

# Syllabus M2 ASEP (version française)

## UE : EISUA3AM - Physique et astrophysique (15 ECTS)

EISUA3C1 – Processus de rayonnement et transfert radiatif / Radiative processes and radiative transfer

Objectif : Connaître les processus de rayonnement les plus fréquents en astrophysique ainsi que les bases du transfert radiatifs nécessaires à l'interprétation des données d'observation

- Rappels d'électromagnétisme : potentiels de Lié#769;nard-Wiechert ; rayonnement émis par des charges relativistes ou non : puissance et distribution angulaire ; approximation dipolaire.
- Rayonnement cyclo-synchrotron : puissance, polarisation, émission d'une distribution de particules ; absorption synchrotron.
- Diffusion Rayleigh.
- Diffusion Thomson et Compton ; Compton inverse ; diffusion par une distribution de particules ; diffusions multiples.
- Bremsstrahlung ; rayonnement mono-énergétique et thermique.
- Transfert de rayonnement : définitions; équation de transfert (ETR) et moments de l'ETR.
- Solution formelle de l'équation de transfert : lois de Kirchoff-Bunsen ; approximation d'Eddington-Barbier, équations de Schwarzschild-Milne ; équilibre thermodynamique local (ETL).
- Equilibre radiatif : température effective ; approximation de diffusion ; opacité de Rosseland ; le "cas gris" ; loi d'assombrissement centre-bord.
- Opacités : bilan détaillé ; fonction de partition ; l'ion H-, équilibre statistique ; bases de la classification spectrale ; notions de transfert hors-ETL.
- Physique de l'élargissement des raies spectrales
- Polarisation des raies spectrales.
- Transfert de rayonnement numérique.

Contenu :

Pré-requis : Electromagnétisme au niveau L3

Ouvrage(s) de référence : Jackson, "Electrodynamique Classique", Dunod 2001

Mots clés : Rayonnement dipolaire-cyclo-synchrotron; diffusion; Bremsstrahlung; équation du transfert; équilibre radiatif; opacité; polarisation

## EISUA3D1 – Gravitation

Objectif :	Introduire les étudiants à la Relativité Générale et ses premières applications <ul style="list-style-type: none"><li>• Les principes de relativité : Galiléenne, restreinte, générale. Principe d'équivalence.</li><li>• Analyse tensorielle et covariance : métrique, système de coordonnées, tenseur, connexion affine, géodésique, dérivée covariante, transport parallèle.</li><li>• Courbure de l'espace : tenseur de Riemann, déviation géodésique, identités de Bianchi.</li><li>• Equations d'Einstein, constante cosmologique.</li><li>• Applications de la relativité générale : métrique de Schwarzschild, décalage vers le rouge, avance du périhélie, déviation de la lumière, effet Shapiro; introduction aux trous noirs de Schwarzschild; tests modernes de la relativité générale.</li></ul>
Contenu :	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cinématique de l'univers : principe cosmologique, métrique FRW, mesures de distance, loi de Hubble</li><li>• Dynamique de l'univers : équations de Friedmann, exemples de solution, paramètres cosmologiques; modèle cosmologique standard.</li><li>• Introduction aux ondes gravitationnelles : solution linéarisée, polarisation; génération d'onde gravitationnelle; détection optique.</li></ul>
Pré-requis :	gravitation Newtonienne, relativité restreinte, notions sur la notation indicielle
Ouvrage(s) de référence :	- « Relativité Générale », A. Barrau et J. Grain, ISBN 978-2-10-056316-6 (Dunod)- « Relativité Générale », M.P. Hobson, G.P. Efstathiou, A.N. Lasenby,(DeBoeck)- « Gravitation and cosmology », S. Weinberg, ISBN 0-471-92567-5 (Wiley)
Mots clés :	gravitation, courbure, tenseur, trou noir, décalage vers le rouge, cosmologie, onde gravitationnelle.

