



**Institut d'Acoustique  
Graduate School**

Le Mans Université



**Faculté des Sciences  
& Techniques**

Le Mans Université

# **Master Acoustique**

## **parcours « Acoustique Appliquée »**

# **Syllabus**

Auteur (recueil, mise en forme) :  
Cyril Desjoux, [cyril.desjoux@univ-lemans.fr](mailto:cyril.desjoux@univ-lemans.fr)  
Olivier Richoux, [olivier.richoux@univ-lemans.fr](mailto:olivier.richoux@univ-lemans.fr)  
Dernière mise à jour : février 2022.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Guide du syllabus</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Première année, semestre 1</b>	<b>5</b>
2.1	Bloc acoustique I — Acoustic Basics . . . . .	5
2.2	Bloc acoustique I — Acoustics I . . . . .	6
2.3	Bloc mécanique — Mécanique des fluides . . . . .	8
2.4	Bloc mécanique — Mécanique des Milieux Déformables . . . . .	10
2.5	Bloc mécanique — Vibration I . . . . .	11
2.6	Bloc outils I — Signal I . . . . .	12
2.7	Bloc outils I — Maths for acoustics . . . . .	13
2.8	Bloc outils I — Méthodes numériques I . . . . .	15
2.9	Bloc ouverture — Physique des instruments de musique . . . . .	16
2.10	Bloc ouverture — Introduction au contrôle non destructif . . . . .	17
2.11	Anglais . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Première année, semestre 2</b>	<b>21</b>
3.1	Bloc acoustique II — Acoustique II . . . . .	21
3.2	Bloc acoustique II — Transmission lines . . . . .	23
3.3	Bloc vibrations — Vibrations II . . . . .	24
3.4	Bloc vibrations — Vibration experiments . . . . .	25
3.5	Bloc outils II — Signal II . . . . .	26
3.6	Bloc outils II — Méthodes numériques II . . . . .	28
3.7	Bloc outils II — Introduction aux éléments finis . . . . .	29
3.8	UE à choix — Acoustique des salles II . . . . .	30
3.9	UE à choix — Formulation intégrale et fonctions de Green . . . . .	31
3.10	UE à choix — Introduction à l'acoustique et aux vibrations non linéaires . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Deuxième année, semestre 3, parcours AA</b>	<b>33</b>
4.1	Ondes guidées et approche modale . . . . .	33
4.2	Propagation acoustique dans les solides anisotropes. Interaction acousto-optique . . . . .	34
4.3	Nonlinear acoustics . . . . .	37
4.4	Signal analysis II . . . . .	39
4.5	Acoustique dans les fluides visqueux et conducteur de la chaleur . . . . .	40
4.6	Numerical methods for acoustics and vibrations . . . . .	42
4.7	Perception, psychoacoustique . . . . .	43
4.8	Vibroacoustique . . . . .	44
4.9	Méthodes expérimentales en acoustique dans les solides . . . . .	45
4.10	Méthodes expérimentales en acoustique dans les fluides . . . . .	46
4.11	Optoacoustics and applications . . . . .	47

4.12	Contrôle non destructif par ultrasons . . . . .	49
4.13	Méthodes numériques pour le CND . . . . .	50
4.14	Aéroacoustique . . . . .	52
4.15	Propriétés Acoustiques des Milieux Périodiques . . . . .	53
4.16	Acoustique des matériaux poreux . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Deuxième année, semestre 4, parcours AA</b>	<b>55</b>
5.1	Stage en laboratoire de Recherche . . . . .	55

# 1 Guide du syllabus

Ce document présente l'ensemble du syllabus (résumé des cours) du Master d'Acoustique parcours Acoustique Appliquée (parcours Recherche). Les cours de la première année du Master sont dispensés sous la forme de cours - TD (Travaux Dirigés ; alternance de notions théoriques et d'exercices) et de Travaux Pratiques (TP). Les cours de la deuxième année sont dispensés sous forme de cours magistraux (notions théoriques et quelques applications). Vous noterez que le semestre 4 (2ème année) est entièrement dédiée à un stage en laboratoire de recherche. Vous trouverez pour chacun des cours :

- \* le nom du ou des enseignant-e-s permanents avec leur fonction et structure d'accueil (université, entreprise ...). Ils sont accompagnés d'enseignants non permanents dont les noms peuvent changer d'une année à l'autre et ne sont pas reportés ici.
- \* la thématique générale du cours,
- \* les volumes horaires des cours-TD et TP,
- \* les crédits ECTS (European Credits Transfert System) qui valent pour coefficient de la matière. Pour rappel, le total des ECTS (coefficients) est de 30 par semestre,
- \* les objectifs (compétences et savoirs attendus),
- \* le contenu du cours-TD et des TP sous la forme d'un plan et de mots clés,
- \* les modalités d'évaluation,
- \* les pré-requis,
- \* les ressources pédagogiques.

La liste des acronymes utilisés est la suivante :

- \* CC : Contrôle Continu ;
- \* EC : Enseignant-Chercheur ;
- \* ECTS : European Credits Transfert System ;
- \* LMU : Le Mans Université ;
- \* PRAG : Professeur Agrégé ;
- \* CM : Cours Magistraux ;
- \* TD : Travaux Dirigés ;
- \* TP : Travaux Pratiques.



## 2 Première année, semestre 1

### 2.1 Bloc acoustique I — Acoustic Basics

**Année, semestre** : M1, S1

**Enseignant-e(s)** : Jean-Pierre Dalmont (responsable)

**Thématique** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 8 / 0

**Crédits ECTS** : 1

#### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

Avoir les connaissances de bases utiles au praticien de l'acoustique de terrain.

#### **Contenu**

1. Maîtriser les ordres de grandeurs en acoustique (pression, vitesse particulaire, vitesse du son)
2. Maîtriser l'échelle des decibels en pression et en intensité.
3. Savoir convertir les pressions en pascal en niveau de pression en dB et vice versa sans utiliser de calculatrice.
4. Savoir sommer les niveaux sonores issus de différentes sources
5. Maîtriser le calcul de l'atténuation (atténuation géométrique et dissipation)
6. Savoir calculer le taux d'onde stationnaire

#### **Evaluation**

Examen final

#### **Pré-requis**

Maîtriser les logarithmes et les nombres complexes

#### **Ressources**

A. Fischetti Initiation à l'acoustique : Cours et exercices, Belin

## 2.2 Bloc acoustique I — Acoustics I

**Année, semestre** : M1, S1

**Enseignant-e-(s)** : Guillaume Penelet (responsable)

**Thématique** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 48 / 12

**Crédits ECTS** : 6

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

The main objective of this course is that students have solid backgrounds on fundamental aspects of acoustics including

- ◇ the fundamental equations of acoustics (backgrounds in fluid mechanics and thermodynamics),
- ◇ the derivation of the wave equation (mostly for the usual case of uniform fluids at rest),
- ◇ the acoustics of the gas column (resonance, free oscillations, coupling etc..),
- ◇ reflexion, transmission, and diffraction phenomena,
- ◇ guided waves and the modal theory,
- ◇ spherical and cylindrical waves (sound radiation, diffraction, guided waves in cylindrical ducts, etc...).

### Contenu

Four lectures (around 10 hours) and four series of exercises related to each lecture (around 30 hours). The titles of lecture are (see lecture notes on UMTICE for more details) :

- ◇ Fundamental equations of acoustics (in fluids)
- ◇ Plane waves
- ◇ Cylindrical and spherical waves
- ◇ Guided waves
- ◇ Modal analysis

### Evaluation

- ◇ 1 written exam at mid-part weight 1 (1h) and 1 final exam weight 2 (2h)
- ◇ 4 practicals weight 1

Personal notes and lecture notes are allowed.

### Pré-requis

Having backgrounds in acoustics is obviously a good point, but it is not essential. Having solid backgrounds in mathematics is essential. This includes : trigonometry, integration/derivation, asymptotic expansions of usual functions, solving of O.D.E., functions of multiple variables, vector analysis and operators (in various systems of coordinates) , linear algebra ... Reminders of useful formula will be provided, and exercise will be treated, but you need to know that we can't ignore mathematics in this course...



