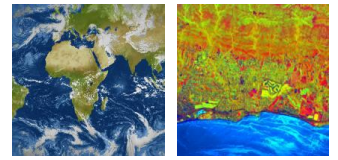


<http://teledetection.ipgp.fr/mpt>

Universités Paris 6 & Paris 7
Université de Versailles Saint-Quentin
Institut de Physique du Globe de Paris
Ecole Normale Supérieure, Ecole Polytechnique
ENSTA ParisTech, École des Ponts ParisTech



Master 2 Méthodes physiques en télédétection

Dernière mise à jour : lundi 12 septembre 2016

Module « Transfert radiatif »

Responsables : Cyril Crevoisier (cyril.crevoisier@lmd.polytechnique.fr)

Autres enseignants : Stéphane Jacquemoud, Benoît Laurent, Sébastien Payan

Crédits : 6 ECTS

Cours « Spectroscopie moléculaire »

Intervenants : Sébastien Payan (sebastien.payan@latmos.ipsl.fr)

Résumé : les méthodes spectroscopiques sont non seulement au cœur de l'étude de la Terre par télédétection mais sont souvent le seul moyen d'observation des autres planètes du système solaire, ainsi que des exoplanètes. Ces méthodes visent à enregistrer le rayonnement électromagnétique pour reconstituer soit les caractéristiques de la surface (terre ou océan), ou de l'atmosphère de la terre ou d'autres planètes (aérosols et espèces moléculaires), soit encore les propriétés du milieu interstellaire (nuages moléculaires, comètes, proto-étoiles, « hot cores »...). La spectroscopie est un outil essentiel et incontournable en particulier pour le suivi de l'évolution de notre atmosphère. Son utilité apparaît aujourd'hui d'autant plus que les inquiétudes sur les évolutions de la qualité de l'air et du climat se font fortes. Les observations produites par les expériences récentes sur les atmosphères terrestre (à partir de satellites en orbite terrestre, à partir du sol, de ballons, avions...) mais aussi planétaire (instruments embarqués sur les sondes spatiales explorant les atmosphères de Jupiter ou de Titan par exemple) produisent de nombreux spectres de très haute qualité permettant d'obtenir une vision globale et précise de la composition de ces atmosphères. En astronomie, l'avènement de grands télescopes tant à partir du sol que à bord de ballons, d'avions ou de satellites va ouvrir dans les prochaines décennies de nouveaux domaines spectraux à l'observation et accentuer les recherches de l'origine de la vie, notamment grâce à l'étude des exoplanètes. Les nouveaux instruments pour la mesure de la composition de la basse atmosphère terrestre (gaz à effet de serre, polluants...) utilisent des technologies permettant des mesures avec une résolution spectrale et des rapports signal sur bruit très élevés. L'interprétation de l'ensemble de ces spectres nécessite la maîtrise des techniques d'analyse spectroscopiques théoriques et expérimentales, dont les bases sont données dans ce cours.

Organisation : 2x3h30 de cours.

Ouvrages

J.M. Flaud (1992), *Spectroscopie des molécules d'intérêt atmosphérique*, Ecole d'été du CNRS.

J.M. Hollas (2003), *Spectroscopie*, Dunod, 400 pp.

J.M. Hollas (2004), *Modern spectroscopy*, John Wiley & Sons, Inc., 482 pp.

S. Payan (2013), *Radiative transfer and inversion*, Ecole d'été du CNRS "HiResMIR@CAES-Frejus-2013", Fréjus (France), 3-7 June 2013.

L. Régalia, H. Tran, M. Leperec (2015), *SpecAtmo summer school trainings*, Fréjus (France).

J. Vander Auwera (2013), *Principles of vibration-rotation spectroscopy*, Ecole d'été du CNRS "HiResMIR@CAES-Frejus-2013", Fréjus (France), 3-7 June 2013.

