

---

# PROGRAMME INGÉNIEUR

2023-2024

2e année / 3e année

---

## Option Disciplinaire Aéronautique

### OD AERONAUTIQUE

---

RESPONSABLE DU PROGRAMME

Guy CAPDEVILLE



# 1er Semestre

Unité d'Enseignement	Crédits ECTS	Parcours	Acronyme	Libellé
UE 73 / 93	12	Tronc commun	DYGAZA DYVOL ISN STAV	Dynamique des gaz Dynamique du vol Introduction à la simulation numérique Modélisation de la structure des avions
UE 74 / 94	13	Tronc commun	AEPF DYSTR MTURB P1AERO PROAE	Aérodynamique en fluide parfait Dynamique des structures Modélisation de la turbulence Projet 1 Systèmes propulsifs en aéronautique

# 2e Semestre

Unité d'Enseignement	Crédits ECTS	Parcours	Acronyme	Libellé
UE 103 / 83	14	Tronc commun	AEAC CAE P2AERO SAE SPSAE	Aéroacoustique Conception des aéronefs Projet 2 Simulations aérodynamiques Sécurité passive des structures aéronautiques

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Dynamique des gaz [DYGAZA]

*Responsable(s) du cours : Guy CAPDEVILLE*

### Objectifs

Introduction générale à la physique des écoulements compressibles, appliquée au domaine de l'aérodynamique.

### Plan de l'enseignement

1. Principes fondamentaux
2. Équations pour un écoulement compressible en régime stationnaire
3. Écoulements compressibles uni-dimensionnels
4. Système d'ondes dans un écoulement supersonique stationnaire.
5. Propulsion par réaction
6. TD utilisant le logiciel STARCCM+

### Bibliographie

- [1] A.H. Shapiro, The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow, Vol. I, Ed. Ronald Press, (1953)
- [2] M. J. Zucrow, J. D. Hoffman, Gas Dynamics, Vol. I, Ed. Wiley & Sons, (1976).
- [3] J. D. Anderson, Modern compressible flows. With historical perspective, Ed. Mc GrawHill, (2003).

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	26 hrs	6 hrs	0 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Dynamique du vol [DYVOL]

*Responsable(s) du cours : Laurent PERRET*

### Objectifs

A partir des notions de base de l'aérodynamique (Cours INTAERO), donner les équations des écoulements autour des surfaces portantes, déterminer les efforts aérodynamiques correspondants, définir les équilibres et les marges de stabilité pour tous les mouvements de l'avion ainsi que ses performances.

### Plan de l'enseignement

1. Introduction
2. Rappels mécanique des fluides et aérodynamique
3. La portance
4. La traînée
5. Effet du nombre de Mach
6. Des éléments sur la propulsion
7. Mécanique du vol
8. Performances de l'avion

### Bibliographie

- Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics, B.W. McCormick, Wiley;
- Introduction to Flight, J.D. Anderson, McGraw Hill;
- Flight Physics, E. Torenbeek & H. Wittenberg, Springer;
- Boundary Layer Theory, H. Schlichting & K. Gersten, Springer;
- Polycopié de Mécanique des Fluides, Pr J.-F. Sini, ECN

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.33)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.67)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	22 hrs	8 hrs	0 hrs	0 hrs	2 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Introduction à la simulation numérique [ISN]

*Responsable(s) du cours : Laurent GORNET*

### Objectifs

Acquérir une culture générale en modélisation numérique.

### Plan de l'enseignement

- Classification des EDP. Elliptiques/Parabolique/Hyperboliques.
- Présentation des principales méthodes de discrétisation : Différences Finies, Volumes Finis, Eléments Finis. Caractérisation et contrôle d'un algorithme numérique.
- Applications à des cas représentatifs en aérodynamique et structure.
- Applications sur le code Cast3M en fluide et structure

### Bibliographie

Résolution numérique des équations aux dérivés partielles, A. Le. Pourhiet, Cepadues

Introduction à la méthode des éléments finis en mécanique des fluides, S. Gounand, CEA

A first Course in finite Elements, J. Fish, T. Belytschko, Wiley

Cours éléments finis, Centrale Nantes, H Oudin : <https://meefi.pedagogie.ec-nantes.fr/MEF/MEF.htm>

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	16 hrs	8 hrs	8 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 73 / 93

## Modélisation de la structure des avions [STAV]

*Responsable(s) du cours : Laurent GORNET*

### Objectifs

Décrire les lois de comportement des matériaux métalliques et composites dans les domaines linéaire et non-linéaire. Techniques de changement d'échelle en matériaux et en structures (poutres composites). Simuler l'endommagement et l'amorçage de la propagation des fissures pour des chargements quasi-statique et de fatigue. Calcul éléments finis sur Abaqus de structures aéronautiques avec des éléments poutres, plaques et tridimensionnels.

