

Le méthane dans l'atmosphère de Titan : de la spectroscopie fondamentale à la planétologie

- Vincent BOUDON¹
- Jean-Paul CHAMPION¹
- Tony GABARD¹
- Michel LOËTE¹

- Athéna COUSTENIS²
- Catherine DE BERGH²
- Bruno BÉZARD²
- Emmanuel LELLOUCH²
- Pierre DROSSART²

- Mathieu HIRTZIG³
- Alberto NEGRÃO⁴
- Caitlin A. GRIFFITH⁵

¹ Institut Carnot de Bourgogne - UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne, 9 Av. A. Savary, BP 47870, F-21078 DIJON, France (Equipe Spectroscopie Moléculaire et Applications, Département Optique, Interaction Matière-Rayonnement)

² Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, Observatoire de Paris-Meudon, 5 Place Jules Jansen, F-92195 MEUDON, France

³ Planetary Science Laboratory, Department of Atmospheric, Oceanic and Space Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2143, USA et Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, Observatoire de Paris-Meudon, 5 Place Jules Jansen, F-92195 MEUDON, France

⁴ Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, Via del Fosso del Cavaliere, I-00133 ROMA, Italie et Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465, PORTO, Portugal

⁵ Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, TUCSON, AZ 85721, USA

Introduction

La molécule de méthane, de formule chimique CH₄ (voir Figure 1), est le plus simple des hydrocarbures saturés. Cette espèce chimique est relativement abondante dans l'Univers. Sur Terre, elle est le principal composant du gaz naturel. Il s'agit aussi du second gaz à effet de serre (après le gaz carbonique) listé par le Protocole de Kyoto et dont il est urgent de réduire les émissions. Le méthane est également présent en proportions relativement importantes dans l'atmosphère d'un certain nombre d'objets extraterrestres : les planètes géantes du Système Solaire (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), mais aussi Titan (satellite de Saturne), Triton (satellite de Neptune), Pluton et, plus loin, les naines brunes, certaines étoiles « froides » et, très vraisemblablement, les exoplanètes géantes (« jupiters chauds ») récemment découvertes.

La méthode privilégiée pour la détermination de la composition chimique et des conditions physiques de ces atmosphères planétaires est la spectroscopie. Il s'agit d'étudier la décomposition en longueur d'onde de la lumière solaire réfléchie par l'objet considéré. Celle-ci ayant traversé son atmosphère, les différents composés chimiques qu'elle contient y impriment leur « empreinte » du fait de la lumière qu'ils absorbent (ou, dans certains cas, réémettent) à des longueurs d'onde spécifiques, formant ainsi des raies et bandes d'absorption (ou d'émission).

La compréhension du spectre d'une atmosphère planétaire nécessite donc de pouvoir modéliser correctement celui de ses différents composés (molécules, aérosols, ...). Ainsi, la modélisation du spectre d'absorption de la molécule de méthane s'avère un enjeu primordial pour l'étude des atmosphères de planètes géantes et de Titan. En effet, le spectre

de ces atmosphères est largement dominé par les fortes bandes d'absorption de cette espèce, du fait de son abondance substantielle. La détermination des autres composés minoritaires (molécules organiques complexes, ...) nécessite de pouvoir « soustraire » le spectre de CH₄, et donc de disposer pour celui-ci d'un

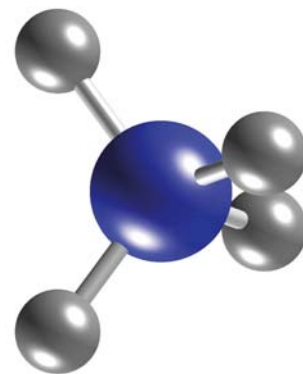


Figure 1 : La molécule de méthane. L'atome de carbone est représenté en bleu, les quatre atomes d'hydrogène en gris.

modèle extrêmement fiable. Un tel modèle doit de plus être valide sur une large gamme de longueurs d'onde, depuis les micro-ondes jusqu'au proche infrarouge. Comme nous allons le voir, ceci requiert l'étude d'états quantiques très excités (c'est-à-dire d'énergie élevée) de la molécule.

L'équipe *Spectroscopie Moléculaire et Applications (SMA)*¹ de l'*Institut Carnot de Bourgogne (ICB)* est, depuis de nombreuses années déjà, reconnue au niveau international comme l'équipe spécialiste de l'analyse et de la modélisation du spectre du méthane. De fait, si de nombreux groupes à travers le monde étudient CH₄ du point de vue expérimental (en enregistrant des spectres en laboratoire), l'équipe SMA est la seule à analyser ce type de spectres, pour des raisons que nous évoquerons plus loin, et se trouve donc au centre de la plupart des travaux concernant la spectroscopie du méthane. En particulier, ainsi que nous allons le montrer dans cet article, elle a pu récemment collaborer étroitement et de manière constructive avec des équipes de planétologues pour contribuer à l'interprétation de spectres de l'atmosphère de Titan.