Plan

- Introduction : notions de physique de l'atmosphère (structure verticale de l'atmosphère, nomenclature, constituants majoritaires et minoritaires), interactions matière-rayonnement
- Les méthodes expérimentales : spectromètre réseau, spectroscopie par transformée de Fourier et spectroscopie par diodes laser, Lidar
- La physique moléculaire – les mouvements moléculaires et leurs énergies : énergies électroniques, énergies vibrationnelles (oscillateur harmonique, modes normaux, anharmonicité), énergies rotationnelles (modèle du rotateur rigide, conventions et classification en molécules linéaires, symétriques, asymétriques, sphériques, influence de la non rigidité), résonances entre niveaux d'énergie et perturbations des raies (notions de couplage entre bandes vibrationnelles)
- La physique moléculaire – symétrie moléculaire et applications de la théorie des groupes : notions de groupes ponctuels, symétrie des modes normaux de vibration, symétrie des états vibrationnels excités, symétrie des niveaux de rotation

- Analyse spectrale – règles de sélection et types de bandes : bandes « parallèles », « perpendiculaires », « bandes chaudes », « bandes de combinaison », « bandes harmoniques ou overtones »
- Analyse spectrale – les paramètres spectraux : positions des raies, intensités des raies (coefficients d'absorption, facteur de transmission, statistique de spins, facteur de population de Boltzmann), intensités de bandes (sections efficaces d'absorption), profil des raies (Gaussien, Lorentzien, Voigt, fonction d'appareil), les banques de données spectroscopiques pour l'atmosphère et l'astrophysique
- Exemples : spectres de rotation pure, spectres de vibration-rotation, spectres électroniques
- TD1 : calcul des niveaux d'énergie et fréquences des raies de molécules atmosphériques
- TD2 : symétrie moléculaire et règles de sélection
- TD3 : identification des raies d'absorption dans un spectre satellitaire.

Sébastien Payan est professeur à l'université Pierre et Marie Curie ([UPMC](#)) et chercheur au Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales ([LATMOS](#)). Ses travaux de recherche portent sur l'analyse des spectres atmosphériques pour la mesure à distance de la composition chimique de l'atmosphère à partir du sol, de ballons et de satellites.

Cours « Introduction au transfert radiatif »

Intervenant : Cyril Crevoisier (cyril.crevoisier@lmd.polytechnique.fr)

Résumé : ce cours a pour but d'introduire les notions de transfert radiatif direct et inverse qui sont à la base de l'exploitation des observations spatiales du système Terre-Atmosphère. Après avoir replacé l'observation satellitaire dans le contexte de l'étude du climat, les grandeurs et lois fondamentales sont rappelées, ce qui conduit à l'établissement de l'équation de transfert radiatif qui donne le rayonnement émis par l'atmosphère et reçu au sommet de celle-ci. Cette équation fait intervenir diverses informations thermodynamiques, spectroscopiques et instrumentales qui sont définies et les principaux modèles radiatifs directs sont décrits. Enfin, le problème inverse qui consiste à passer des mesures aux variables atmosphériques est abordé et illustré par de nombreux exemples tirés de l'exploitation de missions spatiales actuelles.

Organisation : 6x3h30 de cours.

Ouvrages

Plan

- Introduction au transfert radiatif : complexité du système Terre-atmosphère, les grands cycles climatiques, bilan radiatif terrestre, intérêt de l'observation spatiale
- Champs de rayonnement : grandeurs énergétiques de base et unités, caractéristiques des surfaces, rayonnement du corps noir
- Equation de transfert radiatif : transmission atmosphérique, établissement de l'équation de transfert radiatif, application au rayonnement montant
- Equilibre thermodynamique local : équilibre thermodynamique, niveaux d'énergie, fonction source d'émission, ETL et atmosphère terrestre
- Spectre d'absorption de l'atmosphère terrestre : transitions électroniques, vibrationnelles et rotationnelles, résolution spectrale, banques de données spectroscopiques
- Transmission atmosphérique : coefficient d'absorption et facteur de transmission, formes de raie, chemin géométrique, largeur équivalente, modèles raie-par-raie, modèles de bande
- Compléments sur l'équation de transfert radiatif : cas particuliers en ciel clair, phénomènes de diffusion, ETR dans les cas de diffusions
- Inversion de l'équation de transfert radiatif : problèmes directs et inverses, fonction de poids, inversion de l'ETR
- Sondage vertical par satellite : généralités, les types de plateformes, les satellites polaires de la NOAA, AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)

