
PROGRAMME INGÉNIEUR

2024-2025

2e année / 3e année

Option Disciplinaire Propulsion et Transports

OD PROPULSION

RESPONSABLE DU PROGRAMME

Georges SALAMEH



1er Semestre

Unité d'Enseignement	Crédits ECTS	Parcours	Acronyme	Libellé
UE 73	12	Tronc commun	COMBUP MOTCI THERMPRO TURBO	Combustion et émissions polluantes en propulsion Moteur à combustion interne Thermodynamique pour la propulsion Turbomachines pour la propulsion
UE 74	13	Tronc commun	DYGAZP ENERGP P1PROPULS PRAUT PROAE	Dynamique des gaz Energie en Propulsion Projet 1 Propulsion automobile - électrique et hybride Systèmes propulsifs en aéronautique

2e Semestre

Unité d'Enseignement	Crédits ECTS	Parcours	Acronyme	Libellé
UE 83	2	Tronc commun	LASPA P2PROPULS PROMA TFERO TPPRO	Lanceurs spatiaux Projet 2 Propulsion maritime Transports ferroviaires : urbain et grandes lignes Travaux pratiques en propulsion

INGÉNIEUR - OD PROPULSION

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

Combustion et émissions polluantes en propulsion [COMBUP]

Responsable(s) du cours : Xavier TAUZIA

Pré-requis

notions de thermodynamique

Objectifs

Cet enseignement a pour objectifs :

- D'apporter les connaissances fondamentales sur la combustion et les émissions de polluants. A la fin du cours l'étudiant sera en particulier capable de :
 - écrire des réactions de combustion dans le cas d'un mélange stœchiométrique ou pauvre
 - calculer le pouvoir calorifique à partir des enthalpies de formation
 - calculer la température adiabatique de flamme
 - évaluer l'auto-inflammation
 - calculer une vitesse de flamme laminaire
 - utiliser la variable de mélange Z pour décrire les flammes de diffusion
- De présenter quelques aspects appliqués de la combustion dans les machines (notamment les moteurs à combustion interne et les turbines à gaz) : choix du carburant et alimentation, paramètres de réglage de la combustion, ...
- D'exposer les moyens de réduire les émissions de polluants à la source et par post-traitement.

Plan de l'enseignement

Ce cours constitue une étude des principales connaissances concernant les processus liés à la combustion, les mécanismes de formation des émissions polluantes, et les moyens de les réduire à la source.

Tout d'abord sont présentés les aspects généraux liés à la chimie et la thermodynamique de la combustion, les notions d'état initial et d'état final d'enthalpie de formation, de cinétique chimique, des relations entre mécanique des fluides et combustion. Sont présentés également les modes d'inflammation, la combustion laminaire, puis turbulente. Par ailleurs, sont présentés de manière générale les mécanismes physico-chimiques à l'origine des principales émissions de polluants provenant de la combustion (imbrûlés tels que monoxyde de carbone et hydrocarbures, oxydes d'azote NO et NO₂, particules fines).

Les principes fondamentaux évoqués précédemment sont ensuite complétés par l'étude de la combustion et de la dépollution dans les moteurs à pistons (à allumage commandé et à allumage par compression) et les turbines à gaz et brûleurs industriels (pré mélange et diffusion). Le choix des carburants (incluant le bilan de GES du « puits à la roue » et les carburants de synthèse) est discuté et les systèmes d'alimentation en carburant décrits. Les paramètres d'influence et de réglage de la combustion sont présentés (richesse, dilution par des résiduels, phasage, étagement, ...) ainsi que les combustion anormales (cliquetis, instabilités, extinction) dont l'apparition limite les plages de réglage. Les moyens de réduction à la source des émissions polluantes (choix des paramètres de réglage, recirculation de gaz brûlés, injection d'eau, ...) sont étudiés. Enfin, les principaux systèmes de post-traitement (catalyseur 3 voies, catalyseur d'oxydation, pièges à NO_x, SCR, filtres à particules, lavages des fumées) permettant de neutraliser les émissions gazeuses et solides sont décrits (principe, efficacité, contraintes, ...).

Cette deuxième partie inclue de nombreux exercices d'application corrigés en séance.

Bibliographie

- Poinot & Veynante, Theoretical and Numerical Combustion
- <http://elearning.cerfacs.fr/combustion/index.php>

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.25)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.75)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	20 hrs	10 hrs	0 hrs	0 hrs	2 hrs

INGÉNIEUR - OD PROPULSION

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

Moteur à combustion interne [MOTCI]

Responsable(s) du cours : Xavier TAUZIA

Pré-requis

connaissances basiques en thermodynamique / énergétique

Objectifs

Cet enseignement a pour objectifs :

- d'apporter tout d'abord les connaissances de base en moteurs à combustion interne à piston, appréhendés principalement d'un point de vue énergétique.
- de détailler ensuite les principaux processus en termes de technologie et de stratégies en soulignant les nombreuses interactions et la nécessité de réaliser des compromis
- de proposer enfin un point de vue industriel autour de la calibration des moteurs automobiles.