Le méthane sur Titan

Avec ses 5150 km de diamètre, Titan, la plus grosse lune de Saturne, est le second satellite du Système Solaire par la taille (après Ganymède, satellite de Jupiter). C'est surtout le seul à posséder une épaisse atmosphère. Celle-ci est composée principalement d'azote, N₂ (98 % en moyenne), mais aussi d'une quantité importante de méthane, ainsi que d'un grand nombre d'autres molécules, principalement organiques, signe d'une activité chimique complexe. La température de surface de Titan, de seulement 94 K (-179 °C) semble en faire un lieu bien improbable pour y trouver une activité atmosphérique et fluviatile complexe. A cette température, en effet, l'eau n'existe que sous forme de glace. Cependant, le méthane semble jouer sur Titan un rôle très semblable à

celui de l'eau sur Terre. Il est non seulement présent sous forme de gaz dans l'atmosphère, mais forme aussi des nuages, et il existe de nombreuses évidences de la présence de pluies de méthane, de rivières et de lacs de méthane et d'éthane liquides.

Cette vision de Titan est principalement issue des observations et mesures effectuées par les sondes spatiales comme Voyager 1 en 1980 et surtout la mission Cassini-Huygens (NASA/ESA/ASI) qui, depuis juillet 2004, a révolutionné notre connaissance du système de Saturne et en particulier de Titan. Le point d'orgue de la mission fut la descente dans l'atmosphère de Titan, suivie de l'atterrissage réussi à sa surface de la sonde européenne Huygens, le 14 janvier 2005. Cet exploit technologique a permis une moisson de données considérable, *in situ*, sur l'environnement de Titan. La Figure 2 montre le paysage au sol de Titan observé par Huygens. L'orbiteur Cassini continue, quant à lui, de survoler



Figure 2 : A gauche : Image du sol de Titan prise par l'instrument DISR de la sonde Huygens le 14 janvier 2005. La vue de droite montre la surface lunaire prise lors d'une mission Apollo, à la même échelle (Image JPL PIA08115 - Crédit photo : NASA/JPL/Space Science Institute).

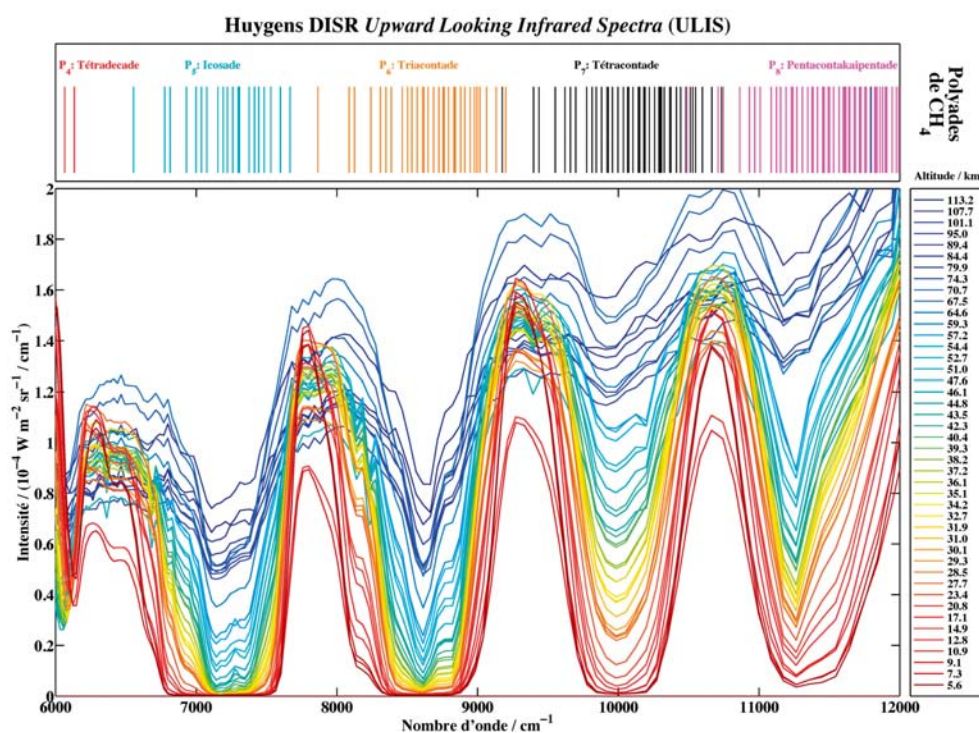


Figure 3 : Spectres enregistrés à différentes altitudes par la sonde Huygens lors de sa descente dans l'atmosphère de Titan, le 14 janvier 2005. Le panneau du haut se réfère aux niveaux d'énergie de vibration du méthane, comme décrits dans la section suivante.

Titan régulièrement afin de l'observer avec ses différents instruments (caméras, spectromètres, radar, ...). En complément, des observations effectuées depuis l'orbite terrestre (Télescope Spatial Hubble, satellite ISO) ou depuis le sol (télescopes CFHT, VLT, Keck, ...) sont également d'une aide précieuse.

De nombreuses équipes à travers le monde travaillent actuellement sur les données de la mission Cassini-Huygens. Le LESIA à l'Observatoire de Paris à Meudon, ainsi que le LPL de l'Université d'Arizona (USA) et l'IFSI (Italie), s'intéressent tout particulièrement aux données concernant Titan. Examinons ici ce que ces données nous ont appris à propos du méthane sur cet objet.