## **Ressources**

- ◇ Site UMTICE "Acoustics 1"
- ◇ C. Potel, M. Bruneau, "Acoustique Générale", chapters 1, 3-6 (in French)
- ◇ A.D. Pierce, "Acoustics, an introduction to its physical principles and applications", chapters 1, 3-5, et 7
- ◇ S. Temkin, "Elements of Acoustics", chapters 1-4

## 2.3 Bloc mécanique — Mécanique des fluides

Année, semestre : M1, S1

Enseignant-e-(s) : Wenping Bi (responsable)

Thématique : socle scientifique

Volume horaire (TD / TP) : 20 / 0

Crédits ECTS : 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ comprendre l'accélération d'une particule
- ◇ comprendre le flux
- ◇ comprendre la viscosité
- ◇ comprendre l'équation constitutive
- ◇ comprendre les forces dans un fluide
- ◇ comprendre l'équation de Navier-Stokes et la résoudre analytiquement

### Contenu

1. Remise à Niveau
  - (a) Introduction
    - ◇ Particule, milieu continu
    - ◇ Différence entre le comportement physique des solides et des fluides
    - ◇ Les équations de base
    - ◇ Types d'écoulement (Stationnaire et instationnaire, Compressible et incompressible, Rotationnel et irrotationnel, Laminaire et turbulent, Écoulement (intérieur) dans un conduit et (extérieur) autour d'un cylindre, Viscosité, fluide Newtonien)
  - (b) Cinématique des fluides I
    - ◇ Descriptions Eulérienne et Lagrangienne
    - ◇ Lignes de courant, trajectoires en coordonnées cartésiennes et cylindriques
    - ◇ Accélération d'une particule (la dérivée particulaire) en coordonnées rectangulaires et cylindriques
2. Cinématique des fluides II
  - (a) Déformation dans les écoulements
    - ◇ Décomposition du champ de gradient de vitesse au voisinage d'un point
    - ◇ Analyse du terme symétrique : déformation pure
    - ◇ Analyse du terme antisymétrique : rotation pure
  - (b) Conservation de la masse sous forme intégrale et différentielle
  - (c) Fonction de courant — Écoulement plan et axisymétrique
  - (d) Écoulement irrotationnel : le potentiel de vitesse
3. Dynamique des fluides
  - (a) Tenseur des contraintes de viscosité et Forces de surface
  - (b) Équation du mouvement d'un fluide sous forme intégrale

- (c) Équation de la dynamique d'un fluide dans le cas général
- (d) Équation de Navier-Stokes d'un fluide newtonien
- (e) Équation d'Euler et Bernoulli pour le mouvement d'un fluide parfait et applications
- (f) Conditions aux limites dans les écoulements fluides
- (g) Quelques solutions de l'équation de Navier-Stokes
- (h) Écoulement de Couette
- (i) Écoulement de Poiseuille

## **Evaluation**

Examen 2 heures

## **Pré-requis**

- ◇ Cinématique des fluides
- ◇ Conservation de la masse
- ◇ Équation de mouvement
- ◇ Bernoulli

## **Ressources**

## 2.4 Bloc mécanique — Mécanique des Milieux Déformables

**Année, semestre :** M1, S1

**Enseignant-e-(s) :** N. Tahani (responsable), C. Potel

**Thématique :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 30 / 0

**Crédits ECTS :** 3

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Savoir exprimer l'énergie potentielle élastique d'un système
- ◇ Savoir poser un problème d'optimisation sous forme de minimisation d'intégrale
- ◇ Savoir utiliser le Principe Variationnel de Hamilton

### Contenu

#### 1. Mécanique des milieux continus (2/3)

- ◇ Rappels de L3 des équations l'élasticité (champs de déplacement, tenseur des déformations et tenseurs de contraintes)
- ◇ Généralisation de l'énergie potentielle élastique
- ◇ Généralisation de la loi de Hooke - Tenseur des rigidités élastiques en milieux isotropes - Application aux milieux isotropes et aux poutres
- ◇ Application de l'énergie potentielle élastique aux milieux isotropes - Introduction au calcul de Lagrangien

#### 2. Principe Variationnel de Hamilton (1/3)

- ◇ Rappel de mécanique analytique de L3
- ◇ Problème d'optimisation
- ◇ Principe Variationnel de Hamilton pour système de solides rigides (1 exemple) puis systèmes déformables (poutres)

### Evaluation

Examen de 2h

### Pré-requis

Mécanique du point

### Ressources

## 2.5 Bloc mécanique — Vibration I

**Année, semestre :** M1, S1

**Enseignant-e-(s) :** F. Ablitzer

**Thématique :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 20 / 0

**Crédits ECTS :** 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

To know the basic concepts in vibrations of discrete and continuous systems, in particular how to obtain the eigenmodes and use them to calculate solutions for free and forced vibrations problems

### Contenu

- ◇ Vibrations of undamped and damped SDOF systems : free response, forced response
- ◇ Vibrations of MDOF systems : eigenmodes, free and forced responses using modal superposition
- ◇ Vibrations of continuous systems (strings, bars, membranes) : eigenmodes, free and forced responses using modal superposition

### Evaluation

- ◇ 1 examen intermédiaire (1h30) sans documents
- ◇ 1 examen final (2h) avec documents

### Pré-requis

Basic bachelor knowledge

### Ressources

- ◇ [UMTICE page](#)
- ◇ S. Rao, Mechanical vibrations, Paris, Prentice Hall , 2011
- ◇ Leonard Meirovitch, Principles and techniques of vibrations, New Jersey : Prentice Hall , 1997
- ◇ S. Graham Kelly, Mechanical vibrations : theory and applications, Stamford : Cengage Learning , cop. 2012

## 2.6 Bloc outils I — Signal I

**Année, semestre :** M1, S1

**Enseignant-e-(s) :** L. Simon (responsable)

**Thématique :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 8 / 12

**Crédits ECTS :** 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

The objectives of this course are as follows :

- ◇ to know the main basic tools of signal processing,
- ◇ to know how to apply the tools dedicated to digital signal processing using the Python language (for both deterministic and random data)

### Contenu

This teaching is organized in the form of 6 sessions of 3-3.5 hours each, each session consisting of a quick presentation of the course, theoretical exercises and practical exercises. 4 thematic blocks are proposed :

- ◇ temporal tools (including time-shifting, convolution and correlation operations)
- ◇ frequency analysis tools (Fourier transforms for continuous and discrete time signals)
- ◇ analysis of time-invariant linear systems, filtering
- ◇ introduction to multi-sensor analysis

Personal work estimated to be 20 hours.

### Evaluation

- ◇ Session 1 : Test for the Practicals (setting in situation, analysis of real-world data, codes to write...), Written test
- ◇ Session 2 : Written test Exam duration 2 hours for all tests/exams

Docs for exam Personal notes and personal codes

### Pré-requis

This course covers all the knowledge and skills of the undergraduate cycle, as well as openings towards the Signal 2 course (next semester). The backgrounds in mathematics mostly include : calculation of integrals (for Fourier transform calculation), calculation of discrete summations (for Discrete Fourier transform calculation) and tools for random data (probability and statistics).

### Ressources

- ◇ Discrete-Time Signal Processing, Oppenheim, Schaffer, Pearson, 2010 Signals, Systems and Inference, Oppenheim, Verghese, Pearson, 2016
- ◇ On-line course Signal Processing 1 (UMTICE page)

## 2.7 Bloc outils I — Maths for acoustics

**Année, semestre** : L1, S1

**Enseignant-e-(s)** : O. Dazel (responsable)

**Thématique (Bloc CMI)** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 30 / 0

**Crédits ECTS** : 3

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

The objective of this course is to manipulate mathematical and numerical tools. This course is mainly focused on the manipulation of tools rather than theoretical aspects (this will be the objective of the course Mathematics for Acousticians II - spring semester)

### Contenu

1. Taylor expansions : This course will do a reminder on what are Taylor expansion but will mainly focus on how to apply them to simplify/linearise physical problem. A focus will be done on how to find the small parameter/how to combine approximations.
2. Intermediate matrix computation : This part corresponds to intermediate manipulation of matrices. The classical decomposition/factorisation techniques will be presented. A particular attention will be paid on diagonalisation and its physical significance
3. Resolution of systems of equations. In this part we will show the methods to solve inverse problems, both in the linear and non-linear case. It is a short introduction to optimisation techniques (deeply studied in Mathematics for Acousticians II and during year 2)
4. Resolution of differential systems : The objective of this part is to be able to solve analytically linear differential systems and to use numerical methods (typically Runge-Kutta) to solve more complicated systems
5. Resolution of continuous problems : an introduction. In this part, we will solve continuous 1D problem with analytical techniques. It is the mathematical side of modal decomposition techniques.

