



PSL



université  
PARIS-SACLAY



SORBONNE  
UNIVERSITÉ  
CRÉATEURS DE FUTURS  
DEPUIS 1257



Master 2 Astronomie, Astrophysique et Ingénierie Spatiale  
Année 2022-2023

Brochure des cours

Direction et secrétariats	page 3
Déroulement de l'année et modalités de contrôle des connaissances	page 4
Liste des enseignements	page 6
Guide pour le choix des cours	page 7
Descriptifs des différents cours	page 9



## M2 AAIS : Direction et secrétariats

### Equipe administrative

Sonia AKROUR (Secrétariat à Meudon) [sonia.akrou@obspm.fr](mailto:sonia.akrou@obspm.fr)

### Responsables pédagogiques

#### *Astrophysique :*

Emeric BRON (Observatoire de Paris, PSL) [emeric.bron@obspm.fr](mailto:emeric.bron@obspm.fr)

Sonia FORNASIER (Université Paris Cité) [sonia.fornasier@obspm.fr](mailto:sonia.fornasier@obspm.fr)

Damien LE BORGNE (Sorbonne Université) [leborgne@iap.fr](mailto:leborgne@iap.fr)

François LEVRIER (ENS, PSL) [francois.levrier@ens.fr](mailto:francois.levrier@ens.fr)

Mathieu VINCENDON (Université Paris Saclay) [mathieu.vincendon@u-psud.fr](mailto:mathieu.vincendon@u-psud.fr)

#### *Dynamique des Systèmes Gravitationnels :*

Gwenaél BOUÉ (Sorbonne Université) [gwenael.boue@obspm.fr](mailto:gwenael.boue@obspm.fr)

Noël ROBICHON (Observatoire de Paris, PSL) [noel.robichon@obspm.fr](mailto:noel.robichon@obspm.fr)

Pour contacter l'ensemble de ces personnes  
(équipe administrative et responsables pédagogiques) :  
[responsables.m2r@obspm.fr](mailto:responsables.m2r@obspm.fr)

Site web de la formation : <http://master-recherche.obspm.fr/>

Site Moodle de la formation : <https://ufe.obspm.fr/moodle/>

## Déroulement de l'année et modalités de contrôle des connaissances

L'année de M2 est divisée en deux semestres : M2S1 (S3) et M2S2 (S4). Chaque semestre est validé par l'obtention de **30 ECTS**. Le Master est obtenu lorsque les deux semestres ont été validés.

**La présence à tous les enseignements et activités pédagogiques proposés (cours, TP, projets méthodologiques, réunions d'information, visites de labo, etc.) est obligatoire.**

### Liste des UE

M2S1		ECTS	
UE "Fondamentales"	(F01 à F08)	<b>F</b>	12
UE "Thématiques, Ouverture & Insertion professionnelle"	(T01 à T10 & activités obligatoires)	<b>T</b>	9
UE "Méthodologiques"	(CTP01 et CTP02)	<b>CTP</b>	6
UE "Projet Méthodologique"	(M01 à M06)	<b>M</b>	3

---

M2S2		ECTS	
UE "Stage d'observation"		<b>O</b>	3
UE "Stage de recherche"		<b>S</b>	27

### Evaluations

Le contrôle des connaissances comprend :

- un ensemble d'épreuves portant sur les UE fondamentales (**F**), thématiques (**T**) et méthodologiques (**CTP**).
- un ensemble d'évaluations portant sur les UE de projet méthodologique (**M**) et de stage d'observation (**O**).
- une évaluation portant sur le stage de recherche (**S**) : rapport écrit et soutenance orale.

Chaque étudiant(e) suit obligatoirement :

- les 2 cours-TP "Méthodes statistiques & Analyse de données" et "Méthodes numériques & Calcul scientifique"
- 5 cours au choix parmi les 8 cours fondamentaux
- 4 cours au choix parmi les 10 cours thématiques
- 1 projet parmi les 6 projets méthodologiques

Le choix des cours en début d'année engage pour l'examen et doit être validé par l'un des responsables pédagogiques du parcours AA ou DSG. Les étudiant(e)s doivent donc communiquer leurs choix :

- au plus tard le **6 septembre 2022** pour les projets méthodologiques ;
- au plus tard le **9 septembre 2022** pour les cours fondamentaux et thématiques<sup>1</sup> ;
- au plus tard le **14 octobre 2022** pour le stage d'observation.

### Constitution des notes

- La note **F** est constituée de la moyenne des 5 notes obtenues aux examens des cours fondamentaux suivis.
- La note **T** est constituée de la moyenne des 4 notes obtenues aux examens des cours thématiques suivis.
- La note **CTP** est constituée de la moyenne des 2 notes obtenues aux évaluations des deux cours-TP.
- La note **M** est constituée de la note obtenue à l'évaluation du projet méthodologique suivi.
- La note **O** est constituée de la note obtenue à l'évaluation du stage d'observation suivi.
- La note **S** est constituée de la note obtenue à l'évaluation du stage de recherche effectué.

---

1. Pour les cours thématiques qui commencent en janvier, des modifications de choix seront envisageables si elles sont bien argumentées et validées par les responsables pédagogiques du parcours AA ou DSG.

Les notes du M2S1 ( $N_1$ ) et du M2S2 ( $N_2$ ) sont calculées suivant les modes suivants :

$$N_1 = 0.4 \mathbf{F} + 0.3 \mathbf{T} + 0.2 \mathbf{CTP} + 0.1 \mathbf{M} \qquad N_2 = 0.9 \mathbf{S} + 0.1 \mathbf{O}$$

La note finale du M2 est calculée suivant le mode suivant :

$$N = 0.5 N_1 + 0.5 N_2$$

### Attribution des ECTS

- Pour les UE **F**, **CTP**, **M**, **O** et **S** : l'obtention d'une note supérieure ou égale à la moyenne conduit automatiquement à l'obtention des ECTS correspondantes (voir tableau ci-dessus) ;
- pour l'UE **T** : la même règle s'applique avec la condition supplémentaire d'avoir participé aux activités d'ouverture et de préparation de l'insertion professionnelle obligatoires figurant au planning, journée de visite des laboratoires d'astrophysique de l'Île de France et demi-journée de compte-rendu de ces visites, visite de la station de radio-astronomie de Nançay, exposé sur l'organisation de la recherche en astrophysique en France et ses financements, exposé sur la thèse, et demi-journée sur l'après-Master 2.

### Règles générales du contrôle des connaissances

- **Ecrits et oraux** : les épreuves seront écrites ou orales, selon des modalités définies par chaque enseignant.
- **Capitalisation** : capitalisation des notes des UE (Fondamentales, Thématiques, Méthodologiques, Stage).
- **Compensation** : entre les éléments constitutifs d'une UE et entre les UE d'un même semestre. Une compensation entre le M2S1 et le M2S2 peut être accordée, à l'appréciation du jury.
- **Rattrapage** : tout(e) étudiant(e) qui a obtenu moins de la moyenne à un semestre peut passer une session de rattrapage. Cette deuxième session aura lieu au moins deux mois après la première. L'étudiant(e) ne repasse que les épreuves des UE où il/elle a obtenu moins de la moyenne. Dans ces UE, il/elle ne repasse que les examens des éléments constitutifs où il/elle n'a pas eu la moyenne. La note finale est la note du rattrapage.

## Liste des enseignements 2022-2023

### Cours fondamentaux : 5 cours à choisir parmi 8

Intitulé	Enseignant(s)	Coloration	Descriptif
F01 - Instruments et observations	M. Ollivier, R. Galicher, J. Girard, A. Zech	AA/DSG	page 9
F02 - Gravitation classique et Mécanique Céleste	G. Boué	AA/DSG[*]	page 10
F03 - Gravitation relativiste	C. Le Poncin-Lafitte, M.-C. Angonin	AA/DSG	page 11
F04 - Astrogéodésie	S. Lambert, P. Bonnefond	AA/DSG	page 12
F05 - Rayonnement	T. Fouchet	AA[*]	page 13
F06 - Dynamique des fluides astrophysiques	M. González	AA/DSG	page 14
F07 - Physique stellaire	R.-M. Ouazzani, J. Marques	AA/DSG	page 15
F08 - Introduction to Dynamical Systems	L. Niederman, A. Bounemoura	DSG	page 16

[\*] : cours obligatoire pour le parcours considéré.

### Cours thématiques : 4 cours à choisir parmi 10

Intitulé	Enseignant(s)	Coloration	Descriptif
T01 - Instruments et observations : radio et hautes énergies	J. Girard, A. Zech	AA/DSG	page 17
T02 - Planètes et petits corps : surfaces et atmosphères	M. Vincendon, A. Spiga	AA/DSG	page 18
T03 - Exoplanètes : détection, populations, formation	S. Charnoz	AA/DSG	page 19
T04 - Physique solaire – activité éruptive	M. Janvier, S. Masson	AA	page 20
T05 - Plasmas astrophysiques	P. Savoini	AA	page 21
T06 - Objets compacts et phénomènes associés, astroparticules	F. Daigne	AA/DSG	page 22
T07 - Milieu interstellaire et formation des étoiles	F. Levrier	AA	page 23
T08 - Galaxies : du groupe local à $z > 10$	P. Di Matteo, P. Salomé	AA/DSG	page 24
T09 - Cosmologie : Univers primordial et grandes structures	H. Dole, J. Grain	AA/DSG	page 25
T10 - Équations cinétiques pour les systèmes à grand nombre de particules	J.-P. Marco	DSG	page 26

### Cours-TP méthodologiques obligatoires

Intitulé	Responsable(s)	Coloration	Descriptif
CTP01 - Méthodes statistiques et Analyse de données	D. Le Borgne	AA/DSG	page 27
CTP02 - Méthodes numériques et Calcul scientifique	B. Semelin	AA/DSG	page 28

### Projets méthodologiques : 1 projet à choisir parmi 6

Intitulé	Responsable(s)	Coloration	Descriptif
M01 - Projets observationnels et instrumentaux / HRA	E. Gendron & P. Gallais	AA/DSG	page 29
M02 - Projets expérimentaux – Astrophysique de laboratoire	J.-H. Fillion	AA/DSG	page 30
M03 - Projets d'analyse de données : photométrie et relevés profonds	M. Douspis, B. Maffei	AA/DSG	page 31
M04 - Projets d'analyse de données : spectroscopie et diagnostics	E. Habart, A. Gusdorf	AA/DSG	page 32
M05 - Projets d'analyse de données : étoiles et petits corps	M. Haywood, S. Fornasier	AA/DSG	page 33
M06 - Projets de modélisation numérique	F. Le Petit	AA/DSG	page 34

### Stage d'observation : 1 stage à choisir parmi 4

Intitulé	Responsable(s)	Coloration	Descriptif
O01 - Stage d'observation à l'OHP : complémentarité sol-espace	H. Dole & N. Robichon	AA/DSG	page 35
O02 - Stage d'observation à l'OHP : instrumentation & observation	P. Gallais & A. Zech	AA/DSG	page 36
O03 - Stage d'observation en radioastronomie à la station de Nançay	S. Corbel	AA/DSG	page 38
O04 - Stage d'observation en radioastronomie millimétrique à l'IRAM	P. Guillard	AA/DSG	page 39

### Stage de recherche

## Guide pour le choix des cours

Les indications qui suivent constituent une aide pour le choix des cours fondamentaux et thématiques au sein de l'offre du M2. Ces choix de cours résultent d'une réflexion issue de l'expérience des responsables du master et correspondent à un choix cohérent de formation, mais ne constituent pas une obligation. Si vous souhaitez suivre des choix différents de ceux proposés dans ce document, il est vivement conseillé de discuter avec un des responsables.

### Parcours Dynamique des Systèmes Gravitationnels (DSG)

Le parcours DSG propose une approche théorique et mathématique des problèmes de dynamique gravitationnelle. La formation est couplée avec une connaissance approfondie des problématiques de positionnement, astrométrie, systèmes de référence en temps et en espace et va ainsi jusqu'à aborder des aspects de la géodésie spatiale.

Il paraît donc important pour un(e) étudiant(e) de DSG de suivre au moins une initiation sur ces thématiques : F02 est un cours incontournable. Pour poursuivre dans la philosophie du parcours, il est naturel de prendre le cours F04, même s'il n'a pas le caractère obligatoire du précédent.

