



## Formation Interuniversitaire de Physique

Ecole Normale Supérieure  
Université Pierre et Marie Curie  
Université Denis Diderot  
Université Paris Sud



# MASTER 1

## BROCHURE DE RENTRÉE 2011-2012

Les informations réunies dans cette brochure sont également disponibles sur le site Internet de la Formation Interuniversitaire de Physique à l'adresse :  
<http://www.phys.ens.fr/enseign/fip>

### PRINCIPAUX RESPONSABLES DE LA FORMATION

Nom du responsable	Adresse électronique	Localisation et téléphone
Rémi MONASSON Directeur de recherche CNRS	Directeur du parcours FIP remi.monasson@ens.fr	ENS pièce L059g 01 44 32 33 61
Steven BALBUS Professeur ENS	Coordination du master steven.balbus@ens.fr	ENS pièce L054 01 44 32 33 53
Jean-François ALLEMAND Professeur ENS	Stages longs allemand@lps.ens.fr	ENS pièce L261 01 44 32 34 92
Correspondants FIP auprès des universités partenaires		Localisation et téléphone
Claude ASLANGUL Professeur UPMC	Université Pierre et Marie Curie aslangul@lptmc.jussieu.fr	Jussieu, 5 <sup>e</sup> 01 44 27 62 91
Frédéric VAN WIJLAND Professeur Paris Diderot	Université Paris Diderot fvw@univ-paris-diderot.fr	Paris, 13 <sup>e</sup> 01 57 27 62 54
Emmanuel TRIZAC Professeur Paris Sud	Université Paris Sud trizac@lptms.u-psud.fr	Orsay 01 69 15 73 39

SECRETARIAT (joignable également à l'adresse : [predoc@phys.ens.fr](mailto:predoc@phys.ens.fr))

Marie BERNABE Secrétariat pédagogique	marie.bernabe@ens.fr	ENS pièce L390 01 44 32 35 61
Mascia REATO Secrétariat administratif	mascia.reato@ens.fr	ENS pièce L059h 01 44 32 35 60
Marie-Françoise DUCOS Stages et finances	ducos@lra.ens.fr	ENS pièce L059b 01 44 32 33 53

Steven BALBUS - Coordination Master 1  
Département de physique de l'ENS - 24, rue Lhomond - 75231 Paris Cedex 05  
Tél. : 01 44 32 33 53 - Fax : 01 44 32 39 92 - E-mail : [steve.balbus@ens.fr](mailto:steve.balbus@ens.fr)

## PREMIERE ANNEE DU MASTER (M1)

SEMESTRE	COURS	ECTS
Premier semestre	<i>Enseignement entièrement optionnel : quatre modules de physique à choisir notamment parmi</i>	24 ECTS
Options complètes	1. Structure fondamentale de la matière 2. Théorie statistique des champs 3. (Demi-option, voir ci-dessous) 4. Hydrodynamics ( <i>en anglais</i> ) 5. Physique expérimentale 6. Physique pour la biologie 7. Projet bibliographique	6 ECTS chacune
Demi options	3a. Phénomènes non-linéaires et systèmes dynamiques 3b. Géomorphogenèse 8a. Cohérence quantique et dissipation 8b. Information quantique 9a. Introduction à la relativité générale 9b. Dynamique des systèmes planétaires 10. Physique numérique : algorithmes et calculs en mec. stat.	3 ECTS chacune
Langue vivante	<i>deux semestres de pratique d'une langue étrangère à valider à l'ENS ou, éventuellement, par équivalence</i>	6 ECTS
Second semestre	<i>Stage de recherche en laboratoire, à l'étranger (notamment dans l'Union européenne) ou en France, dans un établissement public ou industriel</i>	30 ECTS

### PREMIER SEMESTRE (30 ECTS)

En deuxième année, la Formation Interuniversitaire de Physique est entièrement « à la carte. » Le premier semestre est constitué de six unités de valeur pour 6 ECTS chacune :

- M0 : module obligatoire de langue vivante correspondant à deux semestres de pratique hebdomadaire, dont le premier est effectué durant l'année de licence (L3). Ce module peut être validé à l'ENS, au sein de l'*Espace des cultures et langues d'ailleurs* (ECLA), ou par équivalence.
- M1–M4 : quatre modules de physique à choisir parmi une liste d'enseignements proposés par la formation sous forme d'options complètes (60h cours/TD) ou de demi-options (30h cours/TD) :