**Quantité de travail** : 25 hours of lectures/exercices + 25 hours of personal work (more if your prerequisite need to be reinforced). Some practices of the course "Méthodes numériques sous Python" will be application of these techniques.

### Evaluation

2 midterm-exam + 1 final exam (weights 1/4,1/4,1/2)

30 minutes for the mid-term. 2 hours for the final exam

No documents allowed

### Pré-requis

Basic mathematical notions licence

### Ressources

- ◇ Books of Stephen Boyd. Mainly concerning linear algebra and differential equations Cambridge University Press kindly agreed to allow them to keep the book available on the web

- ◇ Lecture notes by O. Dazel & G. Gabard available on the page of the course
- ◇ Page UMTICE : Mathematics for Acoustics / Master 1 Acoustics



## 2.8 Bloc outils I — Méthodes numériques I

**Année, semestre** : M1, S1

**Enseignant-e-(s)** : C. Desjouy (responsable)

**Thématique (Bloc CMI)** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 0 / 12

**Crédits ECTS** : 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

L'objectif de ces TP est d'approfondir certaines compétences en programmation python et d'être capable d'élaborer en autonomie un programme résolvant un problème physique ou mathématique donné et présentant les résultats

### Contenu

1. Remise à niveau
2. Le calcul formel
3. L'exploitation de données scientifiques
4. La méthode des moindres carrés

**Quantité de travail** : 12 heures de TP + 12 heures de travail personnel pour les étudiants ayant déjà des connaissances en Python, 40 heures sinon.

### Evaluation

Examen de 2h sur ordinateur, tous documents et internet autorisés

### Pré-requis

Maîtrise du langage Python, des modules scientifiques numpy et matplotlib et de l'algorithmique

### Ressources

Page UMTICE : M1 ACOUSTIQUE - Méthodes numériques

## 2.9 Bloc ouverture — Physique des instruments de musique

**Année, semestre :** M1, S1

**Enseignant-e(s) :** F. Ablitzer (responsable), J.-P. Dalmont, F. Gautier, J. Gilbert

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 0 / 12

**Crédits ECTS :** 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

Connaître les mécanismes physiques impliqués dans la production sonore des instruments à vent et à cordes. Dans les travaux pratiques, des méthodes de caractérisation d'instruments à vent et à cordes sont mises en œuvre, ainsi que des modèles physiques permettant de simuler leur fonctionnement (par exemple à des fins de synthèse sonore).

**Quantité de travail :** 12 heures de TP + 12 heures de travail personnel pour les étudiants ayant déjà des connaissances en Python, 40 heures sinon.

### Contenu

- ◇ Cours (8h)
  - Bases physiques de l'harmonie
  - Fonctionnement des instruments à vent
  - Fonctionnement des instruments à cordes pincées
  - Fonctionnement des instruments à cordes frottées
- ◇ TP (12h)
  - Caractérisation du couplage corde-caisse sur une guitare
  - Impédance d'entrée d'instruments à vent : mesures et interprétations en lien avec le jeu
  - Modèle physique minimal d'instrument à anche (type clarinette)
  - Modèle physique minimal d'instrument à cordes frottées (type violon)

### Evaluation

Examen de 2h et travaux pratiques

Document pour les examens : Personal notes, lecture notes

### Pré-requis

Notions d'acoustique, mécanique, vibrations

### Ressources

- ◇ A. Chaigne et J. Kergomard, Acoustique des instruments de musique, Belin, 2013
- ◇ N. H. Fletcher and T. D. Rossing, The Physics of Musical Instruments, Springer, 1998
- ◇ Les instruments de l'orchestre, Bibliothèque Pour La Science
- ◇ Page Umtice

## 2.10 Bloc ouverture — Introduction au contrôle non destructif

**Année, semestre :** M1, S1

**Enseignant-e-(s) :** M. Bentahar (responsable)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 20 / 0

**Crédits ECTS :** 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

L'objectif de cet enseignement est d'offrir de bonnes bases sur les méthodes de contrôle non destructif en particulier celles liés aux ultrasons. L'enseignement est conçu pour contenir tout d'abord les informations nécessaires à l'obtention d'un niveau 2 Ultrasons (selon la certification Cofrend). De plus, nous accorderons un intérêt particulier aux explications physiques permettant de mieux comprendre les phénomènes enseignés et ce à travers le développement de calculs du niveau d'un enseignement de Master 1 en ouvrant ainsi la voie vers le monde de la recherche.

Cet enseignement est une introduction aux Contrôles Non Destructifs (CND) des matériaux et des structures. Les principales méthodes de CND sont présentées (rayons X, courants de Foucault, magnétoscopie, ressuage, ultrasons, émission acoustique,...). L'accent est ensuite mis plus particulièrement sur les méthodes mécaniques notamment ultrasonores. Il sera question d'introduire les ondes ultrasonores, leurs caractéristiques ainsi que leurs domaines d'utilisation. Aussi, ce cours s'intéressera aux phénomènes d'interface et aux conversions de modes lorsque l'onde ultrasonore passe d'un milieu A à un milieu B.

### Contenu

1. Intérêt des méthodes CND
2. Domaines d'application des méthodes CND
3. Les méthodes d'inspection
4. Ondes ultrasonores dans les solides
5. Notions d'élasticité
6. Propagation dans les milieux
7. Phénomènes d'interface
8. Atténuation des ultrasons dans les solides

**Quantité de travail :** 20 heures de Cours/TD. Le travail personnel est estimé à 10 heures.

### Evaluation

Examen écrit de 2h, Notes personnelles et documents donnés en cours autorisés

### Pré-requis

Tout d'abord cet enseignement nécessite une bonne culture générale des méthodes physiques permettant de bien comprendre le principe des différentes méthodes. Il faudra également avoir des notions relatifs aux ondes élastiques. Enfin, il faudra avoir de bonnes bases en mathématiques (algèbre, géométrie, etc.)

## **Ressources**

- ◇ Ondes élastiques dans les solides - Auteurs : D. Royer, E. Dieulesaint - Tome 1 - Edition : MASSON
- ◇ Introduction to Nondestructive Testing (Training Guide, second edition) - Auteur : Paul E. Mix - Edition : Wiley Interscience Publication
- ◇ Acoustic Fields and Waves in Solides- Auteur : B.A. Auld - Tome 1 et Tome 2 - Edition : Wiley Interscience Publication
- ◇ Ultrasonic waves in solid media- Auteur : Joseph L. Rose - Edition : Cambridge University
- ◇ Page UMTICE

## **2.11 Anglais**

**Année, semestre** : M1, S1

**Enseignant-e-(s)** : V. Jeanblanc (responsable)

**Thématique (Bloc CMI)** : Complément

**Volume horaire (TD / TP)** : 18 / 0

**Crédits ECTS** : 2

### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

### **Evaluation**

Examen de 2h

### **Pré-requis**

### **Ressources**



# 3 Première année, semestre 2

## 3.1 Bloc acoustique II — Acoustique II

**Année, semestre** : M1, S2

**Enseignant-e(s)** : J. P. Dalmont (responsable), O. Richoux (EC)

**Thématique (Bloc CMI)** : spécialité

**Volume horaire (TD / TP)** : 30 / 12

**Crédits ECTS** : 5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Savoir poser un problème en guide d'onde en utilisant la méthode modale
- ◇ Connaître les sources élémentaires de rayonnement (débit, force, chaleur) associées aux équations de conservation, ainsi que les notions source monopolaire/dipolaire.
- ◇ Savoir résoudre un problème avec sources en faisant des approximations judicieuses

### Contenu

Plan du cours :

1. Approche modale
2. Approche modale en guide d'onde
3. Les équations de l'acoustique avec sources
4. Monopôle, dipôle et quadripôles
5. Sources images et réseaux de sources
6. Rayonnement d'une source compacte
7. Sources aéroacoustiques

### Evaluation

- ◇ Examen final
- ◇ Projet/TP :
  - Compte rendu intermédiaire
  - Compte rendu final

### Pré-requis

Acoustics I, Math for acoustics

## **Ressources**

- ◇ M. Bruneau, Fundamentals of acoustics, ISTE, 2006
- ◇ P. Morse et K. Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, 1968
- ◇ A. Chaigne et J. Kergomard. Acoustique des instruments de musique. 2008
- ◇ S. Temkin Elements of acoustics, Wiley, 1981
- ◇ F. Anselmet et P.-O. Mattei Acoustique, Aéroacoustique et Vibrations, ISTE 2015