## EISUA3D2 – Dynamique des fluides

Objectif :	<p>L'objectif de cette UE est de former les étudiants aux éléments de la mécanique des fluides les plus utilisés en astrophysique.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Petite revue de la Dynamique des fluides en Astrophysique. Stabilité des écoulements: généralités; l'analyse locale linéaire; l'analyse globale ou modale; les écoulements plans cisailés, théorème de Squire.</li><li>• Convection thermique : introduction; critère de Schwarzschild; approximation de Boussinesq; instabilité de Rayleigh-Bénard; convection turbulente: deux approches simples la théorie de longueur de mélange, modèle en couche limite.</li><li>• Fluides en rotation : introduction; rappels sur les nombres de Rossby et d'Ekman et sur l'écoulement géostrophique; ondes et modes propre des fluides en rotation; couche limite d'Ekman; exemples.</li></ul>
Contenu :	<ul style="list-style-type: none"><li>• Introduction à la turbulence : route vers la turbulence; turbulence développée - les symétries possibles; corrélations en deux points de la vitesse; spectres; dynamique de la turbulence universelle (théorie de Kolmogorov); équations de Karman-Howarth et de Kolmogorov</li><li>• Ondes de choc : introduction; formation d'une onde de choc; conditions de passage d'une discontinuité.</li><li>• Les dynamos fluides : rappels sur les fluides conducteurs; comment amplifier le champ magnétique - les théorèmes anti-dynamo; bases de la dynamo turbulente.</li></ul>
Pré-requis :	<p>Les bases de la mécanique des fluides (les équations du mouvement, les propriétés principales des écoulements de fluides parfaits, l'équation de l'énergie).</p>
Ouvrage(s) de référence :	<p>Rieutord M., "Une introduction à la dynamique des fluides", De Boeck, 2014, "Fluid Dynamics: an introduction", Springer, 2015. Drazin &amp; Reid, "Hydrodynamic stability", CUP, 1980</p>
Mots clés :	<p>Stabilité - Convection thermique - Fluides en rotation - Turbulence - Ondes de choc - Dynamos fluides</p>

## EISUA3D3 – Physique des plasmas spatiaux

Objectif :	Présentation des fondements mathématiques de la physique des plasmas (théorie cinétique et fluide) et de quelques grandes applications d'intérêt astrophysique et géophysique. Une part importante du cours est consacrée à la propagation des ondes et instabilités dans les plasmas. Une introduction à l'épineux problème de la reconnexion magnétique et à la physique des chocs est également proposée.
Contenu :	<ul style="list-style-type: none"><li>• Description cinétique d'un plasma : équation de Vlasov – Théorème de Liouville; application à la couche de Harris.</li><li>• Description fluide d'un plasma : dérivation des équations fluides; problème de la fermeture; MHD (rappels).</li><li>• Ondes dans les plasmas : modes électrostatiques de Langmuir; ondes électromagnétiques en plasma froid; ondes d'Alfvén; ondes électrostatiques en plasma chaud – amortissement Landau.</li><li>• Introduction à la reconnexion magnétique : problématique; modèle de Sweet-Parker.</li><li>• Chocs astrophysiques</li></ul>
Pré-requis :	Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique, description MHD d'un plasma
Ouvrage(s) de référence :	<i>Fundamentals of Plasma Physics</i> , Bellan P., Cambridge Univ. Press: Chap. 1-2-4-5-6-12 <i>Introduction to Plasma Physics with Space and Laboratory Applications</i> , Gurnett D. & Battacherjee A. Cambridge Univ. Press
Mots clés :	descriptions cinétique et fluide des plasmas, réponse linéaire d'un plasma, instabilités et amortissement Landau, reconnexion, chocs

## EISUA3E1 – Formation et évolution des systèmes planétaires

Objectif : Ce cours vise à donner des bases fondamentales et une vue large sur nos connaissances concernant la formation et l'évolution des systèmes planétaires, à la fois du point de vue des modèles proposés et des observations dont on dispose, notamment à travers les derniers résultats des missions d'exploration spatiale mais aussi en s'appuyant sur l'analyse des météorites.

### **A/ Formation et évolution des systèmes planétaires**

1/ Propriétés du gaz et des poussières des disques protoplanétaires. Evolution thermique, chimique, dynamique des disques. 2/ Formation des planètes telluriques et géantes via l'accrétion des planétésimaux. Atmosphère des (exo)planètes. Evolutions interne et orbitale des planètes (migration planétaire, interactions avec l'étoile). Confrontation des modèles de formation et d'évolution planétaires avec les observations des systèmes exoplanétaires.

Contenu :

### **B/ Formation des planètes du système solaire vue par l'étude des météorites et des petits corps**

Etude de l'histoire précoce du système solaire à partir des petits corps (astéroïdes, comètes, satellites). Présentation de la diversité pétrologique, minéralogique et chimique des météorites, et de leur origine en lien avec les missions spatiales en cours. Reconstruction de la chronologie du système solaire précoce (formation des premiers solides, différenciation interne) et propriétés astronomiques des petits corps (astéroïdes, comètes, KBO,...) .