La Figure 3 montre une série de spectres enregistrés par l'instrument DISR (en visée vers le haut) de la sonde Huygens au cours de sa descente dans l'atmosphère de Titan, qui a duré 2 h 30. On y voit clairement que ces spectres sont dominés par une série de larges bandes d'absorption

régulièrement espacées, dont l'intensité croît au fur et à mesure que Huygens se rapproche de la surface. Ceci se comprend par le fait que le chemin parcouru par la lumière solaire jusqu'au détecteur sur la sonde est de plus en plus grand et que cette lumière traverse donc une couche de gaz de plus en plus épaisse. Nous verrons plus loin que ces bandes d'absorption sont celles de la molécule de méthane.

Les images prises lors de la descente de Huygens, combinées aux images radar de l'orbiteur Cassini (qui sont un autre moyen de voir à travers l'atmosphère) fournissent d'autres informations précieuses. Les 20 % de la surface de Titan qui ont d'ores et déjà été observés par le radar montrent qu'environ 1 % de cette surface est recouvert par des réseaux fluviaux. Plus spectaculaire encore, les régions polaires (au-delà de 70° de latitude) sont en grande partie couvertes de larges étendues lisses (qui apparaissent en noir sur les images

radar), interprétées comme de grands lacs constitués d'un mélange de méthane et d'éthane liquides. La Figure 4 montre une partie d'un de ces lacs.

Toutes ces observations permettent de commencer à dresser un portrait des mécanismes physico-chimiques à l'œuvre sur Titan. La principale question qui se pose à propos du méthane est son origine. Cette molécule est en effet petit à petit détruite dans la haute atmosphère (stratosphère) par le rayonnement solaire (par photolyse). Les modèles montrent que, à la vitesse à laquelle ces réactions photochimiques se produisent, le méthane actuellement présent dans l'atmosphère de Titan devrait avoir totalement disparu depuis longtemps. Il y a donc nécessairement une ou plusieurs sources de méthane capables d'alimenter l'atmosphère. Les lacs peuvent être une de ces sources, mais ils ne suffisent apparemment pas, selon les modèles récents, à expliquer les quantités de CH₄ actuellement observées. Précisons que, selon les mesures, il y a environ 5 % de méthane atmosphérique près de la surface et 1,5 % dans la stratosphère au-dessus de 50 km d'altitude. Une autre source possible serait la présence de méthane piégé dans la glace de l'intérieur du satellite sous forme de composés appelés clathrates. Ce méthane pourrait remonter petit à petit vers la surface ou encore être relâché lors d'éruptions cryovolcaniques².

Par ailleurs, la décomposition du méthane par photolyse dans la haute atmosphère donne lieu à une série de réactions chimiques menant à des composés chimiques variés. Le principal produit de cette photolyse est l'éthane (C₂H₆) mais d'autres hydrocarbures plus complexes sont aussi formés. La dissociation de l'azote (N₂) dans la haute atmosphère conduit à la formation de nitriles, le plus abondant étant le cyanure d'hydrogène, HCN. La polymérisation de certains de ces composés donne enfin naissance à un matériau complexe qui constitue les particules solides de la brume orangée qui emplit l'atmosphère. Ces particules, qui servent aussi de

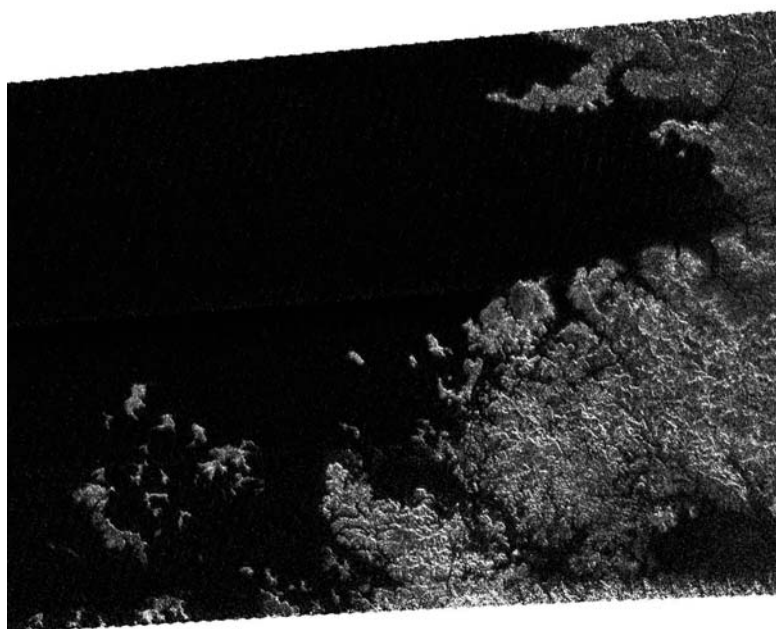


Figure 4 : Image radar d'une région proche du pôle nord de Titan, prise par la sonde Cassini. Selon toute vraisemblance, l'étendue noire sur cette image est une partie d'un vaste lac de méthane et d'éthane liquides. L'image fait environ 270 par 160 km, avec une résolution de 300 m (Image JPL PIA09211 - Crédit photo : NASA/JPL/Space Science Institute).

noyaux de condensation pour l'éthane et d'autres gaz, tombent continûment à la surface de Titan.

