

Parcours M2Recherche : Acoustique Physique

Eléments de programme – 1^{er} semestre (septembre à février)

UE n°1 (Fondamentaux - cours)

Ondes en milieu macroscopique.
Ondes acoustiques dans les fluides parfaits et visqueux.
Introduction aux effets non-linéaires.
Interfaces, guides d'ondes, diffusion et dissipation
Rayonnement des sources, champ proche et champ lointain, fonctions de Green.
Diffraction impulsionnelle, focalisation, antennes, imagerie acoustique

UE n°2 (Méthodes expérimentales - TP)

TP ultrasonores : mesures de bande passante, directivité, application au contrôle non destructif, ondes guidées, ondes de surface, ondes en milieu hétérogène, diffraction et diffusion, acoustique en régime non-linéaire.

TP imagerie : rayonnement, antenne-métrie, imagerie haute résolution par ondes acoustiques

UE n°3 (Signal & MNA – cours et TP)

- *Traitement du signal (cours et TP)*

Cet enseignement a été conçu pour s'adresser à des physiciens, et non, comme c'est parfois le cas dans cette discipline, comme un cours de mathématiques pures ou de techniques informatiques. Il est constitué de cours-TD et de séances de travaux pratiques.

- Rappels fondamentaux : description spectrale d'un signal à temps continu, à temps discret, échantillonnage temporel et fréquentiel, les diverses transformées de Fourier. La transformée de Hilbert et les relations de Kramers-Kronig : utilisation en physique.

- Systèmes numériques linéaires et invariants, synthèse de filtres numériques dans le cadre de l'analyse des signaux en laboratoire.

- Analyse des signaux aléatoires : techniques de réduction du bruit, détection, estimation classique, estimation paramétrique.

- *Méthodes numériques pour l'acoustique (MNA - cours et TP)*

Introduction aux différences finies sur l'équation de transport

Notions introduites : ordre des schémas, schéma implicite / explicite, stabilité, dispersion et dissipation numérique, quelques schémas standard

Les notions introduites en cours seront appréhendées lors de la séance TP par un programme Matlab à développer par l'étudiant.

Application des différences finies à l'équation des ondes 2D

Initiation à la méthode des éléments finis

Une initiation sur les possibilités offertes par la méthode des éléments finis appliquée à l'équation de Helmholtz 2D : formulation variationnelle, maillage et éléments finis, matrices de masse et de raideur, conditions aux limites. La méthode sera illustrée par l'utilisation du logiciel FreeFeM appliqué à l'étude d'un résonateur de Helmholtz.

UE n°4 Compléments

- *Ondes élastiques dans les solides (cours)*

Principaux types d'ondes dans un solide élastique. Équation de propagation, approximation quasi-statique. Conditions aux limites. Transport de l'énergie (théorème de Poynting acoustique). Loi de comportement linéaire d'un solide élastique isotrope. Ondes de volume longitudinale ou transversale. Réflexion et transmission à une interface liquide-solide, solide-solide. Ondes guidées par une surface libre (ondes de Rayleigh). Ondes guidées par une plaque (ondes de Lamb). Ondes de Love.

- *Piézoélectricité et acoustique des milieux anisotropes (cours)*

Représentation d'une grandeur physique par un tenseur. Tenseur des déformations, des contraintes. Loi de Hooke pour un solide élastique et piézoélectrique. Tenseurs des constantes élastiques et piézoélectriques. Réduction du nombre de constantes indépendantes des cristaux. Équation de propagation- de Christoffel. Ondes planes, polarisation, vitesse de phase, vitesse d'énergie. Surface des lenteurs, surface d'onde. Propagation dans un solide piézoélectrique. Coefficient de couplage électromécanique.

- *Acoustique non linéaire - 1^{ère} partie (cours)*

L'acoustique est un phénomène essentiellement linéaire, car les ondes acoustiques ne créent que de petites perturbations du milieu dans lequel elles se propagent. Pourtant, les effets non linéaires, cumulés sur de longues distances, modifient très significativement la forme de l'onde initialement émise.

Étudier l'acoustique non linéaire permet, par exemple, de comprendre la formation du « bang sonique » (détonation balistique des corps supersoniques). La propagation non linéaire des ultrasons est aussi utilisée pour des applications médicales diagnostiques (imagerie harmonique) ou thérapeutiques (hyperthermie, lithotritie).

L'objectif de ce cours est d'étudier la propagation non linéaire des ondes acoustiques dans les fluides, en accentuant ses aspects physiques. A partir des équations constitutives de l'acoustique, nous établissons l'équation de propagation non linéaire dans un fluide thermo-visqueux. Les solutions en ondes planes sont alors étudiées en détail : équation de Burgers, ondes de choc, interaction non linéaire de deux ondes... Les phénomènes de diffraction affectant la propagation non linéaire sont modélisés à l'aide d'une solution en perturbation dans le cadre de l'approximation de faible non linéarité, ou simulés numériquement à partir de l'équation KZ.

- *Ondes en milieux complexes - 1^{ère} partie (cours)*

Par « milieu complexe » on entend les milieux hétérogènes dont la densité et l'élasticité peuvent être modélisée par des fonctions aléatoires. Dans ce cours, tout en conservant le souci d'être proches des expériences, nous présentons aux étudiants les concepts fondamentaux permettant de décrire aussi bien la propagation d'un électron dans un métal contenant des impuretés que d'une onde lumineuse dans un milieu turbide ou d'une onde élastique par exemple dans un acier à grains (application au CND) ou dans la croûte terrestre (applications à la géophysique). Nous étudions les statistiques du *speckle* (optique ou acoustique) en régime de diffusion simple ou multiple et introduisons en particulier les paramètres de transport (libres parcours moyens, constante de diffusion,...) et les différents régimes de propagation (cohérent, incohérent, localisation faible et forte).

