

# 2SC5110 - Performances et trajectoires de vol

Responsables : **Sihem TEBBANI**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ENERGÉTIQUE PROCÉDÉS**

Langues d'enseignement : **FRANCAIS**

Type de cours : **Cours ST**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30**

Année académique : **2024-2025**

Niveau avancé : **non**

---

## Présentation, objectifs généraux du cours :

Le cours spécifique de la séquence thématique 5 « Pilotage et contrôle de vol dans le transport aéronautique et spatial » permet d'acquérir les compétences et connaissances nécessaires pour la modélisation et commande d'un engin en vol (dans et hors de l'atmosphère) en vue d'améliorer les performances du système. Il est divisé en deux parties.

La première partie de ce cours est un tronc commun dont les objectifs sont d'apporter un socle commun de connaissances et de compétences nécessaires pour cette séquence thématique. Ce tronc commun est organisé en trois temps. Premièrement, en s'appuyant sur le cours de mécanique proposé en première année, la mécanique du solide est introduite pour donner les outils nécessaires à la construction de modèles d'avion, de lanceur, satellites, drone... Dans un deuxième temps, le cours décrira la dynamique et les stratégies de contrôle d'un avion. Enfin la mécanique spatiale est introduite pour donner les outils nécessaires à la description du mouvement, des perturbations et des manœuvres hors atmosphère.

La seconde partie du cours correspond aux cours d'introduction aux enseignements d'intégration. Dans cette partie, chaque partenaire industriel intervient auprès des élèves qui auront choisis son enseignement d'intégration. Les objectifs sont d'apporter de nouvelles connaissances et compétences nécessaires pour réussir la semaine d'intégration mais également de renforcer des notions vues dans le tronc commun de ce cours. Ces cours seront axés sur la conception et pilotage de trois systèmes : un avion, un lanceur et un satellite.

Plusieurs experts des secteurs aéronautique et spatial interviendront dans ce cours.

## Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence) :

ST5

## Prérequis :

Il n'y a pas de prérequis spécifique

## Plan détaillé du cours (contenu) :

### Tronc commun :

#### • Mécanique générale :

Cette partie du cours propose de donner les notions de base en mécanique du solide. Elle abordera les points suivants :

- Mouvement de solide indéformable (éléments « succincts » de cinématique et de dynamique pour un solide indéformable, théorèmes fondamentaux de la dynamique pour un solide indéformable).
- TD 1 : Mesure des paramètres d'inertie d'un microsatellite
- Liaisons entre solides indéformables (composition des mouvements, efforts de liaison).
- TD 2 : mouvement de Cubli
- Actionneurs dans le domaine aérospatial (stabilité de la rotation autour d'un axe principal d'inertie, effet gyroscopique, application aux actionneurs gyroscopiques, roues de réaction).
- TD 3 : attitude d'un satellite

### 2. Mécanique du vol :

Cette partie du cours propose d'illustrer la notion de stabilité dynamique à travers l'étude de stabilité d'un avion en vol. L'objectif est d'identifier les mouvements induits par de petites perturbations autour d'un état d'équilibre et de déterminer l'amortissement ou l'amplification de ces mouvements en fonction des propriétés de l'avion. La partie en cours magistral donne tous les outils mathématiques de modélisation pour aborder l'étude de stabilisation. Il abordera les points suivants :

- Définition des angles d'Euler
- Formulation matricielle
- Équations linéarisées dynamiques du mouvement
- Résolution des équations linéarisées
  
- Présentation de mouvements caractéristiques : phugoïde, oscillation d'incidence, roulis hollandais, roulis pur et spirale.

Les séances de TD serviront à mettre en pratique la démarche et à réaliser une étude de stabilité dynamique exhaustive.

### 3. Mécanique spatiale

L'objectif de cette partie est d'appréhender le mouvement libre d'un corps dans un champ gravitationnel, de concevoir des manœuvres orbitales permettant de mener à bien une mission donnée, et de modéliser l'influence de différentes perturbations orbitales sur le mouvement d'un corps. Il abordera les points suivants :

- Mouvement d'un corps dans un champ de pesanteur
- Notion d'orbite képlérienne. Cas des orbites elliptiques
- Perturbations orbitales
- Manœuvres orbitales

### Cours électif (un au choix en fonction de l'enseignement d'intégration choisi)

Dans la deuxième partie, trois cours seront proposés, et correspondant à des cours d'introduction des enseignements d'intégration.