Tout ceci permet de dresser le schéma d'un véritable « cycle du méthane » sur Titan, un peu à l'image du cycle de l'eau sur Terre. Ce cycle est représenté sur la Figure 5. Il correspond à nos connaissances actuelles sur Titan, qui vont très certainement encore évoluer dans les années à venir, avec la poursuite des observations de Cassini.

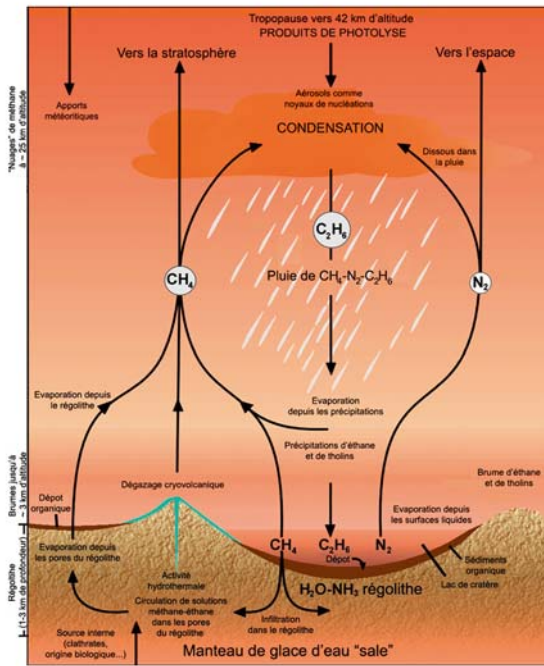


Figure 5 : Le cycle du méthane sur Titan (Crédit : Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques / Université Paris 12).

Ainsi que nous l'avons déjà évoqué, un des principaux moyens d'étude de la physico-chimie de l'atmosphère de Titan est la spectroscopie. Il est donc nécessaire de pouvoir disposer de modèles très fiables du spectre de la molécule CH₄. Or ceci n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire, la modélisation de spectres tels que ceux de la Figure 3 étant en réalité extrêmement complexe. C'est ici qu'une forte interaction entre planétologues et physiciens moléculaires est nécessaire, montrant la grande interdisciplinarité de ce type d'études.

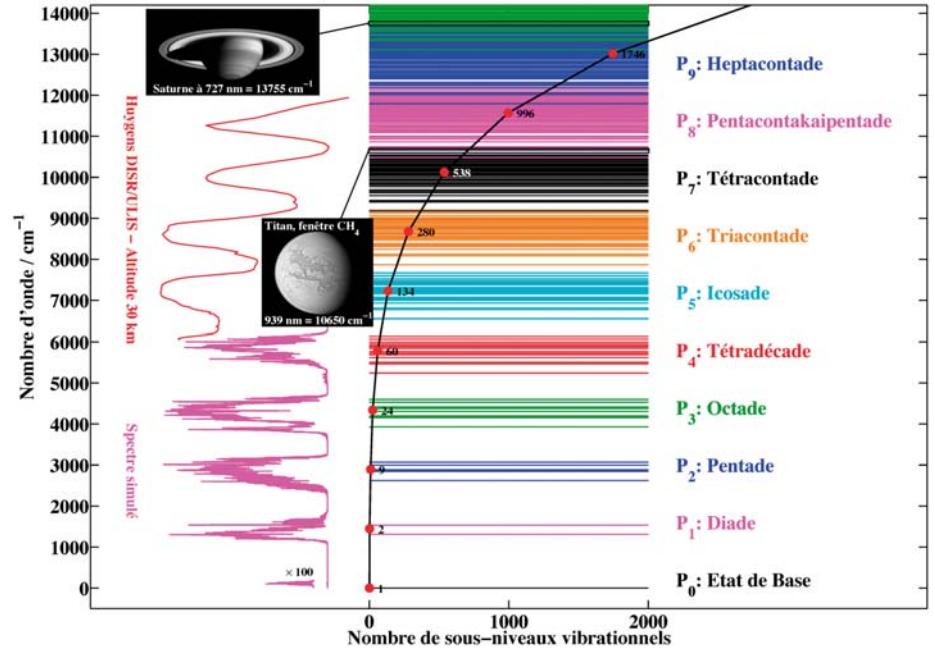


Figure 6 : La complexité du spectre du méthane. Les traits horizontaux au centre représentent les niveaux d'énergie de vibration. La courbe noire donne le nombre de niveaux vibrationnels en fonction du nombre d'onde. Sur la gauche, différentes régions spectrales sont illustrées par des images et des spectres. Les noms à droite correspondent aux différentes bandes d'absorption ou « polyades », voir texte (Images JPL PIA05381 et PIA06220 - Crédit photos : NASA/JPL/Space Science Institute).

Le spectre du méthane

Il peut sembler étonnant qu'une petite molécule organique à seulement cinq atomes comme le méthane soit encore de nos jours un sujet d'études expérimentales et théoriques poussées, et que nos connaissances sur ce sujet soient encore aujourd'hui insuffisantes. Or, la simplicité de cette molécule n'est qu'apparente, surtout si l'on considère la structure fine de son spectre d'absorption sur une large gamme spectrale (en fait, les molécules plus complexes – avec plus d'atomes – sont de ce point de vue encore plus difficiles à étudier ; tout dépend en réalité du niveau de détail et de précision requis par les applications).