Plan de l'enseignement

Dans une première partie on présentera successivement : une perspective historique; les principes généraux ; quelques éléments de technologie et les différents types de moteurs ; les grandeurs caractéristiques : géométrie, performances, rendements ; l'alimentation en air et l'échappement ; la suralimentation ; la dépollution ; le refroidissement, la lubrification et les frottements.

Dans un deuxième temps on abordera les aspects Ingénierie Système et Cycle en V ; les prestations du Groupe Moto Propulseur (GMP) ; les lois de commande ; les moyens d'essais et les méthodes de calibration.

Des exercices d'application sur l'évaluation des performances et du rendement énergétique seront résolus au cours des TD. NB : La décarbonation via l'usage de carburants alternatifs et la combustion seront abordées dans le module COMBUP. Les aspects les plus fondamentaux des écoulements gazeux et des turbomachines seront traités dans des modules spécifiques (DYGAZ, TUMAC).

Bibliographie

J.B Heywood, Internal Combustion Engines Fundamentals, Mac Graw Hill, 2011

W.W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall, 2003

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 PROPULSION

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

Thermodynamique pour la propulsion [THERMPRO]

Responsable(s) du cours : Pascal CHESSE

Pré-requis

Objectifs

L'objectif de ce cours est de bien connaître les notions d'énergétique pouvant être utiles à tout ingénieur amené à travailler dans le domaine de la propulsion.

Plan de l'enseignement

Une première partie de ce cours consiste à présenter la notion de rayonnement thermique. Dans une deuxième partie, les notions de transferts thermiques nécessaires à tout ingénieur seront présentées, tout en les appliquant à un système réel. Pour répondre à ce besoin, les phénomènes de conduction et de convection seront présentés. Suite à cela, une analyse thermique dans un calcul d'échangeur permettra de définir la notion de différence logarithmique moyenne de température et de nombre d'unités de transfert. Enfin une étude de cas sur un échangeur sera réalisée. Dans la troisième partie du cours, la notion d'exergie sera présentée. Celle-ci permet de calculer avec une grande précision les dissipations d'énergie se produisant dans un processus industriel, du fait des irréversibilités. Un bilan détaillé des performances énergétiques de chaque sous ensemble d'un processus global est donc effectué. Cette notion sera mise en application sur plusieurs cas concrets (compresseur, turbine, échangeur). Le cours sera suivi d'une série d'exercice d'application en lien avec la propulsion.

Bibliographie

Michel FEIDT , Energétique - concepts et applications, Dunod Ed. (2006)
 Lucien BOREL et Daniel FAVRAT - thermodynamique et énergétique : de l'énergie à l'exergie, Presses polytechniques et universitaires romandes (2005)
 Richard E. SONNTAG, Claus BORGNAKKE et Gordon J. VAN WYLEN - fundamentals of thrmodynamics, Ed. Wyley & Sons (1998)
 Renaud GICQUEL - systèmes énergétiques (3 tomes), presses des Mines Paris Tech (2009)

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.25)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.75)

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

INGÉNIEUR - OD PROPULSION

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

Turbomachines pour la propulsion [TURBO]

Responsable(s) du cours : Pascal CHESSE

Pré-requis

Objectifs

L'objectif de ce cours est de d'expliquer le fonctionnement des turbomachines à fluide incompressible (pompe, turbine hydraulique) et à fluide compressible (turbine, compresseur) et de leurs applications dans le domaine de la propulsion.

Plan de l'enseignement

Dans un premier temps, les relations générales décrivant le fonctionnement d'une turbomachine et la classification de ces machines seront présentées. Après présentation du théorème d'Euler, le tracé et le fonctionnement d'une pompe centrifuge seront détaillés : roue, diffuseur, volute. La notion de rendement de ces machines sera également abordée et les phénomènes de cavitation présentés. Les coefficients de Rateau seront détaillés.

La deuxième partie du cours sera consacrée aux turbomachines à fluide compressible. Le cas d'un compresseur centrifuge sera traité en détail ainsi que les relations de similitude.

Le cours est suivi d'une série d'exercices en lien avec le domaine de la propulsion, puis d'une conférence sur les turbocompresseurs de suralimentation.

Bibliographie

M. SEDILLE, Turbomachines hydrauliques et thermiques, Tomes 1,2,3, Masson Paris

M. PLUVIOSE, Turbomachines, Vuibert Ed.

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.25)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.75)

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

INGÉNIEUR - OD PROPULSION

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

Dynamique des gaz [DYGAZP]

Responsable(s) du cours : David CHALET

Pré-requis

Objectifs

Cet enseignement a pour objectif d'étudier les phénomènes physiques liés aux écoulements gazeux dans un système, que ce soit pour la propulsion (écoulements compressibles) ou pour le conditionnement d'air (écoulement incompressible).