Cyril Crevoisier est chargé de recherche CNRS au Laboratoire de Météorologie Dynamique ([LMD](#)) dans l'équipe Atmosphère-Biosphère-Climat. Ses travaux de recherche portent sur l'étude de la variabilité et de l'évolution du climat à partir de l'observation spatiale, avec un intérêt particulier pour l'observation depuis l'espace des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) et des signaux associés (feux de biomasse,...).

Cours « Télédétection de l'atmosphère »

Intervenants : Benoît Laurent (benoit.laurent@lisa.u-pec.fr)

Résumé : cette UE vise à donner une culture générale sur les problématiques scientifiques liées aux problèmes sociétaux que sont le changement climatique, la pollution, etc. et sur les moyens d'observation spatiale mis en œuvre pour observer, analyser et comprendre ces problèmes.

Organisation : 4x3h de cours.

Ouvrages

Boucher O. (2012), *Aérosols atmosphériques - Propriétés et impacts climatiques*, Collection : Ingénierie et développement durable, XIV, Springer, 248 pp.

Burrows J.P., Platt U., Borrell P. (2011), *The remote sensing of tropospheric composition from space*, Physics of Earth and Space Environments, XXXII, Springer, 549 pp.

Lee K.H., Li Z., Kim Y.J., Kokhanovsky A. (2009), Atmospheric aerosol monitoring from satellite observations: A history of three decades, in *Atmospheric and biological environmental monitoring*, Springer, pp 13-38.

Plan

- Typologie des aérosols : description des différents processus de formation des aérosols primaires et secondaires ; présentation des principales sources naturelles et anthropiques, de leur émissions à l'échelle globale et de leur distribution géographique.
- Propriétés : généralités sur les propriétés physico-chimiques des aérosols (composition, taille, forme) en fonction de leurs sources d'émission ; discussions sur le temps de vie des aérosols et ses conséquences sur leurs impacts.
- Impacts : généralités sur les effets radiatifs directs et indirect des aérosols, leur participation à certains cycles biogéochimiques, leur impact sur la qualité de l'air.
- Méthodes de télédétection : description des principes généraux d'interactions rayonnement/aérosols en fonction des propriétés physico-chimiques des aérosols ; présentations des méthodes de télédétection passives et actives les plus courantes, de leurs avantages et de leurs limitations.
- Apport de la télédétection à l'étude des aérosols : on donne ici quelques illustrations de la contribution des données de télédétection à l'amélioration des connaissances sur la distribution spatiale et temporelle des contenus atmosphériques en aérosols et l'évaluation de leurs impacts.
- Atmosphères et sondage : introduction et généralités sur la structure de l'atmosphère terrestre. Discussion des grandes thématiques et problématiques scientifiques qui intéressent les chercheurs aujourd'hui (« trou » d'ozone, changement climatique, pollution). Description des techniques de sondage de l'atmosphère
- Traitement des observations : lien spectroscopie / observations. Rappel du transfert radiatif et méthode d'inversion
- L'observation satellitaire aujourd'hui : discussion des principales missions satellitaires et de leurs enjeux

Benoit Laurent est maître de conférences à l'université Paris Diderot ([UPD](#)) et chercheur au Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques ([LISA](#)). Ses travaux de recherche portent sur la modélisation 3D du cycle des aérosols désertiques pour étudier leurs émissions, leurs concentrations atmosphériques et leurs dépôts, et pour évaluer leurs impacts climatiques et biogéochimiques. Il s'appuie pour cela sur le développement du modèle régional de chimie-transport CHIMERE, et sur l'observation des aérosols désertiques à partir d'observations satellitaires et de mesures *in situ*.