SEMAINIER DU PREMIER SEMESTRE (240h cours/TD)		
	8h30-12h30 (cours + TD)	14h-18h (cours + TD)
lundi	Structure fondamentale de la matière	Physique expérimentale
mardi	Physique pour la biologie	Séminaire du Prédoctorat Physique numérique
mercredi	Hydrodynamics	Cohérence quantique Information quantique
jeudi	Relativité générale Dynamique des systèmes planétaires	Séminaire général du Département
vendredi	Théorie statistique des champs	Phénomènes non linéaires Géomorphogénèse

Il est possible d'envisager d'autres cours, notamment dans certaines spécialités de master des universités partenaires (Interface physique-biologie, Océanologie et météorologie, Géodynamique et physique de la terre, Mécanique) sous réserve d'un accord des responsables du parcours et des formations concernées.

Lors d'un entretien pédagogique, le jeudi 6 et 13 octobre, chaque étudiant fait connaître aux responsables de la formation le choix définitif des quatre modules qu'il souhaite faire valider dans le cadre de son cursus.

Un module = une option complète (6 ECTS) ou deux demi-options (2x3 ECTS) au choix. On peut valider au maximum 9 ECTS en dehors de la liste de cours proposée par la formation.

Chacun des cinq modules M0 et M1-M4 donne lieu à l'attribution d'une note sur 20 dont la moyenne arithmétique définit le premier certificat semestriel :

**premier certificat semestriel :**  $MA = (M0 + M1 + M2 + M3 + M4) / 5$

Si cette moyenne est strictement inférieure à 10, l'étudiant repasse en session de septembre l'examen de chacun des enseignements constitutifs pour lesquels il a obtenu une note particulière inférieure à 10. Le jury se réserve, le cas échéant, le droit de lui refuser d'effectuer son stage de recherche à l'étranger.

### CALENDRIER DES EXAMENS

MODULE	DATE D'EXAMEN	HEURE ET SALLE	
1. Structure fondamentale de la matière	lundi 23 jan 2012	9h - 12h	L382
2. Théorie statistique des champs	Vendredi 3 fév 2012	9h - 12h	L382
3a. Phénomènes non linéaires	vendredi 18 nov 2011	14h-17h	L367
3b. Géomorphogénèse	vendredi 3 fév 2012	14h - 18h	L382
4. Hydrodynamics	mercredi 25 jan 2012	9h - 12h	L382
5. Physique expérimentale	--	--	Montrouge
6. Physique pour la biologie	mardi 24 jan 2012	9h-12h	L382
7. <i>Projet bibliographique</i>	<i>dates et lieu à définir</i>		
8a. Cohérence quantique et dissipation	mercredi 9 nov 2011	14h - 17h	L382
8b. Information quantique	mercredi 1 <sup>er</sup> fév 2012	14h - 17h	L382
9a. Introduction à la relativité générale	jeudi 10 nov 2011	9h - 12h	L382
9b. Dynamique des systèmes planétaires	jeudi 2 fév 2012	9h - 12h	L382
10 Physique numérique	mardi 13 déc 2011	Journée	L384

### SECOND SEMESTRE (30 ECTS)

Le second semestre est consacré en totalité à un stage de recherche en laboratoire que l'étudiant effectue à temps plein, le plus souvent à l'étranger (notamment dans l'Union européenne), sinon en France, dans un établissement universitaire ou industriel. Celui-ci débute après les vacances de printemps (mi-février) et s'achève dans le courant de l'été (fin juillet).

Sanctionné par la rédaction d'un mémoire que l'étudiant soutient oralement vers mi-septembre, ce stage donne lieu à l'attribution d'une note sur 20 qui définit le second certificat semestriel :

**second certificat semestriel :**  $MB = \text{STAGE}$

### VALIDATION DE LA PREMIÈRE ANNÉE DU MASTER (M1)

Si la note de chaque certificat semestriel est supérieure ou égale à 10, l'étudiant se voit décerner l'année de MIP 2 avec une note globale correspondant à leur moyenne arithmétique :

**première année du master :**  $(MA + MB) / 2 = (M0 + M1 + M2 + M3 + M4 + 5 \cdot \text{STAGE}) / 10$

Il est alors admis en troisième année de 'Formation interuniversitaire de physique' afin d'y effectuer, en principe, la deuxième année d'un master recherche en physique fondamentale (cycle de spécialisation).