Plan de l'enseignement

Dans une première partie, les équations générales décrivant le comportement d'un gaz seront présentées. En s'intéressant uniquement à un écoulement stationnaire, différents phénomènes seront étudiés (notamment les ondes de chocs et les ondes de détente). Ces notions seront mises en application sur plusieurs cas concrets (tuyères, propulsion par réaction).

Dans une seconde partie, les besoins en terme de chauffage et de climatisation d'un moyen de transport (automobile, train, avion,...) seront définis. Un bilan énergétique sera fait et les différentes solutions seront étudiées.

Bibliographie

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.1)
EVC 2 (coefficient 0.1)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.4)
EVI 2 (coefficient 0.4)

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 PROPULSION

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

Energie en Propulsion [ENERGP]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

Thermodynamique
transferts thermiques
énergétique

Objectifs

Cet enseignement a pour objectif de bien identifier les besoins et les flux énergétique pouvant exister dans le domaine de la propulsion automobile et ce afin d'optimiser le fonctionnement complet du véhicule.

Une partie de cet enseignement évoquera l'hydrogène dans la propulsion:

Les Piles à Combustible associées à l'hydrogène arrivent à une maturité technologique suffisante pour être intégrées dans des chaînes de propulsion pour des applications de transport. Ce module vise à ce que les étudiants aient une première appréhension de ces technologies de l'hydrogène et acquièrent les notions pour pouvoir pré-dimensionner une chaîne de propulsion intégrant de l'hydrogène et une source de puissance à base de pile à combustible pour des applications de mobilité.

Plan de l'enseignement

Dans la première partie, le thermomanagement moteur sera étudié. Le sujet sera introduit par une explication détaillée du bilan thermique d'un moteur, ce qui permettra de définir les enjeux et les paramètres influents. Les principales technologies existantes ou envisagées seront présentées et étudiées en s'intéressant particulièrement à leurs impacts sur les performances et émissions polluantes du moteur (les technologies peu performantes seront également abordées).

Dans la deuxième partie, il y aura l'étude du stockage d'énergie au sein des batteries.

Dans la troisième partie, il y aura l'hydrogène dans la propulsion:

- 1. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible
- 2. Les Piles à combustibles pour la mobilité
- 3. L'Hydrogène : vecteur énergétique
- 4. L'Hydrogène : solution de stockage massif de l'énergie.
- 5. Projet/cas d'étude : dimensionnement d'une chaîne de propulsion hydrogène dans diverses applications de mobilité terrestre (véhicule particulier, utilitaire, transport lourd).

Bibliographie

PEM Fuel Cell : Theory and Practice, F. Barbir, ed. Elsevier
Fuel Cell Systems explained, J. Larminie and A. Dicks, John Wiley & Sons Ltd.

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.35)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.65)

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 PROPULSION

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

Projet 1 [P1PROPULS]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

thermodynamique
mécanique des fluides
énergétique
combustion
moteurs à combustion interne
turbomachines
transferts thermiques
dynamique des gaz

Objectifs

Partie 1: Initiation à l'utilisation d'outils de simulation multi-physiques et multi-niveaux (OD/1D et 3D) en lien avec la propulsion (GT-Power).

Partie 2: Initiation à l'utilisation de l'outil de simulation Simecenter Amesim, en lien avec la propulsion.

Partie 3: Initiation à l'utilisation d'un outil de simulation CFD (StarCCM+).

Plan de l'enseignement

Partie 1:

Dans le cadre de cet enseignement, les outils de simulation GT-Suite développés par Gamma Technologies seront utilisés. Ces outils sont parmi les plus répandus dans le secteur de la propulsion (aéronautique, terrestre et maritime) et donnent les bases à l'utilisation des outils développés par d'autres compagnies.

Dans un premier temps, l'ensemble des outils GT-Suite seront présentés ainsi que les principaux principes physiques, modèles et solveurs utilisés.

Dans un second temps, un modèle mono-cylindre essence sera créé à partir de rien sous la forme d'un tutoriel afin de comprendre comment sont construits les modèles moteurs. Il s'en suivra une phase d'optimisation des performances moteurs pour les étudiants via l'utilisation d'une stratégie de levée soupapes variable.

Finalement, des modèles de moteurs multicylindres seront utilisés et différents moyens d'optimisation seront utilisés afin d'augmenter les performances moteur et réduire la consommation.

Partie 2:

Simcenter Amesim est un logiciel de simulation pour la modélisation et l'analyse de systèmes 1D multi-domaines. Le logiciel offre une suite de simulation 1D pour modéliser et analyser les systèmes intelligents multi-domaines et prédire leur performance multi-disciplinaire.

