

# Master MEGA

## Programme des Cours de 2<sup>ème</sup> année

### Tronc commun du Master MEGA

#### Mécanique et thermodynamique des milieux continus

F. SIDOROFF, M. BRUNET, A. DANESCU

**Objectifs** : Synthèse unitaire de la mécanique des solides et des fluides. Cette synthèse s'appuie sur la mécanique des grandes transformations et sur la thermodynamique des phénomènes irréversibles. D'un point de vue pratique, on établit ainsi les bases indispensables à l'étude des fluides non-newtoniens (Génie des Procédés), des solides hyperélastiques (Caoutchouc, Polymères) et élastoplastiques (Mise en Forme).

##### Sommaire :

- A. Introduction : Euler et Lagrange. Mécanique des Milieux Continus classique. Contraintes et Déformations.
- B. Elasticité : Loi élastique, objectivité, incompressibilité.  
Symétries matérielles : solides isotropes et anisotropes, fluides.  
Aspects thermodynamiques. Hyperélasticité, exemples, inégalités constitutives.  
Problèmes aux limites et aspects numériques.
- C. Fluides simples  
Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles. Modèle de Kelvin. Fluide visqueux newtonien : fluide plastique et viscoplastique. Bingham et Norton-Hoff  
Modèles différentiels : Fluide de Rivlin-Ericksen. Fluides d'Oldroyd. Fluide de Maxwell-Jauman.  
Fluides simples. Fonctions viscométriques, écoulements viscométriques. Lois intégrales.  
Fluides de Maxwell.

#### Traitement de données : de l'acquisition des signaux et images jusqu'à leur interprétation

D. VRAY, C. CACHARD

**Objectifs** : Proposer une démarche et des outils pour l'acquisition, le traitement et l'exploitation des signaux et des images issus des différents domaines d'applications

##### Sommaire :

Notions de base  
Introduction. Représentation mathématique des signaux et des images. Représentation mathématique des systèmes  
Traitement du signal : Capturer, mesurer, représenter, modéliser, analyser, filtrer, décider, contrôler  
Les signaux. Représentation des signaux. Signaux de base : sinusoïdes, dirac, rectangle, sinus cardinal,... Notions sur le bruit.  
Les systèmes. Représentation des systèmes. Propriétés des systèmes. Equation de convolution.  
Transformée de Fourier. Définition, propriétés. Transformée de Fourier des signaux discrets. Transformée de Fourier discrète.  
Transformée de Fourier rapide (FFT). Représentation temps-fréquence.  
Echantillonnage et recouvrement spectral. Conversion analogique-numérique. Théorème d'échantillonnage. Conversion numérique-analogique.  
Notions avancées  
Filtrage. Filtres à réponse impulsionnelle finie (RIF). Filtres à réponse impulsionnelle infinie (RII). Caractérisation fréquentielle des filtres. Usage des fenêtres de pondération. Filtrage optimal, déconvolution.  
Représentation temps-fréquence. Transformation de Hilbert et signal analytique. Amplitude et fréquence instantanée.  
Applications : mécanique, biologie.  
Elastographie : mesure des propriétés d'élasticité par traitement des signaux ultrasonores. Principe. Estimation des déplacements par inter-corrélation. Estimation des déformations. Comparaison et évaluation des méthodes. Applications : imagerie médicale.

# Mécanique physique

D. MAZUYER, F. PLAZA, J. SCOTT

**Objectifs** : L'objectif du cours est de présenter diverses théories physiques actuellement utilisées de manière relativement universelle dans les différentes branches de la mécanique : mécanique des fluides, matériaux, systèmes dynamiques. Sans viser une présentation complète de chaque domaine, le cours s'attachera, en partant d'exemples représentatifs, à sensibiliser les élèves à ces approches unitaires ainsi qu'à introduire leur vocabulaire et leurs principaux concepts.

## Sommaire :

- A. Echelles microscopiques et changements d'échelles  
Diversité des échelles microscopiques d'espace et de temps.  
Echelle microscopique continue : homogénéisation, bornes.  
Echelle microscopique discrète : dynamique moléculaire, contraintes macroscopiques.
- B. Modèles stochastiques  
Marches aléatoires. Mouvement brownien.  
Application aux phénomènes diffusifs. Equations de Focker-Planck.  
Application aux polymères : rayon de giration.
- C. Phénomènes critiques  
Percolation : l'exemple de la conduction. Seuil de percolation et exposants caractéristiques. Applications : agrégation, milieux poreux, gels, polymérisation.  
Master MEGA - Annexes 41  
Phénomènes critiques : transition du premier et second ordre. Diagramme de phases. Transition ordre-désordre.
- D. Fractales et chaos  
Géométrie fractale. Fractales déterministes et fractales aléatoires. Dimension fractale : définitions et mesure.  
Applications : turbulence et rugosité.  
Chaos déterministe : systèmes dynamiques : comportement asymptotique. Attracteur et bassins d'attractions. Régimes réguliers et chaotiques. Sections de Poincaré, exposants de Liapounoff. Exemples : mélange, systèmes mécaniques.

# Systémique et modélisation des systèmes

M. MIRAMOND

**Objectifs** : Dans les domaines du Génie (mécanique, civil, énergétique, etc...), la modélisation des systèmes techniques - à concevoir, à fabriquer, à exploiter, etc.- renvoie à la problématique de la complexité : difficulté voire impossibilité d'aborder les problèmes par fragmentation, nécessité de construire des modèles adaptés au niveau de définition des objets (conception), nécessité de faire appel simultanément à des disciplines différentes du fait du caractère hétérogène ou multidimensionnel des relations constitutives de l'ensemble étudié, etc....