## PRÉDOCTORAT DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

L'accès à la Formation interuniversitaire de physique est, en principe, subordonné à une inscription au *Diplôme de l'École normale supérieure*. On rappelle que ce diplôme d'établissement sanctionne une formation sur trois ans au cours de laquelle l'étudiant obtient une troisième année de licence et les deux années d'un master recherche. Outre ces diplômes universitaires, il doit valider des enseignements supplémentaires pour un minimum de 36 ECTS :

- 12 ECTS imposés par la FIP;
- 24 ECTS au choix, dont 12 ECTS obligatoirement hors physique.

Les enseignements imposés sont répartis entre l'année de licence et la première année du master :

- L3 : participation annuelle au *séminaire de la FIP* (2x2 ECTS) et *stage expérimental* (6 ECTS) ;
- M1 : participation au *séminaire de la FIP* pendant le premier semestre (2 ECTS).

Les autres enseignements peuvent être validés indifféremment pendant l'une ou l'autre des trois années de la scolarité au sein de la FIP.

## VIE QUOTIDIENNE DES ÉTUDES FIP

### BIBLIOTHÈQUES ET PHOTOCOPIES

Sous réserve d'inscription préalable, les étudiants ont accès aux collections de la bibliothèque générale du Département de physique.

*À la fin du premier semestre, chaque étudiant doit impérativement, avant son départ pour le stage de recherche, rapporter la totalité des livres qu'il a empruntés, sous peine de sanctions pendant la délibération relative à la validation de la première année du master.*

Une photocopieuse à code est à disposition des étudiants dans la salle informatique du troisième étage. Le code, strictement personnel, sera communiqué à chaque élève en début d'année.

Quelques cours donnent lieu à des photocopies dont certains sont accessibles sur le site internet de la formation (<http://www.phys.ens.fr/enseign/fip>).

### COURS DE LANGUE À L'ENS (*Espace des cultures et langues d'ailleurs : ECLA*)

La maîtrise d'une langue étrangère, notamment de l'anglais écrit et parlé, est indispensable au physicien d'aujourd'hui : le 'module M0' inscrit cette nécessité, en première année de master, dans le cursus de la Formation Interuniversitaire de Physique. Dans cette perspective, l'École Normale Supérieure organise de nombreux cours de langue (niveaux débutant ou confirmé) qui sont ouverts aux étudiants physiciens, toutes promotions confondues. Ceux-ci doivent valider deux semestres de pratique hebdomadaire d'une langue vivante de leur choix, anglais mais aussi allemand, arabe, chinois, espagnol, italien, japonais, russe, etc. Chaque semestre fait l'objet d'une évaluation de leur participation et du travail fourni. La première note est acquise en année de licence, la seconde en première année de master : leur moyenne constitue la note attribuée au 'module M0' du premier certificat semestriel du master (6 ECTS).

### TRAVAIL PERSONNEL - PROJET BIBLIOGRAPHIQUE

Le travail personnel joue un rôle capital dans les études pré doctorales de physique. Le volume horaire (réduit) des enseignements invite les étudiants à prendre, collectivement ou individuellement, le temps de la réflexion et de l'approfondissement en exploitant des documents complémentaires, monographies ou recueils d'exercices, aussi bien que les notes de cours et de travaux dirigés.

Le projet bibliographique procède de cette logique (voir page 9).