Pour créer un modèle de simulation d'un système, un ensemble de bibliothèques peut être utilisé, contenant des composants prédéfinis pour différents domaines physiques.

L'utilisateur peut composer un modèle d'un système basé sur la physique. Les sous-modèles d'un système doivent être reliés entre eux. Chaque sous-modèle est doté de ports, qui peuvent avoir plusieurs entrées et sorties.

L'électrification du groupe motopropulseur dans le secteur automobile, les systèmes de lancement réutilisables dans le secteur spatial, ou l'utilisation de carburants alternatifs (GNL) pour les navires sont des exemples de mise en œuvre de technologies qui peuvent être modélisés avec Simcenter Amesim.

Dans un premier temps les bases de la simulation OD/1D seront présentées. Dans un second temps le logiciel sera pris en main via des tutoriels et exemples rapides. Un modèle de motorisation hybride sera créé à partir de certaines contraintes et caractéristiques. Enfin, la prise en main se terminera par une étude de cas à analyser par l'outil de simulation.

Partie 3:

Le logiciel de calcul CFD, StarCCM+ développé par Siemens est utilisé.

Cette partie commence par une présentation du logiciel: interfaces, outils, géométries, modèles physiques, maillage, lancer un calcul, post-traitement, analyse.

Il y aura ensuite 3 TP:

TP1: calcul de l'écoulement autour d'une voiture dans une soufflerie

TP2: calcul de l'écoulement dans un ventilateur canalisé

TP3: calcul de l'écoulement à travers une tuyère axisymétrique 2D

Bibliographie

Partie 1:

1. Anderson, J., Modern Compressible Flow, 1st edition, McGraw-Hill, New York, 1982.
2. Kolade, Babajide, Boghosian, Michael E., Reddy, P.S., and Gallagher, Shawn, Development of a General Purpose Thermal-Hydraulic Software and its Application to Fuel Injection Systems, SAE, 2003-01-0702, 2003
3. Colebrook, C. F., "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws," Jour. Inst. Civil Engrs., London, Feb. 1939.
4. Nikuradse, J., "Strömungsgesetze in rauhen Röhren." VDI-Forschungsheft 361. Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens" Ausgabe B Band 4, July/August 1933.
5. Serghides, T.K., "Estimate friction factor accurately." Chemical Engineering, 91, 63-64, 1984.
6. Wagner, W., Strömung und Druckverlust. Vogel Fachbuch Kamprath-Reihe, 2001.
7. White, F.M., Fluid Mechanics 2nd Edition. McGraw Hill, 1986.
8. Idelchik, I.E., Handbook of Hydraulic Resistance, JAICO, 2003.
9. Fox, R. and McDonald, A., Introduction to Fluid Mechanics, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc.: New York, N.Y., 1992.
10. Miller, D.S., Internal Flow Systems, Second Edition, BHR Group Limited, 1990.
11. Cruz, D.A., Coelho, P. M., & Alves, M. A., "A Simplified Method for Calculating Heat Transfer Coefficients and Friction Factors in Laminar Pipe Flow of Non-Newtonian Fluids", Journal of Heat Transfer, 134, 2012.
12. Trinh, Tuoc, "The wall shear rate in non-Newtonian turbulent pipe flow", 2010.
13. Aymanns, R., Scharf, J., Uhlmann, T., and Lückmann, D.; "A Revision of Quasi Steady Modelling of Turbocharger Turbines in the Simulation of Pulse Charged Engines," Dresden Supercharging Conference, 2011
14. Aymanns, R., Scharf, J., Uhlmann, T., Pischinger, S.; "Turbocharger Efficiencies in Pulsating Exhaust Gas Flow", Motortechnische Zeitschrift, Aug. 2012.

Partie 2:

<https://www.plm.automation.siemens.com>

Chasse A, Pognant-Gros P, Sciarretta A (2009), Online implementation of an optimal supervisory control for a parallel hybrid powertrain, SAE Int. J. Engines, vol. 2, no. 1, p. 1630-1638, paper 2009-01-1868

L. Guzzella, A. Sciarretta: "Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization", 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-642-35913-2, 2013

Sciarretta A, Dabadie JC, Font G (2015), Automatic Model-Based Generation of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Powertrains, Proc. of the SIA Powertrain Conf., Versailles, France, 27-28 May 2015.

Partie 3:

StarCCM+ basic training by Siemens

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 PROPULSION

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

Propulsion automobile - électrique et hybride [PRAUT]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

dynamique des gaz
mécanique des fluides
énergétique

Objectifs

L'objectif de ce cours est d'étudier les différents éléments d'un système de propulsion automobile et de pouvoir simuler cet ensemble.