Cette question de la modélisation des systèmes est abordée en deux temps :

- \* présentation de modèles généraux issus de la théorie des systèmes et des sciences et techniques de la conception,
- \* définition de méthodes d'évaluation multiniveaux de comportement de systèmes (mécaniques, thermiques, bâtiments, réseaux,...) et des techniques associées en fonction du niveau de description des systèmes.

## Sommaire :

- 1 : Méthodologie
  - \* Eléments de la théorie des systèmes (notion d'approche systématique, structure/fonctionnement/évolution des systèmes, etc...)
  - \* Typologies des modèles (niveaux de modélisation de la complexité, modèles cognitifs/prévisionnels/décisionnels,...)
  - \* Modélisation des processus de conception et de décision (le modèle S.T.I. et les techniques associées, représentation par niveaux, modélisation multi-techniques, analyse multicritère).
- 2 : Evaluation multiniveaux de comportement
  - \* Conception et assemblage de modèles
  - \* Définition d'éléments, notion de taille et de niveau de description
  - \* Méthodes de réseau maillé (méthode nodale, éléments finis, sous et sur-structuration-
  - \* Application et mise en oeuvre sur des cas représentatifs des problématiques dans différents champs : mécanique, bâtiment et thermique, réseaux urbains

## Instabilités et couplage

A.COMBESURE, H.BENHADID

**Objectif:** Introduire les concepts de base permettant de prévoir les instabilités et de calculer la réponse de systèmes couplés fluide-structure ainsi que leur instabilités statiques et dynamique.

### Sommaire :

Introduction – Instabilités en statique et dynamique

Flambage et striction : Théorie linéaire , non linéaire élastique, non linéaire élastoplastique - Grandes déformations (instabilités en striction) – Dynamique - Effet des imperfections - Exemples industriels en statique - Flambage dynamique

Couplage fluide structure : Fluide au repos (acoustique, masse ajoutée, fluide visqueux) - Fluide en mouvement permanent ou transitoire

Instabilités couplées fluide structure : Instabilités statiques – Instabilités dynamiques

\*\*\*\*\*

## Spécialité Génie Mécanique

### Tronc Commun de Spécialité

## Modélisation non-linéaire en Génie Mécanique

M. BRUNET, A. LUBRECHT, J. PERRET-LIAUDET

**Objectifs :** L'objectif général du cours est de présenter les bases et la méthodologie de la modélisation en génie mécanique. Il s'appuiera sur trois études de cas représentatives des diverses échelles de modélisation rencontrées en génie mécanique, en allant du problème physique ou technologique de départ jusqu'à la mise en œuvre des méthodes numériques.

### Sommaire :

- A. Introduction : Formulations variationnelles et discrétisation - Formulation forte et formulation faible - Travaux virtuels, Théorèmes de l'énergie potentielle, Principe des travaux virtuels - Approximation et interpolation, Approximations nodales, Discrétisation éléments finis, problèmes dynamiques.
- B. Mise en forme : Non linéarités matérielles et géométriques - Formulation faible, opérateur tangent - Ouverture vers les bifurcations d'équilibre - Conditions aux limites et aux interfaces - Contact unilatéral et frottement - Méthodes de pénalisation ou par multiplicateurs de Lagrange.
- C. Elastohydrodynamique : Le problème physique - Equations de Reynolds et mécanique du contact - Couplage et interfaces - Conditions aux limites - Résolution numérique : Introduction aux méthodes multigrille.
- D. Transmission par engrenages : Description locale du contact entre denture - Raideur d'engrènement - Erreur statique de transmission - Prise en compte des composantes globales (carter, arbres, roulement...) - Conséquences sur le comportement dynamique et vibroacoustique.

Ces trois derniers thèmes pourront éventuellement évoluer au cours des années tout en respectant l'équilibre et une ouverture raisonnable de la diversité des problèmes rencontrés en génie mécanique.

\*\*\*\*\*

## Profil Tribologie et Mécanique des Solides

### Matière molle

D. MAZUYER

**Objectifs :** Dans une montre à cristaux liquides, les molécules présentes dans une fine pellicule liquide, sont réorientées par de très faibles signaux électriques : nous avons là un bon exemple de matière molle c'est-à-dire de systèmes moléculaires complexes donnant une réponse très forte pour un très faible signal de commande. De la même façon, toute la formulation des peintures, des encres ou encore des médicaments est basée sur la conception de systèmes moléculaires qui, en très faible concentration sont capables de modifier complètement les propriétés physiques du produit. En ce sens, la matière molle est de plus en plus directement connectée à des problèmes industriels. Le but de ce cours est de montrer comment les expériences combinées à des concepts physiques simples à l'échelle moléculaire peuvent permettre de décrire les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la matière à l'échelle macroscopique. Il s'agit d'identifier le comportement d'objets courants tels que les savons, les caoutchoucs, les polymères, les émulsions ou les colloïdes en suspension en vue soit de leur utilisation soit de leur conception puis de leur fabrication.

