

Intitulé de l'Unité d'Enseignement	Systemes réactifs, turbulence et transferts, applications aux propulsions terrestres et aéronautiques	Code de l'UE	5AExx
---	---	---------------------	-------

Rédacteurs (principaux, 3 maxi) de l'UE

Nom, Prénom, qualité	Philippe GUIBERT Prof de l'UPMC	Daniel GAFFIE IR à l'ONERA	Jean François KRAWCZYNSKI MdC de l'UPMC
Laboratoire ou équipe de recherche	Institut d'Alembert Equipe Fluides Réactifs et turbulence UPMC paris	Ingénieur de Recherche DEFA/PRA ONERA	Institut d'Alembert Equipe Fluides Réactifs et turbulence UPMC paris
Adresse	4 Place Jussieu 75005 Paris	French Aerospace Lab BP 72 - 29 avenue de la Division Leclerc 92322 CHATILLON Cedex FRANCE	4 Place Jussieu 75005 Paris
Téléphone :	01 30 85 48 63	01 46 73 43 32	01 30 85 48 80
e-mail:	philippe.guibert@upmc.fr	daniel.gaffie@onera.fr	jean-francois.krawczynski@upmc.fr

Descriptif de l'UE

Volumes horaires globaux (CM + TD + TP)	36 h CM + 6 h TD + 32 h TP = 74 h
Nombre de crédits de l'UE	6 ECTS
Spécialité où l'UE est proposée	Energétique et Environnement
Semestre où l'enseignement est proposé	S3
Effectifs prévus	42

a) Objectifs de l'Unité d'Enseignement :

L'objectif du cours est de permettre aux étudiants – dans le cadre d'une discipline communément appelée « Aérothermochimie » – l'acquisition des bases théoriques liées à la modélisation et à la simulation des écoulements turbulents et réactifs. Bien que suffisamment général pour être applicable à tout écoulement en combustion, cet enseignement réserve une place particulière aux propulsions aéronautiques et terrestres. La problématique spécifique d'optimisation énergétique de systèmes par le biais de modélisations de différents types inclue aussi la caractérisation des polluants chimiques qui en résultent, impactant négativement l'environnement.

Dans ce contexte, l'enseignement se focalise sur certains acquis liés au fonctionnement de deux types de machines thermiques, la première est une turbomachine propulsive de type aéronautique et la seconde le moteur à combustion interne pour les applications automobiles. De façon générale, on s'appuiera sur le rôle clé d'un de ces composants essentiels ; la chambre de combustion, de son fonctionnement optimal du point de vue de l'amélioration recherchée du cycle thermodynamique, pour atteindre les objectifs de réduction des émissions, gazeuses et particulaires, imposée par la réglementation en vigueur, notamment celle émanant de l'OACI à laquelle est soumise le secteur du transport aérien civil, et d'autre part les normes EURO6 pour le secteur automobile. Les propriétés aérodynamiques seront traitées afin de bien comprendre les impacts engendrés sur les propriétés des flammes ou des régimes d'auto inflammation.

Préalablement à tout objectif de modélisation, un effort particulier sera apporté pour améliorer la compréhension des mécanismes physicochimiques qui cohabitent et interagissent dans une chambre de combustion. Le caractère multiphysique dominant pour ces applications ainsi mis en évidence, on sera naturellement conduit à revisiter certaines disciplines fondamentales, déjà plus ou moins connues des étudiants, telles que la Mécanique des Fluides, la Thermodynamique, la Chimie se référant à la description des processus de combustion, ou enfin les outils statistiques inhérents à la description de la Turbulence et de l'interaction Combustion-Turbulence.