Plan de l'enseignement

Dans un premier temps, une présentation générale permettra de s'intéresser aux effets de l'écoulement d'air autour et dans le véhicule, provoqué par son mouvement relatif par rapport à l'air ambiant. Cette partie se focalise sur les notions de bases de l'aérodynamique appliquée à l'automobile avec pour but d'apporter un éclairage sur les phénomènes affectant les performances globales du véhicule, et en particulier sa traînée qui impacte directement la consommation en carburant.

Une seconde partie permettra d'étudier l'électrification des véhicules (véhicule hybride et électrique) : présentation des différents principes, architectures, fonctionnalités associées,... Cette partie se terminera par une mise en application.

Dans la dernière partie, le but serait de se familiariser au concept de véhicule hybride électrique sur lequel beaucoup d'idées reçues circulent dans les médias. Le cours est très descriptif mais les élèves auront aussi la possibilité d'appréhender ces systèmes complexes ainsi que la problématique de leur optimisation au cours du TP hybride de 8h.

Le cours commencera par un rappel historique depuis la création du premier véhicule hybride de Ferdinand Porsche jusqu'à leur production en masse depuis l'apparition de la première Prius avec une mise en lien de leur démocratisation avec la montée en importance des enjeux climatiques dans le débat public ainsi que le développement des normes anti-pollution. Le cours développera les principes fondamentaux de l'hybridation : fonctionnement de l'ICE à meilleur rendement (notion de CSP moteur en fonction de son point de fonctionnement), récupération d'énergie au freinage, stop/start, plug-in, etc... Les différentes architectures hybrides seront aussi détaillées avec une analyse critique de leurs avantages et inconvénients respectifs.

Les différents éléments de stockage seront évoqués (batteries, supercondensateurs, volants d'inertie, énergie pneumatique) en essayant d'éviter les redites vis-à-vis des cours sur les véhicules full électriques.

Un chapitre sera consacré à la problématique d'optimisation de ces véhicules avec mise en parallèle de leurs meilleures performances de consommation, vis-à-vis des véhicules purs thermiques, avec leurs inconvénients en terme de poids de complexité ou de pollution (batteries mais aussi différente utilisation de l'ICE donnant une pollution différente)

Dans la dernière partie de ce cours, un logiciel de simulation (Simecenter Amesim) est utilisé afin de mettre en application les éléments qui auront été enseignés dans les cours.

L'outil de simulation sera utilisé pour analyser et comparer les performances (consommation de carburant, émission de polluants, flux d'énergie...) d'un véhicule hybride sur différents cycles de conduite (urbain, mixte, autoroutier). Des solutions sur la stratégie de pilotage et/ou sur l'architecture du système seront mises en oeuvre pour diminuer les émissions polluantes.

Bibliographie

<https://www.plm.automation.siemens.com>

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.3)

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 0.3)
EVI 2 (coefficient 0.4)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	20 hrs	0 hrs	10 hrs	0 hrs	2 hrs

INGÉNIEUR - OD PROPULSION

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

Systèmes propulsifs en aéronautique [PROAE]

Responsable(s) du cours : Vincent BERTHOMÉ

Pré-requis

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 PROPULSION

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

Lanceurs spatiaux [LASPA]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

Thermodynamique
Dynamique des gaz
turbomachines
Combustion
énergétique

Objectifs

L'objectif de ce cours est d'apporter une spécialisation sur les ensembles destinés à la propulsion spatiale (avec l'intervention d'ingénieurs de chez ArianeGroup).

Le module de formation turbopompes a pour objectif de présenter à un non spécialiste les exigences, les principaux concepts, les risques, les technologies relatives à l'un des sous-systèmes clés pour les ensembles propulsifs à liquides.

Plan de l'enseignement

Dans un premier temps, une présentation générale permettra de définir la problématique de la propulsion spatiale, les enjeux associés et le déroulement type d'une mission.

Par la suite, les systèmes propulsifs à propergols liquides seront étudiés ainsi que les détails de l'étage de la fusée qui contribuent à sa propulsion (réservoirs pressurisateur, turbopompes, chambres propulsives) seront présentés. Pour bien comprendre les enjeux de ce type de système de propulsion, les problèmes d'interface et d'optimisation d'étages devront être analysés. Une mise en application sera faite sur le dimensionnement d'un lanceur (Ariane5).