## 3.2 Bloc acoustique II — Transmission lines

**Année, semestre :** M1, S2

**Enseignant-e-(s) :** J. P. Dalmont (responsable)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 20 / 0

**Crédits ECTS :** 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Savoir poser et traiter un problème de conduits en utilisant les éléments localisés et les matrices de transfert
- ◇ Savoir poser un problème de propagation 1D avec le formalisme de la théorie des lignes

### Contenu

Plan du cours :

1. Lignes uniformes et analogies (avec et sans pertes)
2. Diagrammes de dispersion
3. Formalisme matriciel pour les multiportes (matrices impédance, de transfert, de diffusion,...)
4. lignes de transmission asymétriques, non-réciproques et non uniformes
5. Pavillons

### Evaluation

- ◇ Examen final
- ◇ Projet :
  - Compte rendu intermédiaire
  - Compte rendu final

### Pré-requis

- ◇ Acoustics I
- ◇ Math for acoustics

### Ressources

- ◇ Munjal, M. L. (2014). Acoustics of ducts and mufflers. John Wiley & Sons.
- ◇ M. Bruneau, Fundamentals of acoustics, ISTE, 2006
- ◇ P. Morse et K. Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, 1968
- ◇ A. Chaigne et J. Kergomard. Acoustique des instruments de musique. 2008
- ◇ S. Temkin Elements of acoustics, Wiley, 1981
- ◇ Page UMTICE : Transmission lines

### 3.3 Bloc vibrations — Vibrations II

**Année, semestre** : M1, S2

**Enseignant-e-(s)** : B. Castagnède (responsable)

**Thématique (Bloc CMI)** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 16 / 0

**Crédits ECTS** : 2

#### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

Approfondir les notions vues en vibration I

#### **Contenu**

- ◇ Vibrations de flexion des barres minces
- ◇ Vibrations de flexion des plaques minces, rectangulaires ou circulaires
- ◇ Méthodes énergétiques en vibrations (méthode de Lagrange Rayleigh, Ritz, ...)

#### **Evaluation**

Examen terminal de 2h

#### **Pré-requis**

Vibration I

#### **Ressources**

Cours Umtice

### **3.4 Bloc vibrations — Vibration experiments**

**Année, semestre** : M1, S2

**Enseignant-e-(s)** : F. Ablitzer (responsable)

**Thématique (Bloc CMI)** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 8 / 12

**Crédits ECTS** : 2

**Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

**Contenu**

**Quantité de travail :**

**Evaluation**

**Pré-requis**

**Ressources**

## 3.5 Bloc outils II — Signal II

**Année, semestre :** M1, S2

**Enseignant-e(s) :** L. Simon (responsable), B. Gazengel (EC), M. Melon (EC)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 12 / 12

**Crédits ECTS :** 2

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Know the basics of digital filtering
- ◇ Know the basic tools of non-stationary signal analysis (Short-time Fourier Transform, wavelet analysis, Wigner-Ville distribution)
- ◇ Know the basic acoustic imaging method
- ◇ Be able to design simple FIR and IIR filters
- ◇ Be able to apply them in a context of real-world data, in order to extract informations from data
- ◇ Be able to write beamforming and Nearfield Acoustic Holography (NAH) codes

### Contenu

1. Digital Filtering : (a) Introduction, properties of digital filters. Analysis of continuous systems, discretization methods (practical 1) (b) Analog systems simulation (IIR filters). Discrete-time approximation of loudspeaker behavior (practical 2) (c) FIR filters design. Filtering with FIR Filters (practical 3)
2. Non stationary signal analysis : (a) Introduction : stationarity vs non-stationarity, global ideas about time-frequency analysis, examples (b) Limits of Fourier analysis and introduction to local Fourier analysis : classical Fourier transform (including time-frequency duality), Short-Time Fourier transform (definition, interpretation, limits) (c) Frequencies : Instantaneous frequency, analytic signal, examples (favourable and un-favourable cases) (d) Decompositions and densities : atomic decompositions (including wavelet analysis), densities (including Wigner-Ville decomposition)
3. Acoustic Imaging : (a) Acoustic intensimetry and beamforming (b) Nearfield Acoustic Holography (NAH) in cartesian coordinates (c) Loudspeaker measurement with microphone arrays.

**Quantité de travail :** 24 hours (12h lecture, 12h practical), personal work estimated to be 12 hours

### Evaluation

Written exam of 2h + practical report

Personal notes allowed

### Pré-requis

Signal I

### Ressources

UMTICE : Signal analysis I

Bibliographie :

- ◇ Edward P. Cunningham, Digital filtering : an introduction, New York, J. Wiley, 1995
- ◇ Time-Frequency Analysis, L. Cohen, Prentice-Hall, 1995
- ◇ Time-Frequency / Time-Scale Analysis, P. Flandrin, Academic Press, 199
- ◇ A Wavelet Tour in Signal Processing, S. Mallat, 3rd Ed., Academic Press, 2009

### **3.6 Bloc outils II — Méthodes numériques II**

**Année, semestre** : M1, S2

**Enseignant-e-(s)** : C. Desjouy (responsable), G. Gabard (EC)

**Thématique (Bloc CMI)** : socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP)** : 0 / 12

**Crédits ECTS** : 2

#### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

Être capable d'appliquer un schéma d'intégration temporel à un problème différentiel donné

#### **Contenu**

1. Dérivation numérique par différences finies
2. Intégration numérique par méthode de Runge-Kutta
3. Application à la résolution d'équations différentielles
4. Application à la méthode FDTD

**Quantité de travail** : 12 heures de TP + 12 heures de travail personnel.

#### **Evaluation**

Examen de 2h sur ordinateur, tous documents et internet autorisés

#### **Pré-requis**

Méthodes numériques I & Math for acoustics

#### **Ressources**

Page UMTICE : M1 ACOUSTIQUE - Méthodes numériques

### 3.7 Bloc outils II — Introduction aux éléments finis

**Année, semestre :** M1, S2

**Enseignant-e-(s) :** O. Dazel (responsable), G. Gabard (EC)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 12 / 6

**Crédits ECTS :** 2

#### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

Découvrir les fondements de la méthode des éléments finis et sa mise en œuvre sur des problèmes simples

#### **Contenu**

1. Introduction sur un problème de statique
2. Calcul des modes d'un tube acoustique fermé par éléments linéaires
3. Introduction aux éléments quadratiques
4. Poutre en traction compression et en flexion
5. Introduction aux dimensions 2 et 3

**Quantité de travail :** 12 heures de TD + 6 heures de TP + travail personnel (environ 30 heures)

#### **Evaluation**

Examen de 2h, Aucun document autorisé

#### **Pré-requis**

Cours de "Mathématiques pour l'acoustique" et "Méthodes numériques I" !

#### **Ressources**

Page UMTICE :

## 3.8 UE à choix — Acoustique des salles II

**Année, semestre :** M1, S2

**Enseignant-e-(s) :** C. Ayrault (responsable)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 20 / 10

**Crédits ECTS :** 3

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Comprendre les limites des approches simples.
- ◇ Approfondir certaines notions nécessaires pour des spécialistes en acoustique des salles.
- ◇ Acquérir la démarche de correction d'un lieu : caractérisation, préconisation de solutions par modèles analytique ou numérique.

### Contenu

#### 1. Cours (15h environ)

- ◇ modèle du champ diffus : rappels et couplage de salles (régimes stationnaire et transitoire)
- ◇ modèles de diffusion : limites du champ diffus, modèles analytique et numérique pour les cas ne répondant pas aux hypothèses du champ diffus
- ◇ diffusion par les parois : principe, rôle, coefficients, contrôle de la diffusion, diffuseurs de Schroëder
- ◇ critères subjectifs : musicaux et d'intelligibilité (définition, signification, valeurs cibles). Exemple d'application à la Philharmonie de Paris.
- ◇ correction active : principe, types de contrôle, système CARMEN. Si possible, visite des théâtre des Quinconces et démonstration du système CARMEN.

#### 2. TP (10h)

- ◇ Caractérisation acoustique d'un amphithéâtre
- ◇ Modélisation analytique (champ diffus) et numérique (Catt Acoustics) de l'acoustique de l'amphithéâtre : études des limites du logiciel, calage du modèle sur les mesures, propositions de correction.

**Quantité de travail :** 15 heures de TP + 10 heures de TP + Relecture du cours, exercices à finir à la maison éventuellement, annales à disposition avec corrections (en général) : 1 à 2 journées de travail.