Pré-requis : Mécanique des fluides niveau M1

Ouvrage(s) de référence : Astrophysics of Planet Formation, P. Armitage, Cambridge university Press, 2010.

Mots clés : Formation planétaire, histoire précoce du système solaire

## EISUA3E2 – Physique stellaire

- Objectif : Approfondir les connaissances sur la physique des étoiles
- Panorama de la place de la physique stellaire dans l'astrophysique moderne
  - Rappels sur le modèle standard : pourquoi a-t-on besoin de processus non-standards ?
  - Processus microscopiques : diffusion atomique, triage gravitationnel et accélération radiative
  - Processus macroscopiques : frontières zones convective/radiative (convection pénétrative, overshoot), rotation et circulation méridienne dans les zones radiatives, transport turbulent et turbulence anisotrope, étoiles binaires, forces de marée
  - Autres processus de transport: ondes internes et champ magnétique
- Contenu :
- Le modèle standard d'atmosphères stellaires : transfert de rayonnement :
  - équilibre radiatif, mécanique, statistique – atmosphères 1D statiques et ETL – paramètres fondamentaux, abondances, relation (pg-pe-T) – microturbulence, bissecteurs de raies, line blanketing, ressources numériques actuelles
  - Au-delà des modèles standard : les « nouvelles abondances »
  - La mesure polarimétrique : rappels, matrices de Müller, constitution de polarimètres, modulations spatiales et temporelles, applications
  - Exploitation des spectres stellaires polarisés : extraction des signaux polarisés, exploitation astrophysique
- Pré-requis : Une introduction à la physique stellaire: modèle de structure interne et évolution stellaire.
- *Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars*, Maeder (2009), Springer
- Ouvrage(s) de référence :
- *Stellar Atmospheres*, Mihalas, 1978, San Francisco
- Mots clés : Processus de transport à l'intérieur des étoiles, propriétés des atmosphères stellaires, mesures de polarisation

## EISUA3E3 – Astrophysique extragalactique et cosmologie

Objectif : Comprendre les bases de la cosmologie et de la physique des galaxies

### **Paramètres Cosmologiques**

**Matière noire** : galaxies, amas, grandes échelles, recherche directe et indirecte, effet de lentilles gravitationnelles.

**Structure à grande échelle** : Fonctions de corrélation à 2 points, angulaire et 3D, estimateurs. Comptage en cellules, scaling.

**Théorie de formation des structures**: Perturbations Newtoniennes linéaires, échelle de Jeans, horizon sonore, régime non-linéaire, virialisation, fonction de masse des structures, lois d'échelle, théorie et observations/simulations numériques

Contenu : **Dynamique galactique (considérations générales)** : Relaxation des systèmes stellaires, équations de Jeans, modèles de distributions de masse.

**Dynamique des galaxies** : Relations d'échelle, courbes de rotation, dynamique des disques, structure spirale, cas particuliers.

**Evolution chimique et spectro-photométrique des galaxies** : Équations de base, IMF, modèles simples analytiques, modèles de synthèse de populations, modèles numériques et outils publics, détermination des paramètres physiques des galaxies à partir des spectres

**Noyaux actifs de galaxies (AGN)**: Propriétés, types d'AGN, modèle standard, mécanismes de rayonnement, formation de trous noirs super-massifs, co-évolution.

Pré-requis : Métrique de Robertson-Walker, Solutions de Friedmann-Lemaître, big bang classique, notions de base sur la morphologie et structure des galaxies

*Principles of Physical Cosmology*, P.J.E. Peebles, Princeton University

Ouvrage(s) de référence : *Galaxies et Cosmologie*, Combes et al., Ed. Intersciences, CNRS  
*Galactic Dynamics*, Binney J., Tremaine, S., Princeton University Press

Mots clés : Grandes structures, formation des structures, matière noire, énergie noire, dynamique galactique, physique des galaxies, AGN

# **UE : EISUA3BN - Techniques spatiales et numériques (6 ECTS)**

## **EISUA3A1 – Instrumentation en astrophysique 2**

Objectif : Découverte des instruments pour l'astronomie au-delà du visible : Radio, Infrarouge, sub-mm, X- et Gamma, l'astronomie non-photonique, Astroparticules

Télescopes pour l'astronomie infrarouge

Télescopes pour l'astronomie radio et submillimétriques

Télescopes pour l'astronomie UV et X

Télescopes pour l'astronomie gamma

Contenu : Astrophysique non-photonique, Astroparticules : détecteurs pour le rayonnement cosmique, télescopes neutrino; détecteurs d'ondes gravitationnelles; instruments pour la détection directe de la matière noire.