Partie 1 : Généralités sur les lanceurs et les moteurs

1- Généralités sur les lanceurs

- Rappel de mécanique spatiale
 - o c'est quoi être en orbite ?
 - o orbites circulaires et elliptiques.
 - o orbites basse, moyenne , GTO, Géostationnaire, orbites para et hyperboliques
- Les différents type d'ergols
 - o Ergols solides
 - o Ergols liquides« stockables »
 - o Ergols liquides cryogéniques
- Avantage et Inconvénients des différents types d'ergols
 - o Isp
 - o indice constructif des étages
- DeltaV d'un étage > lanceurs multi-étage

2- Généralités sur les moteurs fusées

- Théorie de la tuyère
 - o Blocage sonique au col
 - o Détente , Vitesse d'éjection et Isp
 - o Tuyère sous-détendue, adaptée et sur-détendue dimensionnement du divergent en fonction de type d'étage (booster, étage « principal », étage supérieur)

- o Le décollement de jet
- Les 5 principaux cycle de moteurs
- o Moteurs sans pompe
 - >Moteur/Étage solide (= étage à poudre)
 - >Moteur/Étage pressurisé
- o Moteurs avec pompe
 - >Moteurs à flux dérivé :
 - le cycle Générateur de Gaz (exemple :le moteur Vulcain / Vulcain 2 / Vulcain2.1 d'Ariane 5/6)
 - >Moteur à flux intégré :
 - Le cycle Combustion Étagée (exemple : le moteur SSME de la navette spatiale américaine)
 - Le cycle Expander (exemple : le moteur Vinci d'Ariane 6)

avantages et inconvénients de chacun de ces 5 cycles moteurs.

Partie 2: Systemes propulsifs - Les aspects etage

Notion d'étage propulsif, exemples

- o Concept de l'étagement
- o Fonctions principales d'un étage propulsif
- o Etages d'Ariane 5
- o Etages de Saturn V
- o Etages d'Ariane 6
- o Cycle industriel de production d'un étage
- o Etages pressurisés
 - >Exemple : l'étage EPS d'Ariane 5 ES
 - >Equations de base
- o Etages à turbopompes
 - >Equations de base
 - > NPSP et contraintes sur la pression réservoir
- Les structures et l'aménagement
- o Bâti moteur
 - > Fonctions
 - > Exemple du bâti moteur EPC (Ariane 5)
- o Réservoirs
- o Pilotage
 - > Méthodes de pilotage
 - > Contraintes
- La mise en œuvre
- o Définition
- o Exemple de la mise en œuvre EPC à Kourou (Ariane 5)
- o Remplissage des réservoirs
- o Mise en froid moteur(s)
- o Exemple de chronologie de lancement (Ariane 5)
- Conception optimisée d'un étage
- o Variables clés et relations fondamentales
- o Optimisation de l'impulsion spécifique
- o Considérations générales sur l'optimisation d'un étage inférieur ou supérieur
- Les ergols
- o Qualités et défauts d'un ergol / d'un couple d'ergols
- o Oxydants et réducteurs courants
- Les systèmes d'alimentation, de pressurisation et de commande
- o Système d'alimentation

- >Principales fonctions
 - > L'effet POGO et le Système Correcteur POGO
- o Système de pressurisation
 - > Introduction
 - > Régulation de la pression réservoir
 - > Exemple du système de pressurisation de l'EPC (Ariane 5)
- o Système de commande
 - > Fonctions
 - > Exemple du système de commande de l'ESC-A (Ariane 5)
- Autres sous-systèmes
 - o Systèmes de séparation inter-étages
 - o Systèmes de contrôle d'attitude et de tassement d'ergols
 - o Systèmes exotiques
 - > Liés au redémarrage de l'étage supérieur en orbite
 - > Liés à la récupération / réutilisation du premier étage

Partie 3: Turbopompes

Les compétences acquises lors de la formation doivent permettre aux participants de :

- Identifier les besoins principaux vis-à-vis du sous-système turbopompe et expliciter les 3 principales fonctions
- Identifier les principales contraintes d'intégration sur l'ensemble propulsif
- Reconnaître les différents aménagements de turbopompes
- Identifier les 4 fonctions secondaires autorisant le fonctionnement sain d'une turbopompe et leurs associer les ensembles fonctionnels à partir d'une coupe 2D de la machine
- Estimer la taille de la turbopompe et sa vitesse de rotation ; choisir le nombre d'étages de la pompe et de la turbine
- Reconnaître les différentes technologies utilisées pour les différents ensembles fonctionnels
- Prendre conscience de la complexité des phénomènes (cavitation, élastoélasticité, ...) mis en jeu dans une machine à ratio puissance sur masse extrême, et de la nécessité d'un plan de développement rigoureux traitant l'ensemble des modes de défaillances

La présentation est illustrée de nombreux exemples basés sur les turbopompes développées lors des programmes Ariane et sur les matériels de la concurrence.

Partie 4: Formation Systèmes Propulsifs: Les Organes de Combustion

- Missions et contraintes pour les organes de combustion
- Conception d'une tête d'injection
- Conception d'un corps de chambre et d'un GG/Pré-burner
- Conception d'un divergent
- Conception d'un allumeur

Bibliographie

Partie 3:

Ph. Hill, C. Peterson, Mechanics and Thermodynamics of Propulsion - Second Edition, 1992, DDISON-WESLEY Publishing Company

DK Huzel, DH Huang, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, 1992, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 147.