Les modèles mathématiques peuvent être classés dans deux grands groupes : les modèles dimensionnels et les modèles thermodynamiques (nommés aussi zéro dimensionnels). Une sous famille de modèles va se distinguer par le choix du nombre de dimension (1D – 3D) pour les modèles dimensionnels ou bien par le nombre de zones où sera appliqué le modèle thermodynamique

Afin d'atteindre l'objectif visé par un enseignement qui pourrait paraître, a priori, difficile, on s'attachera à mener la réflexion avec progressivité, en multipliant les exemples simples pour faciliter une bonne compréhension de chacune des étapes de la démarche théorique engagée. A intervalle régulier, le cours sera jalonné de séances de travaux dirigés, conçues pour démystifier les aspects les plus théoriques, à la lumière d'exercices concrets touchant aux applications d'intérêt industriel. Le cours illustrera la partie liée à la modélisation zéro dimensionnelle par le biais d'un projet sur Matlab qui permettra à l'étudiant de bien cerner ce qu'est la réduction de modèle et les limites et avantages associés à l'utilisation d'un niveau de modélisation.

b) Contenu de l'Unité d'Enseignement :

L'enseignement est ainsi structuré en 6 chapitres, tels que détaillé dans ce qui suit.

Chapitre 1. Impact environnemental du secteur aérien : contexte général

Le chapitre introductif, rapidement traité, présente le contexte général lié à la réglementation des nuisances chimiques induites par le secteur aérien civil. Il est rappelé que cette réglementation est imposée par l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile, la présentation de la vision européenne, dite vision ACARE, vient également compléter ces informations à caractère général. Dans cette partie, les espèces polluantes primaires, minoritaires, réglementées sont identifiées, ainsi que les cycles opérationnels de vol dans le cadre desquels ces normes s'appliquent. L'évolution des normes, attendue pour les années futures, est également présentée. Quelques outils et notions usuelles, inhérentes à une mesure quantitative de l'impact environnemental global (efficacité énergétique) ou particulier, pour un polluant donné (indice d'émission de polluant, inventaire d'émission...)

sont également définis. Ces premières informations sont jugées indispensables pour aider à l'identification et à la quantification de l'effort à produire, sur un plan technologique, pour réduire les émissions sur la partie purement propulsive d'un aéronef, celui-ci venant s'ajouter aux améliorations escomptées portant sur l'aéronef (hors motorisation) ou sur la gestion du trafic aérien.

- o Carburéacteurs aéronautiques et polluants chimiques primaires émis par combustion
- o Réglementation OACI du transport aérien civil - Vision européenne ACARE
- o Evolution du trafic aérien et prévision et contrôle de l'impact environnemental
- o Indices d'émission d'un polluant primaire – élaboration d'inventaires d'émissions
- o Turbomachines propulsives aéronautiques et paramètres clés de fonctionnement
- o Chambre de combustion et réduction de l'impact environnemental du secteur aérien

Chapitre 2. Etablissement des équations 3D de l'incompressible au multi-espèce réactif

Le chapitre 2 s'appuie sur deux disciplines théoriques clés ; la Mécanique des Fluides et la Thermodynamique, qui sont au fondement de l'établissement des équations de l'Aérothermochimie. On profite de ce premier chapitre pour faire les rappels indispensables à une bonne assimilation du cours ; d'une part, en abordant la problématique selon le point de vue de la dynamique des fluides. Les équations de conservation sont ainsi revisitées d'abord dans le cadre d'un écoulement mono constituant, ensuite étendues au cas d'un écoulement multi-espèce réactif, d'autre part en étendant les lois bien connues de la Thermodynamique au concept du système chimique réactif. A l'issue de chapitre, les équations de l'Aérothermochimie sont posées, le transport moléculaire détaillé de masse de quantité de mouvement et d'énergie et les termes sources de production et disparition des espèces chimiques sont parfaitement définis en

s'appuyant sur les grands principes de la théorie cinétique des gaz.