### Evaluation

Examen écrit de 2h, Notes de cours autorisées

2 compte-rendus de TP complet : caractérisation et modélisation / préconisations

### Pré-requis

Acoustique des salles I

### Ressources

Page UMTICE : Room acoustics, clé : reverberation, rubrique Room Acoustics 2

Bibliographie : voir la page UMTICE



### 3.9 UE à choix — Formulation intégrale et fonctions de Green

**Année, semestre :** M1, S2

**Enseignant-e-(s) :** O. Richoux (responsable)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 20 / 10

**Crédits ECTS :** 3

#### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Knowledge : Green's function theory & Integral formalism in time and frequency domain
- ◇ Skills :
  - be able to write and use the Green's function in usual cases (Free space (1d to 3d), reflecting boundaries and image sources,
  - use the integral formalism in different simple applications : Acoustic field in small cavity, Acoustic field between two infinite wall, Sound radiation by a flat piston.

#### Contenu

1. Introduction : (a) Non homogeneous differential equations : various examples in physics (b) Toolbox (i. Linear differential operator ii. Boundary conditions iii. Fourier transform iv. Green's identities v. Dirac distribution).
2. Time-independant problem : (a) Definition of the Green's function (b) Interpretation (c) Homogeneous Boundary Conditions (d) Reciprocity (e) Solution (i. Method of Variations of Parameters ii. Sturm-Liouville Problem iii. Eigenmode Expansion iv. Direct Method).
3. 3D (and 2D) free space Green's function : (a) Integral Formalism in Acoustics (b) Introduction (c) Green's theorem (d) Integral formalism in time domain (e) Integral formalism in frequency domain (f) Solving integral equations (g) Boundary conditions (h) Examples of application.

**Quantité de travail :** 30 hours (20h tutorial, 10h practical), personal work estimated to be 30 hours.

#### Evaluation

#### Pré-requis

Acoustics I

#### Ressources

Page UMTICE : Acoustics 2

Bibliography :

- ◇ Alastuey, A., Clusel, M., Magro, M., & Pujol, P. (2015). Physics and Mathematical Tools : Methods and Examples. World Scientific Publishing Company.
- ◇ Duffy, D. G. (2001). Green's Functions with Applications. Chapman & Hall.

### 3.10 UE à choix — Introduction à l'acoustique et aux vibrations non linéaires

**Année, semestre :** M1, S2

**Enseignant-e-(s) :** G. Theocharis (responsable)

**Thématique (Bloc CMI) :** socle scientifique

**Volume horaire (TD / TP) :** 30 / 0

**Crédits ECTS :** 3

#### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

Presentation of methods of nonlinear acoustics and vibration

#### Contenu

1. Introduction : Course organization, scope. Typical examples of nonlinear vibrations and wave phenomena in nature and in applications.
2. Nonlinear Vibrations : Review of phase plane for two-d.o.f. systems, classification of fixed points and closed orbits. Review of conservative systems. Perturbation techniques for weakly nonlinear systems (application to Van der Pol and Duffing oscillators). Introduction and examples of Chaos.
3. Lattice Dynamics : Review of Linear Wave Propagation, basic concepts (phase and group velocity). Monoatomic lattice, derivation of dispersion relation, dispersion effects in propagation.
4. Nonlinear Waves : The FPU lattice, continuum approximation and derivation of Boussinesq equation. Derivation of the Korteweg-de Vries equation. Shock waves and Solitons, Nonlinear wave interactions. Examples and applications of solitons in acoustics, solids and mechanical metamaterials.

**Quantité de travail :** 30 hours of lectures.

#### Evaluation

There will be 5 problem sets ; typically, a new problem set will be given and you will have two weeks to work on it. Some problems will require the use of a computer, and familiarity with MATLAB® would be helpful.

There will be a final exam (Homework 20%, Final exam 80%)

#### Pré-requis

Acoustics I & Vibration I

#### Ressources

The subject will be based on the material presented in the lectures. There is no required textbook. A general list of references will be provided (if you need additional references for a particular topic, please feel free to ask the instructor).

# 4 Deuxième année, semestre 3, parcours AA

## 4.1 Ondes guidées et approche modale

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e(s)** : Simon Félix (CNRS, LAUM)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Connaître les différents domaines de la physique des ondes
- ◇ Formuler un problème de propagation guidée en utilisant la théorie modale
- ◇ Appliquer les notions vues dans différents domaines de l'acoustique (fluide, solide, ...)

### Contenu

1. Les guides d'ondes dans la nature (Physique des ondes)
2. La théorie modale (mathématique)
  - ◇ Equation d'onde classique (Helmholtz)
  - ◇ Autres équations d'ondes (ondes de Lamb, ...)
3. Applications
  - ◇ L'acoustique urbaine (propagation dans une rue)
  - ◇ modes de guide traités (aéroacoustique)
  - ◇ cavités
  - ◇ guides élastiques
  - ◇ milieux périodiques

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Maîtrise :

- ◇ Cours d'acoustique physique de M1
- ◇ Cours d'algèbre linéaire (calcul matriciel)

## 4.2 Propagation acoustique dans les solides anisotropes. Interaction acousto-optique

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e(s)** : Catherine Potel (EC, LMU), Vitali Gusev (EC, LMU)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

L'objectif de ce cours, fortement lié au Contrôle Non Destructif (CND) des milieux complexes par ultrasons est double : donner aux étudiants tous les outils nécessaires pour comprendre d'une part la propagation acoustique dans les solides anisotropes, et d'autre part l'interaction acousto-optique. Dans la première partie du cours, une fois les équations établies dans le cas le plus général, les particularités de la propagation en milieu anisotrope (notamment en termes de direction de propagation de la vitesse d'énergie) sont étudiées, tout d'abord en milieu infini, puis en présence d'une interface plane, et enfin en présence de multiples interfaces, en application aux milieux composites. Les clés de compréhension du comportement des ondes modales (ondes de Lamb et de Rayleigh généralisées) sont données, avec une application au CND.

To teach the students the physical backgrounds of acousto-optic interaction, through the studies of theoretical equations describing the influence of the acoustic waves on the propagation of light and of the detection of acoustic waves by laser radiation, analysis of the typical experimental realizations and of the most important applications of the acousto-optic effect in non-destructive testing, bio-medical and fundamental research, as well as in technical applications for modulation, redirecting and filtering of light.

- ◇ Avoir compris la différence entre vecteur direction de propagation et vecteur vitesse d'énergie.
- ◇ Savoir déterminer les vitesses de propagation et vecteurs polarisation des ondes se propageant dans un milieu anisotrope infini, pour une direction de propagation.
- ◇ Savoir écrire formellement (sans forcément aller jusqu'au bout des calculs) les conditions aux frontières à l'interface séparant deux milieux quelconques (fluide ou solide), et savoir faire un bilan des inconnues et des équations disponibles.
- ◇ Savoir déterminer graphiquement quelles sont les ondes réfléchies et transmises en faisant usage des surfaces de lenteurs.
- ◇ Connaître le principe d'obtention des courbes de dispersion des ondes de Lamb en milieu quelconque (stratifié ou non) et être capable de déterminer une configuration de contrôle donnée à partir de ces courbes.
- ◇ Knowledge of the physical mechanism of the influence of acoustic waves on light propagation (of acousto-optic effect)
- ◇ Knowledge of the basic applications of the acousto-optic effect for the control and manipulating of light, for the detection of the acoustic waves and in the non-destructive testing of the materials
- ◇ Knowledge of the mathematical formulations and the simplest analytical solutions of the problems related to the detection of acoustic waves by light sources and the manipulation of light by acoustic waves