### Plan de l'enseignement

Mécanique de la rupture : théorie énergétique de la rupture, singularité du champ de contrainte, propagation de fissures en mode mixte, Mise en oeuvre de ma mécanique de la rupture à l'aide de la méthode des Eléments Finis.

Plasticité et instabilités: Plasticité et instabilité des structures métalliques élancées.

Mécanique de l'endommagement : Méthode de l'état local, fatigue, aspects phénoménologiques, modèles de comportement (métaux, composites), objectivité et régularisation des modèles de comportement adoucissants. Simulation Eléments Finis du comportement mécanique des structures Aéronautiques jusqu'à la phase ultime de la rupture.

Interaction modèles-expériences: Identification des lois de comportement, optimisation d'une structure aéronautique avec le code Abaqus.

### Bibliographie

Aircraft Structures, for Engineering students, THG Megson, Butterworth Heinemann

Généralités sur les matériaux composites, L. Gornet, hal.archives-ouvertes.fr

Mécanique des matériaux solides, J. Lemaitre - JL Chaboche

Mechanics of Aircraft structures, C.T. Sun, Wiley

### Évaluation

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	24 hrs	6 hrs	0 hrs	0 hrs	2 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Aérodynamique en fluide parfait [AEFP]

*Responsable(s) du cours : Guy CAPDEVILLE*

### Objectifs

- Introduire les modèles classiques d'un écoulement subsonique incompressible.
- Décrire les techniques de modélisation dérivées de ces modèles.
- Décrire l'évolution des idées en aéronautique, depuis le début du XIXème siècle.
- Les TD sont consacrés à la programmation d'un des modèles présentés en cours-

### Plan de l'enseignement

- Concepts et principes introductifs en aérodynamique.
- Fondamentaux d'un écoulement incompressible non-visqueux - Théorème de Kutta-Joukowski.
- Écoulement incompressible autour de profils - Méthode numérique des singularités vorticitaires.
- Écoulement incompressible autour d'ailes - La «ligne portante» de Prandtl.
- Théorie linéaire des profils minces - La correction de Prandtl-Glauert.
- Calcul des caractéristiques aérodynamiques d'un profil par la méthode des singularités (TD).

### Bibliographie

- J.D. Anderson, Fundamentals of aerodynamics, Ed. Mc Graw-Hill, (1984)
- A. H. Shapiro, The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow, Vol. I, Ed. Ronald Press, (1953).

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	24 hrs	8 hrs	0 hrs	0 hrs	0 hrs



# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Dynamique des structures [DYSTR]

*Responsable(s) du cours : Pascal COSSON / Patrick ROZYCKI*

### Objectifs

La mise en service de structures aéronautiques requiert pour assurer la sécurité des passagers de contrôler par exemple les fréquences et modes propres de l'avion ou de parties structurelles mais aussi de contrôler par exemple le dimensionnement des liaisons d'un train d'atterrissage. Le cours se propose de donner les connaissances nécessaires à la mise en données de tels problèmes sur les thématiques du mouvement et des vibrations de systèmes multi-corps. La résolution numérique des précédentes équations est aussi abordée afin de pouvoir proposer des solutions rapidement quand un logiciel commercial n'est pas disponible.

Le cours a deux objectifs principaux : le premier concerne les clés qui permettent d'élaborer des modèles analytiques simples mais suffisamment représentatifs de systèmes pour pouvoir apporter une réponse rapide à un problème donné. Le second objectif est d'avoir des connaissances de base solides sur les méthodes disponibles de résolution et de se forger ainsi un esprit critique en fonction des avantages et désavantages des méthodes employées.

A partir de ces connaissances et ces compétences, les étudiant(e)s pourront proposer des modèles simples avec une résolution numérique associée pour un problème multi-corps donné. Ils/elles pourront sereinement les analyser, les critiquer et infirmer ou confirmer les résultats obtenus, et ce même dans le cadre de l'utilisation d'un logiciel commercial dédié.

### Plan de l'enseignement

1. Modélisation de systèmes multi-corps
  - Paramétrage, liaisons, équations de Lagrange, paramétrage cinématiquement ou non admissible...
2. Vibrations.
  - Système à 1 ou plusieurs degrés de liberté, problème aux valeurs propres, vibrations libres ou forcées...
3. Méthodes numériques pour l'intégration en temps des équations
  - Euler, Runge Kutta, Newmark, méthodes implicites ou explicites, stabilité...