Pour les étudiant(e)s souhaitant mettre un accent fort sur la formation mathématique (du fait de leur formation ou par choix d'orientation), les cours F08 et T10 constituent un choix cohérent.

Ces cours doivent être complétés par le choix d'un thème (voir plus bas) donnant ainsi une cohérence à la formation, même si le choix de quelques cours ponctuels dont les thématiques sont différentes est envisageable.

Concernant les projets méthodologiques, M05 et M06 proposent des sujets autour des thématiques et approches DSG. Mais les autres méthodologies peuvent constituer un complément de formation intéressant pour le parcours. Le choix est donc laissé libre.

### Parcours Astrophysique (AA)

Le parcours Astrophysique apporte les outils et méthodes utiles à la description et à la compréhension physiques des objets de l'Univers, il peut donc se décliner en approches théoriques ou observationnelles, en fonction des objets et phénomènes d'intérêt. L'essentiel de l'information étant transmise par le rayonnement, le cours F05 est incontournable, quelle que soit l'approche envisagée par la suite. Le choix de cours doit ensuite faire apparaître une dominante aussi bien sur l'approche suivie (théorie/modélisation/observation/instrumentation) que la thématique astrophysique (système solaire, étoiles, planètes, galaxies, etc.).

Chaque étudiant(e) choisira donc une approche et un thème dans les propositions ci-après, puis complètera pour atteindre le nombre d'enseignements demandés.

#### *Approche « modélisation/théorie »*

- Cours recommandés : F03+F05
- Thèmes : tous sont possibles
- Méthodologie : le projet M06 est particulièrement recommandé.
- Remarque : nous conseillons d'équilibrer cette approche en la complétant par quelques enseignements donnant une introduction suffisante aux observations et à leur analyse (F01 et éventuellement T01).

#### *Approche « observation/modélisation »*

- Cours recommandés : F01+F05
- Thèmes : tous sont possibles
- Méthodologie : les projets M01, M02, M03, M04, M05 sont particulièrement recommandés.

#### *Approche « instrumentation observation et astrophysique de laboratoire »*

- Cours recommandés : F01+F05+T01
- Thèmes : instrumentation, observation et astrophysique de laboratoire (tous les thèmes astrophysiques sont possibles)
- Méthodologie : les projets M01 et M02 sont particulièrement recommandés.
- Remarque : dans cette approche, on veillera à ce que le choix de cours complémentaires fasse apparaître une ou deux thématiques astrophysiques d'intérêt (étoiles, exoplanètes, galaxies, cosmologie, etc.).

## Thèmes

Les listes de cours qui suivent constituent des ensembles relativement cohérents thématiquement. Elles ne respectent pas nécessairement les contraintes imposées en termes de nombre de cours F et T, mais doivent être prises comme des guides pour le choix de ces enseignements.

*Thème Relativité / Particules de haute énergie / Objets compacts*

F03, T01, T06, T09, et pour certains sujets liés aux objets compacts : F06, F07

*Thème Etoiles / Milieu interstellaire*

F06, F07, T01, T05, T07

*Thème Planètes / Système Solaire / Exoplanètes*

F02, F07, T02, T03, T04

*Thème Plasmas / MHD*

F06, F07, T01, T04, T05

*Thème Galaxies / Cosmologie*

F02, T06, T08, T09, et pour pour certains sujets liés aux galaxies : F07, T07

*Thème instrumentation*

F01, T01

Dans tous les cas, pour les deux parcours, le choix de cours doit être fait en accord avec les responsables du M2 et validé par eux. Ce choix doit tenir compte des pré-requis pour chaque cours.



## F01 Instruments et Observations

Marc Ollivier, IAS, Université Paris-Saclay ([marc.ollivier@ias.u-psud.fr](mailto:marc.ollivier@ias.u-psud.fr))

Raphaël Galicher, LESIA, Observatoire de Paris ([raphael.galicher@obspm.fr](mailto:raphael.galicher@obspm.fr))

Julien Girard, LESIA, Université Paris Cité ([julien.girard@cea.fr](mailto:julien.girard@cea.fr))

Andreas Zech, LUTH, Observatoire de Paris ([andreas.zech@obspm.fr](mailto:andreas.zech@obspm.fr))

### Objectifs

Aborder les principes de base de l'observation astrophysique - repérage sur le ciel des sources - estimation du signal à détecter - sélection, principes de fonctionnement et mise en œuvre de l'instrumentation d'observation - composition du signal détecté.

### Thèmes abordés – Déroulement

1. Les messagers astrophysiques - spectre électromagnétique - processus physiques et sources associées,
2. Repérage des objets sur le ciel, astronomie de position, référentiels d'espace et de temps et instruments de mesure,
3. Formation des images à travers un instrument d'observation, notion de résolution angulaire, synthèse d'ouverture,
4. Les collecteurs du rayonnement,
5. Formation des images à travers les milieux turbulents, optique atmosphérique, optique adaptative, imagerie très haute dynamique,
6. Détection des photons, photométrie, estimation de la qualité des observations, rapport signal/bruit, performances d'un instrument, bilan photométrique
7. Détection : détection cohérente et incohérente, les grandes familles de détecteurs associés,
8. Diagnostic spectroscopique et instrumentation associée, spectrographie basse, moyenne et haute résolution, spectrographie multi-objets, spectrographie intégrale de champ, spectro-imagerie,
9. Introduction aux techniques d'observation des hautes énergies : le ciel vu en hautes énergies : observation de l'univers non-thermique. Techniques d'observation directes et indirectes : télescopes spatiaux et instruments au sol. Instruments en opération et en préparation.
10. Introduction aux techniques d'observation en radioastronomie : l'Univers vu en radio : multiplicité de rayonnements radio, processus de rayonnement, objets de l'environnement local à l'Univers lointain. Les techniques d'observations : notions instrumentales fondamentales, réseaux d'antennes, interférométrie, mesure physique. Observer en radio aujourd'hui (et demain) : tour d'horizon des grands observatoires, quels instruments pour quelles applications scientifiques, kit de survie radio pour astronome.

### Autres informations

Cours avec exercices d'illustration, 1 TD en fin d'UE (examen des années précédentes). Support de cours : planches de cours, corrigé des exercices et des TD disponibles sur le Moodle du master.

### Pré-requis

Goût pour l'expérimentation et l'instrumentation, théorie de la mesure, optique géométrique et physique, statistiques. Connaissances de base des processus d'interaction rayonnement - matière

## **F02** Gravitation Classique & Mécanique Céleste

Gwenaël Boué, IMCCE, Sorbonne Université ([gwenael.boue@obspm.fr](mailto:gwenael.boue@obspm.fr))

### Objectifs

Ce cours a pour but de fournir les outils de base qui permettront de mieux comprendre les interactions dynamiques dans les systèmes gravitationnels.

### Thèmes abordés – Déroulement

#### **Introduction à la gravitation classique et à la mécanique Hamiltonienne (quatre séances)**

- Champ gravitationnel
- Formalisme Lagrangien et Hamiltonien
- Structure symplectique et changement de variables canoniques
- Flot des systèmes Hamiltoniens, espace des phases et intégrateurs symplectiques

#### **Problème planétaire à N corps (trois séances)**

- Problème à deux corps et développements classiques
- Construction des variables canoniques de Delaunay
- Propriétés des systèmes planétaires à N corps, règles de D'Alembert

#### **Dynamique non-intégrable (trois séances)**

- Perturbations du problème à deux corps : équations de Lagrange et équations de Gauss
- Théorie des perturbations
- Chaos et instabilités

#### **Introduction à la gravitation statistique (deux séances)**

- Fonction de distribution, équations de Vlasov-Poisson
- Équilibre et stabilité des systèmes autogravitants

### Autres informations

Le cours est accompagné d'exercices dont certains pourront être résolus en séance.

### Pré-requis

Il est fortement conseillé d'avoir au moins suivi un cours de méthodes mathématiques pour la physique niveau L3.

## F03 Gravitation relativiste

**Christophe Le Poncin-Lafitte, SYRTE, Obs. de Paris** ([christophe.leponcin-lafitte@obspm.fr](mailto:christophe.leponcin-lafitte@obspm.fr))  
**Marie-Christine Angonin, SYRTE, Sorbonne Université** ([m-c.angonin@obspm.fr](mailto:m-c.angonin@obspm.fr))

### Objectifs

Présentation des bases de la relativité générale en développant les applications astrophysiques et les tests fondamentaux de la théorie. Les compétences acquises durant ce cours donnent les outils de base pour permettre d'effectuer la modélisation d'un phénomène de manière à contraindre les observables associées.

### Thèmes abordés – Déroulement

1. Contexte général et cadre géométrique  
Mots clés : espace-temps, principe d'équivalence, variété, tenseur, dérivation covariante, métrique
2. Physique dans l'espace-temps  
Mots-clés : ligne d'univers, transformation de Lorentz, cinématique, dynamique
3. Electromagnétisme
4. Gravitation relativiste  
Mots-clés : tenseur énergie-impulsion, géodésique, différents types de transport, équations d'Einstein
5. Observables  
Mots-clés : tétrades, référentiels localement inertiels
6. Métriques d'une masse ponctuelle  
Mots-clés : métriques de Schwarzschild et de Kerr, orbites, coordonnées de Kruskal
7. Trous noirs  
Mot-clé : équation de Tolman–Oppenheimer–Volkoff
8. Cosmologie  
Mot-clé : métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker
9. Ondes gravitationnelles  
Mots-clés : linéarisation des équations d'Einstein, jauge TT, détections
10. Système Solaire  
Mots-clés : linéarisation d'Eddington, tests classiques
11. Extension de la relativité générale  
Mots-clés : formalismes à Paramètres Post-Newtoniens et Standard Model Extension, formulation variationnelle et théories alternatives

### Autres informations

Des documents pédagogiques de type notes de cours et exercices seront disponibles sur le moodle. Certains exercices pourront être traités sous la forme de TD en fonction de la demande et du calendrier.

### Pré-requis

Avoir suivi un cours sur la relativité restreinte n'est pas indispensable. Les bases de mathématiques (matrices...) et de mécanique doivent être maîtrisées.

## F04 Astrogéodésie

Pascal Bonnefond, SYRTE, Observatoire de Paris ([Pascal.Bonnefond@obspm.fr](mailto:Pascal.Bonnefond@obspm.fr))  
Sébastien Lambert, SYRTE, Observatoire de Paris ([Sebastien.Lambert@obspm.fr](mailto:Sebastien.Lambert@obspm.fr))

### Objectifs

La géodésie spatiale est une science métrologique fondée en partie sur la mécanique céleste et dont l'objectif est l'étude des formes géométrique et gravifique de la Terre et des planètes, de leur rotation ainsi que de l'évolution de ces caractéristiques. Elle utilise les mesures des satellites artificiels, notamment par leurs techniques de suivi (GNSS, Laser, DORIS), ou bien encore des mesures astronomiques sur des objets extragalactiques (VLBI).

Les principales applications scientifiques concernent la détermination des systèmes de référence terrestre ou céleste, des paramètres de rotation de la Terre, des déformations globales (ex. : marées) ou locales. Elles s'appuient aussi sur des mesures de positionnement ou InSAR, du champ de gravité (ou du géoïde) par des missions de gravimétrie spatiale (ex. : GRACE, GOCE), du niveau des océans par des missions d'altimétrie spatiale (ex. : Jason)...

Bien au-delà, de nombreuses applications sociétales découlent de cette science née avec les satellites artificiels.

### Thèmes abordés – Déroulement

#### Introduction à la géodésie : objets, aspects historiques et défis sociétaux (1 séance)

#### Systèmes de référence : du céleste au terrestre et vice et versa (6 séances)

- Astrométrie globale, astronomie fondamentale
  - Sphère céleste et repères classiques en astronomie
  - Triangles sphériques
  - Principaux instruments et missions d'astrométrie (VLBI, Gaia...)
- L'orientation de la Terre : mesure et physique
- Les échelles de temps : du temps astronomique au temps de l'atome
- Les systèmes et repères de référence en astronomie et en géodésie : construction de l'ITRF, de l'ICRF et liens entre les deux ; vers le millimètre

#### De la Géodésie Terrestre à la Géodésie spatiale (5 séances)

- Les observations de Géodésie Spatiale : télémétrie laser, système DORIS, Global Navigation Satellite System (GPS, GLONASS, Galileo, ...), VLBI, altimétrie satellitaire
- La dynamique orbitale pour mesurer la Terre
- Forme et déformation de la Terre (réseaux de stations, champ de gravité)

### Autres informations

### Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable.