## Contenu

1. Ondes élastiques dans les solides anisotropes
  - ◇ Rappels d'élasticité
  - ◇ Comportement d'un solide élastique
  - ◇ Equation de propagation
  - ◇ Solution de l'équation de propagation sous forme d'ondes planes
  - ◇ Propriétés du tenseur de Christoffel
  - ◇ Propagation suivant des directions liées aux éléments de symétrie, dans la direction 3
  - ◇ Ondes élastiques dans un milieu isotrope
  - ◇ Energie - Vecteur de Poynting
2. Réflexion et réfraction des ondes planes monochromatiques
  - ◇ Equation de continuité (solides rigidement liés)
  - ◇ Conservation de la fréquence et de la projection des vecteurs d'onde sur l'interface
  - ◇ Construction graphique : utilisation des surfaces des lenteurs
  - ◇ Angles critiques - ondes évanescentes
  - ◇ Coefficients de réflexion et de transmission
3. Propagation dans une seule couche
  - ◇ Propagation à travers une interface
  - ◇ Nombre des ondes dans une couche
  - ◇ Notations - hypothèses
  - ◇ Obtention des vecteurs lenteur et polarisation
  - ◇ Vecteur déplacements - contraintes dans une couche
  - ◇ Problèmes numériques dans le cas d'une couche
  - ◇ Ecriture des conditions aux limites dans le cas d'une couche plongée dans un fluide
4. Propagation dans un multicouche
  - ◇ Matrice de transfert d'une couche  $q$
  - ◇ Ecriture des conditions aux limites aux interfaces extrêmes
5. Les ondes modales : cas particulier des ondes de Lamb
  - ◇ Introduction
  - ◇ Déplacements et contraintes
  - ◇ Modes de Lamb
  - ◇ Courbes de dispersion
  - ◇ Analyse des déplacements
  - ◇ Modes de Lamb généralisés
  - ◇ Montage expérimental
6. Les ondes modales : cas particulier des ondes de Rayleigh
  - ◇ Obtention des ondes de Rayleigh en milieu isotrope
  - ◇ Onde de Rayleigh "généralisée"

- ◇ Généralisation aux milieux stratifiés
- 7. Introduction au CND par ultrasons
  - ◇ Introduction
  - ◇ Les transducteurs "conformables"
  - ◇ Mesure de vitesses ultrasonores - Les précautions de réglage
- 8. Interaction acousto-optique Qualitative explanations of the physical principles of sound influence on the propagation of light in condensed media (acousto-optic effect) ; - Explanation of the principles and of the importance of the basic applications of acousto-optic effect for the control/manipulation of light, in non-destructive testing/evaluation and in the fundamental research ; - mathematical formulation of the equations describing detection of acoustic waves by laser radiation in solids and their analytical solution ; - Analysis of the derived solutions and the conditions necessary for the detection of the acoustic waves in the GHz – THz frequency range ; - Analysis of the principles of application of acousto-optics for modulation, filtering and redirection of coherent light.

### **Evaluation**

- ◇ 1 examen écrit final

### **Pré-requis**

Maîtrise :

- ◇ Mécanique des milieux continus : tenseur des déformations et des contraintes
- ◇ Calcul tensoriel (principalement changement de base)
- ◇ Knowledge of the backgrounds of optics and acoustics of anisotropic solids
- ◇ Knowledge of the mathematical methods to solve ordinary differential equations
- ◇ Knowledge of integral transformations (Fourier and Laplace)

## 4.3 Nonlinear acoustics

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e-(s)** : Vitali Gusev (EC, LMU)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

To teach the students the physical principles and theoretical backgrounds of nonlinear acoustic phenomena, through the studies of theoretical equations describing transformation of temporal profiles and the frequency spectra of the acoustic waves, analysis of the typical experimental realizations and of the most important applications of the nonlinear acoustics in non-destructive testing, biomedical and fundamental research. Knowledge of physical principles of the nonlinear acoustic phenomena in general and such phenomena as harmonics generation, sub-harmonic emission, shock front and solitary waves formation, parametric emission and acoustic streaming in particular.

- ◇ Knowledge of the physically different types of sources of acoustic nonlinearity.
- ◇ Knowledge of the classical equations of the nonlinear acoustics such as the simple-wave equation, Burgers equation, Korteweg de Vries equation and Khokhlov-Zaboltskaya equation.
- ◇ Knowledge of the basic mathematical methods for the analysis of the nonlinear differential equations of nonlinear acoustics (both homogeneous and inhomogeneous).
- ◇ Knowledge of the basic principles in application of nonlinear acoustics in non-destructive testing, in medicine, in design and construction of parametric emitters and receivers.

Mots clés : nonlinear acoustics, harmonics generation, subharmonic generation, frequency mixing, demodulation, parametric emission, simple-wave equation, Burgers equation, Korteweg de Vries equation, Khokhlov – Zaboltskaya equation, solitary waves, solitons, acoustic streaming, non-destructive testing

### Contenu

- ◇ physical and geometrical origins of the acoustic nonlinearity ;
- ◇ basic nonlinear acoustic phenomena and their applications in non-destructive testing, in technology, industry, medicine and fundamental research :
- ◇ theoretical derivation of the basic equations of the nonlinear acoustic in fluids and solids ;
- ◇ analysis of the harmonics generation and shock front formation in the frame of the simple-wave equation and of the Burgers equation ;
- ◇ quadratic, cubic, hysteretic and other types of the acoustic nonlinearity and their typical manifestations ;
- ◇ synchronous generation of the nonlinear acoustic waves by moving sources ;
- ◇ nonlinear acoustics of the diffracting sound beams and parametric emitting antennas ;
- ◇ nonlinear acoustics in media with dispersion and acoustic solitary waves.

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

## **Pré-requis**

Maîtrise :

- ◇ Knowledge of the backgrounds of fluid mechanics and of the elasticity theory,
- ◇ Knowledge of the methods for the solution of ordinary differential equations (both homogeneous and inhomogeneous)



## 4.4 Signal analysis II

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e-(s)** : Jean-Hugh Thomas (EC, LMU)

**Thématique** : Signal, instrumentation

**Volume horaire (CM, TP)** : 12 h, 8h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Fournir aux étudiants des compétences pour modéliser un signal aléatoire stationnaire, prédire le futur d'un signal à partir des échantillons passés, extraire le contenu fréquentiel d'un signal sans recourir aux techniques de Fourier
- ◇ Savoir identifier une fonction de transfert par la mesure
- ◇ Comprendre les méthodes de Pisarenko, de Prony, de décomposition en sous-espaces
- ◇ Donner des compétences expérimentales pour la mise en place d'un banc d'imagerie
- ◇ Connaître les avantages et inconvénients de deux techniques d'imagerie acoustique : l'holographie et la formation de voies
- ◇ Savoir choisir la méthode d'imagerie adaptée à un contexte de mesure
- ◇ Exercer les étudiants à la programmation Matlab
- ◇ Savoir interpréter des résultats expérimentaux

### Contenu

- ◇ Systèmes linéaires stochastiques
  - Modèles AR, MA, ARMA
  - Prédiction linéaire
  - Estimation spectrale « moderne »
- ◇ Imagerie acoustique
  - Formation de voies (Bartlett, Capon , Music)
  - Holographie acoustique
- ◇ Liste des TP
  - Modélisation autorégressive d'un signal de bruit de structure
  - Imagerie acoustique par formation de voies

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final
- ◇ 2 compte-rendus de TP

### Pré-requis

Maîtrise : Analyse de Fourier, Analyse spectrale, Transformée en Z, convolution, décomposition en valeurs propres, signaux aléatoires.

## 4.5 Acoustique dans les fluides visqueux et conducteur de la chaleur

Année, semestre : M2, S3

Enseignant-e(s) : Guillaume Penelet (EC, LMU)

Volume horaire (CM) : 20 h

Crédits ECTS : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Reprendre rigoureusement les équations fondamentales de l'acoustique en prenant en compte les effets associés à la viscosité et la conduction de la chaleur dans les fluides.
- ◇ Etudier les différents mécanismes de dissipation en milieu infini : viscosité, conduction de la chaleur, et relaxation moléculaire.
- ◇ Etudier les mécanismes de dissipation mis en jeu dans les couches limites viscothermiques sur une interface fluide-solide, puis pour des problèmes de propagation en guide d'onde.
- ◇ Illustrer les différentes notions vues précédemment à l'étude de processus physiques dans lesquels les effets visqueux et/ou thermique jouent un rôle majeur : singularité géométriques et « vortex sound », vent acoustique (de type Rayleigh.schlichting), gyromètre acoustique, sources sonore thermoacoustique, machines thermoacoustique, instabilité thermoacoustique dans les problèmes de combustion, etc...
- ◇ Appliquer plus particulièrement les concepts vus précédemment à l'étude des générateurs d'ondes et réfrigérateur thermoacoustique, qui constitue l'une des opérations de recherche du LAUM.