### Bibliographie

M. Géradin & A. Cardon, Flexible Multibody Dynamics - A Finite Element Approach, Wiley, 2001

D. Le Houedec, Mécanique des Solides, Nantes

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	12 hrs	8 hrs	12 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Modélisation de la turbulence [MTURB]

*Responsable(s) du cours : Laurent PERRET*

### Objectifs

Ce cours constitue une introduction aux écoulements turbulents et à leur modélisation.

Il est complété par des applications sur l'analyse statistique d'un écoulement de sillage et l'étude des modèles de turbulence à l'aide d'un code CFD.

### Plan de l'enseignement

1. Introduction
2. Phénoménologie de la turbulence
3. La couche limite turbulente
4. Modélisation statistique de la turbulence
5. Modélisation par la simulation des grandes échelles

### Bibliographie

- Boundary Layer Theory, H. Schlichting & K. Gersten, Springer;
- Turbulent Flows, S.B. Pope, Cambridge univ Press;
- Turbulence en mécanique des fluides, P. Chassaing, Cépaduès

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.5)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.5)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	16 hrs	8 hrs	6 hrs	0 hrs	2 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Projet 1 [P1AERO]

*Responsable(s) du cours : Guy CAPDEVILLE*

### Objectifs

Mise en application des enseignements dispensés dans l'option.

### Plan de l'enseignement

### Bibliographie

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	1	0 hrs	0 hrs	0 hrs	32 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 1er Semestre - UE 74 / 94

## Systèmes propulsifs en aéronautique [PROAE]

*Responsable(s) du cours : Vincent BERTHOMÉ*

### Objectifs

L'objectif de ce cours est d'étudier de façon approfondie la thermodynamique des turboréacteurs utilisés en propulsion aéronautique.

### Plan de l'enseignement

Dans un premier temps, une présentation générale et historique permettra de définir la problématique de la propulsion aéronautique et les enjeux associés.

Suite à cela, une présentation des systèmes propulsifs aéronautiques (turbomoteurs et turboréacteurs) sera effectuée. Le cycle de turboréacteur monocorps monoflux sera étudié ainsi que son fonctionnement hors adaptation. Enfin, une étude du turboréacteur double corps double flux sera effectuée.

Dans une dernière partie, la motorisation des hélicoptères sera étudiée (thermodynamique générale et thermique, rôle et principe de fonctionnement, les voilures tournantes).

### Bibliographie

### Évaluation

Évaluation individuelle :   EVI 1 (coefficient 0.5)  
  EVI 2 (coefficient 0.5)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	30 hrs	0 hrs	0 hrs	0 hrs	2 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Aéroacoustique [AEAC]

*Responsable(s) du cours : Guy CAPDEVILLE*

### Objectifs

Comprendre et modéliser les mécanismes générateurs de bruit dans un écoulement turbulent de fluide compressible.

### Plan de l'enseignement

- Équations en perturbations.
- Analogies aéro-acoustiques.
- Méthodes numériques spécifiques.
- Applications: jets supersoniques, cavités,...
- TD numériques d'illustration et d'application des modèles introduits en cours

### Bibliographie

A. P. Dowling, J.E. Ffowcs-Williams, Sound and sources of sound, Ed. Wiley & Sons, (1982)

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	21 hrs	11 hrs	0 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Conception des aéronefs [CAE]

*Responsable(s) du cours : Laurent GORNET / Laurent PERRET*

### Objectifs

L'objectif de première partie du cours est de donner les connaissances réglementaires de base sur les principales catégories d'aéronefs, de définir les méthodes de calcul des charges appliquées en vol et au sol et de dimensionner les sous-ensembles majeurs de la cellule (surfaces portantes et fuselage). La deuxième partie consiste à présenter les différents procédés spécifiques à la fabrication et à l'assemblage des composants (métalliques et en matériaux composites) des cellules d'avion.

### Plan de l'enseignement

- Historique,
- Principes constructifs des aéronefs,
- Charges en vol et au sol sur les avions
- Avant-projet d'aéronefs,
- Méthodes de dimensionnement applicables aux surfaces portantes et fuselage d'un avion.
- Généralités et spécificités des fabrications aéronautiques.
- Procédés de fabrication et d'assemblage des composants métalliques et en matériaux composites.