## TUTORAT

Pendant l'année de licence, les responsables de la FIP assurent la fonction de tuteur collégialement. Les étudiants mettent cette période à profit pour identifier et affirmer progressivement leur spécificité, la définition du stage de recherche étant le temps fort de leur réflexion. C'est à la charnière entre licence et master que l'attribution d'un tuteur scientifique prend son sens : ce dernier est désormais à même de jouer un rôle pertinent dans l'orientation de son pupille vers tel ou tel domaine de la physique. *En tout état de cause, l'initiative du dialogue incombe à l'étudiant. C'est à lui qu'il revient d'établir et d'entretenir le contact avec le tuteur, qui pourra éventuellement le mettre en rapport avec des chercheurs français et étrangers dans la perspective de sa thèse de doctorat et le conseiller dans les étapes ultérieures de sa spécialisation.*

## SÉMINAIRE DU DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE ET SÉMINAIRE DE LA FIP

On rappelle que l'assistance régulière à un séminaire de recherche est un aspect important de la vie d'un chercheur. Elle entretient une indispensable ouverture d'esprit, par laquelle celui-ci évite de confiner ses activités dans un domaine trop étroitement spécialisé. À cet effet, le Département de physique de l'ENS organise un séminaire général hebdomadaire auquel il faut recommander aux étudiants d'assister, toutes promotions réunies, quel qu'en soit le degré de technicité (jeudi à 13h30 en E224).

Une série de conférences, abordant des thèmes de recherche actuels en physique et disciplines connexes, est proposée plus spécifiquement aux étudiants (mardi à 14h en E244). Il s'agit du *séminaire de la FIP*, qui fait partie des enseignements imposés dans le cadre du Diplôme de l'ENS par les Études prédoctorales de physique. Moment d'échanges entre promotions, ce séminaire est obligatoire pendant la totalité de l'année de licence ainsi qu'au premier semestre de la première année du master.

*La validation du séminaire de la FIP (2 ECTS pour chaque semestre, 6 ECTS au total) suppose l'assiduité systématique des étudiants aux séances hebdomadaires et s'effectue sous la forme de compte-rendu de séances rédigés par un ou deux binômes d'étudiants.*



## Formation Interuniversitaire de Physique

Ecole Normale Supérieure  
Université Pierre et Marie Curie  
Université Denis Diderot  
Université Paris Sud



# MASTER 1

## ENSEIGNEMENTS 2011-2012

**RÉUNION DE RENTRÉE**  
Jeudi 8 septembre à 14h  
en E244

**JOURNÉE DES ENTRETIENS**  
Vendredi 6 et 13 octobre  
en salle L384

### SÉMINAIRES

#### SÉMINAIRE OBLIGATOIRE DE LA FIP (Responsable Thomas SALEZ)

Du 27 septembre jusqu'au 31 janvier : mardi après-midi (13h45-15h15) en E244. Pour les titres et résumés, consulter les panneaux d'affichage et le site internet de la formation.

#### SÉMINAIRE GÉNÉRAL DU DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE DE L'ENS

Toute l'année : jeudi après-midi (13h30-14h45) en E244. Pour les titres et résumés, consulter les panneaux d'affichage du Département de physique

### OPTIONS COMPLETES

#### 1. STRUCTURE FONDAMENTALE DE LA MATIÈRE

Séances : lundi matin du 19 septembre au 9 janvier inclus (sauf le 31 octobre)

*Attention : premier cours aura lieu le mardi 13 septembre, le matin*

Cours : Pierre BINETRUY

8h30-10h30 salle L382

TD : Francesco NITTI

10h30-12h30 salle L382

Examen : jeudi 23 janvier (9h-12h) en salle L382

##### *I. Les atomes*

1. Corrections relativistes, Équation de Dirac.
2. Désintégrations d'états excités, Quantification de rayonnement, Émission spontanée.

##### *II. Les noyaux*

1. Structure nucléaire, Rayons alpha, bêta, gamma.
2. Spin isotopique.
3. Modèle en couches.

##### 4. Réactions nucléaires.

##### 5. Astrophysique nucléaire.

##### *III. Les particules élémentaires*

1. Phénoménologie, Modèle des quarks.
2. Théorie des champs relativiste.
3. Réactions et sections efficaces.
4. Théories de jauge et 'modèle standard'.
5. La gravitation quantique et introduction à la théorie des cordes.