G.P. Sutton, Turbopumps, a Historical Perspective, 2006, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 0.25)

Évaluation individuelle :
EVI 1 (coefficient 0.25)
EVI 2 (coefficient 0.25)
EVI 3 (coefficient 0.25)

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 PROPULSION

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

Projet 2 [P2PROPULS]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

thermodynamique
mécanique des fluides
énergétique
combustion
moteurs à combustion interne
turbomachines
transferts thermiques
dynamique des gaz

Objectifs

L'objectif de ce projet consiste à mettre les étudiants face à un problème concret avec plusieurs sous-groupes.

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 PROPULSION

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

Propulsion maritime [PROMA]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

moteur à combustion interne
mécanique des fluides
thermodynamique
combustion
énergétique

Objectifs

Cet enseignement a pour objectif d'apporter une spécialisation sur les ensembles destinés à la propulsion maritime.

L'objectif de ce cours est de présenter les éléments majeurs d'une propulsion maritime (hélices, lignes d'arbre, moteurs diesels) et leur dimensionnements ; commençant par le besoin en puissance du navire.

Plan de l'enseignement

Une première partie permettra de faire un bilan complet des différents modes de propulsion pouvant exister (voile, moteur à combustion interne, nucléaire) et ce, en fonction des applications, tout en s'appuyant sur d'autres cours (moteur à combustion interne par exemple).

Dans une seconde partie, les différents systèmes de transmission seront étudiés ainsi que le propulseur en tant que tel (roue à aubes, hélices immergée ou aérienne, hydrojets, etc

L'objectif de ce cours est de présenter les éléments majeurs d'une propulsion maritime (hélices, lignes d'arbre, moteurs diesels) et leur dimensionnements ; commençant par le besoin en puissance du navire. Différentes architectures propulsives sont présentées, des plus classiques aux hybrides. Un focus particulier est fait sur le moteurs diesels et ses spécificités pour les applications marines : composants mécaniques, suralimentation, injection, carburant. Les contraintes environnementales sur les émissions sont aussi abordés, avec les solutions pour les respecter, en passant par les systèmes interne moteur, les systèmes de post-traitement, les moteurs Gaz/dual fuel, les carburants alternatifs.

Visite de l'entreprise MAN - Energy Solutions - site de Saint Nazaire

- Le site est spécialisé dans l'assemblage de moteurs diesels de 500 à 26 500 kW pour les centrales électriques et la propulsion marine (civil et militaire).

- Déroulé de la visite :

- Présentation du site en salle
- Visite des ateliers

Intervention sur la propulsion sous-marine(Naval Group): définition, histoire, technologies, énergie embarquée, performances.

Bibliographie

Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power (Livre numérique Google)

Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson

Cambridge University Press, 8 août 2011

Évaluation

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 1.0)

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 PROPULSION

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

Transports ferroviaires : urbain et grandes lignes [TFERO]

Responsable(s) du cours : Georges SALAMEH

Pré-requis

énergétique

Objectifs

L'objectif de ce cours est d'étudier les matériels utilisés pour le transport ferroviaire mais également les contraintes associés à ce type de déplacement.

Partie 1:

Le système ferroviaire; Les contraintes d'infrastructure; Le matériel roulant; Les architectures; La performance; Les principaux trains produits par Alstom; Le rôle de la signalisation; Normes et réglementations : un impact considérable sur la conception; Séquence de conception : de la spécification au train; Quelques enjeux du futur : Interopérabilité, Cybersécurité, Co2 free et Ecodrive.

Partie 2:

L'objectif est d'expliquer aux étudiants ce qu'est un système de traction ferroviaire moderne et pourquoi, contrairement à ce que l'on peut imaginer, c'est un système très complexe qui doit répondre à des contraintes à la fois environnementales, normatives et contractuelles très spécifiques au monde ferroviaire fortement liées à l'histoire et son évolution.

Partie 3:

Présenter les principes de conception et les technologies développées pour assurer le freinage des convois ferroviaires, depuis le tramway jusqu'à la très grande vitesse. Mettre en lumière les principaux enjeux techniques et économiques.

Plan de l'enseignement

Après une présentation générale sur le transport ferroviaire dans le monde, une présentation des différents matériels roulants et modes de traction (moteur à combustion interne, électrique,..) sera effectuée. Les avantages et inconvénients seront étudiés et des mises en application seront réalisées notamment au niveau de la modélisation dynamique du véhicule. La partie propulsion sera présentée tout comme l'aspect freinage.

Partie 1:

Le système ferroviaire :

- Un système contraint
- Un système économiquement viable et performant
- Un système sûr
- Un système respectueux de l'environnement
- Un système en évolution

Les contraintes d'infrastructure :

- Le gabarit et sa diversité,
- Le contact roue rail,
- Les paramètres qui limitent la vitesse.