### Bibliographie

- Résistance des Matériaux appliquée à l'aviation, P. Vallat.
- Calcul des structures d'avions - cours ECP, F. Delisée.
- Aérodynamique - cours ENSAE, P. Rebuffet.
- Le projet d'avion léger, L. de Goncourt.
- Les secrets de la construction des aéronefs légers, M. Fékété.
- Design of Light aircraft (Richard D Hiscocks)
- Aircraft Structures (David J. Peery)

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	12 hrs	0 hrs	20 hrs	0 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Projet 2 [P2AERO]

Responsable(s) du cours : Guy CAPDEVILLE

### Objectifs

Mise en application des enseignements dispensés dans l'option.

### Plan de l'enseignement

### Bibliographie

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	2	0 hrs	0 hrs	0 hrs	48 hrs	0 hrs

# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Simulations aérodynamiques [SAE]

*Responsable(s) du cours : Boris CONAN / Guy CAPDEVILLE / Laurent PERRET*

### Objectifs

- Permettre de se familiariser avec des logiciels de calcul spécifiques, en résolvant des problèmes classiques d'aérodynamique.
- Prolonger, introduire ou illustrer les cours de MTURB, AENM et AEAC.
- Comparer les solutions fournies par des modèles numériques différents.
- Confronter les résultats numériques avec l'expérience et la théorie.

### Plan de l'enseignement

Techniques de génération d'un maillage structuré/non-structuré (CM)

- Critères d'évaluation d'un maillage (CM).
- Présentation du logiciel de calcul STARCCM+ (CM).
- Modélisation d'un jet supersonique en sortie de tuyère - régimes de fonctionnement d'une tuyère à col.
- Choix du modèle de turbulence: influence sur les calculs de la traînée et de la portance (MTURB) - cas test de la colline ou de la marche.
- Modélisation d'une entrée de réacteur supersonique - Diffraction d'une onde de choc - Calculs stationnaires/instationnaires (AENM).
- Bruit généré par un écoulement - Problème d'acoustique (AEAC)
- Modélisation numérique d'un profil d'aile NACA en régimes subsonique/trans-sonique/supersonique.

### Bibliographie

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	6 hrs	16 hrs	10 hrs	0 hrs	0 hrs



# INGÉNIEUR - OD AERONAUTIQUE

2e année / 3e année - 2e Semestre - UE 103 / 83

## Sécurité passive des structures aéronautiques [SPSAE]

Responsable(s) du cours : Patrick ROZYCKI

### Objectifs

Les enjeux industriels au niveau de la sécurité, notamment dans le domaine des transports, imposent une connaissance de plus en plus précise du comportement des matériaux et des structures sous des sollicitations de type dynamique rapide.

L'objectif de ce cours est d'examiner les méthodes actuelles et les tendances futures dans ce domaine, dans sur les plans mécanique, numérique et expérimental. Les notions abordées sont essentiellement la modélisation des matériaux sous sollicitations dynamiques (lois de comportement, influence de la vitesse de déformation, méthodes de caractérisation expérimentales), les règles de conception au crash, la simulation numérique (outils et code de calcul pour la mise en place d'un modèle) et les moyens expérimentaux que l'on peut mettre en place pour caractériser le comportement de structure.

Grâce à l'ensemble de ces notions, l'élève ingénieur pourra ainsi mettre en relation la mise en place d'un modèle en regard des conditions d'expérimentations et confronter les différentes problématiques relatives à chacun de ces outils. Cela ne pourra que renforcer son sens critique et accroître ses capacités afin de proposer les meilleures corrélations expérimentales/numériques.

Pour concrétiser les acquis, un projet sera réalisé par l'élève ingénieur : il participera dans un premier temps à la réalisation complète d'un essai expérimental d'écrasement sur puits de chute vertical, d'une structure simple. Dans un second temps, il aura à proposer le modèle numérique s'y référant. Enfin, il aura à critiquer les résultats et à mettre en avant les différentes problématiques dans chacune des parties.

### Plan de l'enseignement

1. Généralités sur les chocs
  - Nature, type et classification des chocs
2. Crash dans le domaine des transports
  - Généralités, Sécurité, approches...
3. Simulation numérique
  - Lois de comportement, différentes méthodes de résolution, prise en compte des non linéarités...
4. Moyens expérimentaux
  - Description, différents types d'essais (chocs frontaux, latéraux)...
5. Etude d'un modèle analytique pour des tubes à sections circulaires ou carrés
6. Etude du cas simple
  - Réalisation d'un essai expérimental de crash d'une structure simple, simulation numérique de l'essai et confrontations expérimental/numérique

### Bibliographie

N. Jones, Structural Crashworthiness, Cambridge University Press, 1997

Jorge A.C. Ambrósio, Manuel F.O. Seabra Pereira, F. Pina da Silva, Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant, Springer Netherlands, 1997

### Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1.0)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	4 hrs	0 hrs	28 hrs	0 hrs	0 hrs