Steven BALBUS - Coordination Master 1

Département de physique de l'ENS - 24, rue Lhomond - 75231 Paris Cedex 05

Tél. : 01 44 32 33 53 - Fax : 01 44 32 39 92 - E-mail : [steve.balbus@ens.fr](mailto:steve.balbus@ens.fr)

## 2. THÉORIE STATISTIQUE DES CHAMPS

Séances : vendredi matin du 16 septembre au 13 janvier inclus (sauf le 4 et le 11 novembre)

Cours : Rémi MONASSON  
08h30-10h30 en L382

TD : Guilhem SEMERJIAN  
10h30-12h30 en L382

Examen : vendredi 3 février (9h-12h) en L382

Phénomènes collectifs : des transitions de phase à la théorie statistique des champs

La physique statistique a pour objectif de comprendre les propriétés macroscopiques des systèmes comportant une multitude de composants microscopiques (particules, atomes, molécules, moments magnétiques, ...). Lorsque ces composants interagissent fortement entre eux, des phénomènes collectifs peuvent survenir, par exemple des changements macroscopiques abrupts consécutifs à de petites variations de paramètres extérieurs. Le but du cours est de montrer comment ces transitions de phase peuvent être quantitativement comprises à l'aide des outils et concepts de la théorie statistique des champs, qui constitue le langage moderne de la physique statistique théorique. En outre, des applications variées, allant de la physique de la matière condensée à la physique de la matière molle seront proposées.

### 3a. PHÉNOMÈNES NON LINÉAIRES et SYSTÈMES DYNAMIQUES

### 3b. GÉOMORPHOGÉNÈSE

Voir demi-options.

## 4. HYDRODYNAMICS

Séances : mercredi matin du 14 septembre au 11 janvier inclus (sauf 2 novembre)

Cours : Steven BALBUS  
8h30-10h30 en L382

TD : Frédéric CHEVY  
10h30-12h30 en L382

Examen : lundi 25 janvier (9h-12h) en L382

Classical hydrodynamics is the oldest nonlinear field theory of physics, yet its most difficult challenges remain beyond the grasp of modern mathematics. Hydrodynamics is one of the few domains of modern physics whose fundamental problems, if solved, would lead to immediate practical benefits in our daily lives. This would be reason enough to study hydrodynamics. Our purpose here, however, is to experience the pure intellectual pleasure of understanding some of the infinitely rich behavior of fluids.

1. Introduction to hydrodynamics, derivation of fundamental fluid equations, transformation of coordinate systems.
2. Lagrangian and Eulerian viewpoints, equations in conservation form, effects of external forces.
3. Linear wave theory: dispersion relations, group velocity, wave energy transport.
4. Nonlinear waves: steepening of acoustic waves, Riemann problem, Rankine-Hugoniot shock relations, solitary waves.
5. Two-dimensional flow: conformal mapping techniques, classical theory of flight, Kutta-Joukowski lift theorem.
6. Vortex motion: theorems of Kelvin and Helmholtz, von Kármán vortex street, spherical vortices.
7. Viscous flow: Navier-Stokes equations, viscous drag on spheres, reversibility of viscous flow, Hele-Shaw cell, adhesion, boundary layers.
8. Classical fluid instabilities: Rayleigh-Taylor, Kelvin-Helmholtz; criteria of Schwarzschild, Rayleigh, and Richardson; inflection point theorem; experimental results.
9. Introduction to turbulent flow: onset of turbulence, Kolmogorov scaling laws, turbulent transport, chaos.

## 5. PHYSIQUE EXPERIMENTALE

Séances : lundi après-midi du 26 septembre au 9 janvier inclus

Cours : Pierre-François COHADON, Antonin MARCHAND et Kenneth MAUSSANG  
14h-18h ENS Montrouge, 1 rue Maurice Arnoux, 92120 Montrouge

Examen : voir ci-dessous

Cette option, d'un semestre, consiste en une série de travaux pratiques effectués en binômes. Ils portent sur de nombreux thèmes de la physique classique (électronique, optique, fluides, thermodynamique...).

Le but est d'apprendre à mener une expérience quantitative dans des domaines variés. Il s'agira donc de mettre en œuvre des expériences simples, de faire l'acquisition des données, d'analyser de manière critique les signaux obtenus pour vérifier une loi physique ou mesurer une grandeur pertinente.