CH₄ possède de plus plusieurs particularités spectroscopiques remarquables. Tout d'abord, cette molécule, dans sa configuration d'équilibre, est très symétrique, les quatre atomes d'hydrogène étant placés aux sommets d'un tétraèdre régulier (voir Figure 1). Cette grande symétrie doit être prise en compte dans les modèles

et ceci se traduit par l'emploi nécessaire d'outils mathématiques spécifiques (théorie des groupes, en particulier). Une seconde caractéristique essentielle du spectre du méthane est liée à l'organisation de ses niveaux d'énergie. CH₄, comme toute molécule, est un objet quantique, dont les mouvements de rotation et de vibration des atomes sont quantifiés. Ce sont les transitions entre les niveaux d'énergie discrets qui produisent un spectre de raies d'absorption. Il se trouve que les fréquences caractéristiques de vibration des atomes de la molécule de méthane, au nombre de quatre, présentent entre elles des rapports approchés simples. La conséquence en est que les niveaux d'énergie de vibration se groupent en « paquets » appelés *polyades*, régulièrement espacés en énergie (ou en nombre d'onde, voir les notes à la fin de l'article). Et plus l'on monte en énergie, plus le nombre de niveaux dans chaque polyade augmente, comme le montre la Figure 6. Ce groupement en polyades est responsable des larges bandes d'absorption du spectre du méthane observé à basse

résolution (comme illustré sur la gauche de la même Figure). La complexité de la structure énergétique du méthane est à l'origine du fait que le groupe de Dijon est le seul à avoir maintenu un fort investissement dans la théorie des spectres de ce type de molécules. Les concepts originaux mis en place seront brièvement évoqués plus loin.

Les lois de la mécanique quantique font que l'intensité d'absorption des polyades les plus élevées diminue avec l'excitation (avec l'énergie) des niveaux. Cependant, dans des environnements tels qu'une atmosphère planétaire contenant une quantité significative de méthane (quelques %) et dans laquelle la lumière solaire parcourt un très long chemin (plusieurs centaines de km), même les polyades très excitées, extrêmement faibles lorsque observées en laboratoire, peuvent absorber pratiquement toute la lumière aux longueurs d'onde correspondantes. La Figure 6 montre ainsi une image de Saturne, prise par la sonde Cassini, dans la région d'une polyade très excitée. Les régions sombres correspondent à une forte absorption du méthane dans cette région spectrale (alors que les régions claires correspondent à des nuages d'altitude élevée, masquant le méthane sous-jacent). Cette absorption de la lumière par le méthane est aussi en grande partie responsable, par exemple, de l'opacité de l'atmosphère de Titan. Il existe cependant des fenêtres de transparence entre ces polyades. Celles-ci sont très intéressantes, car elles permettent, d'une part, d'observer les autres composés de cette atmosphère et, d'autre part, elles constituent le seul moyen de « voir » la surface de Titan depuis l'espace. Toujours sur la Figure 6, une autre image prise par la sonde Cassini à travers une de ces fenêtres spectrales, révèle la topographie de la surface du satellite de Saturne. Nous voyons donc déjà que la modélisation de l'absorption du méthane dans de telles atmosphères nécessite de considérer un très grand nombre d'états excités. Mais la complexité ne s'arrête pas là ! Car à la structure vibrationnelle du spectre se superpose sa structure rotationnelle, due

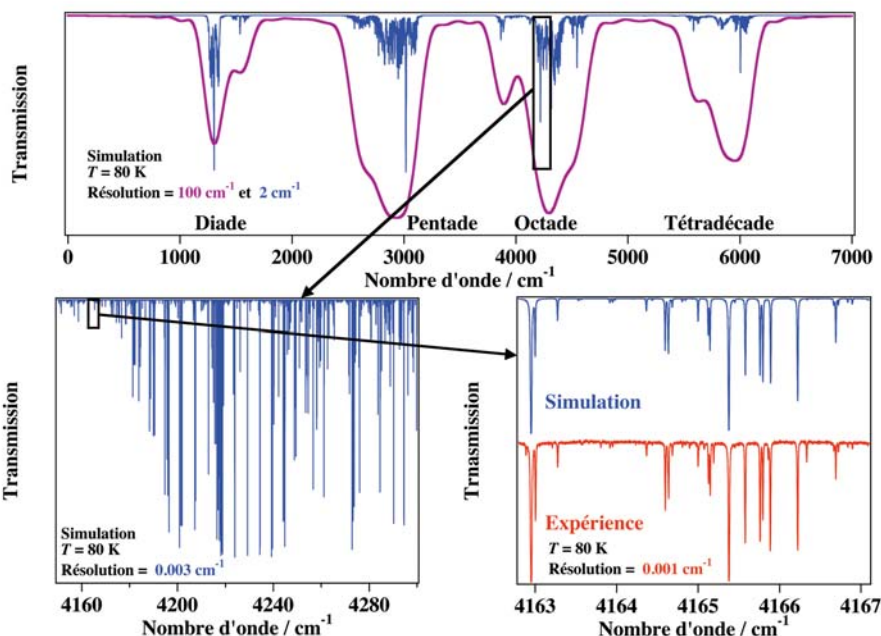


Figure 7 : Le spectre du méthane simulé à différentes résolutions spectrales. Le dernier panneau en bas à droite montre la comparaison d'une petite partie du spectre calculé avec l'expérience (spectre mesuré en laboratoire, en rouge).