UE n°5 Approfondissements & applications

- *Aéro-acoustique (cours) [optionnel]*

Equations modèles pour l'acoustique dans des milieux avec écoulements (équation des ondes convectées, équation de Lilley, équations d'Euler linéarisées)

Vitesse de phase et vitesse de groupe dans les écoulements. Solutions en milieu libre ou confiné.

Introduction à l'acoustique géométrique pour la propagation à grande distance en milieu hétérogène avec écoulement.

Théorème de Kirchhoff. Notions de sources en aéroacoustique.

Bruit de Combustion

Génération de son par les écoulements

Analogie de Lighthill. Application à la réduction du bruit des turboréacteurs.

Théorie du "Vortex sound"

- *Acoustique médicale (cours)*

L'objectif est de donner aux étudiants qui suivent un parcours en acoustique physique une formation approfondie sur les applications médicales diagnostiques et thérapeutiques des ultrasons. Le cours s'appuiera sur les notions théoriques abordées lors d'UE de spécialisation et d'approfondissement en acoustique des fluides et des solides et sur les connaissances de l'étudiant en traitement du signal. Seront notamment abordés les principes de formation de l'image échographique, le mode « Doppler », les effets biologiques et l'acoustique non linéaire.

Principes de formation de l'image échographique : interactions ultrasons/tissus biologiques, modes d'imagerie (B, TM, 3D), capteurs, grandes fonctions de l'échographe, focalisation, bruit de speckle, caractéristiques de l'image (résolution, contraste)

Vélocimétrie et mode « Doppler »

Application de l'acoustique non linéaire à l'imagerie : imagerie harmonique, produits de contraste.

Effets biologiques des ultrasons : échauffement, cavitation, applications thérapeutiques (lithotripsie, hyperthermie), normes de sécurité

Quantification et méthodes avancées : densitométrie osseuse ultrasonore, élastographie

- *Capteurs et contrôle non destructif par ultrasons (cours) [optionnel]*

Piézo-électricité, fonctionnement d'un capteur à ultrason

Notions de base en CND par ultrasons, CND par courants de Foucault, méthodes radiographiques

Modélisation ultrasonore pour le CND : propagation et diffraction des ondes de volumes, propagation et diffraction des ondes guidées

Techniques multi-éléments : capteurs et systèmes multi-éléments, principales techniques, imagerie, reconstruction, exemples d'application. Applications industrielles

- *Infrasons et géosciences (cours et projet)*

Coordinateurs : A. Fournier (IPGP) et A. Le Pichon (CEA).

Instrumentation et surveillance des systèmes naturels : « Les infrasons : techniques d'acquisition et application aux géosciences »

Cette UE se propose de présenter aux étudiants les méthodes modernes d'étude des infrasons, depuis les méthodes d'acquisition des signaux, de traitement et d'analyse, ainsi que leurs applications à différentes thématiques des géosciences. Les enseignements seront assurés par des ingénieurs et chercheurs du CEA, organisme qui travaille depuis plus de 40 ans sur cette technologie. Elle est divisée en deux parties principales : la première décrit les méthodes de traitement du signal, de simulation de la propagation et d'interprétation des signaux, la seconde concerne une description complète des systèmes de mesure. Des exemples et travaux pratiques viendront illustrer les exposés. Pour mener ces travaux, les enseignants mettront à disposition des étudiants des équipements de mesure, bases d'enregistrements, logiciels de traitement du signal et de simulation.

Compétences visées : donner aux étudiants un aperçu global et une vision transverse sur les techniques de mesures et d'analyse des ondes infrasonores dans les domaines de la surveillance de l'environnement, des sciences de la terre et de l'atmosphère.

Evaluation : projets d'études par binômes proposés en fin de formation (traitement et analyse de signaux / simulation / instrumentation).

- *Ondes élastiques guidées (cours et TP numériques)*

Notions générales sur les guides d'ondes : modes propres d'un guide d'ondes linéaire, homogène et invariant dans le temps ; vitesse d'un groupe d'ondes ; guide élémentaire

Propriétés du champ élasto-électrique : grandeurs caractéristiques, équations du champ, conditions aux limites ; théorème de Poynting, bilan énergétique ; lois de comportement d'un solide élastique et piézoélectrique ; matrices des composantes élastiques et piézoélectriques des cristaux ; ondes élastiques guidées par un ou deux plans parallèles ; décomposition des équations de propagation et des conditions aux limite

Principaux types d'ondes : ondes de Rayleigh (solide isotrope, équation de Rayleigh, milieu piézoélectrique, permittivité de surface, transducteur à électrode en peignes imbriqués, détection piézoélectrique & optique) ; ondes de Lamb (équation de dispersion de Rayleigh-Lamb, classification des modes et déplacement mécanique) ; ondes transversales horizontales (milieu non piézoélectrique, onde TH et ondes de Love ; demi-espace piézoélectrique, onde de Bleustein-Gulyaev)

- *Acoustique non linéaire – 2^{ème} partie (cours)*

Suite de la première partie ; la propagation non linéaire dans les milieux hétérogènes est abordée par le biais d'exemples

- *Ondes en milieux complexes - 2^{ème} partie (cours)*

Suite de la première partie ; approximation de la diffusion ; rétrodiffusion cohérente ; problèmes ouverts en physique des ondes acoustiques en milieu complexes.

- *Séminaires d'intervenants extérieurs (présence obligatoire ; pas d'examen)*

Le second semestre est entièrement consacré au stage