Les sujets couvriront une partie de ceux proposés à l'agrégation de physique et seront abordés dans l'esprit de l'épreuve de montage en attachant un soin particulier à la notion de mesure. L'évaluation se fera par un contrôle continu et par une présentation orale où seront effectuées et commentées des expériences sur un sujet donné. Cette option peut également être vue comme une préparation anticipée à l'épreuve de montage de l'agrégation.

Pour des raisons logistiques, nous ne pouvons accueillir que 5 binômes. Un binôme supplémentaire peut cependant être accueilli pour un projet un peu différent, consistant à élaborer et interfacer avec un ordinateur (programmation en Labview) des expériences nouvelles.

## 6. PHYSIQUE POUR LA BIOLOGIE

Séances : mardi matin du 12 septembre au 10 janvier inclus (sauf le 1er novembre)

*Attention : le 1<sup>er</sup> cours aura lieu exceptionnellement le lundi. Pas de cours le mardi 13 septembre.*

Cours : Jean-François ALLEMAND  
8h30-10h30 en L384

TD : Léo VALON  
10h30-12h30 en salle L384

Examen : mardi 24 janvier (9h-12h) en L384

La physique appliquée à la biologie a connu un essor important depuis deux décennies. Le vivant fournit de beaux exemples d'applications de la physique qui en retour bénéficie d'un apport dans la description quantitative des phénomènes.

Mouvement Brownien, écoulements à faibles nombre de Reynolds, expériences en molécules uniques, moteurs moléculaires sont autant de thèmes qui pourront être abordés.

Aucune connaissance de biologie particulière n'est prérequis.

## TRAVAUX PERSONNELS

### 7. PROJET BIBLIOGRAPHIQUE

Responsable : Claude DELALANDE

Au terme de travaux personnels qu'il mène, à raison d'une demi-journée par semaine, sous la tutelle d'un chercheur du Département de physique, l'étudiant présente ses conclusions au cours d'une soutenance orale. L'exposé se déroule courant janvier, dans le cadre du séminaire de la FIP, et permet de s'exercer à la prise de parole en public. L'évaluation prend en compte tant la qualité didactique de la présentation orale que le travail accompli.



*Le projet bibliographique peut se concevoir comme une phase préparatoire du stage de recherche que les étudiants effectuent durant le second semestre. Lorsque le sujet du stage est défini en début d'année universitaire, on peut envisager que l'un de ses aspects donne lieu à un travail préalable en concertation entre son futur responsable et un chercheur de l'ENS.*

Le *projet bibliographique* se propose d'apprendre à manipuler l'outil bibliographique, par l'identification et l'exploitation d'un petit nombre d'articles portant sur un sujet de physique moderne. L'étudiant se livre à une démarche de recherche qui complète sa formation théorique ; on lui demande de préparer son travail de synthèse dans une perspective didactique.

*Soutenances orales : 10 et 17 janvier 2012.*

## DEMI-OPTIONS

### 3A. PHÉNOMÈNES NON LINÉAIRES ET SYSTÈMES DYNAMIQUES

Séances : vendredi après-midi du 16 septembre au 28 octobre inclus

Cours : Stephan FAUVE  
14h-16h en L382

TD : Swann PIATECKI  
16h-18h en L382

Examen : vendredi 18 novembre (9h -12h) en L382

1. Phénomènes non linéaires, non unicité des solutions, symétries brisées
2. Exemples simples : bilan thermique de la terre, lampe fer-hydrogène, diode tunnel
3. Oscillateurs quasi-harmoniques. Régime de relaxation
4. Accrochage de fréquences, transitions commensurables-incommensurables
5. Oscillateurs paramétriques et phénomènes physiques associés
6. Symétries brisées et équations d'amplitude
7. Quelques résultats généraux sur les systèmes dynamiques et les bifurcations
8. Elimination des termes non résonants et formes normales
9. Application à l'étude d'ondes solitaires (solitons, fronts, défauts topologiques, etc)
10. Stabilité des cycles limites et transitions vers le chaos
11. Effet du bruit sur les instabilités
12. Analogies entre instabilités et transitions de phase

### 3B. GÉOMORPHOGÉNÈSE

Séances : vendredi après-midi du 25 novembre au 13 janvier inclus (séance supplémentaire le jeudi 5 janvier, dans l'après-midi)