## F05 Transfert du rayonnement et interaction matière–rayonnement

Thierry Fouchet, LESIA, Sorbonne Université ([thierry.fouchet@obspm.fr](mailto:thierry.fouchet@obspm.fr))

### Objectifs

Le rayonnement électromagnétique porte l'essentiel de l'information qui permet d'étudier les objets astrophysiques et l'Univers en général. Il joue également un rôle souvent dominant dans le transport d'énergie au sein des objets astrophysiques. Son étude est donc nécessaire à la fois à l'observation et à la modélisation des objets astrophysiques. Dans ce cours, nous étudierons aussi bien le transport du rayonnement, que sa production, sa diffusion et son absorption lors d'interactions matière-rayonnement. Nous appliquerons les processus étudiés des milieux très dilués aux milieux très denses dans toutes les gammes de longueur d'onde depuis les rayons  $\gamma$  jusqu'aux ondes radio.

### Thèmes abordés – Déroulement

#### Introduction (1 séance)

1. Rappels d'électromagnétisme et de physique quantique
2. Le ciel dans toutes les longueurs d'onde
3. Les sources de rayonnement en astrophysique

#### Transfert de rayonnement (4 séances)

1. Définition des concepts et grandeurs (intensité spécifique et ses moments)
2. Equation du transfert, absorption, épaisseur optique, émissivité
3. Le corps noir et l'équilibre gaz-photons (loi de Maxwell et de Saha, ETL).
4. Diffusion (Rayleigh, Mie, Thomson, Compton, Compton-inverse) et équation de transfert avec la diffusion.
5. Approximation d'Eddington - Opacité de Rosseland - Structure stellaire - Effet de serre

#### Interaction onde-matière (2 séances)

1. Structure atomique et moléculaire (hydrogène, atomes à plusieurs électrons, ions, molécules)
2. L'oscillation de Rabi, les règles de sélection, les coefficients d'Einstein
3. Formes des raies spectrales (Lorentz - Doppler - Voigt)
4. L'interaction onde-solide : bandes d'absorption, phonons

#### Processus d'émission (3 séances)

1. Calcul de la fonction source avec écart à l'ETL
2. Émission radiative des particules chargées (rayonnement synchrotron et de freinage)
3. Interaction électron-photon (Compton, Compton inverse, annihilation des paires électrons-positrons)
4. Formes des raies spectrales (Lorentz - Doppler - Voigt)

#### Méthodes de résolution (2 séances)

1. Diffusion dans une atmosphère plan-parallèle
2. Modèle Monte Carlo. Itération lambda et lambda accélérée
3. Hydrodynamique et rayonnement

### Autres informations

Les transparents de cours seront disponibles. Un poly sera distribué. Des exercices seront corrigés en cours.

### Pré-requis

Un peu d'électromagnétisme (onde EM dans le vide, vecteur de Poynting, densité d'énergie électromagnétique), de physique quantique (structure de l'atome d'hydrogène), de relativité (quadrivecteur et transformation de Lorentz).

## **F06** Dynamique des fluides astrophysiques

Matthias González, AIM, Université Paris Cité ([matthias.gonzalez@cea.fr](mailto:matthias.gonzalez@cea.fr))

### Objectifs

Ce cours présente les bases de l'hydrodynamique, des schémas numériques associés et de la magnéto-hydrodynamique (MHD) qui est l'étude des fluides magnétisés. De nombreux phénomènes astrophysiques peuvent être décrits dans ce cadre : dynamique des atmosphères stellaires, du milieu interstellaire, de la formation des étoiles, du gaz dans les disques galactiques et les disques d'accrétion (AGN, étoiles jeunes...), formation des grandes structures.

### Thèmes abordés – Déroulement

#### Introduction (1 séance)

- lois de conservation, Euler/Lagrange, dérivée matérielle
- équations de continuité, Navier-Stokes, énergie

#### Hydrodynamique (4 séances)

- nombre sans dimension (Reynolds, ...), fluide parfait, fluide compressible, théorème de Bernoulli, vorticité, théorème de Kelvin
- ondes sonores, chocs et relations de Rankine-Hugoniot
- instabilités de Rayleigh-Taylor, Kelvin-Helmholtz, Jeans
- turbulence : propriétés, Kolmogorov

#### Schémas numériques hydrodynamiques (1 séance)

-  quations sous forme conservative
- méthodes des différences finies et des volumes finis
- condition de stabilité : CFL, von Neumann
- méthode de Godunov, problème de Riemann
- schéma d'ordre élevé et multi-D

#### Magnéto-hydrodynamique (6 séances)

- hypothèses MHD, force de Lorentz : tension et pression magnétique, équation d'induction, champ gel 
- ondes d'Alfvén, ondes magn tosoniques rapides et lentes, chocs MHD
- instabilité magnéto-rotationnelle
- théorème du Viriel en MHD et application à la formation stellaire
- MHD non idéale : diffusion ambipolaire, ohmique et effet Hall et applications
- dynamo et reconnection : théorème anti-dynamo de Cowling, modèle de reconnection de Sweet-Parker

### Autres informations

Le cours est accompagné d'exercices distribués à l'avance et qui seront corrigés en séance.

### Pré-requis

Aucun pré-requis.

## F07 Physique stellaire : structure, évolution, et oscillations des étoiles

Rhita-Maria Ouazzani, LESIA, Observatoire de Paris ([rhita-maria.ouazzani@obspm.fr](mailto:rhita-maria.ouazzani@obspm.fr))  
João Marques, IAS, Université Paris-Saclay ([joao.marques@ias.u-psud.fr](mailto:joao.marques@ias.u-psud.fr))

### Objectifs

Dans ce cours de Physique stellaire, nous allons étudier en profondeur les caractéristiques physiques internes des étoiles ainsi que leur évolution au cours du temps. Dans notre description de la structure des étoiles, nous nous attacherons à analyser et comprendre les processus physiques sous-jacents. En général, nous nous concentrerons sur les étoiles solitaires, depuis la pré-séquence principale, jusqu'au stade de naine blanche, ou supernova. Le cas des systèmes binaires sera néanmoins abordé en fin de cours. Ce cours sera constitué de trois parties, Structure stellaire, Évolution stellaire, et enfin Asterosismologie.

### Thèmes abordés – Déroulement

#### **Introduction générale, caractérisation des étoiles (une séance de cours).**

#### **La modélisation stellaire (une séance de cours).**

- Équations générales de la structure interne stellaire dans le cas standard.
- Temps caractéristiques de la structure et de l'évolution stellaire, lois d'échelle, ordres de grandeurs.
- Le théorème du viriel.

#### **Les ingrédients physiques de la modélisation stellaire (deux séances de cours).**

- Équations d'état, opacités, convection, réactions nucléaires.

#### **Au delà de la modélisation standard (deux séances de cours).**

- Traitement de la convection.
- La rotation des étoiles et ses effets sur la structure et évolution des étoiles.
- Champ magnétique, activité stellaire

#### **Évolution stellaire (trois séances de cours, une séance de TP).**

- Formation stellaire.
- Évolution des étoiles de faible masse.
- Évolution des étoiles massives.
- Évolution des systèmes binaires.
- TP : utilisation d'un code d'évolution stellaire pour calculer des modèles.

#### **Astérosismologie (deux séances de cours).**

- Introduction générale de la sismologie.
- Aspects dynamiques.
- Aspects énergétiques.

### Autres informations

Une séance de TP ainsi que des devoirs maison sont prévus. Le cours est accompagné d'un polycopié de cours. Plusieurs documents seront fournis sur le site Moodle du cours.

### Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable.

## F08 Introduction to Dynamical Systems

Abed Bounemoura, Université Paris-Dauphine ([bounemoura@ceremade.dauphine.fr](mailto:bounemoura@ceremade.dauphine.fr))

Laurent Niederman, Université Paris-Saclay & Obs. de Paris ([laurent.niederman@obspm.fr](mailto:laurent.niederman@obspm.fr))

### Objectifs

Dynamical Systems are systems (e.g. planets revolving around a star) whose state depend on time. Contrary to the most elementary differential equations, usually there is no formula to describe their state as an explicit function of time. Yet there is a wealth of methods to study the qualitative properties of their evolution, and, in particular, their long time evolution. This course will introduce the most basic or fundamental ones.

### Thèmes abordés – Déroulement

1. Flow of a vector field. First integrals and symmetries. Poincaré sections. Examples
2. Fixed points, periodic orbits, spectral stability, linear systems in dimension 2. Linearisability
3. Hyperbolic fixed points, stable and unstable manifolds
4. Hamiltonian systems, quasiperiodic solutions, integrability
5. Averaging, small divisors and resonances, perturbation theory, stability theory
6. Anosov flows, geodesic flows with negative sectional curvature

### Autres informations

The course will be taught in English, except if all students speak French.

### Pré-requis

Some understanding of linear algebra (including spectral theory) and calculus (including the inverse function theorem) are welcome, albeit not compulsory.



## **T01** Instruments & Observations - radio & HE Introduction aux observations en radio astronomie et aux hautes énergies

Julien Girard, LESIA, Université Paris Cité ([Julien.Girard@obspm.fr](mailto:Julien.Girard@obspm.fr))  
Andreas Zech, LUTH, Observatoire de Paris ([Andreas.Zech@obspm.fr](mailto:Andreas.Zech@obspm.fr))

### Objectifs

En se basant sur les notions acquises en F01, ce cours donne une introduction plus approfondie à l'instrumentation, aux techniques d'observation et à la réduction et analyse de données des domaines d'astronomie qui se trouvent aux deux limites extrêmes du spectre électromagnétique : la radioastronomie (notamment imagerie avec les interféromètres modernes) d'un côté et l'astrophysique aux hautes énergies (astronomie X, gamma, très hautes énergies) de l'autre. Une séance sera aussi dédiée aux "multi-messagers" de haute énergie (rayons cosmiques, astro-neutrinos).

### Thèmes abordés – Déroulement

1. Les fondamentaux de la radioastronomie (*~ 2 séances*)
  - notions fondamentales sur les antennes
  - observer le ciel avec des antennes uniques
  - de l'émission à la mesure du signal
  - chaîne d'acquisition et exploitation du signal
2. Radio astronomie moderne, les réseaux d'antennes - Imagerie (*~ 1,5 séances*)
  - introduction : au-delà de l'antenne unique
  - image et transformée de Fourier
  - imagerie par synthèse d'ouverture (interféromètre à N antennes)
  - les enjeux de la radioastronomie moderne
3. Télescopes spatiaux en rayons X et gamma (*~ 1,5 séances*)
  - interactions photon-matière : photo-absorption, diffusion Compton, production de paires
  - télescopes et détecteurs pour rayons X et rayons gamma
  - principes de la réduction des données
4. Télescopes Cherenkov et détecteurs de grand champ au sol (*~ 1 séance*)
  - la physique des gerbes atmosphériques
  - fonctionnement des télescopes Cherenkov et réduction des données
  - fonctionnement de détecteurs de grand champ et réduction des données
5. Détection des "multi-messagers" aux hautes énergies (*~ 1 séance*)
  - détection de rayons cosmiques
  - détection d'astro-neutrinos

### Autres informations

Support de cours au moins partiellement en anglais. Des documents utiles sont fournis sur le site Moodle du cours.

### Pré-requis

Il est recommandé d'avoir suivi le cours F01. Il est par ailleurs fortement conseillé d'avoir suivi le cours F05.