#### Sommaire :

L'état colloïdal : Définition, classification et propriétés physico-chimiques des systèmes colloïdaux - Systèmes moléculaires organisés (de l'agrégat micellaire aux cristaux liquides ordonnés) - Adsorption aux interfaces et microhétérogénéité des solutions colloïdales

Transports des suspensions colloïdales : Introduction à la rhéologie expérimentale - Modèles de viscosité, écoulements homogènes et hétérogènes - Ecoulement des suspensions concentrées et interactions colloïdales

Rhéologie des polymères : Topologie des polymères et lois d'échelle, écoulements des polymères en solution - Polymères aux interfaces : application à la stabilisation stérique - Propriétés visco-élastiques des polymères fondus : application à la mise en forme - Propriétés mécaniques de l'état solide (volume libre et réseaux moléculaires)

### Tribologie générale

D. MAZUYER, H. ZAHOUANI

**Objectifs :** Bien que présente depuis longtemps dans notre vie quotidienne, la tribologie est une discipline scientifique récente qui traite des multiples aspects du frottement, de l'usure et de la lubrification. La prise en compte des phénomènes tribologiques devient un passage obligé dans de nombreux secteurs industriels (automobile, aéronautique, microtechnologies, ...) pour répondre aux enjeux technologiques et économiques (production et maîtrise de l'énergie, modernisation et automatisation des technologies de fabrication, fiabilisation des produits). Grâce à une approche interdisciplinaire couplant la mécanique, la science des matériaux et la physico-chimie des surfaces, ce cours a pour but de donner, au futur ingénieur, les outils et la méthodologie nécessaires à la compréhension et à la résolution d'un problème de tribologie. On insistera, également sur l'effet des échelles temporelle et dimensionnelle des phénomènes étudiés (du mètre pour les systèmes mécaniques au nanomètre pour les interactions de surfaces).

#### Sommaire :

La mécanique du contact statique - Comportement mécanique des matériaux - Mécanique du contact lisse et rugueux, effet des couches minces

Les lois macroscopiques de frottement et d'usure - Frottements statique et dynamique - Les mécanismes physiques de l'usure

Les lubrifiants et les surfaces - Adhésion entre surfaces et mécanique du contact adhésif - Structure et propriétés des lubrifiants

La lubrification fluide - La lubrification hydrodynamique : principes physiques, notion de portance - La lubrification

Elastohydrodynamique : mécanismes de formation des films lubrifiants

La lubrification limite - Les phases intercalaires, le contrôle du frottement et la réduction de l'usure - La lubrification moléculaire

# Comportement des matériaux

A.COMBESURE, J.C.BOYER, F.SIDOROFF, P.FRANCIOSI

**Objectifs :** Le cours vise à donner une vue structurée des modèles de comportement non linéaires actuellement utilisés en Mécanique des Matériaux et notamment dans les codes de calcul par éléments finis. Au delà d'une présentation des modèles usuels, on s'attachera à dégager également les outils méthodologiques de base.

## Sommaire :

1. Quelques notions de physique  
Rhéologie classique : Modèles rhéologiques - Viscoélasticité, modèle de Biot, relaxation et fluage, sollicitations harmoniques –  
Modèles élastoplastiques et viscoplastiques, Bingham et Norton-Hoff.  
Anisotropie élastique, groupe d'isotropie, orthotropie et isotropie transverse, identification.
2. Thermodynamique en petites perturbations  
Thermodynamique des phénomènes irréversibles, potentiel de dissipation, modèle standard généralisé
3. Homogénéisation linéaire et non linéaire  
Passage micro-macro et homogénéisation, principes généraux, lois des mélanges, milieux à géométrie connue, Homogénéisation de milieux aléatoire, homogénéisation de Hill-Mandel, homogénéisation périodique et schéma autocohérent.  
Modèle multiéchelles.
4. Elasto-plasticité  
Comportement élastoplastique, plasticité associée et non associée, lois différentielles, modèle de Prager - Ecrouissage isotrope et écrouissage cinématique, plasticité cyclique. Effet de la vitesse de sollicitation. Application à l'évaluation de la rupture par déformation excessive et rochet. Mise en forme.
5. Visco élasticité et visco plasticité  
Viscoplasticité : et viscoplasticité cyclique. Application à la rupture par fluage charge monotone et cyclique.
6. Endommagement  
Introduction, modèle de Kachanov et modèle élastique fragile - Modèles phénoménologiques, variables d'endommagement, loi d'évolution, cumul de dommage, interaction fatigue fluage – Modèles micromécaniques, l'apport de l'homogénéisation, modèle de type Gurson et Rice-Tracey.. maîtrise de la localisation pour les matériaux endommagés : résultats récents
7. Effets de la température (hautes et très hautes températures)  
Couplages thermomécaniques, transformations microstructurales, alliages à mémoire de forme, introduction aux phénomènes couplés. Application au soudage.

# Tribologie : frottement, usure et lubrification solide

M.-C. BAIETTO, L. BAILLET, Y. BERTHIER, I. IORDANOFF, M.-H. MEURISSE

**Objectifs :** Tous les systèmes mécaniques contiennent des liaisons qui sont à la fois les conditions aux limites des calculs de structures et des conditions fonctionnelles à satisfaire. Ces liaisons sont quasi-statiques (aile-carlingue d'un avion, implant articulaire-os, connectique...), ou dynamiques (orientation des panneaux solaires d'un satellite, freins aéronautiques, pneumatique–chaussée, guidage des têtes de lecture de disques durs, prothèses articulaires...). Dans tous les cas, le cours vous permettra d'acquérir et maîtriser les éléments théoriques et expérimentaux de la mécanique, de la science des matériaux et de la physico-chimie nécessaires pour concevoir et maîtriser la durabilité de ces liaisons ainsi que l'énergie dissipée (frottement, bruits induits par le frottement, pollution ...).