Cours et TD: Bruno ANDREOTTI  
14h-18h en L382

Examen : vendredi 3 février à 14 h en L382

Le cours de Géomorphogénèse porte sur les origines physiques des phénomènes géologiques de surface faisant apparaître des "formes". D'une part, il s'agira de passer en revue quelques-uns ces phénomènes, en élaborant une modélisation élémentaire : rides et dunes, avalanches, dynamique des côtes sableuses, plissements et fractures, rivières et bassins versants, nuages, cercles et polygones de cailloux, etc. D'autre part, le cours sera l'occasion d'une initiation à la physique des milieux granulaires, à la physique des milieux continus (hydrodynamique et élasticité) et à la physique non-linéaire (lois d'échelles, instabilités, formation de motifs).

## 8A. COHÉRENCE QUANTIQUE ET DISSIPATION

Séances : mercredi après-midi du 14 septembre au 26 octobre inclus

Cours : Jean HARE  
14h-16h en L384

TD : Amir KASHANI-POOR  
16h-18h en L384

Examen : mercredi 9 novembre (9h-12h) en L382

Dans ce cours, nous nous intéresserons à des situations où la cohérence quantique joue un rôle essentiel. Nous nous appuierons sur des expériences menées en physique atomique, en optique quantique ou en matière condensée pour montrer comment la cohérence est liée à l'existence de chemins quantiques indiscernables. Nous introduirons la description quantique de la dissipation comme résultant du couplage à un environnement, qui sera discuté en termes d'opérateur densité. Nous montrerons comment l'équation pilote permet de décrire une évolution dissipative et illustre le lien entre dissipation et fluctuations. Nous introduirons à partir de là le phénomène de décohérence quantique, illustrée par la fragilité intrinsèque d'une superposition quantique d'états macroscopiques ou « chat de Schrödinger », et ses conséquences en théorie de la mesure. La description de la dissipation en termes de fonctions d'onde stochastiques et de sauts quantiques sera enfin présentée.

1. Quelques expériences remarquables de cohérence quantique.
2. Champs quantiques et bains d'oscillateurs.
3. La notion d'opérateur densité.
4. L'équation pilote et le mouvement brownien quantique.
5. Décohérence, « chat de Schrödinger », théorie de la mesure
6. L'approche « fonctions d'onde stochastiques ».

## 8b. INFORMATION QUANTIQUE

Séances : mercredi après-midi du 16 novembre au 15 janvier inclus

Cours : Jakob REICHEL  
14h-16h en L382

TD : Amir KASHANI-POOR  
16h-18h en L382

Examen : mercredi 1<sup>er</sup> février (14h-17h) en L382

Décrit par la mécanique quantique, le monde microscopique est extrêmement différent de notre univers classique. Un système physique peut, en effet, s'y trouver dans une superposition d'états correspondant à des propriétés classiques différentes. Un bit quantique ou « qubit » pourrait être préparé dans une superposition de ses états logiques, permettant de réaliser des fonctions entièrement inédites pour le traitement ou la transmission d'information. On peut rêver d'un ordinateur effectuant, en une gigantesque superposition quantique, tous les calculs à la fois. Dans ce cadre général, le cours propose une introduction aux principes de l'information quantique, qui fournit en outre une très belle illustration des aspects les plus fondamentaux de la mécanique quantique, ainsi qu'un survol des réalisations expérimentales.

1. Introduction : du bit au « qubit », d'erreurs.
2. Communication quantique.
3. Calcul quantique.
4. Décohérence et correction
5. Réalisations expérimentales.

## 9A. INTRODUCTION À LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Séances : jeudi matin du 15 septembre au 27 octobre inclus

Cours : Luc BLANCHET

8h30-10h30 en L382

TD : Cédric DEFFAYET

10h30-12h30 en L382

Examen : jeudi 10 novembre (9h-12h) en L278 (2<sup>e</sup> étage)

La théorie de la relativité générale est très bien vérifiée expérimentalement dans le système solaire avec la déviation de la lumière par le Soleil et l'avance du périhélie de Mercure. D'autre part la confrontation avec le pulsar binaire (un pulsar en orbite rapprochée autour d'une autre étoile à neutrons) a permis de vérifier l'existence du rayonnement gravitationnel. Le trou noir est une prédiction de la relativité générale et est très certainement une réalité en astronomie avec notamment la présence de trous noirs géants au centre des galaxies. De plus, la relativité générale est le fondement théorique de tous les modèles cosmologiques. Le cours consistera en une initiation technique à cette théorie, qui sera suivie d'applications en astrophysique dans le domaine des ondes gravitationnelles et des trous noirs, et en cosmologie.