## T02 Planètes et petits corps : surfaces & atmosphères

Aymeric Spiga, LMD, Sorbonne Université ([aymeric.spiga@sorbonne-universite.fr](mailto:aymeric.spiga@sorbonne-universite.fr))  
Mathieu Vincendon, IAS, Université Paris-Saclay ([mathieu.vincendon@u-psud.fr](mailto:mathieu.vincendon@u-psud.fr))

### Objectifs

- Expliquer les grands enjeux de la recherche en planétologie.
- Caractériser les propriétés et les mécanismes d'évolution des surfaces au sein du système solaire.
- Justifier les principales caractéristiques des atmosphères planétaires à l'aide de grands principes généraux.
- Illustrer tous ces concepts par des exemples dans et hors le système solaire :
  - surfaces : planètes telluriques, planètes naines, satellites rocheux et glacés, astéroïdes, comètes
  - atmosphères : Mars, Vénus, Titan, géantes gazeuses et glacées, exoplanètes

### Thèmes abordés – Déroulement

7 séances de 3 heures : 3 séances sont dédiées aux surfaces [S] enseignées par Mathieu Vincendon et 4 séances sont dédiées aux atmosphères [A] enseignées par Aymeric Spiga.

- **S1. La composition des surfaces.** L'objectif de ce cours est de comprendre l'origine de la composition des objets solides du système solaire : planètes telluriques, satellites, astéroïdes, comètes, en décrivant notamment la répartition des éléments au sein de ces objets et la séquence de condensation des espèces réfractaires et volatiles.
- **S2. L'eau primordiale.** Ce cours permettra d'explorer la répartition de l'eau sous forme liquide et glace dans le système solaire, et de présenter les contraintes disponibles sur la dynamique des objets riches en eau (comètes...) ainsi que sur la formation des océans primordiaux à l'aide de l'étude des rapports isotopiques.
- **S3. L'altération aqueuse.** Les modifications chimiques des roches sous l'action de l'eau seront présentées, afin de comprendre les enjeux des missions spatiales d'exploration des astéroïdes hydratés, de la planète Mars et des satellites glacés du système externe.
- **A1. Généralités sur les atmosphères planétaires** Dans ce cours, nous abordons, à partir de principes de thermodynamique et de statique des fluides, des définitions et mécanismes centraux des atmosphères planétaires : état de l'atmosphère, sa dynamique élémentaire, formations de nuage et instabilités.
- **A2. Approche radiative des atmosphères planétaires** Ce cours vise à donner une idée de l'utilisation des concepts de bilan et transfert radiatifs pour comprendre comment l'on calcule l'environnement thermique d'une planète et comment l'observer par télédétection spatiale.
- **A3. Structure et dynamique des atmosphères planétaires** Dans ce cours, les perspectives du précédent cours sont étendues pour parvenir finalement à définir la structure verticale générale d'une atmosphère planétaire. Dès lors, nous pouvons nous intéresser à la dynamique horizontale du fluide atmosphérique, en abordant différents régimes dynamiques par type de planète.
- **A4. Les atmosphères planétaires en tant que composante d'un système** Cette séance complète les précédentes en abordant la photochimie et une approche simplifiée de l'évolution des atmosphères planétaires et des questions d'habitabilité. A la fin du cours, des exemples (exo)planétaires viennent synthétiser les principes vus dans chacun des cours.

### Autres informations

L'enseignement est principalement composé de cours magistraux au tableau. Des exercices sont également proposés. Les supports des présentations éventuellement utilisées sont fournis. Examen écrit de contrôle des connaissances.

### Pré-requis

Pas de pré-requis nécessaire en géophysique et en physique de l'atmosphère. Des connaissances de base en mécanique des fluides (F06 ou cours d'introduction de niveau L3/M1) et en thermodynamique sont nécessaires (cours de Licence). Intérêt pour la recherche en planétologie.

## **T03** Exoplanètes Détection, populations, formation

Sébastien Charnoz, IPGP, Université Paris Cité ([charnoz@ipgp.fr](mailto:charnoz@ipgp.fr))

### Objectifs

Donner une vision d'ensemble de la discipline qui est très dynamique et évolue rapidement. Le cours portera sur (1) les aspects observationnels et détection (2) la physique des populations d'exoplanètes, les processus de formation et d'évolution dynamiques planétaires. La physico-chimie de l'atmosphère sera moins traitée, car ce sujet est couvert dans le cours T02.

### Thèmes abordés – Déroulement

- **Séance 1 : des planètes aux exoplanètes : aspects historiques, premières découvertes et grands programmes d'observation.**  
Système Solaire. Planètes extrasolaires : difficulté de la détection. Première détection autour d'une étoile de la séquence principale (51 Peg). Panorama des missions spatiales (Corot, Kepler, CHEOPS, TESS, PLATO, ARIEL) et des programmes au sol (WASP, TRAPPIST). Présentation rapide de la population d'exoplanètes découvertes.
- **Séance 2 : détection par vitesses radiales (RV) & méthode des transits (début).**  
Détection par spectroscopie, effet Doppler. Exemple de détection. Présentation d'un ou deux instruments (HARPS, HIRES). Détection de systèmes planétaires par vitesses radiales. Détection par transit. Complémentarité avec les vitesses radiales. Courbes de lumière, un exemple de Kepler. Effets de sélection, biais observationnels.
- **Séance 3 : méthode des transits (suite) & imagerie directe.**  
Transit secondaire, détection de systèmes multiples. Exemples. Spectroscopie et transits : effet Rossiter-McLaughlin. Difficulté de l'imagerie directe. Techniques (optique adaptative, masque coronographique, speckles). Stratégie d'observation et exemples (HR8799, Beta Pictoris b). Biais. Le futur : JWST, ELT.
- **Séance 4 : qu'avons-nous appris des populations d'exoplanètes. Physique des planètes (début).**  
Complémentarité des différentes méthodes. Familles de planètes et population : géantes de gas, géantes de glace, planètes terrestres, jupiters chauds, etc. . . Relation masse-rayon. Physique des exoplanètes : équilibre hydrostatique, équation d'état, relation masse-rayon. Physique de l'atmosphère : rayons de Hill et de Bondi. Effet de la température.
- **Séance 5 : physique des planètes (suite).**  
L'échappement : échappement hydrodynamique vs. Jeans. Effets de marées. Principes de base. La marée stellaire. La marée planétaire. Le fameux paramètre « Q ». Évolution dynamique des éléments orbitaux et temps de synchronisation. Exemples : Cas du système Terre-Lune. Cas des planètes géantes.
- **Séance 6 : Formation planétaire (début).**  
Physique du disque protoplanétaire. Structure, taille, température. Le concept de nébuleuse de masse minimum. Croissance des poussières. Croissance des planétésimaux. La « streaming instability ». Pebble accretion.
- **Séance 7 : Formation planétaire (suite), application aux exoplanètes.**  
Des embryons aux planètes. Croissance des planètes géantes. Migration des planètes dans les disques. Calcul du couple de marée entre la planète et le disque. Une histoire de la formation de notre Système Solaire. Synthèse de populations planétaire. Les ingrédients de base. Les limitations. Succès et échecs de la synthèse de population planétaire.

### Autres informations

### Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable.

## T04 Physique solaire – Activité éruptive

Sophie Masson, LESIA, Observatoire de Paris ([Sophie.Masson@obspm.fr](mailto:Sophie.Masson@obspm.fr))  
Miho Janvier, IAS, Université Paris-Saclay ([miho.janvier@ias.u-psud.fr](mailto:miho.janvier@ias.u-psud.fr))

### Objectifs

Ce cours propose d'étudier l'activité solaire et les processus physiques au coeur de celle-ci, ainsi que son impact sur l'héliosphère : génération/émergence du champ magnétique à la surface de notre étoile, éruptions/éjections de matière associées, propagation dans le milieu interplanétaire. Les principales observations (imagerie, données de sondes in situ), la façon de les interpréter et la physique à l'œuvre des phénomènes sera étudiée.

### Thèmes abordés – Déroulement

- **La reconnexion magnétique (séances 1 & 2).**
  - Introduction : où trouve-t-on la reconnexion magnétique ?
  - Les équations de la MHD et la formation de nappes de courants
  - Instabilité de déchirement + Modèle de Sweet-Parker et Petschek et au delà
- **Le champ magnétique solaire (séance 3).**
  - Introduction
  - Formation des régions actives : émergence de flux magnétique
  - Reconstruction 3D du champ magnétique solaire
- **Vent solaire (séance 4).**
  - Modèle de Parker : vent isotherme
  - Spirale de Parker : champ B de l'héliosphère
- **Les éruptions solaires (séances 4 & 5).**
  - Description phénoménologique d'une éjection de masse coronale (CME)
  - Tubes de flux torsadés
  - Mécanismes déclencheurs
- **option 1 : Les conséquences des éruptions (séance 6)**
  - Boucles post-éruptives : (contraction) et chauffage
  - Les particules énergétiques
  - Les signatures observationnelles des particules énergétiques
- **option 2 : Les observations spectroscopiques (séance 6)**
  - Opacité, raies spectrales, spectrogrammes
  - Effet FIP
- **Propagation des éjections de masse coronales dans le milieu interplanétaire (séance 7).**
  - Phénoménologie des CMEs : des coronographes et imageurs héliosphériques aux mesures in situ
  - Evolution de la CME
  - Effets sur les environnements planétaires (phénoménologie)

### Autres informations

### Pré-requis

Avoir suivi les cours F06 et T05 sera un atout certain, de même que le cours F07 (ou un cours d'introduction à la physique stellaire de niveau M1).

**T05** Physique des Plasmas :  
les bases fondamentales de l'astrophysique au laboratoire

Philippe Savoini, LPP, Sorbonne Université ([philippe.savoini@sorbonne-universite.fr](mailto:philippe.savoini@sorbonne-universite.fr))

### Objectifs

Plasma - named the fourth state of matter - constitutes 99% of the visible matter in the universe and is therefore a key element in the study of astrophysical phenomena. The plasma state is characterized by a set of charged particles influenced by the  $\vec{E}$  and  $\vec{B}$  fields, and especially by their feedback on these same fields. Plasmas are thus the result of two contradictory tendencies, a tendency to disorder due to thermal agitation and a tendency to organization due to Coulomb interaction.

Then, this module is an introduction and aims at fulfilling two objectives : (i) to introduce the basic concepts of the "plasma state" and (ii) to present the different theoretical approaches related to its multi-scale aspect (time and space). It remains at a basic level concerning the applications and is essentially devoted to give a general and most precise view of the tools and models used in plasma physics.

It is moreover mutualized with the master M2 Plasma Physics and Fusion (PPF) in order to bring a common base on "plasma state" allowing the students to acquire the fundamental knowledge to what is the plasma physics.

### Thèmes abordés – Déroulement

**Introduction (one session).**

- The diversity of the "plasma state".
- The space-time scales related to the electric  $\vec{E}$  and magnetic  $\vec{B}$  fields.
- Short presentation of the different possible theories and models related to these scales.

**Theory of motion of single charged particles : a very useful approximation (one session).**

- Electrical and magnetic drift phenomena.
- Notion of adiabatic invariant : the mirror reflection and Fermi acceleration processes.

**Kinetic theory : collection of charged particles (two sessions).**

- Statistical approach of plasmas : Klimontovitch equation (simple approach).
- Vlasov and Boltzmann equations.

**Multi-fluid theory : a global approach (one session)**

- Determination of fluid equations via kinetic theory.
- Approximations and consequences on the dynamics of particles : Notion of closures.

**MagnetoHydroDynamic Theory : a "simplified" theory (one session).**

- Determinations of MHD equations from multi-fluid theory.
- Limitations and areas of validity of MHD : the Ohm's law.

### Autres informations

The course is accompanied by a booklet which also includes exercises from the exams and constitutes the annals of previous years which will be solved.

**Both the oral presentation and the booklet are in english.**

### Pré-requis

This module does not presuppose that the student has already studied plasma physics. Nevertheless, basic knowledge in statistical mechanics and electromagnetism is welcome.

## **T06** Objets compacts et phénomènes associés Astrophysique des hautes énergies et multi-messagers

Frédéric Daigne, IAP, Sorbonne Université ([daigne@iap.fr](mailto:daigne@iap.fr))

### Objectifs

Ce cours présente les concepts, modèles et observations fondamentales nécessaires pour aborder l'étude des objets compacts et des phénomènes qui leur sont associés. Cette thématique joue un rôle essentiel en astrophysique des hautes énergies et multi-messagers (astronomie X et  $\gamma$ , rayonnement cosmique, neutrinos, ondes gravitationnelles).