### Contenu

1. Equations fondamentales
  - ◇ Equations du mouvement en fluide non dissipatif (rappels)
  - ◇ Equations du mouvement en fluide dissipatif
2. Propagation acoustique en fluide dissipatif
  - ◇ L'équation d'onde
  - ◇ Propagation en milieu infini dans les gaz mono et poly-atomiques
  - ◇ Conditions aux frontières
  - ◇ Réflexion d'une onde plane harmonique sur une paroi rigide
  - ◇ Propagation d'ondes planes dans des guides
3. Applications et conséquences des effets viscothermiques
  - ◇ Quelques problèmes académiques
  - ◇ Conséquences des effets visqueux (gyromètre acoustique, vent acoustique, vortex sound)
  - ◇ Conséquences des effets de conduction de la chaleur (thermophone, machines thermoacoustique, tomographie thermoacoustique, instabilité thermoacoustique dans un tube de Rijke et/ou dans les turbines à gaz)
  - ◇ Focus sur les machines thermoacoustique (Principe de fonctionnement et applications, modélisation, verrous à lever en recherche etc...)

## **Evaluation**

- ◇ 1 examen écrit final

## **Pré-requis**

Le principal pré-requis est le cours de Master 1 d'Acoustique Physique

## 4.6 Numerical methods for acoustics and vibrations

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e-(s)** : Gwenaél Gabard (EC, LMU)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

L'objectif du cours est d'appliquer les méthodes des éléments-finis et éléments de frontières à des problèmes d'acoustique.

- ◇ Etre capable de mettre un problème aux limites 1D sous forme variationnelle
- ◇ Etre capable de construire une matrice élémentaire à partir d'une formulation variationnelle simple
- ◇ Etre capable de faire un assemblage élément finis

### Contenu

1. Méthode des éléments finis : problèmes acoustique 1D
2. Modélisation 2D d'un diapason dans le vide
3. Couplage vibroacoustique : Cas du rayonnement d'un diapason dans une cavité acoustique
4. Rayonnement d'un diapason en champs libre
5. Méthode des éléments de frontière : représentation intégrale, régularisation.

Mots clés : Eléments-finis, Approches variationnelles, discrétisation, maillage

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Numerical Methods 1 / Mathematics for acousticians 1 & 2

## 4.7 Perception, psychoacoustique

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e-(s)** : Léo Varnet (CNRS, ENS)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

Ce cours s'intéresse la perception des sons par le système auditif humain. Après avoir mis en place une méthodologie expérimentale pour l'étude de la perception, nous verrons comment elle peut être appliquée pour explorer la perception d'attributs auditifs simples (sonie, hauteur, timbre...) ou d'objets plus complexes comme les sons de parole ?

### Contenu

- ◇ Anatomie, biophysique et physiologie du système auditif (rappels)
- ◇ Méthodologie de la psychophysique et techniques psychométriques
- ◇ Introduction à la psychoacoustique et à la psycholinguistique
- ◇ Notions fondamentales de psychoacoustique
- ◇ Perception des attributs auditifs (hauteur, sonie, timbre)
- ◇ Modélisation de phénomènes perceptifs simple
- ◇ Perception, reconnaissance, identification et catégorisation des objets vibrants
- ◇ Introduction à la phonétique acoustique et à la phonétique expérimentale
- ◇ Perception de la parole : catégorisation des voyelles et des consonnes, reconnaissance des mots, segmentation des phrases et accès au sens
- ◇ Mise en application des notions vues en cours à travers l'analyse d'articles scientifiques
- ◇ Présentation de travaux scientifiques récents par un chercheur invité

Cours en ligne : <https://dbao.leo-varnet.fr/enseignements/>

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Aucun

## 4.8 Vibroacoustique

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e-(s)** : François Gautier (EC, LMU), Charles Pezerat (EC, LMU)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

◇

### **Contenu**

◇

### **Evaluation**

◇ 1 examen écrit final

### **Pré-requis**

Maîtrise :

◇

## 4.9 Méthodes expérimentales en acoustique dans les solides

**Année, semestre :** M2, S3

**Enseignant-e-(s) :** Aroune Duclos (EC, LMU), Mourad Bentahar (EC, LMU)

**Volume horaire (TP) :** 24 h

**Crédits ECTS :** 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Prise en main des appareils de mesure par ultrasons
- ◇ Découvrir les différentes méthodes de génération d'ondes ultrasonores (contact, immersion, etc.) avec et sans couplant
- ◇ Découvrir les transducteurs utilisés dans les méthodes ultrasonores (piézoélectriques, électromagnétiques, etc.)
- ◇ Développer des programmes d'imagerie ultrasonore à partir des données brutes
- ◇ Comprendre les signaux générés suite à la propagation et/ou à l'interaction avec les défauts et ce en corrélation avec les défauts.

### Contenu

- ◇ Génération d'ondes de Lamb par EMATs : Application à la caractérisation de l'endommagement d'une structure tubulaire
- ◇ Imagerie ultrasonore de défauts de soudures par la méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction)
- ◇ Imagerie par ultrasons multi-éléments de défauts de soudures dans une structure en acier inoxydable
- ◇ Imagerie ultrasonore en immersion de défauts de volume et caractérisation des propriétés élastiques par méthode inverse.

### Evaluation

- ◇ Compte rendu de travaux pratiques

### Pré-requis

Cours de

- ◇ Propagation acoustique dans les solides anisotropes
- ◇ Contrôle non destructif par ultrasons

## **4.10 Méthodes expérimentales en acoustique dans les fluides**

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e-(s)** : Jean-Pierre Dalmont (EC, LMU)

**Volume horaire (TP)** : 24 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

◇

### **Contenu**

◇

### **Evaluation**

◇ 1 examen écrit final

### **Pré-requis**

Maîtrise :

◇



## 4.11 Optoacoustics and applications

**Année, semestre :** M2, S3

**Enseignant-e(s) :** Vitali Gusev (EC, LMU), Samuel Raetz (EC, LMU)

**Volume horaire (CM) :** 20 h

**Crédits ECTS :** 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

To teach the students the physical backgrounds of laser ultrasonics, through the studies of theoretical equations describing generation of acoustic waves by laser radiation, analysis of the typical experimental realizations and of the most important applications of the laser ultrasonics in non-destructive testing, bio-medical and fundamental research.

- ◇ Knowledge of in mathematical formulations and the simplest analytical solutions of the problems related to the generation of acoustic waves by the stresses distributed in the volume of the material
- ◇ Knowledge of the typical durations and the profiles of the acoustic pulses that can be generated by laser sources
- ◇ Knowledge of the physical mechanism for the transformation of laser energy in the coherent acoustic waves
- ◇ Knowledge of the innovative applications of laser ultrasonics and picosecond laser ultrasonics for the evaluation of the nano-materials and in medicine-biology
- ◇ Knowledge of the typical experimental setup in microsecond laser ultrasonics and picosecond acoustic.
- ◇ Knowledge of the difference between homodyne sampling and heterodyne sampling.
- ◇ Knowledge of different methods to detect mechanical displacement at the surface of an opaque material [deflectometry, diffraction, beam distortion detection, interferometry (stabilized Michelson, heterodyne)]

### Contenu

- ◇ Qualitative explanations of the physical principles of sound generation by laser-induced thermoelastic effect ;
- ◇ Explanation of the principles and of the importance of the basic applications of laser ultrasonics in non-destructive testing/evaluation and in the fundamental research ;
- ◇ Basic physical mechanisms of the opto-acoustic transformation (thermo-elasticity, deformation potential, inverse piezo-electrical effect, electrostriction and light pressure) ;
- ◇ mathematical formulation of the equations describing generation of acoustic waves by laser action on liquids and solids and their analytical solution ;
- ◇ Analysis of the derived solutions and the conditions necessary for the generation of the acoustic waves in the GHz – THz frequency range.
- ◇ Notion of the changes in the waveform due to different kind of generation mechanism (ablation, thermoelastic at the surface (dipolar), taking into account the optical penetration, then the thermal diffusion)
- ◇ Directivity of compressional and shear elastic waves generated in the case of a thermoelastic source or an ablative source

- ◇ Experimental setup in optoacoustic
  - typical experimental setup in microsecond laser ultrasonics
  - typical experimental setup in picosecond acoustic : homodyne sampling and heterodyne sampling
- ◇ Methods to detect mechanical displacement at the surface of an opaque material (description and principles)
  - deflectometry,
  - diffraction,
  - beam distortion detection,
  - interferometry (stabilized Michelson, heterodyne)

### **Evaluation**

- ◇ 1 examen écrit final

### **Pré-requis**

- ◇ Knowledge of the backgrounds of fluid mechanics and the thermo-elasticity theory.
- ◇ Knowledge of the mathematical methods to solve ordinary differential equations and of the methods of integral transformations (Fourier and Laplace).
- ◇ Knowledge of the propagation of elastic waves in solid media.