Pour chacun des domaines listés ci-dessus sont déclinés : domaine énergétique et sources ; optique (incidence rasante, télescopes Wolter, multicouches); détecteurs (CCD, galettes à microcanaux, microcalorimètres) ; imagerie, spectroscopie; Exigences mission (type(s) d'orbite, d'attitude, performance en pointage, contrôle thermique).



## EISUA3A2 – Outils de traitement de données expérimentales

Objectif :	<p>Les instruments en sciences de l'Univers font l'acquisition de données correspondant à l'observation d'objets astrophysiques. Ces données ne consistent généralement pas en une mesure directe de quantités d'intérêt physiques, ce qui nécessite un traitement de ces données.</p> <p>L'objectif de cette UE est d'introduire les outils permettant d'exploiter ces données.</p> <p>L'accent sera mis sur les outils de l'estimation de paramètres et sera illustré par des exemples concrets de traitement de données en sciences de l'Univers</p> <p>I. Introduction à l'estimation et l'optimisation II Analyse spectrale des signaux et cas de l'échantillonnage irrégulier III. Représentations parcimonieuses des signaux et images et applications en sciences de l'Univers; IV. Déconvolution, problèmes inverses et applications en sciences de l'Univers</p>
Contenu :	<p>Illustration sur des exemples pratiques de méthodes numériques d'estimation et optimisation pour le traitement de données avec des applications telles que :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Estimation de la PSF à partir de l'observation d'un objet non résolu</li><li>• Estimation de paramètres morphologie à partir de l'observation d'une galaxie</li><li>• Recherche de périodicité dans des signaux irrégulièrement échantillonnés</li><li>• Estimation d'une PSF à haute résolution à partir de plusieurs images basses résolutions</li><li>• Amélioration de la résolution d'images par déconvolution</li></ul> <p>Dans ces TPs en Matlab, les étudiants auront à programmer des méthodes simples et à exploiter des bibliothèques existantes pour des méthodes plus avancées</p>
Pré-requis :	UE « Traitement du signal et des images » et « Statistiques pour le traitement de données » du M1 SUTS
Ouvrage(s) de référence :	Bayesian Approach to Inverse Problems, J. Idier, Ed., ISTE, 2008. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume 1: Estimation Theory, S. Kay, Prentice Hall, 1993
Mots clés :	Traitement statistique du signal, estimation, optimisation, analyse spectrale, problèmes inverses, déconvolution, approximation parcimonieuse.

## EISUA3B1 – Dynamique spatiale

Objectif :	<p>Après un rappel des bases de la Mécanique Spatiale (M1 SUTS) l'objectif est d'atteindre une culture générale en SCAO : connaître les problèmes de contrôle basique se familiariser avec les phénomènes physiques et leur ordre de grandeur.</p>
Contenu :	<p>Mécanique Spatiale (3 h) - Mouvement Képlérien. Satellites terrestres. Orbites. Théorie des perturbations. rappel M1 SUTS. SCAO (9h) : Système de Commande d'Attitude et d'Orbite Définitions du contrôle d'attitude : référentiels utilisés dans le spatial, représentations d'attitude (Euler, matrice de passage, quaternion), équations cinématiques et dynamiques. Environnement spatial et couples perturbateurs : forces aérodynamiques, densité atmosphérique, pression solaire, champ magnétique terrestre, gradient de gravité. Rappel des senseurs/actuateurs les plus courants et de leur fonctionnement: Senseurs solaires, terrestres, d'étoiles, magnétomètre, gyroscope, tuyères, roues à réactions, et magnéto-coupleurs. Passage en revue de plusieurs concept de contrôle d'attitude : stabilisation passive par spin/gradient de gravité, contrôle 3axes avec ou sans biais de moment cinétique, mode magnétique. Introduction à l'automatique et application au spatial : PID, avance de phase, filtrage, stabilité des systèmes linéaires, transformées de Laplace, applications aux modes souples (panneaux solaires).</p>
Pré-requis :	Introduction aux techniques spatiales du M1 SUTS (EMSUA2D1)
Ouvrage(s) de référence :	
Mots clés :	Mouvement Képlérien, Orbites, Théorie des perturbations Système de Commande d'Attitude et d'Orbite

Objectif : Ce cours présente la notion de Système, la complexité technique et organisationnelle associée lorsqu'il s'agit de le réaliser, et introduit les concepts de l'Ingénierie Système, qui regroupe l'ensemble des activités permettant de passer d'un besoin exprimé à une solution réalisée conforme au besoin.