Le cours introduira les différentes classes d'objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs) en posant la question de leur formation, de leur structure interne et de leur rayonnement. Il mettra en évidence le lien entre les objets compacts et les phénomènes les plus énergétiques observés dans l'Univers. Seront ainsi discutés le rayonnement des objets compacts accrétants et l'émission multi-messagers des phénomènes explosifs extrêmes associés à l'effondrement gravitationnel (d'une étoile ou d'un système binaire).

### Thèmes abordés – Déroulement

#### **Introduction (~ une séance).**

- critère de compacité, propriétés communes des objets compacts
- intérêts de l'étude des objets compacts : les liens avec la physique stellaire, avec l'astrophysique des hautes énergies et multi-messagers, avec la physique fondamentale et la cosmologie.

#### **Les objets compacts : structure interne et rayonnement (~ deux séances).**

- naines blanches
- étoiles à neutrons et pulsars
- trous noirs

#### **Objets compacts accrétants (~ deux séances).**

- physique de l'accrétion, comparaison aux observations
- phénomènes d'éjection
- explosions thermonucléaires de surface : novae et sursauts X
- explosions thermonucléaire d'une naine blanche : supernovae de type Ia

#### **Effondrement gravitationnel (~ deux séances).**

- supernovae gravitationnelles et neutrinos
- optionnel : rayons cosmiques – rôles de l'astronomie  $\gamma$  et de l'astronomie neutrino
- sursauts gamma
- coalescences d'objets compacts et ondes gravitationnelles

### Autres informations

Le cours est accompagné d'un polycopié de cours et de nombreuses suggestions d'exercices. Plusieurs documents, dont les annales des examens, sont fournis sur le site Moodle du cours.

### Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable, mais avoir suivi plusieurs des cours suivants sera un atout : F03 : gravitation relativiste ; F05 : rayonnement ; F06 : fluides astrophysiques (ou cours de mécanique des fluides de niveau L3 ou M1) ; F07 : physique stellaire (ou cours d'introduction à la physique stellaire de niveau M1) ; cours d'introduction à la physique statistique de niveau L3/M1 (en particulier : statistique des fermions).

## T07 Milieu interstellaire et formation des étoiles

François Levrier, LPENS, Ecole Normale Supérieure ([francois.levrier@ens.fr](mailto:francois.levrier@ens.fr))

### Objectifs

Ce cours présente les concepts, modèles et observations nécessaires pour aborder la thématique de la formation des étoiles, qui est elle-même indissociable de la physique du milieu interstellaire (MIS). Le cours s'attachera à décrire les différentes composantes du MIS, sa structure et sa dynamique, des phases les plus diffuses jusqu'à la formation des étoiles, pour mettre en évidence le rôle de véritable "écosystème Galactique" qu'il joue, et la variété des processus physiques à prendre en compte pour en saisir la complexité.

### Thèmes abordés – Déroulement

#### Introduction (une séance)

- Les acteurs du milieu interstellaire : composantes et processus
- La structure du milieu interstellaire Galactique
- Le cycle de la matière interstellaire

#### Le gaz interstellaire (deux séances)

- Les observations du gaz ionisé, atomique et moléculaire
- La thermodynamique du gaz et les différentes phases du milieu interstellaire
- La richesse de la chimie interstellaire, des observations aux modèles

#### Les poussières interstellaires (une séance)

- Les modèles de poussières, de leur formation et de leur évolution
- Les interactions entre gaz, grains, radiation et rayons cosmiques

#### La dynamique du milieu interstellaire (une séance)

- Les diagnostics observationnels de la turbulence interstellaire, sources d'énergie et modélisation
- Les observations des chocs interstellaires et leur modélisation

#### La formation des étoiles (deux séances)

- Les modèles et les observations de cœurs préstellaires
- L'effondrement vers la proto-étoile
- La fonction de masse initiale
- Les cas particuliers des étoiles massives et des naines brunes
- L'impact des étoiles jeunes sur leur environnement
- La formation stellaire à l'échelle Galactique et au-delà.

### Autres informations

Le cours est accompagné d'un polycopié et de suggestions d'exercices.

### Pré-requis

Le cours F05 ("Transfert du rayonnement et interaction matière-rayonnement") est un pré-requis quasiment indispensable. Avoir suivi le cours F06 ("Dynamique des fluides astrophysiques") sera un atout.

## **T08 Galaxies : de la Voie Lactée à $z > 10$**

**Paola Di Matteo, GEPI, Observatoire de Paris** ([paola.dimatteo@obspm.fr](mailto:paola.dimatteo@obspm.fr))  
**Philippe Salomé, LERMA, Observatoire de Paris** ([philippe.salome@obspm.fr](mailto:philippe.salome@obspm.fr))

### **Objectifs**

Ce cours présente les différents aspects de la physique des galaxies. La première partie du cours se concentrera sur la Voie Lactée, ses composantes et ses populations stellaires. En suivant un schéma classique, les propriétés du disque mince, épais, du bulbe et du halo de notre Galaxie seront présentées, avec une discussion sur les possibles scénarios de formation et d'évolution, et leurs liens réciproques. Cette partie se terminera en introduisant la place de la Voie Lactée dans le Groupe Local et en présentant les propriétés principales des autres galaxies qui le composent. La seconde partie du cours aborde l'histoire de la formation et de l'évolution des galaxies non résolues en étoiles. Après avoir brièvement décrit les grandes structures de l'Univers dans un contexte cosmologique puis les amas et super-amas proches, le cours s'intéressera aux propriétés des différents types morphologiques de galaxies et à l'activité de leur trou noir central. Les questions de la formation d'étoiles seront ensuite abordées. Enfin, les mécanismes pouvant réguler la croissance des galaxies seront présentés ainsi que les autres processus susceptibles de transformer les galaxies.

### **Thèmes abordés – Déroulement**

#### **La Galaxie et le Groupe Local (10.5h) - 3.5 séances (3×3h + 1h30)**

1. Introduction au cours. Le disque mince et épais de la Voie Lactée. Processus de formation et d'évolution (accrétion de satellites/évolution séculaire). Evolution chimique. Courbe de rotation et matière noire
2. La barre et le bulbe dans les kiloparsecs internes. Processus de formation et d'évolution. Propriétés morpho-cinématiques. Du bulbe au halo. Les amas globulaires.
3. Le halo stellaire de la Voie Lactée. Courants stellaires. Processus de formation et d'évolution. Réchauffement cinématique du disque, étoiles accrétées, leur distribution et cinématique. Collapse monolithique.
4. Le Groupe Local : Satellites de la Voie Lactée dans la toile cosmique. Les Nuages de Magellan et la galaxie naine du Sagittaire. La Galaxie d'Andromède et son système de satellites.

#### **Propriétés et évolution des galaxies distantes (10.5h) - 3.5 séances (3×3h + 1h30)**

1. Contexte et grandes structures. Faits observationnels, Grands relevés : les grandes structures de l'Univers, les amas de galaxies
2. Classification des galaxies. Les galaxies spirales et elliptiques. Les galaxies actives. Les galaxies primordiales. Les proto-amas.
3. La formation d'étoiles, croissance des galaxies. Bimodalité. Milieu interstellaire. La rétro-action des étoiles et des AGNs.
4. Evolution des galaxies. Interactions, effets de l'environnement. Les modèles numériques. L'ère des données massives, les instruments à venir.

### **Autres informations**

Le cours se déroulera en 2 grandes parties : La Voie Lactée (3.5 séances), les galaxies lointaines (3.5 séances).

### **Pré-requis**

Aucun pré-requis indispensable. Des notions d'évolution stellaire (F07 ou cours d'introduction de niveau M1), des systèmes de référence (équatorial et galactique, F01 ou F04) et des propriétés du Milieu Interstellaire (T07) seraient un atout.



## T09 Cosmologie : Univers primordial et grandes structures

Hervé Dole, IAS, Université Paris-Saclay ([Herve.Dole@u-psud.fr](mailto:Herve.Dole@u-psud.fr))  
Julien Grain, IAS, CNRS ([julien.grain@ias.u-psud.fr](mailto:julien.grain@ias.u-psud.fr))

### Objectifs

Ce cours présentera le modèle de concordance de la cosmologie moderne. Après un rappel du cadre homogène et isotrope (ou une introduction), nous introduirons le cadre inflationnaire de l'univers primordial, tant du point de vue des modèles d'expansion accélérée que du point de vue de l'origine quantique des fluctuations primordiales. Nous verrons ensuite comment les inhomogénéités qui en résultent croissent sous l'effet de la gravité, à travers les différentes ères cosmologiques, à toutes les échelles, pour donner naissance à la structuration de la matière en toile cosmique. On décrira la physique qui détermine les propriétés des anisotropies du Fond Diffus Micro-onde, ainsi que leurs aspects statistiques. On terminera par un aperçu du problème de l'accélération récente de l'expansion de l'Univers.

### Thèmes abordés – Déroulement

- Cosmologie homogène et isotrope, métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), modèle  $\Lambda$ CDM, distances en cosmologie
- Inflation : motivations (horizon, courbure), expansion accélérée primordiale, paramètres de roulement lent (cinématiques, dynamiques), modèles concaves, convexes, hybrides
- Inflation : génération des fluctuations scalaires et tensorielles, vide de Bunch-Davies, spectres de puissance, indices spectraux, running, relation de cohérence
- Croissance des inhomogénéités : instabilité de Jeans, modes sub- et super-horizon, évolution du spectre de puissance scalaire, oscillations acoustiques de baryons
- Effondrement gravitationnel, modèle sphérique, fonction de masse des halos
- Fond Diffus Micro-onde : physique des anisotropies primaires, spectre de puissance angulaire des anisotropies de température, modes E et B de polarisation, anisotropies secondaires
- Accélération de l'expansion cosmique et modèles d'énergie sombre

### Autres informations

### Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable. Avoir suivi le cours F03 est un atout. Autres pré-requis conseillés : avoir entendu parler du principe de moindre action ; être familier de la mécanique lagrangienne ; avoir quelques notions de statistiques (fonctions de corrélation, spectres de puissance) ; posséder quelques souvenirs de base de mécanique quantique ; ne pas craindre de faire quelques calculs formels.

## T10 Equations cinétiques pour les systèmes à grand nombre de particules

Jean-Pierre Marco, Sorbonne Université ([jean-pierre.marco@imj-prg.fr](mailto:jean-pierre.marco@imj-prg.fr))

### Objectifs

L'objectif de ce cours est de donner une première approche mathématique - en évitant tout détour technique superflu - des équations cinétiques à partir du modèle de Vlasov-Poisson. Ce dernier est une équation aux dérivées partielles dont la fonction inconnue est la densité normalisée des particules. C'est un modèle dit "de champ moyen", dans lequel les interactions entre particules sont newtoniennes et les collisions sont négligées. L'équation est non linéaire, ce qui rendra nécessaire la définition détaillée de solution faible associée à une donnée de Cauchy ; le but sera ensuite d'en montrer l'existence et d'interpréter son sens physique.

### Thèmes abordés – Déroulement

- Les premières séances seront dédiées à la construction de quelques équations cinétiques (Boltzmann, Vlasov-Poisson, Fokker-Planck) et à leur interprétation physique.
- On rappellera ensuite quelques outils de base en analyse fonctionnelle, notamment liées à la compacité et la convergence faible dans les espaces  $L^p$ .
- On définira ensuite la notion de solution faible et on en étudiera l'existence pour l'équation de Vlasov-Poisson au moyen d'outils mathématiques usuels dans ce domaine : méthode des caractéristiques, inégalité de Hardy-Sobolev-Littlewood, régularisation, convergence faible.
- La pertinence physique des solutions sera enfin discutée, en se basant en particulier sur le livre *Galactic Dynamics* de Binney et Tremaine (2<sup>e</sup> édition).

### Autres informations

Le cours sera accompagné d'un polycopié en cours d'élaboration

### Pré-requis

Toutes les connaissances de base en analyse fonctionnelle seront rappelées. Il est conseillé de connaître quelques rudiments de topologie (comme exposés par exemple dans le tome 1 des *Éléments d'Analyse*) de J. Dieudonné. On pourra aussi survoler le livre *Analyse fonctionnelle* de H. Brézis.