Cours « Télédétection des surfaces continentales »

Intervenant : Stéphane Jacquemoud (jacquemoud@ipgp.fr)

Résumé : ce cours est une introduction à la caractérisation des surfaces terrestres par télédétection, essentiellement dans le domaine optique. Dans un premier temps, sont abordés les différents modes d'interaction du rayonnement solaire avec les surfaces continentales. La deuxième partie du cours est consacrée à la détermination des paramètres biochimiques et structuraux de la végétation par télédétection hyperspectrale et multi-angulaire, de l'échelle de la feuille à celle de l'écosystème. Dans la dernière partie du cours sont abordées la quantification des termes du bilan d'énergie à la surface de la Terre et leur importance dans les modèles de climat. L'accent est mis sur la modélisation physique aux différentes échelles.

Organisation : 4x3h de cours. Quelques semaines avant l'examen, distribution d'un article scientifique en anglais que les étudiants doivent lire et sur lequel ils seront interrogés.

Ouvrages

- Asrar G. (1989), *Theory and applications of optical remote sensing*, Wiley Interscience, 734 pp.
Berthier S. (1993), *Optique des milieux composites*, Polytechnica, 300 pp.
Campbell G.S., Norman J.M. (1998), *An introduction to environmental biophysics*, Springer, 286 pp.
Elias M., Lafait J. (2006), *La couleur. Lumière, vision et matériaux*, Belin, 352 pp.
Gates D.M. (2003), *Biophysical ecology*, Dover, 611 pp.
Hapke B. (1993), *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*, Cambridge University Press, 455 pp.
Hufty A. (2001), *Introduction à la climatologie*, De Boeck-Université, 542 pp.
Jones H.G., Vaughan R.A. (2010), *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*, Oxford University Press, 353 pp.
Liang S. (2003), *Quantitative remote sensing of land surfaces*, Wiley-Interscience, 560 pp.
Monteith J.L., Unsworth M.H. (2008), *Principles of environmental physics*, Academic Press, 418 pp.
Myneni R.B., Ross J. (1991), *Photon-vegetation interactions: applications in optical remote sensing and plant ecology*, Springer-Verlag, 565 pp.

Plan

- La végétation terrestre : évolution et répartition ; caractéristiques physiques et chimiques ; fonctionnement
- Eléments de physique du rayonnement : les sources de rayonnement ; interaction rayonnement-matière (propriétés optiques intrinsèques, spectroscopie d'absorption, diffusion surfacique, diffusion volumique simple et multiple) ; bases de la radiométrie optique
- Propriétés optiques de la végétation : compréhension du transfert radiatif à différentes échelles ; extraction des paramètres biophysiques de la végétation ; modélisation (feuilles, sols, couverts végétaux)
- Exemples d'applications : bilan énergétique d'une surface naturelle ; étude des écosystèmes ; exobiologie

Stéphane Jacquemoud est professeur à l'université Paris Diderot ([UPD](#)) et chercheur à l'Institut de Physique du Globe de Paris ([IPGP](#)) dans l'équipe de Planétologie et sciences spatiales. Ses travaux de recherche portent sur la télédétection des surfaces naturelles dans le domaine optique. Elles recouvrent aussi bien la compréhension de la physique des signaux radiométriques (spectroradiométrie, problèmes de calibration, corrections atmosphériques) que le développement d'outils mathématiques d'analyse des données (modèles de transfert radiatif, analyse multispectrale, inversion de modèles mathématiques). Il travaille actuellement sur la détermination de la rugosité multiéchelle et de l'humidité de surface des sols par télédétection optique.