Sont abordés les aspects suivants :

- Le point de vue technique : comment réaliser un système qui réponde aux attentes du client ?
- Le point de vue organisationnel : cycle de vie des projets spatiaux, processus de gestion de projets, découpage en tâches (WBS), planification, gestion des risques, gestion de la communication.

Contenu :

Le cours est illustré par des exemples de grands systèmes spatiaux (ex : Système de navigation GALILEO).

Des exercices ponctuent le cours afin de permettre aux étudiants d'assimiler les diverses notions vues au fur à mesure. Afin que les étudiants se concentrent sur la méthodologie et non sur le contenu, ces exercices sont choisis volontairement hors discipline spatiale.



## UE : EISUA3FM - unité d'approfondissement: 3 modules à choisir dans la liste - 15h chacun (6 ECTS)

### EISUA3F1 – Interactions des planètes avec leur environnement

- Le but de ce cours est d'appréhender les concepts, les processus physiques et les méthodes d'analyse relatifs à l'étude des relations Soleil – Planètes, qu'on regroupe souvent sous l'appellation 'héliophysique'. L'atmosphère solaire n'est pas en équilibre hydrostatique et émet continuellement un vent de particules associé à un champ magnétique. Ce vent solaire interagit ainsi avec tous les objets du système solaire ; ces interactions sont modulées à la fois par la forte variabilité du vent mais aussi par la nature des corps rencontrés, notamment s'ils sont magnétisés ou non. Ce cours s'intéressera à présenter différents modèles dérivés de la diversité de données spatiales acquises depuis une cinquantaine d'années.
- Objectif :
- Contenu :
- Introduction générale à l'héliophysique
  - Génération du vent solaire et du champ magnétique interplanétaire - Modèle de Parker, modèle cinétique
  - Événements transitoires du vent solaire : éjections de masse coronale, régions d'interaction en co-rotation
  - Formation de frontières : chocs, magnétopause
  - Description et dynamique du système magnétosphérique : cycle de Dungey, couplage vent solaire-magnétosphère-ionosphère, sous-orages, météorologie spatiale.
  - Analyse de données in-situ multi-satellites à partir d'outils en ligne
- Pré-requis :
- Ouvrage(s) de référence :
- *Introduction to Space Physics*, Margaret G. Kivelson, Christopher T. Russell
  - *Physics of Solar System Plasmas*, Thomas E. Cravens
  - *Basic Space Plasma Physics*, R. A. Treumann, W. Baumjohann
- Mots clés :
- Plasmas spatiaux, vent solaire, champ magnétique interplanétaire, magnétosphère, ionosphère, données in-situ

## EISUA3F2 – Milieu interstellaire et formation stellaire

- Objectif :** Le but de ce cours est de décrire la matière interstellaire de notre Galaxie sous ses différentes phases, ainsi que les processus physiques et chimiques qui y prennent place.
- Contenu :**
1. Nuages moléculaires, début de la formation stellaire: Propriétés, grand relevés spectraux, détermination de la masse, conditions physiques, équilibre thermique, stabilité du nuage, effondrement et fragmentation.
  2. Etapes de formation stellaire: Les différentes classes de proto-étoiles et taux de formation. La vie dans l'Univers : l'eau et les molécules organiques complexes dans le MIS.
  3. Champs magnétique: Propriétés, origine et impact sur le milieu interstellaire.
  4. Formation des disques proto-planétaires et leur héritage chimique. Comparaison avec notre propre système solaire (nuage parental et comètes). Utilisation des isotopologues.
- Pré-requis :** Une bonne connaissance générale de la Physique, des Mathématiques et de l'Astronomie.
- Ouvrage(s) de référence :**
- The interstellar medium, by J. Lequeux, Springer, 2003
  - Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium, by B.T. Draine, Princeton 2011.
  - The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, by A.G.G.M. Tielens, Cambridge, 2005.
- Mots clés :** Nuages interstellaires, formation des étoiles

