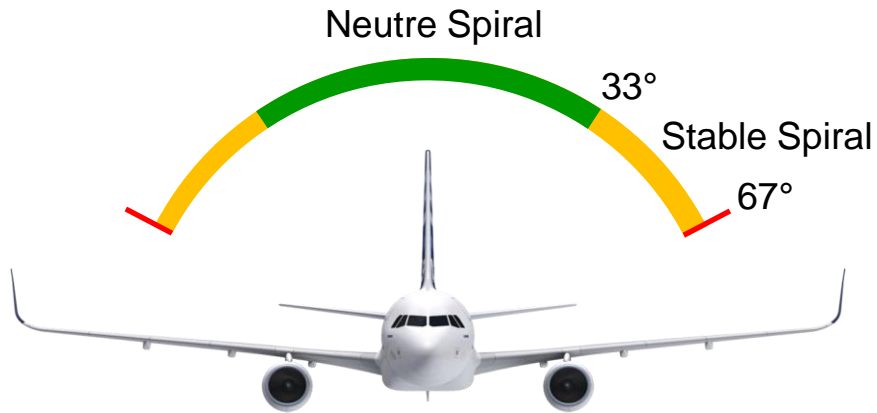
Introduction à la dynamique latérale

- Exemple : Mode spiral sur une entrée aileron (avion naturel)



Introduction à la dynamique latérale

- Réglage de la stabilité spiral avec les lois de pilotages





© AIRBUS Operations S.A.S. All rights reserved. Confidential and proprietary document. This document and all information contained herein is the sole property of AIRBUS Operations S.A.S. No intellectual property rights are granted by the delivery of this document or the disclosure of its content. This document shall not be reproduced or disclosed to a third party without the express written consent of AIRBUS Operations S.A.S. This document and its content shall not be used for any purpose other than that for which it is supplied. The statements made herein do not constitute an offer. They are based on the mentioned assumptions and are expressed in good faith. Where the supporting grounds for these statements are not shown, AIRBUS Operations S.A.S. will be pleased to explain the basis thereof. AIRBUS, its logo, A300, A310, A318, A319, A320, A321, A330, A340, A350, A380, A400M are registered trademarks.