1. Place de la gravitation en astrophysique
2. Principe de relativité
3. Rappels de relativité restreinte
4. Principe d'équivalence
5. Notion de force gravitationnelle
6. Calcul tensoriel
7. Equations de la relativité générale
8. Tests classiques dans le système solaire
9. Ondes gravitationnelles
10. Effondrement gravitationnel et trous noirs
11. Introduction à la cosmologie

## 9b. DYNAMIQUE DES SYSTEMES PLANETAIRES

Séances : jeudi matin du 17 novembre au 12 janvier inclus

Cours : Jacques LASKAR

8h30-12h30 en L382

Examen : jeudi 2 février (9h-12h) en L382

Depuis 20 ans, la dynamique des corps céleste, et en particulier des systèmes planétaire a considérablement évoluée. D'une part, la prise en compte des comportements chaotiques dans le Système solaire permet de mieux comprendre son évolution. D'un autre côté, la découverte des systèmes planétaires extrasolaires offre depuis 1995 un nouveau terrain d'investigation avec une très grande variété de systèmes qui impose une nouvelle approche plus globale de l'étude des mouvements planétaires.

Le but de ce cours est à la fois de donner un aperçu de certains grands problèmes qui nécessitent une compréhension de la dynamique des systèmes Hamiltoniens, réguliers ou chaotique.

Thèmes abordés :

- Problème des deux corps
- Résonance spin-orbite
- Mouvements des planètes. Mouvements séculaires
- Précession. Mouvement chaotique des obliquités
- Évolution à long terme des orbites planétaires.
- Théorie des paléoclimats
- Intégrateurs symplectiques
- Analyse en fréquence. Étude des mouvements chaotiques

Les séances de TD seront consacrées à l'étude de systèmes Hamiltoniens classiques par diverses méthodes : Méthodes perturbatives, intégration symplectique, analyse en fréquence. Elles permettront de donner une vision concrète aux notions de tores KAM (Kolmogorov, Arnold, Moser) et de mouvements chaotiques.

## 10. PHYSIQUE NUMÉRIQUE : APPROCHE NUMÉRIQUE EN PHYSIQUE MACROSCOPIQUE

Séances : mardi après-midi du 20 septembre au 6 décembre inclus (sauf le 11 octobre)

Cours : Emmanuel DORMY

15h30-18h30 en E244 (sauf le 4 octobre : salle L380)

Examen oral : mardi 13 décembre en L384 (toute la journée de 9h à 18h)

La modélisation numérique prend une importance croissante pour l'étude des phénomènes physiques en complément des études expérimentales. Les modèles numériques permettent de modifier facilement les conditions et les paramètres d'une expérience « virtuelle ». Ils permettent d'avoir accès à des grandeurs difficiles à mesurer expérimentalement. Ils permettent enfin de tester les descriptions théoriques sous forme d'équations aux dérivées partielles, en les confrontant à l'expérience.

Pour autant les écueils sont nombreux et la réalisation hâtive d'une expérience numérique peut rapidement mener à l'étude d'artéfacts numériques plutôt qu'à celle de phénomènes physiques.

On introduit dans une première partie les notions utiles pour la modélisation numérique de la physique des milieux continus. L'étude de cas pratiques permet ensuite de souligner les difficultés liées à ce type d'approche.

Les séances sont de 3 heures, complétées par des DM et un projet en binôme.

Notes : DM et projet

1. Différences finies, volumes finis, éléments finis, méthodes spectrales
2. Convergence, stabilité, méthodes d'ordres élevés, complexité
3. Discontinuités, diffusion numérique, dispersion numérique, anisotropie numérique
4. Géométrie, conditions aux limites, adaptativité