- o Rappels de dynamique des fluides pour l'établissement des équations de l'Aérothermochimie
- o Description de l'évolution d'un système thermodynamique – Extension au système chimique
- o Equations de l'Aérothermochimie obtenues à partir des équations de Navier-Stokes
- o Théorie cinétique des gaz – Transport moléculaire détaillé et chimie complexe

Chapitre 3. Description statistique de la turbulence

Le chapitre 3 s'intéresse à la réécriture, dans un contexte d'écoulement turbulent, des équations de l'Aérothermochimie établies au chapitre précédemment. Dans cette partie, Il s'agira d'étudier de manière détaillée les conditions de survenue de la Turbulence, ainsi que ses effets, avantageux ou non, sur le comportement observé à grande et petite échelle. C'est dans ce cadre que la théorie de Kolmogorov sera naturellement introduite, que les modélisations de la turbulence classiques qui en découlent, sont analysées. Les différentes approches classiquement requises pour simuler numériquement les écoulements turbulents (approche RANS, simulations aux grandes échelles ou simulation directe) seront identifiées, leur positionnement respectif et contexte d'utilisation, clairement précisés. Enfin, on insiste dans ce chapitre, sur les techniques de modélisation requises pour simplifier les équations générales dans le cadre d'écoulements simples, tels que les couches de mélange ou de limite. Il en découle les conditions aux limites à imposer aux parois pour assurer numériquement un bon développement des couches limites turbulentes, dynamique et thermique.

- o Description phénoménologique des écoulements turbulents – Théorie de Kolmogorov
- o Simulation numérique et outils statistiques de modélisation des écoulements turbulents
- o Positionnement des opérateurs « moyenne » par rapport aux approches RANS et LES
- o Classification des modèles de turbulence et hypothèses de fermeture associées
- o Méthodes asymptotiques pour la mise en équation d'écoulements turbulents simples.
- o Ecoulements turbulents de couche limite – Conditions aux limites requises
- o Transition laminaire-turbulent - Fonction d'intermittence.

Chapitre 4. Description statistique des écoulements turbulents compressibles – multi espèce réactif et combustion turbulente interaction combustion et turbulence

Enfin, le chapitre 4 aborde la modélisation de l'interaction du processus de combustion avec la turbulence de l'écoulement, problème rendu délicat du fait du caractère non linéaire et multidimensionnel des termes sources chimiques. Dans cette partie, une attention particulière est portée aux stratégies à mettre en œuvre pour simplifier le problème général, conformément aux régimes de flamme qui peuvent être observés et aux hypothèses à considérer selon l'importance respective des temps caractéristiques de la chimie ou de la turbulence (pilotant plus ou moins le développement du processus de combustion). Finalement, dans le but d'apporter une vision exhaustive du sujet, les méthodes de réduction des mécanismes réactionnels et de calcul d'équilibres en chimie complexe, sont analysées. La fin de chapitre est consacrée à une présentation des modélisations les plus avancées de la combustion turbulente constituant l'état de l'art actuel d'un sujet qui demeure aujourd'hui encore très ouvert.

- o Les difficultés particulières posées par la modélisation de l'interaction combustion-turbulence
- o Modélisation de la combustion turbulente et Fonctions Densité de Probabilité (PDF)
- o Voies de réduction des mécanismes de cinétique chimique
- o Fraction de mélange et variable d'avancement
- o Introduction à la modélisation avancée de la combustion turbulente.

Chapitre 5. Impact environnemental du secteur automobile : contexte général

Le chapitre 5 aborde le fonctionnement du moteur à combustion interne. Cette première décennie du troisième

millénaire est clairement marquée par une prise de conscience collective des enjeux de la pollution atmosphérique et de l'augmentation de l'effet de serre engendrée par l'activité humaine. Dans cette pollution anthropique, le secteur des transports routiers est un contributeur important pour certains polluants comme les oxydes d'azote (NOx), le monoxyde de carbone (CO), les particules solides ou encore les hydrocarbures imbrulés (HC). On détaillera en particulier le challenge technique qui conduit les constructeurs à utiliser des innovations technologiques majeures tant au niveau des techniques de post-traitement que dans les mécanismes de combustion eux-mêmes. Par exemple, nous évoquerons le potentiel de la combustion homogène.