au nombre encore bien plus grand d'états quantiques de rotation. Ceci est illustré sur la Figure 7, qui montre une partie du spectre d'absorption à différentes résolutions. Même observé à basse ou moyenne résolution (comme c'est souvent le cas pour les instruments embarqués à bord de sondes spatiales), le profil d'un spectre d'absorption dépend de la structure fine sous-jacente. Sa modélisation requiert donc l'analyse de spectres de laboratoire à haute résolution, ce qui implique l'étude d'un nombre extrêmement grand d'états quantiques, et donc l'attribution (c'est-à-dire l'identification) d'un très grand nombre de raies spectrales. La densité des niveaux quantiques est de l'ordre de 5 niveaux par cm^{-1} dans la région de l'Octade (actuellement bien modélisée autour de 4500 cm^{-1}), elle passe à environ 300 niveaux par cm^{-1} dans la région de la Pentacontakaipentade (autour de 11500 cm^{-1} , voir Figure 6). La densité d'états correspondante (compte tenu de la dégénérescence³ totale des niveaux) est de l'ordre de 350 et 32 000 états quantiques par cm^{-1} respectivement ! Ces chiffres situent l'ampleur du défi à relever pour l'obtention des paramètres moléculaires nécessaires à la production de spectres synthétiques qui peuvent être incorporés aux modèles d'atmosphères planétaires.

Une brève histoire de spectroscopie fondamentale...

Les outils théoriques élaborés à Dijon dès la fin des années 1970 (stimulés à l'époque par la mission Voyager) n'ont cessé de produire des modèles et des algorithmes informatiques incontournables pour l'analyse à haute résolution des spectres des molécules dites « toupies sphériques » dont l'archétype est le méthane. Dès les années 1980, l'équipe a constitué le centre de gravité de collaborations nationales et internationales impliquant à la fois des théoriciens et des expérimentateurs, notamment avec l'Université de Paris 11 Orsay, l'Institut d'Optique Atmosphérique (IAO) de Tomsk (Russie) et le *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) à Pasadena (USA). Les nombreux résultats acquis dans ce contexte sont référencés dans un article de revue récent (Référence [1]). Grâce à une intégration poussée de la théorie et du traitement numérique, l'équipe a été à l'origine du concept d'approche globale visant une description unifiée des premières polyades d'une molécule. Cette approche s'est avérée déterminante en particulier pour les résultats récents décrits plus loin car elle optimise la propagation sur les polyades supérieures des résultats

accumulés sur les polyades inférieures et intègre, de façon systématique, les observations expérimentales disponibles de toutes origines. Au début des années 1990, les travaux de l'équipe ont débouché sur une licence logicielle (TDS) commercialisée par le CNRS. Puis, peu après l'avènement d'Internet, l'ensemble des outils développés (STDS, ...) ont été mis en ligne à disposition de la communauté scientifique. Les résultats d'analyse sont régulièrement mis à jour depuis lors (voir le site Web :

<http://icb.u-bourgogne.fr/OMR/SMA>).

C'est donc grâce à une activité fondamentale de longue haleine menée dans le cadre d'un travail en équipe largement ouvert sur les collaborations internationales que des réponses précises et déterminantes pour l'interprétation des données de missions spatiales ciblées ont pu être apportées. Le soutien constant de la Région Bourgogne en matière d'équipement informatique dédié à l'équipe a contribué indirectement à ce succès et mérite d'être mentionné. L'encadré ci-dessous est une illustration anecdotique révélatrice des retombées « technologiques » de l'activité « fondamentale » de l'équipe.

Un thermomètre Hi-Tech fabriqué en Bourgogne...

La spectroscopie est l'outil de prédilection pour le sondage à distance des atmosphères. Précisément, la mesure des températures des différentes couches de l'atmosphère de Titan par la sonde Cassini, en orbite autour de Saturne, est basée sur le spectre infrarouge du méthane dans la région autour de $7\ \mu\text{m}$. Cette technique s'appuie sur la qualité de la modélisation réalisée à Dijon et publiée en 1989 (Références [2] et [3]) des paramètres des raies spectrales constituant des étalons secondaires dans ce domaine. Preuve s'il en est que le « rayonnement » de la Bourgogne déborde largement son terroir géographique ...