## CTP01 Méthodes statistiques et Analyse de données

Karim Benabed, IAP - Sorbonne Université ([benabed@iap.fr](mailto:benabed@iap.fr))  
Emeric Bron, LERMA - Observatoire de Paris ([emeric.bron@obspm.fr](mailto:emeric.bron@obspm.fr))  
Alexis Coleiro, APC - Université Paris Cité ([coleyro@apc.in2p3.fr](mailto:coleyro@apc.in2p3.fr))  
Clothilde Laigle, IAP - Sorbonne Université ([laigle@iap.fr](mailto:laigle@iap.fr))  
Damien Le Borgne, IAP - Sorbonne Université ([leborgne@iap.fr](mailto:leborgne@iap.fr)) (cours)  
Raphaël Raynaud, AIM - Université Paris Cité ([raphael.raynaud@cea.fr](mailto:raphael.raynaud@cea.fr))

### Objectifs

L'objectif de cette série de cours et TP est de permettre aux étudiants d'acquérir les concepts et la pratique de moyens contemporains d'analyse statistique des données dans un contexte d'astronomie-astrophysique. Les notions théoriques seront illustrées par de nombreux exemples concrets et mises en pratique dans des exercices de programmation en langage Python.

### Thèmes abordés – Déroulement

- **Cours 1 - TP 1** : Représentation des signaux et des données, variables aléatoires, lois de probabilité, tirage, processus stationnaires, ergodiques, estimateurs des moments d'une distribution statistique, matrice de covariance.
- **Cours 2 - TP 2** : Lois de probabilité usuelles, description des données, analyse en composantes principales, modèles de données, transformée de Fourier, filtrage.
- **Cours 3 - TP 3** : Inférence statistique, test de Kolmogorov-Smirnov, bootstrap, signification statistique, distances, loi et test du  $\chi^2$ , degrés de liberté, erreurs corrélées.
- **Cours 4 - TP3/4** : Théorème de Bayes, maximum de vraisemblance, critères d'information (BIC, AIC), information de Fisher, limite Cramér-Rao.
- **Cours 5 - TP 4** : Inférence Bayésienne, méthodes Monte Carlo par chaînes de Markov, régions de confiance.
- **Cours 6 - TP 5** : Introduction au machine learning

### Autres informations

L'enseignement comporte 6 séances de cours de 2h accompagnés de 5 séances de travaux pratiques de 4h. Ces TPs seront réalisés en langage Python sur les ordinateurs de Meudon et de l'Institut d'Astrophysique de Paris. Le premier TP inclut une formation succincte au langage Python et aux principales bibliothèques scientifiques. Le contrôle des connaissances se fera par un travail à rendre dans un délai d'une semaine après certaines séances de TP.

### Pré-requis

Aucun pré-requis indispensable.

## CTP02 Méthodes numérique et calcul scientifique

**Benoît Semelin**, LERMA, Sorbonne Université ([benoit.semelin@obspm.fr](mailto:benoit.semelin@obspm.fr)) (cours)  
**Christian Balança**, LERMA, Observatoire de Paris ([christian.balanca@obspm.fr](mailto:christian.balanca@obspm.fr))  
**Renaud Belmont**, AIM, Université Paris Cité ([renaud.belmont@cea.fr](mailto:renaud.belmont@cea.fr))  
**Jacques Le Bourlot**, LERMA, Université Paris Cité ([jacques.lebourlot@obspm.fr](mailto:jacques.lebourlot@obspm.fr))  
**Yann Rasera**, LUTH, Université Paris Cité ([yann.rasera@obspm.fr](mailto:yann.rasera@obspm.fr))  
**Daniel Reese**, LESIA, Observatoire de Paris ([daniel.reese@obspm.fr](mailto:daniel.reese@obspm.fr))

### Objectifs

L'objectif de ce cours-TP est, d'une part, de donner une base de connaissance solide des méthodes numériques de base utilisées en calcul scientifique et d'autre part d'affiner les compétences des étudiants en terme de programmation en langage compilé (C/Fortran). Le but est d'amener les étudiants à un savoir-faire suffisant pour commencer un travail de thèse contenant un volet numérique.

### Thèmes abordés – Déroulement

- **Cours 1** : Environnement Unix, langages compilés. Dérivation intégration.
- **Cours 2** : Interpolation. Algèbre linéaire (résolution d'un système, diagonalisation, inversion, conditionnement). Utilisation de bibliothèques
- **Cours 3** : Résolution d'équations non-linéaires, problèmes d'optimisation
- **Cours 4** : Introduction à la programmation parallèle
- **Cours 5** : Résolution d'équations différentielles ordinaires
- **Cours 6** : Résolution d'équations aux dérivées partielles
- **TP 1** : Programmation en langage compilé, méthodes numériques de base.
- **TP 2** : Intégration, algèbre linéaire
- **TP 3** : Equations non-linéaires. Parallélisme.
- **TP 4** : Equations différentielles ordinaires
- **TP 5** : Résolution d'équations différentielles ordinaires
- **Cours 6 - TP 6** : Equations aux dérivées partielles

### Autres informations

L'UE est organisée en 6 cours de 2h et 5 TP de 4h

### Pré-requis

Il est nécessaire pour les étudiants d'acquérir une première expérience d'utilisation de C ou Fortran avant le début de l'enseignement. Seul le premier TP sera consacré à une familiarisation avec la programmation en langage compilé : c'est insuffisant si l'on part de zéro pour arriver au niveau d'aisance souhaitable pour la suite de l'UE.

## M01 Instrumentation, observations et haute résolution angulaire

Kevin Barjot, LESIA, Observatoire de Paris ([kevin.barjot@observatoiredeparis.psl.eu](mailto:kevin.barjot@observatoiredeparis.psl.eu))  
Catherine Boisson, LUTH, Observatoire de Paris ([catherine.boisson@obspm.fr](mailto:catherine.boisson@obspm.fr))  
Pascal Gallais, AIM, CEA et Observatoire de Paris ([pascal.gallais@obspm.fr](mailto:pascal.gallais@obspm.fr))  
Eric Gendron, LESIA, Observatoire de Paris ([eric.gendron@obspm.fr](mailto:eric.gendron@obspm.fr))  
Elsa Huby, LESIA, Observatoire de Paris ([elsa.huby@obspm.fr](mailto:elsa.huby@obspm.fr))  
Pierre Kervella, LESIA, Observatoire de Paris ([pierre.kervella@obspm.fr](mailto:pierre.kervella@obspm.fr))  
Jean-Michel Martin, GEPI, Observatoire de Paris ([Jean-Michel.Martin@observatoiredeparis.psl.eu](mailto:Jean-Michel.Martin@observatoiredeparis.psl.eu))  
Frédéric Merlin, LESIA, Université Paris Cité ([frederic.merlin@obspm.fr](mailto:frederic.merlin@obspm.fr))  
Guy Perrin, LESIA, Observatoire de Paris ([guy.perrin@obspm.fr](mailto:guy.perrin@obspm.fr))

### Objectifs

L'objectif de cet enseignement méthodologique est de donner aux étudiants, au travers d'applications pratiques et concrètes, une formation conséquente instrumentale et observationnelle en astrophysique, renforcée dans le domaine de la haute résolution angulaire. Les étudiants en binôme devront choisir un des cinq projets d'observation suivants : spectroscopie haute résolution, imagerie infrarouge proche, interférométrie optique des tavelures, interférométrie optique par masquage de pupille, radio interférométrie solaire. Des séances dédiées à la haute résolution angulaire permettront d'approfondir la formation d'image, l'optique adaptative et l'interférométrie optique longue base.

### Thèmes abordés – Déroulement

L'enseignement se compose de deux grandes parties :

1. Un projet d'observations astrophysiques qui fera l'objet d'une étude instrumentale détaillée : mise en œuvre, caractérisation, étalonnage au laboratoire et sur le ciel, observations astrophysiques et analyse des résultats. Ce projet se déroule en binômes sur 8 séances dont 1 séance de revue à mi-parcours.
2. Une étude approfondie des techniques de haute résolution angulaire qui permettent de maximiser le pouvoir de résolution des télescopes optiques et d'augmenter le contraste dans les données obtenues. Les séances s'adressent à tous les étudiants simultanément et sont composées de cours et travaux pratiques sur la formation d'image (1 séance), l'optique adaptative (2 séances) et l'interférométrie optique longue base (4 séances).

Le déroulement de l'enseignement est le suivant :

- séance 1 : présentation de l'enseignement, organisation et sécurité, constitution des binômes, rappel de quelques bases pour la prise d'image
- séance 2 : haute résolution angulaire
- séances 3 à 5 : projets d'observation
- séances 6 à 8 : haute résolution angulaire
- séance 9 : présentation à mi-parcours des projets d'observation
- séances 10 à 12 : haute résolution angulaire
- séances 13 à 15 : projets d'observation

### Autres informations

Pour les projets d'observation, les étudiants devront passer 3 à 4 soirées sous la coupole.

### Pré-requis

Pratique de Python (CTP01). Avoir suivi le cours F01 est un atout.

## M02 Projets Expérimentaux Astrophysique de laboratoire

Jean-Hugues Fillion, LERMA, Sorbonne Université ([jean-hugues.fillion@obspm.fr](mailto:jean-hugues.fillion@obspm.fr))  
Xavier Michaut, LERMA, Sorbonne Université ([xavier.michaut@obspm.fr](mailto:xavier.michaut@obspm.fr))

### Objectifs

Cet enseignement méthodologique a pour but de se familiariser avec la recherche en astrophysique de laboratoire. Le projet permettra d'appréhender concrètement comment simuler, en laboratoire terrestre, le comportement de la matière en conditions extrêmes (vide poussé, effets de rayonnements ionisants, très basses températures) afin d'extraire des informations clés pour aider à l'interprétation des observations en astrophysique.

### Thèmes abordés – Déroulement

Le travail en laboratoire délivrera un apprentissage sur les aspects suivants :

- Initiation aux techniques usuelles pour la caractérisation expérimentale sur des instruments de pointe dédiés à la recherche : emploi de détecteurs calibrés, préparation contrôlée d'échantillons, exploitation de techniques de mesures telles que la spectroscopie infrarouge en phase gazeuse ou solide, la spectroscopie de masse, la désorption programmée en température, la spectroscopie par laser...
- Analyse et exploitation des données instrumentales. Cette partie pourra impliquer des développements ou l'utilisation de codes informatiques de traitement et de simulation de données pour aider à interpréter la mesure (MathLab, Pgopher, Simion, ...)
- Exploitation et mise en forme des données pour extraire des valeurs calibrées et pertinentes pour l'astrophysique à grande échelle. Interprétation des résultats et analyse critique de leurs importances dans le contexte astrophysique.

Les études proposées pour l'année 2019-2020 portent sur les thématique suivantes :

1. Interaction du rayonnement UV-X avec des analogues de glaces interstellaires/cométaires pour quantifier et modéliser les échanges de matière solide/gas.
2. Equilibration des états de spin nucléaire de l'eau à basses températures pour tracer l'histoire thermique de la matière moléculaire dans l'univers.

### Autres informations

- Le travail (15 séances) se répartira entre étude bibliographique et initiation aux expériences (typiquement 3 séances), séance d'expérimentations (typiquement 8 séances), exploitation, analyse et interprétation des résultats (typiquement 4 séances). Les séances sont programmées en demi-journée sur un après-midi ou seront groupées en journée complète afin de permettre la mise en œuvre des expériences (typiquement 4 journées complètes).
- Le projet se déroulera sur le Campus Pierre et Marie Curie (Jussieu) sur les plateformes expérimentales SPICES ou CoSpiNu.
- l'évaluation se déroule sous la forme d'une présentation de 20 minutes suivie de questions.

### Pré-requis

De la curiosité pour l'expérimentation.