Le matériel roulant

- Les architectures

o Architecture mécanique horizontal classique Jacob notion de modularité

o Architecture mécanique vertical hauteur de plancher nombre de niveaux nombre et largeur des portes

- o Architecture électrique motorisation répartie ou concentrée
- o Architecture intérieure
- o Sécurité passive
 - Les composants mécaniques principaux :
 - o La caisse,
 - o Le bogie,
 - o Les intérieurs.
- La performance :
- o Temps de parcours : vitesse accélération
- o Acoustique : bruit intérieur bruit extérieur
- o Aérodynamique : résistance à l'avancement, vents traversiers, effet de souffle, confort climatique
- o Compatibilité électromagnétique : pouvoir de « polluer », sensibilité à la « pollution »
- o Stabilité : critères de déraillement
- o Eco-conception : pouvoir de nuisance
- o Confort
 - Les principaux trains produits par Alstom.

Le rôle de la signalisation.

Normes et réglementations : un impact considérable sur la conception.

Séquence de conception : de la spécification au train.

Quelques enjeux du futur :

- Interopérabilité
- Cybersécurité
- Co2 free et Ecodrive

Partie 2:

L'origine du chemin de fer et le ferroviaire en quelques chiffres

La notion de système ferroviaire : Le système de traction ferroviaire constitue un ensemble cohérent avec des interactions très fortes avec le système de captation, l'alimentation et le rail

- o Les sousstations d'alimentation électrique
- o Le système de captation de courant (Caténaires, 3ème rail et APS)
- o Le retour de courant
- o La notion d'adhérence et de Contact roue rail

La dynamique ferroviaire

- o Notion de résistance à l'avancement
- o Calcul d'effort à la roue pour respecter les contraintes de performance demandée par le client

les composants de la chaîne de traction

- o Le principe de conversion de puissance ou comment transférer la puissance collectée à la caténaire pour appliquer l'effort demandé sur la roue tout en respectant les contraintes et les spécificités du monde ferroviaire (diversité d'alimentation, excursion de la tension d'alimentation, contraintes normatives, contraintes environnementales,...)
- o Onduleur (Inverter) / hacheur (chopper) / redresseur 4 quadrants (4 quadrant rectifier)
- o La brique essentielle de la conversion de puissance : le semiconducteur
- o les modules de puissance : leur refroidissement et la protection
- o Les moteurs de traction
- o La transmission mécanique de l'effort

La production d'énergie auxiliaire à bord du train

Un monde toujours plus respectueux de l'environnement : La traction hybride et le stockage d'énergie

Un monde en évolution perpétuelle : quelles sont les futures tendances ?

Partie 3:

1. Enjeux et problématiques du freinage ferroviaire
2. Performances de freinage
3. Contrôle-commande du freinage
4. Produire l'effort et dissiper l'énergie de freinage
5. Adhérence roue-rail et antienrayeurs

Partie 4:

Visite de l'entreprise Alstom - site de la Rochelle

- Le site est le centre mondial de conception et fabrication d'Alstom pour les trains à très grande vitesse (TGV) et les tramways.

- Déroulé de la visite :

- Présentation du site en salle
- Visite des ateliers
- Échanges avec les ingénieurs

Bibliographie

Partie 2:

Les données chiffrées relatives au système ferroviaire mondial sont tirées du site UIC (Union internationale des chemins de fer)

Partie 3 :

- Matériel roulant dans le système ferroviaire – Tomes 1 à 3 – Editions La Vie du Rail (2016-2018)
- Le frein pneumatique ferroviaire – Revue de l'Association Française des Amis des Chemins de Fer – N° 407 (1991) - 410 (1991) - 412 (1992) - 415 (1992) - 422 (1993) - 428 (1994) - 430 (1995) - 440 (1996) - 441 (1996)

Évaluation

Évaluation individuelle : EVI 1 (coefficient 1.0)

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 PROPULSION

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

Travaux pratiques en propulsion [TPPRO]

Responsable(s) du cours : Vincent BERTHOMÉ

Pré-requis

Objectifs

L'objectif est de mettre ici en application les compétences acquises au travers des différents cours de l'option.

Plan de l'enseignement

- combustion dans une chaudière / ventilateur
- échangeurs thermiques
- turbine à impulsion / pile à combustible
- tuyères
- boîtes de vitesses/ véhicule hybride
- démontage / remontage d'un moteur à combustion interne
- moteur à allumage commandé
- moteur à allumage par compression

Bibliographie

Évaluation

Évaluation collective : EVC 1 (coefficient 1)

LANGUE DU COURS	CRÉDITS ECTS	COURS MAGISTRAUX	TRAVAUX DIRIGÉS	TRAVAUX PRATIQUES	PROJET	DEVOIRS SURVEILLÉS
Français	3	0 hrs	0 hrs	32 hrs	0 hrs	0 hrs