Chapitre 6. Approche par modélisation réduite dite multi zéro dimensionnelle

Les modèles zéro dimensionnels permettent une approche simplifiée des différents phénomènes où le système est une succession de bloc (zone, réacteur, tubulure, compresseur, catalyseur) tous en interaction mais intégrant des modèles spécifiques. En effet, ils ne font intervenir aucune grandeurs liées à l'espace, donc à la propagation (dans certains cas, il pourra être introduit indirectement des grandeurs en fonction des variables d'espace ou directement lorsque l'approche devient alors 1D (x,t)). Ce type de modèle

permet de considérer uniquement l'évolution des variables thermodynamiques dans le temps. Dans le cadre de la modélisation zéro dimensionnelle, qui fera l'objet de ce chapitre, le choix d'une seule zone impose comme hypothèse d'avoir l'ensemble des grandeurs thermodynamiques (pression, température, concentration ...) uniformes. En augmentant le nombre de zone, il pourra être précisé dans chaque zone certaines conditions d'évolution ou d'initialisation. Les résultats pourront alors être affinés. Par exemple, dans le cas de deux zones, le contenu du cylindre peut être assimilé à deux espèces de composition respectivement à celles des gaz brûlés et imbrulés. La progression de la combustion s'opère par front de flamme. La réaction chimique d'oxydation a lieu dans un volume négligeable (front de flamme) devant les volumes des deux zones. Le front de flamme est considéré comme une discontinuité entre les gaz frais et les gaz brûlés.

La multiplicité du nombre de zone ne permettra en aucun cas d'atteindre les résultats obtenus par les modèles dimensionnels car les modèles thermodynamiques ne prennent pas en compte en général les effets de transfert convectif et de diffusion. Les équations régissant les modèles 0 D sont basées sur l'équation du bilan d'énergie, de la conservation des espèces en système ouvert, l'équation des gaz parfaits, la conservation de la masse, l'évolution des volumes et différents sous modèles permettant la résolution du cycle (sous modèles de combustion, de transfert thermique, de transfert de masse pendant les phases ouvertes de la chambre de combustion, de formation de polluant, de turbulence ...). Cette modélisation permet des temps de calculs réduits et une mise en œuvre aisée. La résolution du problème consiste à résoudre un système de n équations différentielles du premier ordre. Le choix des sous modèles conditionne la pertinence des résultats. En effet, les sous modèles relatifs à la loi de combustion sont proposés soit sous forme d'une loi phénoménologique, soit en tenant compte de la physique du processus de propagation du front de flamme en introduisant un modèle turbulent (par exemple de type « »), soit par des réacteurs pseudo homogènes où des schémas cinétiques complets peuvent être utilisés.

En première conclusion préalable, il est important de souligner que l'objectif dans l'utilisation de modèles 0D est d'avoir un outil prédictif permettant aussi la prospection de plages non explorées expérimentalement.

- o Modélisation de la phase d'admission, de compression, de détente et d'échappement
- o Présentation des sous modèles d'évolution
- o Sous modèle cinématique décrivant le volume de la chambre
- o Modélisation de la phase de combustion
 - * Sous modèle basé sur une loi phénoménologique
 - * Sous modèles basés sur le développement de front de flamme.
 - * Modèle « Eddy Burn up ».
 - * Modèle de réacteur homogène.
- o Modèle de turbulence

- * Modèle à zéro équation - hypothèses de fermeture semi-empiriques
- * Modèle à une équation k
- * Modèle à deux équations -modèle k e
- o Sous modèle d'échanges aux parois, rayonnement, convection
 - * Modèles empiriques et semi-empiriques
 - * Lois de paroi pour les transferts thermiques
- o Sous modèle de composition des gaz (dissociation)
- o Modèle sur la composition des différents constituants.
 - * Schémas cinétiques réduits
 - * Caractéristiques thermodynamiques des gaz
 - * Introduction de la dissociation
 - * Formation des nox
- o Modèle de transfert de masse, modèle de mélange de Curl

c) Pré-requis :

Connaissance en mécanique des fluides, modélisation et combustion

d) Modalités de contrôle des Connaissances :

TP 1 (40%) + TP 2 (25%) + E1 (35%)

Organisation pédagogique

Enseignements présentiels	Volume horaire total	Horaire hebdomadaire	Effectif par groupe
Cours	36	3	40
Enseignements dirigés	6	2	40
Travaux pratiques Expérimentaux	32	4	5 ou 20