## 4.12 Contrôle non destructif par ultrasons

**Année, semestre :** M2, S3

**Enseignant-e(s) :** Mourad Bentahar (EC, LMU)

**Volume horaire (CM, TP) :** 20 h

**Crédits ECTS :** 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

Ce cours a pour objectif de faire découvrir aux étudiants les différentes méthodes de contrôle non destructif (CND) par ultrasons. En particulier, il s'agira d'étudier :

- ◇ Les ultrasons multiéléments (Phased Array),
- ◇ La méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction),
- ◇ La génération et la réception des ultrasons par EMATs (ElectroMagnetic Acoustical Transducers),
- ◇ Les ultrasons aériens (Air coupled ultrasound),
- ◇ L'émission acoustique.

Par ailleurs, il est important de préciser que pour une bonne compréhension de ces différentes méthodes, un rappel théorique des différents types d'ondes générés dans les solides est effectué (ex. ondes de tête, onde de surface, ondes de Lamb, etc.).

Pour une meilleure compréhension des techniques enseignées, les étudiants auront également à effectuer des mesures expérimentales grâce aux instruments ultrasonores récents (Scanner EMATs, Système Phased Array, Système TOFD, etc.) disposés dans une salle spécialisée.

A l'issue de cet enseignement les étudiants devraient être capables de :

- ◇ Monter différentes expériences de contrôle non destructif par ultrasons,
- ◇ Identifier les différents types d'ondes ultrasonores générées dans les matériaux,
- ◇ Décrire les avantages et les limites des différentes méthodes étudiées,
- ◇ Traiter les données notamment grâce aux méthodes de traitement du signal préalablement étudiées,
- ◇ Etablir un lien entre les connaissances théoriques et expérimentales.

### Contenu

◇

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Maîtrise :

- ◇ Propagation des ondes acoustiques dans les solides, mécanique des milieux continus, traitement du signal, mesures acoustiques.

## 4.13 Méthodes numériques pour le CND

**Année, semestre :** M2, S3

**Enseignant-e(s) :** Aroune Duclos (EC, LMU), Mathieu Chekroun (EC, LMU)

**Volume horaire (CM) :** 20 h

**Crédits ECTS :** 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Présenter les problématiques techniques et scientifiques attachées au Contrôle Non Destructif (CND) dans leur généralité. L'objectif est que les étudiants prennent connaissance de ce champ applicatif de l'acoustique.
- ◇ Montrer l'apport de la simulation numérique dans le contexte du CND : les besoins, les applications, les contraintes. Les exemples présentés peuvent se transposer aisément dans d'autres contextes applicatifs.
- ◇ Revoir la physique des ultrasons sous l'angle de l'application (quels phénomènes importants à prendre en compte ?) et sous l'angle de la modélisation (quelles théories et quelles approximations appliquer ?)
- ◇ Initier les étudiants à l'utilisation de la simulation à partir des exemples d'application réels.
- ◇ Développer des méthodes de calcul rapides pouvant s'appliquer à des géométries assez simples et permettant :
  - d'obtenir des informations sur les phénomènes physiques mis en jeu.
  - de choisir des méthodes de mesures appropriées au type de contrôle.
  - d'en étudier la faisabilité et la sensibilité

### Contenu

#### 1. Partie 1

- (a) CND par ultrasons, principe et méthodes
- (b) Dimensionnement des défauts
- (c) Radiation d'un transducteur
- (d) Du pulse/écho à l'imagerie ultrasonore
- (e) Effets des pertes
- (f) Le cas des milieux biphases

#### 2. Partie 2

- (a) Rappels sur les ondes de volume dans les solides isotrope
- (b) propriétés des ondes de Rayleigh et applications
- (c) Modélisation analytique de la dispersion des Ondes de Lamb

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

## **Pré-requis**

- ◇ Acoustique physique (notions de base)/Ondes élastiques dans les solides
- ◇ Transformée de Fourier
- ◇ Notions sur les applications des ultrasons
- ◇ algorithmique / programmation (python)

## 4.14 Aéroacoustique

**Année, semestre :** M2, S3

**Enseignant-e-(s) :** Gwenaél Gabard (EC, LMU)

**Volume horaire (CM) :** 20 h

**Crédits ECTS :** 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Connaître les bases de la propagation en présence d'écoulement
- ◇ Connaître les bases de la production de son par les écoulements

### Contenu

- ◇ Equations de base de l'aéroacoustique
- ◇ Propagation avec écoulement
  - Propagation dans les conduits avec écoulement
  - Effets des discontinuités en conduit en présence d'écoulement
  - Effet de l'écoulement sur les silencieux et les traitements acoustiques
- ◇ Sources acoustique induites par les écoulements
  - Notion d'analogie acoustique
  - Son produit par les tourbillons
  - Bruit de jet
  - Son produit par des obstacles

Mots clés : Aéroacoustique, propagation, traitement acoustique, sources acoustiques

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Base en acoustique, propagation en conduit et notion de modes, base de mécanique des fluides

### Ressources

Le pdf des présentations est fourni aux étudiants. Les étudiants sont invités à se référer au livre « An Introduction to Acoustics » de S.W. Rienstra & A. Hirschberg disponible gratuitement sur internet. Le cours n'est pas disponible sur UMTICE

## 4.15 Propriétés Acoustiques des Milieux Périodiques

**Année, semestre :** M2, S3

**Enseignant-e(s) :** Vicente Romero-Garcia (CNRS, LAUM), Jean-Philippe Groby (CNRS, LAUM)

**Volume horaire (CM) :** 20 h

**Crédits ECTS :** 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Calculer la relation de dispersion des milieux périodiques
- ◇ Mettre en évidence les bandes interdites et passantes
- ◇ Mettre en évidence les phénomènes liés aux interfaces périodiques

### Contenu

- ◇ Propagation et relation de dispersion dans un milieu périodique 1D : à partir de Matrice de Transfert
- ◇ Propagation et relation de dispersion dans un milieu périodique 2D : Expansion en ondes planes
- ◇ Réflexion par un réseau surfacique périodique 2D
- ◇ Multidiffusion par des réseaux infinis et finis

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Maîtrise :

- ◇ des bases mathématiques de l'acoustique
- ◇ des transformées de Fourier spatial
- ◇ du théorème de Poisson

## 4.16 Acoustique des matériaux poreux

**Année, semestre** : M2, S3

**Enseignant-e(s)** : Olivier Dazel (EC, LMU)

**Volume horaire (CM)** : 20 h

**Crédits ECTS** : 2,5

### Objectifs (compétences et savoirs attendus)

- ◇ Connaître les modèles de fluide équivalent et la théorie de Biot
- ◇ Etre capable de modéliser la réponse de structures multicouches poroélastiques

Mots clés : Fluide équivalent, Théorie de Biot, matériaux multiphasiques

### Contenu

- ◇ Introduction
  - Modèles de fluide équivalent
  - Modèles empiriques
  - Modèles géométriques
  - Modèles semi-phénoménologiques (Johnson-Champoux-Allard-Lafarge)
- ◇ Théorie de Biot
  - Approche Lagrangienne
  - Formulations en déplacement et mixtes
  - Calcul de réponse dynamique
- ◇ Méthodes prédictives
  - Méthode des Matrices de transfert
  - Méthodes éléments-finis poroélastique
- ◇ Caractérisation des matériaux poreux
- ◇ Cours d'ouverture (le programme peut évoluer en fonction des années)
  - Matériaux à gradient de propriété
  - Homogénéisation

### Evaluation

- ◇ 1 examen écrit final

### Pré-requis

Maîtrise :

- ◇ Propagation dans les fluides et dans les solides



# 5 Deuxième année, semestre 4, parcours AA

## 5.1 Stage en laboratoire de Recherche

**Année, semestre** : M2, S4

**Volume horaire** : 5 à 6 mois

**Crédits ECTS** : 30

### **Objectifs (compétences et savoirs attendus)**

Le stage a comme objectif de participer à une recherche scientifique dans un laboratoire de recherche (dans le domaine public ou privée). Ce stage permet aux étudiants de se confronter aux réalités du travail quotidien d'un chercheur et d'appréhender les différentes missions qu'il lui incombe. Il faudra être capable de mener à bien une recherche bibliographique, développer des modèles théoriques et/ou élaborer des expériences permettant la mise en évidence des phénomènes physiques. Ce stage donnera lieu aussi à la rédaction d'un rapport scientifique ainsi qu'à une présentation des travaux réalisés.

### **Evaluation**

- ◇ 1 rapport de stage
- ◇ 1 présentation de 15 minutes devant un jury