Ce cours, synthèse des acquis en tribologie et mécanique des interfaces, est une spécificité reconnue de l'INSA/GMD. Il concerne tous les domaines des applications mécaniques y compris la biomécanique. Il traite des aspects développement et recherche.

## Sommaire :

- Physique des surfaces.
- Mécanique des contacts « solides ».
- Mécanismes d'usure, durabilité des surfaces , circuit tribologique.
- Etude tribologique des revêtements, des traitements de surfaces.
- Conduite d'expertises tribologiques.
- Lubrification fluides sous-alimentés et lubrification fractionnée.
- Modélisations par éléments discrets des troisièmes corps «solides».
- Etudes de cas industriels (analyse et solutions).
- Visites de sites industriels particulièrement concernés par la tribologie.

## Mécanique des contacts lubrifiés

G. DALMAZ, L. FLAMAND, A. LUBRECHT

### Objectifs :

Aspects théoriques et expérimentaux du comportement réel des lubrifiants et des matériaux en mécanique des contacts. Effets rhéologiques, thermiques et transitoires en lubrification élastohydrodynamique. Analyse des défauts et des rugosités des surfaces. Application à la modélisation des systèmes mécaniques lubrifiés.

L'analyse et la caractérisation des contacts élastohydrodynamiques sont effectuées en terme de : pression, contrainte de cisaillement, épaisseur du film, charge et frottement dans les contacts non-conformes pour des conditions géométriques et cinématiques générales et des lubrifiants newtoniens, non-newtoniens et diphasiques.

### Sommaire :

Analyse des paramètres du contact lubrifié élastohydrodynamique (EHL) – Lubrification élastohydrodynamique pour un fluide de Ree-Eyring – Effets thermiques en EHL – Effets transitoires en EHL, défauts et rugosités des surfaces – Modélisation des contacts lubrifiés sous-alimentés – Frottement dans les contacts lubrifiés, Rhéologie du lubrifiant, Courbe de Stribeck – Exemples : contact collet-rouleau d'un roulement, système came-poussoir, variateur continu de vitesse... – Modélisation quasistatique et dynamique de la lubrification des roulements à billes et à rouleaux – Analyse fonctionnelle des contacts lubrifiés, Endommagements – Simulation, machines d'essais, tests et mesures spécifiques optiques et infrarouge en EHL.

## Fatigue, Rupture, Durabilité

A.COMBESCURE, R. ESTEVEZ, A. GRAVOUIL, E. SALLE

### Objectifs :

L'objectif général du cours est de présenter des modèles de comportements de structure sollicitées en fatigue ou en présence de fissures. Le but de ces modèles est d'établir des critères de dimensionnement comme la durée de vie pour les sollicitations fluctuantes ou d'expliquer quantitativement les ruptures brutales de façon à pouvoir les prévenir, pour des matériaux métalliques et polymères.

### Sommaire :

Fatigue : Généralités – Historique – Mécanismes de ruine par fatigue – Détection des fissures avant rupture – Caractérisation des matériaux – Terminologie – Essais de base – Courbes et diagrammes – Facteurs influençant la tenue en fatigue – Cas des matériaux non métalliques – Dimensionnement – Approche élastique – Sollicitations d'amplitude variable – Critères multi-axiaux – Approches en contraintes et en déformations.

Mécanique de la rupture : Introduction – Mécanismes physiques de rupture – Mécanique de la fissuration – Théorie linéaire – Généralisation au cas tridimensionnel – Théorie élastoplastique – Fissuration en dynamique – Calculs de fissuration par la mécanique de l'endommagement – Aspects numériques – Simulation – Notions pratiques.

Mécanique de la rupture des polymères : Spécificités de comportement mécanique des polymères amorphes, semi-cristallins et des élastomères vis-à-vis des métaux – Mécanismes intervenant dans le processus de fissuration – Observations et résultats expérimentaux pour les polymères amorphes et semi-cristallins – Analyse du comportement en rupture – Comportement nonlinéaire – Conditions expérimentales – Zone cohésive représentative.

## Dynamique des usinages par enlèvement de matière, applications UGV et jet d'eau

T. MABROUKI, J.-F. RIGAL

**Objectifs** : L'objectif général du cours est de présenter les bases théoriques et méthodologiques de la dynamique des usinages par enlèvement de matière pour les fabrications en mécanique. Il s'agit ensuite d'exploiter ces notions pour une meilleure détermination des conditions opératoires en considérant des procédés actuels l'usinage à grandes vitesses (UGV) et la découpe jet d'eau.

### Sommaire:

**A. Modèles de coupe** : introduction, notions de couple outil et matière usinée, les modèles expérimentaux et numériques de la coupe orthogonale.

**B. Modèles dynamiques en UGV** : le système bouclé des efforts, définition des grandeurs dynamiques caractéristiques des éléments, application à l'étude de la stabilité de la coupe, instabilités liées à la broche, à l'outil, étude d'algorithmes de chemin d'outils et intégration en FAO (fabrication assistée par ordinateur) en considérant la dynamique de la coupe des matériaux durs et les grandes vitesses

**C. Modèles de la découpe jet d'eau** : l'enlèvement particulaire (abrasion), les modèles prédictifs des conditions opératoires, pour l'outillage et les surfaces usinées.