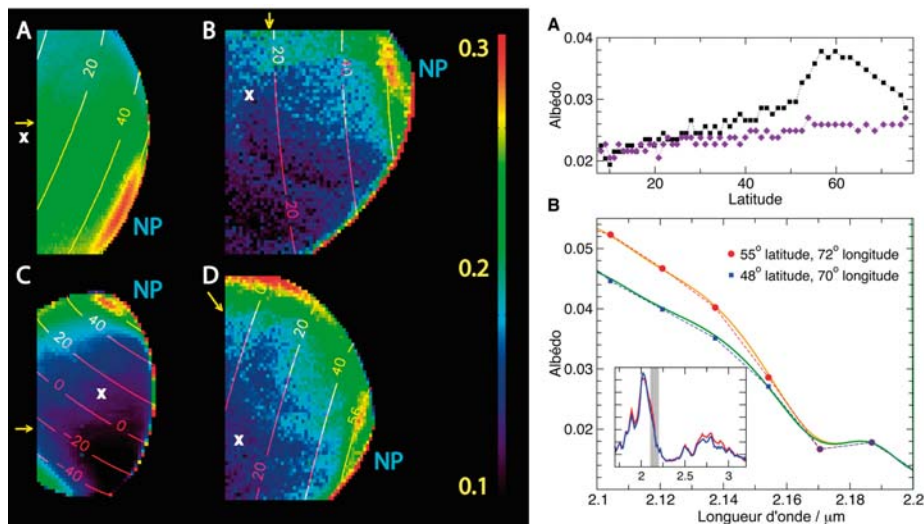


Figure 8 : A gauche : Vues infrarouges de Titan par l'instrument VIMS de la sonde Cassini, pour différentes longitudes. La tache en rouge près du pôle nord (NP) est un nuage d'éthane. En haut à droite : Albédo (proportion de lumière solaire réfléchie) en fonction de la latitude à $2,11\ \mu\text{m}$ (en noir) et à $2,17\ \mu\text{m}$ (en mauve), révélant la diffusion par un nuage visible à $2,11\ \mu\text{m}$, au-delà de 51°N . En bas à droite : spectre mesuré (points) et simulé (courbes) à deux latitudes différentes. Le nuage d'éthane est présent à la latitude de 55°N . La différence entre les deux courbes reflète la diffusion par le nuage en question, plus brillant que la surface et situé vers 30 à 50 km d'altitude. Figure d'après la Référence [5].

Résultats récents

Les listes de raies calculées par l'équipe SMA ont permis récemment d'apporter une contribution significative à l'analyse d'un certain nombre de mesures concernant Titan.

Ainsi, grâce à ces listes, le LESIA a pu interpréter les données du satellite ISO prises en 1997 dans la région spectrale $2,4 - 4,9\ \mu\text{m}$ (Référence [4]).

Une autre contribution importante a été la participation à la mise en évidence, par une équipe de l'Université d'Arizona (USA), d'un vaste nuage d'éthane polaire sur Titan. Ceci a été possible grâce à la simulation du spectre du méthane dans la région dite de l'octade (voir Figure 6) autour de $2,1$ à $2,2\ \mu\text{m}$. Comme illustré sur la Figure 8, il a été montré que la différence entre le spectre dans et en dehors du nuage en question était due à la diffusion par des petites particules situées vers 30 à 50 km d'altitude, avec des caractéristiques indiquant que ce nuage est vraisemblablement composé d'éthane. Comme nous l'avons évoqué plus haut, l'éthane (C_2H_6) est le principal produit de la photodissociation du

méthane par le rayonnement solaire dans la haute atmosphère de Titan et devrait précipiter au sol. L'apparente absence d'éthane liquide à la surface aux latitudes moyennes de Titan était donc jusqu'à présent un mystère. Ces nouvelles observations suggèrent qu'en fait l'éthane semble condenser plutôt dans ce type de nuages polaires, et s'accumuler très probablement dans les lacs présents dans ces mêmes régions (Figure 4). Ce résultat important a été publié dans la revue *Science* (Référence [5]).

Dans la Référence [6], il a été montré que les coefficients d'absorption du méthane calculés à Dijon dans l'infrarouge moyen permettaient une modélisation correcte de l'absorption atmosphérique de Titan mesurée par le télescope CFHT, à partir de laquelle les variations d'albédo de surface de la lune de Saturne peuvent être déduites.

Enfin, les mesures spectroscopiques du VLT pour différentes régions de Titan, dont le site d'atterrissage de la sonde Huygens, ont pu être modélisées correctement, aux incertitudes de mesure près, comme il est montré sur la Figure 9 (voir Référence [7]).

Notes

- ¹ Un glossaire de l'ensemble des sigles utilisés se trouve dans les notes ci-dessous.
- ² Le cryovolcanisme est aux planètes glacées ce que le volcanisme est aux planètes rocheuses. Un cryovolcan rejette des flots d'eau liquide ou de glace visqueuse.
- ³ Pour les molécules très symétriques, il arrive très souvent qu'un niveau quantique corresponde en fait à plusieurs niveaux de même énergie ; on parle alors de niveaux dégénérés.

Les unités en spectroscopie : En principe, un spectre est représenté par une courbe de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde λ . Celle-ci s'exprime le plus souvent en micromètres ou microns ($1 \mu\text{m} = 10^6 \text{ m}$). Toutefois, dans le domaine infrarouge, les spectroscopistes, pour des raisons de commodité, préfèrent généralement utiliser le nombre d'onde $\tilde{\nu}$ qui est l'inverse de la longueur d'onde ($1/\lambda$) et s'exprime traditionnellement en cm^{-1} . Le nombre d'onde est proportionnel à l'énergie.