## EISUA3F3 - Objets compacts et accrétion

- Objectif : Ce module traite de la physique des objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs de masse stellaire et supermassif) et des phénomènes d'accrétion/éjection qui y sont associés. L'objectif du module est de donner les clés (vocabulaire, ordre de grandeur et cadre de travail) pour appréhender à la fois la physique riche et complexe de ces objets & leur importance dans différents domaines de l'astrophysique moderne (p.e. cosmologie, physique des galaxies, physique stellaire) et de la physique fondamentale (p.e. physique nucléaire et des particules, ondes gravitationnelles). Les questions majeures du domaine seront discutées à l'aide d'exemples.
- Contenu :
  - \* Scénarii de formation, lieux de formation et propriétés physiques
  - \* Notion sur les supernovae et de leurs liens avec les objets compacts
  - \* Physique des phénomènes d'accrétion sans (accrétion de Bondi-Hoyle et de Hoyle-Lyttlton) et avec moment cinétique (disque d'accrétion, disque &#945;) aux abords de ces objets. Exemples: binaires X et noyaux actifs de galaxies
  - \* Modèle standard d'émission des disques d'accrétion, rôle des effets relativistes, instabilités des disques et lien accrétion/éjection (jets et vents)
  - \* Impact des jets/vents sur l'environnement interstellaire et intergalactique
  - \* Discussion de quelques questions ouvertes
  - \* Exemples de techniques d'observation utilisées pour les étudier.
- Pré-requis : Physique de base au niveau d'un M1 de physique
- Ouvrage(s) de référence : Frank J., King A.R., Raine D.J. 2002: Accretion power in astrophysics, Cambridge University press  
Shapiro S.L., Teukolsky S.A. 1983: Black holes, white dwarfs and neutron stars, the physics of compact objects, Wiley (New-York)
- Mots clés : Objet compact, trou noir, étoile à neutrons, naine blanche, accrétion, rayonnement haute énergie, relativité

## EISUA3F6 – Cosmologie et physique des galaxies

Objectif :	<p>Approfondir ses connaissances en cosmologie et physique des galaxies</p> <p><b>Histoire thermique de l'univers primordial :</b> abondances reliques, matière noire froide et chaude, asymétrie matière antimatière, baryogénèse</p> <p><b>Physique de Univers primordial :</b> Limites du modèle standard, Dynamique d'un champ scalaire, Inflation, Quintessence, Gravité modifiée</p> <p><b>Théorie des perturbations :</b> perturbations relativistes, fonctions de transfert (CDM, HDM), fluctuations du fond cosmologique, polarisation</p>
Contenu :	<p><b>Formation des galaxies et des premières structures :</b> physique du milieu intergalactique, processus de refroidissement et de chauffage, premiers objets, overcooling, réionisation</p> <p><b>Mesure des paramètres physiques des galaxies :</b> Physique des régions de formation stellaire, détermination des abondances métalliques, diagnostics spectrales, mesure du taux de formation stellaire, modélisation et ajustement des distributions spectrales en énergie</p> <p><b>Formation et évolution des galaxies (approfondissement) :</b> L'univers tracé par Lyman alpha, la forêt de Lyman, propriétés des galaxies à grand redshift, construction et analyse de grands échantillons.</p>
Pré-requis :	<p>Notions de base de relativité générale et de cosmologie, notions de base sur la physique des galaxies</p> <p>Physical foundations of Cosmology, V.Muhkanov, Cambridge university press</p>
Ouvrage(s) de référence :	<p>Articles de revue et ouvrages spécifiques extraits de la base <a href="http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/">http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/</a></p>
Mots clés :	<p>Théories des perturbations, univers primordial, inflation, premières structures, formation et évolution des galaxies</p>