## **M03** Projets d'analyse de données et d'interprétation : Photométrie et relevés profonds

**Marian Douspis, IAS, Université Paris-Saclay** ([marian.douspis@ias.u-psud.fr](mailto:marian.douspis@ias.u-psud.fr))  
**Bruno Maffei, IAS, Université Paris-Saclay** ([bruno.maffei@ias.u-psud.fr](mailto:bruno.maffei@ias.u-psud.fr))

### **Objectifs**

Cet enseignement méthodologique est axé sur l'interprétation des observations cosmologiques. L'objectif est de faire le lien entre les moyens d'observation (détecteurs), les observations elles-mêmes et les résultats scientifiques en se frottant au bruit, aux systématiques instrumentales et aux analyses statistiques. Les données Planck, de grands relevés en optique, ainsi que des simulations réalistes seront analysées avec des outils statistiques classiques (spectre de puissance, ...) ainsi que des techniques plus novatrices (machine learning).

### **Thèmes abordés – Déroulement**

- Les premières séances comporteront une introduction sur la détection bolométrique, les notions de bruits et effets systématiques sur la mesure avec potentiellement quelques manip expérimentales simples. Puis les séances seront dédiées à la prise en main à la fois des données et des outils d'analyses : cartes Planck en fréquences, catalogues de sources galactiques et extragalactiques, utilisation de bibliothèques python dédiées aux cartes tout-le-ciel (healpix), mise en place de système de version de code (gitlab).
- La deuxième partie sera axée sur le traitement des données proprement dit pour fabriquer des produits prêts pour l'analyse scientifique : carte de composantes, spectre de puissance, cartes et spectres de bruits, estimation des systématiques, catalogues de sources.
- Enfin l'analyse scientifique sera faite dans la troisième partie afin de déduire par exemple les paramètres cosmologiques à partir des cartes reconstruites du fond diffus cosmologique ou bien valider le catalogue de sources.

### **Autres informations**

- Les séances de méthodologie s'étaleront sur 15 semaines : 2 séances se feront sur un après-midi, les autres seront réparties sur des journées entières distribuées sur les semaines restantes.
- La méthodologie se déroulera dans la salle informatique de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, Orsay), sur des ordinateurs équipés des bibliothèques Python nécessaires et hébergeant les données principales. Les différents sujets spécifiques seront effectués par binôme.
- L'évaluation se fait sur des critères en contrôle continu, sur un rapport écrit de quelques pages et une soutenance finale. L'ensemble des critères sont : implication, compréhension/bibliographie, initiative, travail, présentation (fond, forme, questions, contexte), rapport.

### **Pré-requis**

Des notions de Python (CTP01), de programmation (CTP02) et de cosmologie (T09 ou cours d'introduction de niveau M1) sont souhaitées mais pas nécessaires.

## M04 Projets d'analyse de données et d'interprétation : Spectroscopie et diagnostics

Emilie Habart, IAS, Université Paris-Saclay ([emilie.habart@ias.u-psud.fr](mailto:emilie.habart@ias.u-psud.fr))  
Antoine Gusdorf, LPENS, Ecole Normale Supérieure ([antoine.gusdorf@lra.ens.fr](mailto:antoine.gusdorf@lra.ens.fr))

### Objectifs

Cet enseignement méthodologique est centré sur l'exploitation scientifique de données spectroscopiques multi-longueur d'onde (galactiques et extra-galactiques), la modélisation physico-chimique à l'aide de codes utilisés par la communauté internationale, et les diagnostics de conditions astrophysiques associés. L'enseignement est structuré en projets visant à interpréter des données spectroscopiques obtenues avec des télescopes modernes ou simulées pour les futurs instruments. Les codes de modélisation physico-chimique proposés traitent de processus à l'oeuvre dans la plupart des objets astrophysiques, i.e. de l'interaction matière-rayonnement et du dépôt d'énergie par choc.

Buts pédagogiques :

1. Se familiariser avec la manipulation et l'analyse de cubes de spectro-imagerie obtenus avec des télescopes sol et spatiaux (IRAM, *Herschel*, *Spitzer*, VLT, SOFIA, APEX). Préparer les étudiants à l'exploitation des données JWST en utilisant des cubes spectraux simulés.
2. Compréhension de diagnostics astrophysiques dans le milieu interstellaire proche et les galaxies externes. Se familiariser et utiliser deux codes de modélisation physico-chimique de la plateforme MIS & Jets (régions de photo-dissociation PDR et chocs). Simuler l'état de la matière pour différents environnements astrophysiques.

### Thèmes abordés – Déroulement

Cette méthodologie s'organise autour de 2 axes principaux, chacun représentant 50% du volume des projets :

- (a) Analyse et exploitation de données spectroscopiques : fabrication de cartes spectrales et de continuum, convolution de données d'une même espèce chimique à une même résolution spatiale, ajustement de profils spectraux, cinématique, fabrication de diagrammes position-vitesse et de diagrammes d'excitation.
- (b) Modélisation physico-chimique et ajustement de modèles : modélisation de l'excitation du gaz moléculaire, atomique et ionisé et de l'émission de la poussière. Comparaison aux résultats observationnels : utilisation d'outils d'ajustement de cartes spectrales, ajustement de diagrammes d'excitation de H<sub>2</sub> et CO. Extraction des conditions physiques (champ de rayonnement, densité, température, vitesses de chocs, champ magnétique, etc.).

Déroulement de la méthodologie : (1) présentation des motivations et objectifs de la méthodologie, ainsi que de notions indispensables sur le milieu interstellaire ; (2) choix des projets et 'hands-on session' sur les outils d'analyse des données mis à disposition ; (3) démarrage des projets et point à mi-parcours pour discuter du travail et des résultats obtenus et des difficultés rencontrées ; (4) présentation d'une synthèse du travail et des résultats obtenus : court rapport et soutenance orale (~20 minutes).

### Autres informations

Les séances se dérouleront dans la salle informatique de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, Orsay) et s'étaleront sur 7 semaines et demie (7 séances sur des journées entières et une séance sur un après-midi).

### Pré-requis

Pratique du Python (CTP01)



## M05 Projets d'analyse de données et d'interprétation : Étoiles et petits corps

Misha Haywood, GEPI, Observatoire de Paris ([misha.haywood@obspm.fr](mailto:misha.haywood@obspm.fr))  
Sonia Fornasier, LESIA, Université Paris Cité ([sonia.fornasier@obspm.fr](mailto:sonia.fornasier@obspm.fr))

### Objectifs

Compréhension et application des méthodologies de réduction spectrale et de modélisation des données astronomiques, via la simulation et l'ajustement de modèles à des observations.

### Thèmes abordés – Déroulement

La spectroscopie est un outil essentiel en astrophysique pour contraindre les propriétés physiques (composition chimique, température, vitesse..) des différents corps célestes : surface et atmosphère des planètes et des petits corps, atmosphères stellaires, galaxies, etc. La comparaison ou l'ajustement de modèles et de données est, elle, fondamentale pour notre compréhension et interprétation des phénomènes astronomiques.

1. **Première partie : présentation des méthodologies enseignées aux étudiants** : outils et méthodes d'observations en astronomie depuis le sol et l'espace, méthodes de réduction des données en spectroscopie appliquées à un échantillon de spectres d'astéroïdes, modélisation des spectres ; modélisation Monte-Carlo d'un diagramme HR d'un amas galactique, comparaisons avec les observations d'un amas, détermination des ses paramètres physiques.
2. **Deuxième partie : Approfondissement avec deux applications pratiques**  
Après ces séances introductives les étudiants approfondiront la méthodologie avec une des deux applications suivantes :
  - A) **Analyse et interprétation des spectres**  
Les étudiants appliqueront les techniques de réduction spectroscopiques sur des astéroïdes géocroiseurs : correction des différents artefacts induits par le CCD, extraction des spectres et correction du signal du fond de ciel, étalonnage en longueur d'onde, correction de l'extinction atmosphérique, calibration absolue des données, spectre en réflectance et analyse des sources d'erreur. Les spectres obtenus seront modélisés pour contraindre la taxonomie et la composition de surface des astéroïdes.
  - B) **Simulation d'un diagramme HR et détermination des paramètres du diagramme HR simulé**  
Nous construirons un diagramme HR d'un amas à partir des mouvements propres d'étoiles dans l'archive GAIA. Une modélisation Monte-Carlo de la distribution des étoiles sera ensuite construite à partir de fonctions théoriques de l'âge, de la métallicité, et de la fonction de masse initiale, et comparée aux observations. Enfin, les paramètres physiques de cet amas (âge, métallicité, fonction de masse initiale) seront déterminés par la méthode de Monte-Carlo Markov Chain.

### Autres informations

Le cours sera sous forme de TP. Logiciels utilisés : Python et systèmes d'analyses astronomiques basées sur Python comme PyMidas ; tool online M4AST pour la modélisation des spectres d'objets sans atmosphère. Des photocopies de cours seront fournis.

### Pré-requis

Connaissance de Python (CTP01) et des bases de programmation (CTP02).

## M06 Projets de modélisation numérique

Franck Le Petit, LERMA, Observatoire de Paris ([Franck.LePetit@obspm.fr](mailto:Franck.LePetit@obspm.fr))

Zakaria Meliani, LUTH, Observatoire de Paris ([Zakaria.Meliani@obspm.fr](mailto:Zakaria.Meliani@obspm.fr))

Yann Rasera, LUTH, Université Paris Cité ([Yann.Rasera@obspm.fr](mailto:Yann.Rasera@obspm.fr))

### Objectifs

L'objectif de la méthodologie est d'acquérir des connaissances et des savoir-faire sur le développement de modèles numériques simulant des problèmes astrophysiques. Les projets proposés sont caractéristiques de types de problèmes pouvant être rencontrés en recherche. Outre l'apprentissage de méthodes numériques, cette méthodologie permettra aussi d'acquérir des compétences en développement de code, sur l'utilisation d'outils de programmation (système de gestion de versions, documentation de code, bibliothèques numériques) et sur l'exploitation de moyens de calculs intermédiaires.

### Thèmes abordés – Déroulement

Trois projets sont proposés. Pour chacun, l'approche suggérée correspond à des méthodes couramment utilisées dans les équipes de recherche. Chacun des projets est très ouvert et il est possible d'explorer des pistes non prévues tant du côté des méthodes numériques que du problème astrophysique étudié.

- **Modélisation d'instabilités thermiques dans un disque d'accrétion autour d'un trou noir.** Ce projet nécessite de résoudre plus d'une dizaine d'équations physiques couplées dont deux équations aux dérivées partielles (EDP). Il est l'occasion d'apprendre à résoudre des EDP par des schémas numériques implicites et explicites et de choisir la méthode et les pas d'intégration en fonction de l'état physique du système. Le code étant long à programmer, il est habituellement développé par un groupe de 6 étudiants travaillant en mode projet.

- **Diffusion de photons par méthode Monte Carlo.** Les méthodes Monte Carlo sont basées sur des tirages de nombres aléatoires qui simulent statistiquement des lois physiques. Elles sont utilisées pour résoudre de nombreux types de problèmes. Ce projet sera l'occasion d'apprendre à maîtriser ces méthodes sur le cas particulier de la diffusion de photons à travers une atmosphère, problème courant dans de nombreux domaines de l'astrophysique. Les simulations Monte Carlo pouvant être lourdes, ce projet sera aussi l'occasion d'apprendre à utiliser un cluster de calcul et de faire de la parallélisation de code.

- **Collision et structure de galaxies.** Dans ce projet, il s'agira de simuler la dynamique d'une distribution d'étoiles auto-gravitantes. Simuler l'évolution de chaque étoile en interaction avec toutes les autres n'est pas possible en raison du grand nombre d'étoile. Ici, on résoudra le problème en résolvant l'équation de Boltzmann sans collisions (équation de Vlasov-Poisson). Ce projet sera l'occasion d'acquérir des compétences sur des méthodes "Cloud in Cell" et de calcul de potentiels sur grille par résolution de l'équation de Poisson via la méthode de Jacobi ou de Gauss Seidel.

### Autres informations

Les séances de méthodologie s'étaleront sur 15 semaines.

La méthodologie se déroulera dans la salle informatique des M2 sur le site de Meudon.

L'évaluation se fera sur un rapport écrit et une soutenance finale. L'ensemble des critères sont : implication, compréhension, initiative, travail personnel et en groupe, présentation (fond, forme, question, contexte), rapport.

### Pré-requis

Les codes numériques seront réalisés de préférence en Fortran (C est également possible). L'exploitation des résultats sera faite en python. Les cours-TP CTP01 et CTP02 sont des pré-requis.