## Modélisation en dynamique rapide

A COMBESCURE, A GRAVOUIL, J.P. VERRIEST

**Objectifs** : L'objectif général du cours est de présenter les bases et la méthodologie de la modélisation en dynamique rapide. Il s'appuiera sur des exemples tirés provenant de cas de choc dans le domaine des impacts basse moyenne et très haute vitesse.

### Sommaire :

Les problèmes d'intégrité et de résistance au choc prennent une importance croissante du fait des exigences croissantes des autorités de contrôle. Les acteurs industriels de la sûreté civile et du secteur des transports sont fortement impliqués dans ces simulations. Les questions de recherche actuelle tournent autour de la qualité des modélisations du comportement des matériaux aux moyennes vitesses ainsi que de l'efficacité et de la rapidité des calculs. L'objectif de ce cours est de donner aux étudiants les bases des méthodes numériques et des modélisations de matériau utilisées pour la simulation du comportement et de la rupture des structures sous sollicitation dynamique rapide. Ce cours introduira également les élèves aux techniques les plus récentes de sous domaines et de multi échelles en espace temps qui permettent accélérer d'un ou deux ordres de grandeur les temps de calcul. Le cours sera illustré par des exemples tirés de cas industriels.

## Modélisation de la mise en œuvre des matériaux composites. Influence sur leurs propriétés mécaniques

P. BOISSE

**Objectifs** : introduction aux modèles utilisés en simulation du formage des composites. Analyse des conséquences de cette mise en œuvre sur les propriétés mécaniques en service

### Sommaire :

#### 1. Méthodes de mise en œuvre des composites

Fibres continues : drapage des pré imprégnés, placement de fibres, Injection sur renforts (RTM, LCM,...), enroulement filamentaire, CFRTP.

Fibres courtes : SMC, BMC, injection de thermoplastiques chargés, pultrusion....

Domaines d'application et analyse du coût

#### 2. Simulation du drapage des renforts tissés

Différents types de renforts tissés, propriétés et domaines d'utilisations.

Méthodes géométriques : algorithme du filet, avantage et limites.

Comportement mécanique des renforts tissés : différentes échelles d'analyses : macro (tissé), meso (maille), micro (fibre).

Traction biaxiale, embuvage, cisaillement plan (picture frame et BIAS), flexion des fibreux, compaction, grandes transformations de milieux fibreux.

Modélisation du formage par éléments finis : Approche en dynamique explicite. Modèles continus et discrets. Eléments finis spécifiques. Exemples industriels.

#### 3. Injection sur renforts

Mesures et calculs de perméabilité d'un renfort fibreux. Loi de Darcy, simulation des remplissages de moules sur renforts : 2D, 3D, RTM et variantes. Influence de la mise en forme du renfort.

#### 4. Formage des thermoplastiques à fibres continues (CFRTP)

Modèles de comportement du mono-plis (Rogers, Spencer). Contact et frottement visqueux entre les plis. Modélisation de la consolidation.

#### 5. Mise en forme des composites à fibres courtes

Modélisation de la rhéologie. SMC, BMC (thermodurcissables), GMT (thermoplastiques), injection de matrices chargées.

Théorie des mélanges multiphasés, modèles biphasiques, suspensions diluées (Lipscomb)

#### 6. Influence de la mise en forme sur les propriétés

Perméabilité (RTM) : influence du formage du renfort. Analyse expérimentale et calculs par homogénéisation.

Propriétés mécaniques en service : influence et prise en compte de la direction des renforts, des taux de fibres. Influence de l'endommagement de la préforme, des plissements, des bulles, des défauts de résine. Optimisation des procédés.

## Méthodes numériques avancées

S. BAGUET, T. LUBRECHT

**Objectifs** : Introduction aux méthodes numériques efficaces pour la résolution de différents types de problèmes. Description de différents types de problèmes physiques et mathématiques qui aboutissent à de très grands systèmes d'équations à résoudre.

Analyse de la complexité des différentes méthodes de résolution, analyse des temps de calcul.

### Sommaire :

**A. Problèmes issus d'un maillage** : systèmes d'équations obtenus par discrétisation d'équations différentielles ou intégrales sur un maillage.

- Résolution rapide d'un système d'équations d'origine équation différentielle utilisant les méthodes MG (multigrille).
- Calcul rapide d'intégrales utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT).
- Calcul rapide d'intégrales utilisant la MLMI (méthode multigrille).
- Résolution rapide d'un système d'équations d'origine équation intégrale, utilisant les méthodes MG (multigrille).
- Analyse de la précision d'une solution numérique, et d'un calcul à précision imposée.

### B. Problèmes non issus d'un maillage

- Tri efficace : (quicksort, Heapsort).
- Compression de données efficace (Huffman, Arithmatc).
- Cryptage efficace ().
- Filtrage utilisant la FFT.

\*\*\*\*\*

## Profil Mécanique des Structures

### Dynamique des structures

L. JEZEQUEL

**Objectifs** : L'analyse dynamique des structures à l'aide des méthodes de synthèse modale et d'éléments finis a trouvé un grand nombre d'applications industrielles. Le but principal de ce cours est de présenter ces méthodes dans un cadre général en menant en parallèle et en interaction une approche numérique et une approche expérimentale basée sur des essais vibratoires.

La correction des modèles et l'influence de l'amortissement sont aussi abordés.

### Sommaire :

Introduction : Choix de la description - Choix de la formulation - Procédures de discrétisation.