## EISUA3F4 – Sismologie des étoiles et des planètes

Objectif :	Une introduction à la sismologie des étoiles et des planètes (telluriques) Introduction : Intérêt de la sismologie des étoiles et des planètes Equations d'onde dans un fluide / dans un milieu élastique : ondes acoustiques (p), ondes de gravité (g), ondes de volumes (P, SV, SH), ondes de surface (Love, Rayleigh). o Approximation JWKB, théorie des rais, équation, formules asymptotiques o Fonctions de Green : représentation modale, décomposition en ondes
Contenu :	propagatives, reconstruction par inter-corrélation de champs aléatoire o Astérosismologie et sismologie planétaire: Nature des observables o Problèmes inverses : effets d'une perturbation au premier ordre, principe variationnel, dérivées de Fréchet, noyaux de sensibilité. Expression sous la forme de problèmes inverses. o Applications : Inversion du profil de rotation interne des étoiles (Soleil, étoiles géantes), Inversion de la structure interne des étoiles (profil de vitesse du son), Tomographie 3D en ondes de volume du manteau et du noyau terrestre, Inversion des courbes de dispersion des ondes de surface pour l'imagerie crustale et lithosphérique o Développements actuels de l'astérosismologie et de la sismologie planétaire
Pré-requis :	bases de physique stellaire et planétaire, bases de la théorie des perturbations en dynamique des fluides et des solides <i>Asteroseismology</i> , Aerts, Christensen-Dalsgaard & Kurtz, 2010, Springer
Ouvrage(s) de référence :	<i>Modern global seismology</i> , Lay & Wallace, Academic Press; 1995 <i>Planetary science : the science of planets around stars</i> , Cole & Woolfson, IoP 2002
Mots clés :	sismologie, astérosismologie, ondes sismiques



## EISTT3L1 – Surfaces planétaires et cycles globaux

- Objectif : Partant de connaissances fondamentales en chimie minérale et thermodynamique, ce module vise à donner des clés aux étudiants pour comprendre les processus d'altération à l'œuvre sur les planètes telluriques (Terre, Mars, Vénus) et leur évolution climatique. L'environnement et l'évolution sur Mars seront discutés à la lumière des connaissances les plus récentes issues de l'exploration en cours. Un éclairage sera aussi dispensé sur Vénus.
- Contenu : **Présentation** de la chimie minérale et de la minéralogie des altérations (Terre et Mars), comme clés de la compréhension de l'altération des planètes telluriques et de leur évolution climatique. **Introduction** des lois régissant les interactions eaux-roches, de l'application de la thermodynamique à la chimie des solutions et aux contraintes cinétiques. **Description** des grands cycles géochimiques terrestres et des modalités de transfert entre réservoirs (flux, temps de résidence): exemple du cycle du carbone. Panorama des analogues actuels et des outils permettant de reconstituer la composition des enveloppes fluides qui régnaient sur la Terre et les planètes telluriques primitives (principalement Mars). **Analyse** détaillée de la surface de Mars, par télédétection et mesures chimiques/minéralogiques in situ (Mars Exploration Rover, Mars Science Laboratory), et de ce que les modèles climatiques nous révèlent sur l'évolution des conditions présentes à sa surface et sur les possibles scénarios d'évolution climatique sur Mars. **Présentation succincte** des connaissances sur la planète Vénus et des problématiques liées aux interactions surface-atmosphère.
- Pré-requis : bases de minéralogie, de chimie des solutions, de thermodynamique, base de cinétique chimique  
Géologie générale du système solaire, notions de spectrométrie
- Ouvrage(s) de référence : The Martian Surface : composition, mineralogy and physical properties, Cambridge Univ. Press, 2008, 636p  
Method Spectroscopiques Appliquées aux Minéraux, SFMC, 678p.  
Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals, Rev. in Mineral., 31, 583p.
- Mots clés : altération, processus physico-chimiques, évolution climatique, atmosphère, interaction surface atmosphère, cycles globaux, sol, Mars, Terre, Venus.