#### 1. Pilotage d'un avion

Ce cours a pour objectif de détailler la modélisation et pilotage d'un avion. Il abordera les points suivants :

- Présentation d'un cahier des charges pour les performances en vol d'un avion
- Modélisation des forces (dont poussée, portance et traînée)
- Coefficients et ratio pour l'étude des performances des trajectoires.

## 2. Pilotage d'un lanceur

Le cours de pilotage des lanceurs vise à aborder les fondamentaux du contrôle d'attitude d'un lanceur, en phases propulsées et balistiques. Les exigences à respecter par la fonction pilotage ainsi que les perturbations physiques à gérer au cours du vol seront abordées. Des principes de synthèse de commande seront présentés, ainsi que des aspects relatifs aux actionneurs

## 3. Pilotage d'un satellite

Ce cours a pour objectif de détailler la modélisation et pilotage d'un satellite. Il abordera les points suivants :

- Architecture d'un système SCAO,
- Missions typiques, familles de SCAO, types d'orbites, couples perturbateurs,
- Capteurs et actionneurs pour un satellite
- modes et algorithmes de contrôle, contribution du SCAO dans les trade-offs
- Cahier des charges pour un système de SCAO ( stabilité, performances, robustesses, différents contrôleurs,
- Exemples d'application

## Déroulement, organisation du cours :

Cours magistraux et travaux dirigés.

Plusieurs exemples de systèmes aéronautiques et spatiaux réels seront présentés.

Pour le cours de mécanique générale, la pédagogie est de type classe inversée. Les cours sont sous forme de vidéos à étudier avant la séance en présentiel qui est une mise en pratique (via un TD).

## Organisation de l'évaluation :

Le cours spécifique sera évalué individuellement par un examen final d'une durée de 1H30. Cette évaluation se fera par QCM.

## Moyens :

- Equipe enseignante : F. Gatti, E. Bourgeois, Ch. Betrancourt, intervenant du CNES, TAS et Dassault Aviation, S. Tebbani (coordination)
- Taille des TD : 35 élèves
- Outils logiciels : Matlab

## Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

Les objectifs sont d'acquérir les connaissances et compétences pour :

- Modéliser le comportement d'un engin en vol dans le cadre de la mécanique du solide, de la mécanique du vol et de la mécanique spatiale.
- Décrire la dynamique des véhicules dans le cas de vols dans et hors de l'atmosphère (trajectoire, modes propres, instabilités).
- Choisir et déployer des stratégies de contrôle et pilotage.

Ce cours permettra également d'acquérir une vision globale des systèmes de pilotage pour les véhicules en vol et des exigences en termes de performance et des contraintes associées.

## Description des compétences acquises à l'issue du cours

:

At the end of the course, students will acquire an operational understanding of the design tools of a flying vehicle in flight through the acquisition of:

- basic concepts in solid mechanics, flight mechanics and space mechanics
- good knowledge of the requirements and constraints of the control of a flying system
- good knowledge of different aerospace systems and vehicles (aircraft, UAV, satellite, launcher).

They will be able to:

- model vehicle dynamics in the case of flights in and out of the atmosphere (trajectory, modes, instabilities).
- Choose and develop control strategies.
- Evaluate the flight performance of the flight of a vehicle and to propose effective and economical solutions to improve it.

More specifically, the acquired skills are:

- Analyze, design and implement complex systems with scientific, technological, human and economic components (C1).
- Develop in-depth skills in a scientific or sectoral field and a family of professions (C2).
- Act, undertake and innovate in a scientific and technological environment (C3).
- Be operational, responsible, and innovative in the digital world (C6).
- Know how to convince (C7)

## Bibliographie :

- Techniques et technologies des véhicules spatiaux , CNES, Cépaduès Editions, 1998.
- Trajectoires spatiales , O. Zarrouati, Cépaduès Editions, 1987.
- Orbital Mechanics for Engineering Students, H. D. Curtis, Butterworth-Heinemann. 2013.
- Practical Methods for Aircraft and Rotorcraft Flight Control Design: An Optimization-Based Approach, Mark B. Tischler, Tom Berger, Christina M. Ivler, Mohammadreza H. Mansur, Kenny K. Cheung and Jonathan Y. Soong. ISBN: 978-1-62410-443-5.
- Advances In Aircraft Flight Control, M B Tischler, CRC Press, 28 jun. 1996.
- Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems Brian L. Stevens, Frank L. Lewis, Eric N. Johnson, John Wiley & Sons, 2 oct. 2015 - 768 pages
- Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes, Third Edition 2015, Bandu N. Pamadi, ISBN: 978-1-62410-274-5.