Discrétisation par éléments finis : Principes généraux - Calcul des matrices élémentaires - Procédures d'assemblage -

Problème spectral - Intégration temporelle - Calcul au crash.

Modélisation de l'amortissement - Origines de l'amortissement - Matrices d'amortissement - Introduction des modes complexes - Matrices d'impédance.

Identification modale - Méthode d'appropriation - Lissage des courbes d'impédance - Lissage des réponses transitoire

Synthèse modale : Principes généraux - Méthodes des modes libres - Méthodes des modes encastrés - Méthodes hybrides.

## Stabilité des systèmes mécaniques

L. JEZEQUEL

**Objectifs** : Lors de la conception des structures et des systèmes mécaniques, il est impératif de maîtriser les risques d'instabilité provenant de nombreux phénomènes. On peut citer, en particulier, les divers couplages de nature non-conservative liés à l'existence de frottements ou de contacts avec un fluide en écoulement. D'autre part, les phénomènes de flambement et de cloquage sont de plus en plus dimensionnant compte tenu de l'allègement des structures associé à l'utilisation de nouveaux matériaux. Dans le domaine du transport, la qualité des véhicules est essentiellement liée à l'apparition de ces comportements instables. On peut citer, par exemple, le comportement routier, les bruits de frein, la résistance aux crashes, les vitesses critiques des machines tournantes, le captage électrique, le contact roue-rail. Il apparaît donc indispensable pour les ingénieurs qui participent à un projet véhicule d'avoir une vision synthétique de ces divers problèmes afin de les maîtriser à l'aide d'outils d'analyse spécifiques.

### Sommaire :

**1. Analyse générale de stabilité** : Stabilité d'un état d'équilibre – Analyse des points de bifurcation – Stabilité orbitale – Instabilités paramétriques – Résonance non-linéaire de systèmes dynamiques  
**2. Flambement des structures élastiques** : Flambement des poutres – Formulation variationnelle du problème général – Analyse des surfaces caractéristiques – Calcul par éléments finis des charges critiques – Théorie des catastrophes  
**3. Structures élastiques non conservatives** : Formulation variationnelle du problème général – Cas des systèmes pseudoconservatifs – Analyse des surfaces de flottement – Calcul des charges critiques – Bifurcation de Hopf  
**4. Stabilité des systèmes gyroscopique** : Analyse spectrale – Formulation variationnelle du problème – Classification des problèmes – Stabilité des machines tournantes – Influence des effets dissipatifs  
**5. Application aux structures frottantes** : Phénomènes de stick-slip – Instabilité par arc-boutement – Vitesse critique des charges en mouvement – Etude du crissement des freins  
**6. Applications aux structures couplées avec un écoulement** : Présentation générale des équations couplées – Calcul des vitesses critiques – Couplage aéro-élastique – Couplage hydro-élastique.

## Dynamique des mécanismes

J. PERRET-LIAUDET

**Objectifs** : Les mécanismes présentent des architectures très variés et souvent complexes qui exigent chacune des approches spécifiques. La conception de ces mécanismes impose dorénavant de prendre en compte de plus en plus précisément leur comportement dynamique en vue d'optimiser le rapport performances/coût de fabrication. Dans ce cadre, l'objectif du cours est de présenter les principales méthodes d'analyse, de modélisation et de résolution qui permettent d'intégrer la plupart des phénomènes dynamiques. Il s'appuiera sur un ensemble d'exemples typiques.

### Sommaire :

A. Lois idéales de transmission : Géométrie – Cinématique – Dynamique – Exemples des mécanismes à barres et des systèmes came-poussoir.

B. Erreurs de transmission : Erreur statique de transmission hors charge – sous charge – Erreur dynamique de transmission – Définition – Origines – Caractéristiques – Excitation interne des mécanismes – Exemple de l'engrenage.

C. Approche probabiliste : Origines des dispersions – Tolérancement et fabrication – Description statistique des lois de transmission – Conséquences – Quelques exemples.

D. Comportement dynamique en approche corps rigides : Approche vectorielle – Approches analytiques – Groupe de Lie – Avantages, inconvénients – Calcul des réactions aux liaisons – Dimensionnement – Logiciels – Exemple du mécanisme biellemanivelle.

E. Vibrations de contact, vibroimpacts : Caractéristiques et influence dynamique des raideurs hertziennes – Résonances nonlinéaires – Effet des jeux – Vibroimpacts dans les contacts hertziens.

F. Phénomènes paramétriques : Origines – Instabilités – Résonances paramétriques – Conséquences – Quelques exemples.

G. Modélisation dynamique globale des mécanismes : Comportement élastodynamique – Méthodes et applications sur quelques exemples – Boîte de vitesses automobiles – Mécanismes à barres – Systèmes came-poussoir. Quelques notions sur le bruit des mécanismes – Méthodes de calcul.

## Dynamique des machines

G. FERRARIS, G. JACQUET-RICHARDET

**Objectifs** : Les machines tournantes sont des éléments clés de domaines aussi stratégiques que le transport et la production d'énergie (turbocompresseur de véhicule, moteur d'avion, turbine, pompe, éolienne...). Il s'agit ici de comprendre et apprendre à modéliser le comportement dynamique des ensembles tournants de ces machines, constitués de roues aubées montées sur un arbre. Ce cours comprend deux parties. La partie dynamique des rotors -13heures - s'intéresse au comportement des arbres flexibles montés sur paliers et considère les roues rigides. La partie dynamique des ensembles disque-aubes – 12 heures – suppose l'arbre rigide et porte sur le comportement des roues .