## EISTT3L2 – Evolution des planètes telluriques

- Objectif : Partant de l'observation des grandes unités géomorphologiques (Lune, Terre, Mercure, Vénus, Mars), une description sera faite des types de croûtes planétaires (structure et composition). L'histoire de leur formation (depuis les derniers stades d'accrétion : impacts géants et océans de magma) et de leur évolution dans le temps sera détaillée, en relation avec les processus de géodynamique interne d'une part (écoulements biphasiques et différenciation, refroidissement convectif), la cratérisation et la mise en place des unités volcaniques d'autre part. Un regard comparé sera donné sur les modes et styles de mise en place des produits volcaniques (de la montée des magmas aux éruptions et morphologie des édifices en surface) des planètes telluriques (caractéristiques communes et divergences).
- Introduction** : Roches magmatiques, magmas (sources et différenciation). Le système solaire : composition de la nébuleuse solaire, derniers stades d'accrétion des planètes (impacts géants et océans de magma). Types de croûtes planétaires (primaire, secondaire, tertiaire).
- Lune** : Types de roches et régolite. Océan de magma et croûte primaire. Bassins d'impact. Volcanisme : origine et conditions d'ascension des magmas. Les grandes provinces lunaires.
- Mercure** : Structure interne et évolution précoce. Type de croûtes et volcanisme. Comparaison avec la Lune.
- Contenu : **Terre** : La Terre à l'hadéen et à l'archéen. La croûte océanique (formation, âges, composition, la tectonique des plaques et son évolution dans le temps). La croûte continentale (formation et évolution).
- Vénus** : Type de croûte en surface. Comparaison avec la Terre (dynamique interne). Volcanisme (conditions en surface et rôle des éléments volatils : influences sur l'arrivée des magmas en surface et sur la morphologie des édifices volcaniques). Variétés et singularités des structures volcaniques, liens volcanisme et tectonique.
- Mars** : Types de croûtes. Structure et évolution des grandes provinces volcaniques.
- Pré-requis : Bases souhaitées en minéralogie et pétrographie des roches magmatiques. Notions en télédétection et spectroscopie.
- Ouvrage(s) de référence : **Planetary crusts: their composition, origin and evolution.** Stuart R. Taylor, Scott M. McLennan, Cambridge Univ. Press, 2009
- Evolution of the Earth** (vol. 9). Treatise on geophysics. David Stevenson Elsevier, 2007
- Mots clés : Croûtes planétaires, Magmatisme, Océan de magma, Volcanisme, Evolution des planètes telluriques

# UE : EISUA4BM - Simulations numériques (3 ECTS)

- EISUA4C2 – Simulations numériques et traitement de données expérimentales

Objectif :	<p>Apporter des outils pour la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles rencontrées dans divers domaines de l'astrophysique, acquérir des notions sur la qualité des méthodes (convergence, rapidité, efficacité) et appliquer ces méthodes à des problèmes concrets grâce à des TP sur ordinateur.</p> <p><i>Partie: Simulations numériques</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Cours d'introduction aux méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles : les différents types de simulations numériques en astrophysique, éléments de théorie sur les méthodes numériques, propriétés de quelques schémas aux différences finies, comparaison de l'efficacité de deux schémas dans un cas simple, limitations des simulations numériques.</li><li>• TP1 sur les méthodes numériques</li><li>• TP2 sur la dynamique des intérieurs stellaires</li><li>• TP3 sur l'amortissement Landau dans les plasmas non-collisionnels</li></ul>
Contenu :	<p><i>Partie: Astronomie pratique:</i></p> <p>Un éventail de sujets sera proposé aux étudiants, qui devront être restitués devant l'ensemble de la promotion afin de présenter aux étudiants différentes méthodes instrumentales en astrophysique. Chaque mini-projet est supervisé par un scientifique de contact. Ces mini-projets peuvent couvrir de nombreux sujets tels que: mise en place d'observations avec le télescope IRIS, utilisation de données d'archives pour déterminer une courbe de lumière d'un transit d'exoplanète, détermination de la limite de détection dans des observations profondes avec le HST, etc ...</p>
Pré-requis :	commandes de base Linux, notions sur la résolution numérique d'équations différentielles
Ouvrage(s) de référence :	-Allaire, G., Analyse numérique et optimisation, Editions de l'Ecole Polytechnique, 2012 -Jedrzejewski, F., Introduction aux méthodes numériques, Springer, 2005 -Observational astrophysics, Léna et al. Springer
Mots clés :	Equations aux dérivées partielles, méthodes et simulations numériques observations astronomiques, télescopes, analyse de données

## **UE : EISUA3VM - Anglais scientifique (3 ECTS)**

- EISUA3L1 – Anglais scientifique

Objectif : Savoir communiquer à l'orale et à l'écrit des idées scientifiques

Savoir comprendre un discours scientifique

Contenu : Rédiger un résumé d'article ou de proposition en anglais

Rédiger un article scientifique en anglais

Rédiger une proposition en anglais

Evaluer des propositions en anglais

Postuler pour un travail (CV, lettre de motivation) en anglais

Savoir passer un entretien en anglais

Présenter un travail à l'orale en anglais

Poser des questions en anglais

Présenter un travail à l'écrit (affiche) en anglais

Mener un débat en anglais

Comprendre un article/ une présentation en anglais

Ecrire un communiqué de presse en anglais