## **001** Stage d'observation à l'OHP : complémentarité sol – espace

Noël Robichon (resp.), GEPI, Observatoire de Paris ([noel.robichon@obspm.fr](mailto:noel.robichon@obspm.fr))

Hervé Dole (resp.), IAS, université Paris-Saclay ([Herve.Dole@u-psud.fr](mailto:Herve.Dole@u-psud.fr))

Cateline Lantz, IAS, université Paris-Saclay ([cateline.lantz@ias.u-psud.fr](mailto:cateline.lantz@ias.u-psud.fr))

Lucie Maquet, IMCCE, Observatoire de Paris ([lucie.maquet@obspm.fr](mailto:lucie.maquet@obspm.fr))

Henry J. McCracken, IAP, Sorbonne université ([hjmcc@iap.fr](mailto:hjmcc@iap.fr))

### **Objectifs**

- Techniques d'observation : imagerie, photométrie, spectroscopie, systèmes de coordonnées, planification d'observation
- Analyse scientifique de données : analyse des raies (paramètres physiques des étoiles, rotation et composition des planètes, astéroïdes...), courbes de lumière (exoplanète, étoile double, astéroïde...), trichromie.
- Complémentarité sol / espace / big data : utilisation de Gaia, Planck, préparation Euclid, Plato, bases de données VO, CFHT

Nous privilégierons l'observation et l'analyse de données afin de permettre une maîtrise de l'imagerie, spectroscopie et photométrie en vue de mener un mini-projet scientifique. Dans ce cadre, le traitement de données sera automatisé, afin de permettre aux étudiants de se concentrer sur les autres aspects d'observation et analyse, et ainsi de saisir les clefs de l'astrophysique observationnelle contemporaine : multi-instrumentale, multi-technique, faisant appel aux grands bases de données, et surtout à la complémentarité sol-espace.

### **Thèmes abordés – Déroulement**

Les étudiants travailleront sur des mini-projets en binômes. Le stage durera 7 jours et 6 nuits dont 5 nuits d'observation au T152 (spectroscopie), T120 et T80 (imagerie et photométrie) afin de mener à bien les nuits d'initiation et de projets. Chaque binôme passera au moins une nuit sur chaque télescope. Chaque mini-projet a un lien avec une mission spatiale européenne structurante, et éventuellement des données de relevés accessibles en VO, afin de former les étudiants aux enjeux de l'astrophysique du XXI<sup>e</sup> siècle. Les soutenances auront lieu sur place le dernier soir. Exemples de mini-projets

- astéroïdes position, courbe de lumière (T80, T120) - lien avec Gaia
- minor planet center : confirmation de NEO
- amas d'étoiles, métallicité (T152) - lien avec Gaia
- étoiles, classification spectrale, diagramme HR (T152) - lien avec Gaia
- étoiles variables en photométrie et spectrométrie : binaires à éclipses ou Céphéïdes, RR Lyrae, delta scuti : photométrie et spectro (vitesse radiale, courbe de lumière)
- transits d'exoplanètes (T80, T120) - lien avec Gaia, Plato
- imagerie d'amas de galaxies, comptages de galaxies (T120) et comparaison avec CFHT - lien avec Planck, Euclid

### **Autres informations**

### **Pré-requis**

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.

## 002 Stage d'observation à l'OHP : instrumentation & observation

**Catherine Boisson, LUTH, Observatoire de Paris** ([catherine.boisson@obspm.fr](mailto:catherine.boisson@obspm.fr))  
**Matteo Cerruti, APC, Université Paris Cité** ([cerruti@apc.in2p3.fr](mailto:cerruti@apc.in2p3.fr))  
**Stéphane Erard, LESIA, Observatoire de Paris** ([stephane.erard@obspm.fr](mailto:stephane.erard@obspm.fr))  
**Pascal Gallais (resp.), AIM, CEA et Observatoire de Paris** ([pascal.gallais@obspm.fr](mailto:pascal.gallais@obspm.fr))  
**Damien Gratadour, LESIA, Université Paris Cité** ([damien.gratadour@obspm.fr](mailto:damien.gratadour@obspm.fr))  
**Andreas Zech (resp.), LUTH, Observatoire de Paris** ([andreas.zech@obspm.fr](mailto:andreas.zech@obspm.fr))

### Objectifs

Durant cette semaine de stage, quatre télescopes de l'OHP, chacun équipé d'une instrumentation spécifique, seront utilisés pour mener à bien des mini programmes scientifiques basés sur observations en imagerie et en spectroscopie, dans le visible et l'infrarouge proche. L'objectif est de se former aux différents outils de l'astrophysique observationnelle moderne en menant des observations dans des conditions favorables. Tous les aspects de la chaîne de mesure seront abordés, de l'analyse de l'instrument jusqu'à l'interprétation des résultats, en passant par l'établissement des procédures d'observation, par la recherche de cibles pertinentes et par l'identification des sources de bruit introduit tout au long de la chaîne de mesure, en s'appuyant aussi sur une recherche bibliographique raisonnable.

### Thèmes abordés – Déroulement

Le stage s'appuie sur l'exploitation de quatre télescopes de l'OHP sur lesquels sont installés différents instruments :

- le T80 équipé d'une caméra CCD et des filtres U, B, V, R et H $\alpha$
- le T1m suisse équipé d'une expérience de "haute résolution angulaire" consistant en un analyseur de front d'onde couplé à une voie d'imagerie des tavelures.
- le T120 équipé d'une caméra infrarouge proche de type NICMOS et des filtres J, H et K
- le T152 équipé du spectromètre à haute résolution spectrale "Aurélié" avec un grand choix de réseaux

Plusieurs programmes scientifiques sont proposés tels que :

- Étude de galaxies à formation d'étoiles par bouffées,
- Réalisation du diagramme HR d'amas globulaires et d'amas ouverts,
- Étude de l'excitation dans les nébuleuses planétaires et/ou noyaux actifs de galaxies,
- Résolution de systèmes binaires proches, séparation "sub-seeing", ...

Les étudiants sont répartis en binômes/trinômes. Chaque groupe observera 2 nuits sur un télescope puis 2 nuits sur un autre. La dernière nuit sera dédiée à un instrument qu'ils n'auront pas utilisé les nuits précédentes. Le travail proposé se décompose en trois phases principales :

- Préparer et réaliser le programme d'observation : définir la stratégie d'observation, rechercher les sources à observer (objets, références,...), observer.
- Réduire et interpréter les données,
- Réaliser la synthèse et présenter les résultats.

Des réunions seront programmées pour présenter l'avancement des projets, discuter les méthodes mises en œuvre, préciser des notions fondamentales...

### Autres informations

### Pré-requis

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.

## **003** Stage d'observations en radioastronomie à la Station de Nançay

**Stéphane Corbel (resp.), AIM, Université Paris Cité** ([stephane.corbel@cea.fr](mailto:stephane.corbel@cea.fr))  
**Julien Girard, AIM, Université Paris Cité** ([julien.girard@cea.fr](mailto:julien.girard@cea.fr))  
**Jean-Mathias Griessmeier, LPC2E, Univ. d'Orléans** ([jean-mathias.griessmeier@cnrs-orleans.fr](mailto:jean-mathias.griessmeier@cnrs-orleans.fr))  
**Lucas Guillemot, LPC2E, Univ. d'Orléans** ([lucas.guillemot@cnrs-orleans.fr](mailto:lucas.guillemot@cnrs-orleans.fr))  
**Jean-Michel Martin, GEPI, Observatoire de Paris** ([jean-michel.martin@obspm.fr](mailto:jean-michel.martin@obspm.fr))  
**Cyril Tasse, GEPI, Observatoire de Paris** ([cyril.tasse@obspm.fr](mailto:cyril.tasse@obspm.fr))

### **Objectifs**

La radioastronomie vit actuellement une période d'activité intense avec la construction de nouveaux radiotélescopes très sensibles à travers le monde et cela dans différentes gammes de fréquences, l'ouverture vers les basses fréquences étant récemment permises grâce à de nombreuses innovations technologiques et algorithmiques. La Station de Nançay héberge de nombreux instruments à la pointe des observations radio et ceux-ci seront donc au cœur de ce stage d'observations afin de familiariser les étudiants avec les méthodes et les techniques d'observations en radioastronomie.

### **Thèmes abordés – Déroulement**

Nous proposons plusieurs projets d'observations qui se dérouleront sur l'ensemble de la semaine à la Station de Nançay. Les projets utiliseront les données acquises par le grand radiotélescope de Nançay (NRT), la station LOFAR FR606 et le nouveau radio télescope basse fréquence NenuFAR qui vient d'être ouvert aux observations scientifiques. Le stage est basé sur l'observation et l'analyse de données afin de permettre une maîtrise de l'imagerie, de la spectroscopie, des techniques de chronométrage des pulsars, et des mesures temps-fréquence en vue de mener un mini-projet scientifique. Dans ce cadre, les étudiants seront confrontés aux techniques de programmation des observations et au traitement de données avec les outils les plus récents disponibles à la communauté. Exemples de mini-projet pouvant être appliqué à diverses sources :

- Étude du contenu en gaz HI de galaxies avec le NRT
- Étude de la polarisation des ondes radio dans les quasars avec le NRT
- Chronométrie de pulsars avec le NRT
- Observations de pulsars à basses fréquences avec LOFAR FR606
- Observations en imageries avec LOFAR en utilisant les algorithmes les plus récents
- Imagerie et observations temps fréquence avec NenuFAR
- ...

### **Autres informations**

Format : 5 jours, 4 nuits avec évaluation sur place le dernier jour. Le déroulement comprend une introduction aux sujets proposés, la préparation des observations, le traitement des données et leur interprétation. Une présentation orale évaluée des résultats par les étudiants le vendredi permet aux différents binômes de partager les connaissances acquises.

### **Pré-requis**

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 et T01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.

## **O04** Stage d'observation en radioastronomie millimétrique à l'IRAM

**Pierre Guillard, IAP, Sorbonne Université** ([guillard@iap.fr](mailto:guillard@iap.fr))

### **Objectifs**

Le télescope de 30m de l'IRAM est localisé à Pico Veleta en Espagne à coté de Grenade. Depuis 2010 quatre étudiants de la promotion peuvent aller y observer pendant une semaine. Il s'agit d'une excellente expérience pour les étudiants, en particulier avec la mise en place récente de l'interféromètre ALMA de l'ESO au Chili. Le but de ce séjour d'observation sera donc de familiariser les étudiants avec un instrument de pointe dans le domaine millimétrique : techniques d'observations (continuum, spectroscopie), prise de données, réduction des données radioastronomiques, analyse et exploitation scientifique des données.

### **Thèmes abordés – Déroulement**

Les étudiants participent d'abord à 4 séances de 2h de cours/préparation des observations. Ces cours introduisent la problématique scientifique, les concepts de base de la radioastronomie, se familiariser avec le logiciel de visualisation et réduction des données. Ensuite nous nous rendons au télescope à Grenade pour 3 jours d'observations et de réduction des données. Sur place, les étudiants suivent un cours d'environ 2h sur la chaîne de détection hétérodyne des données. Puis les étudiants écrivent un rapport envoyé à la direction de l'IRAM et (si possible!) publient les résultats!

1. Introduction à la problématique scientifique de la proposition d'observation (mesure de la turbulence dans les flots proto-stellaires, cinématique des galaxies, etc.)
2. Concepts de base de la radioastronomie dans le domaine (sub-)mm
3. Caractéristiques de l'antenne et détection hétérodyne
4. Définition de la stratégie d'observation et préparation des scripts
5. Familiarisation avec CLASS, logiciel de réduction des données de l'IRAM.

### **Autres informations**

Ce stage ne peut accueillir qu'un tout petit nombre d'étudiant(e)s qui seront sélectionné(e)s sur leur motivation. Typiquement 4 séances d'introduction avant le départ avec des slides et des cours / documents en ligne disponibles.

### **Pré-requis**

- Pratique de Python (CTP01).
- Avoir suivi F01 et T01 est un atout mais n'est pas indispensable : il faut alors disposer de quelques connaissances de base en optique ondulatoire, photométrie, spectroscopie et systèmes de coordonnées célestes.