### Sommaire :

Dynamique des rotors : Équations des éléments de rotor en flexion. Modèles simples de monorotors, phénomènes de base. Modèles simples de multirotors coaxiaux. Modélisation éléments finis. Comportement dynamique des rotors industriels en flexion, compresseurs turbines à vapeur, compresseurs centrifuges, moteurs d'avion. Normes API. Comportement dynamique en torsion.

Dynamique des ensembles disque-aubes : Introduction, définitions, phénomènes de base et modélisations simplifiées.

Équations relatives aux systèmes en rotation. Modélisations éléments finis, aubes isolées, ensembles axisymétriques, ensembles à répétitivité cyclique. Mécanismes d'excitation, outils d'analyse. Étude de cas, modélisation d'un aubage simple en rotation sous Ansys.

## Dynamique non linéaire

R. DUFOUR

**Objectifs** Comprendre les méthodes pour résoudre les problématiques induites par les comportements dynamiques des systèmes mécaniques à paramètres variables dus, par exemple, à des sollicitations paramétriques, à des non linéarités localisées. Il s'agit d'identifier les paramètres variables, de dresser des cartes d'instabilités, d'étudier les bifurcations et les chemins vers le chaos, de quantifier l'effet des amortissements et des non linéarités sur la réponse des systèmes. La maîtrise du comportement s'effectue par les paramètres de contrôle.

### Sommaire :

**A. Vibrations non linéaires** : Généralités, phénomènes de base. Equations adimensionnelles, utilisation des espaces de phase, cartes d'instabilités, sections de Poincaré. Linéarisation, étude locale de la stabilité, méthode des perturbations, des échelles multiples. Formes normales. Applications.

**B. Structures à coefficients périodiques** : Stabilité des systèmes à excitation paramétrique et des systèmes autoparamétriques. Equation d'état, théorie de Floquet, bifurcation, chaos, paramètres de contrôle. Applications

**C. Structures à non linéarités localisées** : Modélisation des non linéarités. Modélisation des ensembles structure- non linéarités. Applications industrielles, isolation vibratoire, matériel.

## Comportement des structures sous sollicitations extrêmes

A. COMBESURE

**Objectifs** : L'ingénieur mécanicien aura inévitablement à résoudre des problèmes de tenue des structures mécaniques sous sollicitations sévères : chocs en dynamique rapide, séismes, gradients exceptionnels de température. Les approches numériques sont abordées ainsi que la comparaison avec des résultats expérimentaux. Le module a pour objectif d'introduire l'ingénieur au type de questions qu'il aura à affronter et de lui donner un aperçu des résultats de recherche les plus récents. Le cours a aussi pour objet de bien faire comprendre les atouts et les limites des simulations numériques qui sont maintenant très largement utilisées dans ce type de prédiction.

### Sommaire :

1. Equations de base et schémas numériques en dynamique linéaire ;
2. Schémas en dynamique non linéaire : exemples d'applications;
3. Contacts et liaisons permanentes en dynamique ;
4. Le cas du crash quelques exemples;
5. Introduction aux méthodes particulières SPH;
6. Applications industrielles à des cas de sûreté (industrie nucléaire, automobile et aéronautique).
7. Sollicitations sismiques
8. Réponse des matériaux aux températures sévères

## Identification des systèmes et des structures

J. DER HAGOPIAN, L. GAUDILLER, J. MAHFOUDH, D. REMOND

**Objectifs** : L'objectif général du cours est de présenter les différentes techniques d'identification utilisées en Génie Mécanique.

Le cours présentera les concepts et modèles associés à l'identification en suivant des approches classiques, pour aller progressivement vers des approches plus spécifiques et élaborées (Intelligence Artificielle). L'ensemble de ces outils sera utilisé sur un ou plusieurs cas, de manière à mettre en évidence les avantages et inconvénients de chaque approche.

### Sommaire :

#### Identification comportementale et paramétrique (12h)

Introduction : Rappels théoriques et notions fondamentales. Modèles à temps continu, modèles à temps discret. Formulation du problème d'identification. Présentation de quelques exemples et domaines d'application.

Identification comportementale: modale SDOF / MDOF, Méthode LSCE, Applications.

Méthodes d'identification paramétriques et non paramétriques : réponse impulsionnelle, Structures de modèle. Méthodes d'estimation des paramètres. Convergence et consistance. Applications.

Choix de l'utilisateur : Critère d'identification. Sélection de la structure de modèle. Validation du modèle. Application.

Introduction à l'identification de systèmes variables dans le temps ou aux systèmes non linéaires : Identification temps réel.

Identification non linéaire.

#### Identification en temps réel : application au contrôle actif auto-adaptatif (3h)

Introduction sur le contrôle adaptatif / auto-adaptatif - Boucle de contrôle auto-adaptative - Algorithmes d'identification

adaptés – Problèmes liés au temps réel et solutions – Limites du contrôle auto-adaptatif / non linéaire – Communication Identification/Contrôleur – Implémentation sur microprocesseurs

#### Identification neuronale (4h)

Structures linéaires /non-linéaires: architectures, algorithmes, contrôleur, Applications.

#### Caractérisation et suivi de comportement des machines tournantes (6h).

Méthode des coefficients d'influences, Applications: équilibrages multiplans, mono / multivitesse. Approches modale et mixte.

Introduction à l'équilibrage actif.