Quelques sigles :

- ICB : Institut Carnot de Bourgogne,
- SMA : Equipe Spectroscopie Moléculaire et Applications de l'ICB.
- LESIA : Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique,
- ESA : European Space Agency (Agence Spatiale Européenne),
- NASA : National Aeronautics and Space Administration,
- ASI : Agenzia Spaziale Italiana,
- IAO : Institute of Atmospheric Optics,
- JPL : Jet Propulsion Laboratory,
- LPL : Lunar and Planetary Laboratory,
- IFSI : Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario,
- DISR : Descent Imager Spectral Radiometer,
- VIMS : Visual and Infrared Mapping Spectrometer,
- CIRS : Composite InfraRed Spectrometer,
- ISO : Infrared Space Observatory,
- VLT : Very Large Telescope,
- CFHT : Canada-France-Hawaii Telescope

Quelques sites Web

- ICB : <http://icb.u-bourgogne.fr>
- LESIA : <http://www.lesia.obspm.fr>
- LPL : <http://www.lpl.arizona.edu>
- Cassini-Huygens à l'ESA : <http://saturn.esa.int>
- Cassini-Huygens au JPL (NASA) : <http://saturn.jpl.nasa.gov>

Références

- ¹ BOUDON V., CHAMPION J.-P., GABARD T., LOËTE M., MICHELOT F., PIERRE G., ROTGER M., WENGER C. and REY M., 2004. "Symmetry-Adapted Tensorial Formalism to Model Rovibrational and Rovibronic Spectra of Molecules Pertaining to Various Point Groups". *Journal of Molecular Spectroscopy*, 228, 620-634.
- ² CHAMPION J.-P., HILICO J.-C., WENGER C. and BROWN L.-R., 1989. "Analysis of the ν_2 / ν_4 Dyad of $^{12}\text{CH}_4$ and $^{13}\text{CH}_4$ ". *Journal of Molecular Spectroscopy*, 133, 256-272.
- ³ BROWN L.-R., LOËTE M. and HILICO J.-C., 1989. "Linestrengths of the ν_2 and ν_4 Bands of $^{12}\text{CH}_4$ and $^{13}\text{CH}_4$ ". *Journal of Molecular Spectroscopy*, 133, 273-311.
- ⁴ COUSTENIS A., NEGRÃO A., SALAMA A., SCHULZ B., LELLOUCH E., RANNOU P., DROSSART P., ENCRENAZ T., SCHMITT B., BOUDON V. and NIKITIN A., 2006. "Titan's 3-Micron Spectral Region from ISO High-Resolution Spectroscopy". *Icarus*, 180, 176-185.
- ⁵ GRIFFITH C. A., PENTEADO P., RANNOU P., BROWN R., BOUDON V., BAINES K. H., CLARK R., DROSSART P., BURATTI B., NICHOLSON P., MCKAY C. P., COUSTENIS A., NEGRÃO A. and JAUMANN R., 2006. "Evidence for a Polar Ethane Cloud on Titan.". *Science*, 313, 1620-1622.
- ⁶ NEGRÃO A., COUSTENIS A., LELLOUCH E., MAILLARD J.-P., RANNOU P., SCHMITT B., MCKAY C. P. and BOUDON V., 2006. "Titan's Surface Albedo from Near-Infrared CFHT/IFTS Spectra : Modeling Dependence on the Methane Absorption." *Planetary and Space Science*, 54, 1225-1246.
- ⁷ NEGRÃO A., HIRTZIG M., COUSTENIS A., GENDRON E., DROSSART P., RANNOU P., COMBES M. and BOUDON V., 2007. "2- μm Spectroscopy of Huygens Probe Landing Site on Titan with VLT/NACO." *Journal of Geophysical Research*, 112, E02S92.
- ⁸ NIKITIN A., BOUDON V., CHAMPION J.-P., LOËTE M., ALBERT S., BAUERRECKER S., QUACK M. and BROWN L. R., 2008. "Global Frequency and Intensity Analysis of $^{12}\text{CH}_4$ Lines in the 0-4800 cm^{-1} region." *Submitted to The Journal of Chemical Physics*.
- ⁹ TRAN H., FLAUD P.-M., GABARD T., HASE F., VON-CLARMANN T., CAMY-PEYRET C., PAYAN S. and HARTMANN J.-M., 2006. "Model, Software and Database for Line-Mixing Effects in the ν_3 and ν_4 Bands of CH_4 and Tests Using Laboratory and Planetary Measurements-I: N_2 (and Air) Broadenings and the Earth Atmosphere." *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 101, 284-305.
- ¹⁰ TRAN H., FLAUD P.-M., FOUCHETT., GABARD T. and HARTMANN J.-M., 2006. "Model, Software and Database for Line-Mixing Effects in the ν_3 and ν_4 Bands of CH_4 and Tests Using Laboratory and Planetary Measurements-II: H_2 (and He) Broadenings and the Atmospheres of Jupiter and Saturn." *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 101, 306-324.

Le lecteur pourra également se référer à des articles généraux comme :

- ATREYA S., Juin 2007. "Le Méthane, Signe de Vie sur Mars et Titan ?" *Pour la Science*, 356, 38-45.
- PORCO C., Octobre 2007. "Cassini, 1 000 Jours Autour de Saturne" *Pour la Science*, 360, 44-51.