## Contrôle actif des structures. Mécatronique

J. DER HAGOPIAN, L. GAUDILLER

**Objectifs** : Présentation de méthodes avancées de contrôles actifs pour maîtriser le comportement dynamique (linéaire/nonlinéaire) de structures souples et de machines.

### Sommaire :

Présentation du contrôle actif des structures et des machines

Objectif – Etat de l'art. Types de contrôles (actif, actif/passif, semi-actif, préinformé, ...), de commande (LQG, Floue, Neuronale, Neurofloue, ...), d'actionneurs, de capteurs et de structures intelligentes. Exemples d'applications.

Traitement du Signal

Classification des signaux (déterministes, aléatoires). Rappels sur les propriétés de la Transformée de Fourier (TF), des fonctions d'impulsions (dirac généralisé), des SLIT. Puissance et énergie de signaux. Caractérisation des signaux aléatoires.

Amélioration de la mesure d'un signal répétitif bruité. Transformée Discrète de Fourier (TDF), TDF-1, Propriétés, Fonctions Fenêtres.

Contrôle multivariable développé à partir de la modélisation des structures

Exemple introductif / Généralisation / Modélisation. Commande multivariable des structures, commandabilité et grammiens / Retour d'état / Précision/ Etude de cas. Contrôle linéaire quadratique (LQ), Reconstruction d'état, observateur continu / discret, observation optimale (LQG, DLQG), spillover. Exemples (structures souples, rotor, ..). Stratégies de contrôle: modal global / Indépendant, hiérarchisé. Contrôle adaptatif / non-linéaire: glissement des contrôleurs linéaires. Robustesse.

Contrôle Flou: contrôle non-linéaire multivariable

Sous ensembles flous, définition, caractérisation, opérations sur les sous ensembles flous, sous ensembles flous convexes, produits cartésien et projection de sous ensembles flous. Commande floue, fonctions d'appartenance, univers de discours, classes d'appartenance. Structure d'une commande floue, base des règles, Interface de "fuzzification" et de "défuzzification" (mécanisme d'inférence, implication, agrégation des règles. Stratégies de contrôle: global, modal indépendant. Exemples d'application (N ddl, rotor, ..).

Contrôle Neuronale

Introduction aux réseaux de neurones: Neurones formels, fonctions d'activation, architecture, règles d'apprentissage.

Commande neuronale: Structure d'une commande neuronale: Modélisation – Identification du système à contrôler, réglage du contrôleur. Exemples. Introduction au contrôle neuro-flou.

# Optimisation des matériaux et structures composites

P. HAMELIN, T. BARANGER, E. BIGAUD

**Objectifs** : L'objectif général du cours est de définir les différentes étapes de la conception et du dimensionnement des structures composites. Après une identification des paramètres physico-chimiques et des facteurs technologiques influençant le comportement mécanique des composites, les approches de caractérisation et de modélisation conduites à différentes échelles d'analyse sont traitées et complétées par des méthodes d'optimisation s'appuyant sur l'anisotropie contrôlée et la prise en complément de critères prenant en considération la durabilité et la fiabilité des structures.

## Sommaire :

**A. Introduction** : Notion de matériaux composites (hétérogénéité, anisotropie, effets échelle...), données de physico-chimie contrôlant les propriétés mécaniques, lois de comportement des matières polymères et des renforts textiles (visco-élasticité, thermo-rhéologie)

**B. Micromécanique des composites** : modélisation de l'interaction fibre-matrice, mécanismes de rupture et d'endommagement des fibres et de la matière, modélisation des interfaces et des interphases, homogénéisation à l'échelle du feuillet élémentaire

**C. Macro-mécanique des composites** : élasticité, rigidité orthotrope dans les axes et hors axes, critères de rupture en plasticité anisotrope

**D. Structures composites** : formulation analytique et modélisation numérique. Théorie des plaques stratifiées, théorie des plaques sandwich, théorie du collage et des assemblages collés, flambement d'instabilité, optimisation du dimensionnement en rigidité, à rupture

**E. Durabilité - fiabilité des matériaux et des structures composites** : fatigue, fluage, vibration, choc, effets couplés (environnement, sollicitations mécaniques)

**3. Equations et coordonnées généralisées libres** : 3.1. Degré de liberté – de liberté composé – mobilité – 3.2. Analyse des degrés de mobilité et de liberté composé – Singularités de fonctionnement – Pour une chaîne ouverte – pour une chaîne fermée – 3.3. Mouvements incompatibles.

**4. Actions de liaison** : 4.1. Actions de liaisons et multiplicateurs de Lagrange – 4.2. Hyperstatisme et moyens d'éliminer l'hyperstatisme – 4.3. Equivalence entre l'hyperstatisme au sens de la cinétique et au sens de la dynamique.

**5. Equations de la dynamique** : 5.1. Cas du paramétrage absolu – 5.2. Cas du paramétrage relatif – Méthode de Luh-Walter- Paul – Méthode des tenseurs d'inertie globaux – Méthode de Featherstone – Equations de Kane ou équations de Maggi.

**6. Problèmes d'intégration numérique** : 6.1. Systèmes algèbro-différentiels – 6.2. Problème de la transgression des équations de liaison – 6.3. Solution de Baumgarte dans le cadre des méthodes de Runge-Kutta – 6.4. Utilisation de méthodes implicites – 6.5. Réduction au nombre minimum de paramètres – Equations de Hamel-Boltzmann.