

Le méthane dans l'atmosphère de Titan

De la spectroscopie fondamentale à la planétologie*

Vincent Boudon¹(Vincent.Boudon@u-bourgogne.fr), Jean-Paul Champion¹, Tony Gabard¹, Michel Loëte¹, Athéna Coustenis², Catherine de Bergh², Bruno Bézard², Emmanuel Lellouch², Pierre Drossart², Mathieu Hirtzig^{2,3}, Alberto Negrão^{4,5}, Caitlin A. Griffith⁶

1 - Institut Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne, BP 47870, 21078 Dijon

2 - LESIA, Observatoire de Paris-Meudon, 92195 Meudon

3 - Planetary Science Laboratory, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2143, USA

4 - Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, 00133 Rome, Italie

5 - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, s/n 4200-465, Porto, Portugal

6 - Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

Le méthane (CH₄) joue sur Titan, le plus gros satellite de Saturne, un rôle similaire à celui de l'eau sur Terre. Il y est de plus à l'origine d'une chimie organique complexe. La spectroscopie étant la technique privilégiée pour mesurer le CH₄ dans les atmosphères planétaires, des modèles précis de l'absorption de la lumière par cette molécule doivent être développés. Les résultats récents obtenus dans ce domaine à l'Institut Carnot de Bourgogne, en collaboration étroite avec des planétologues, permettent notamment de contribuer à l'interprétation des résultats de la mission Cassini-Huygens.

La molécule de méthane (CH₄) est relativement abondante dans l'Univers. Sur Terre, elle est le principal composant du gaz naturel et il s'agit du second gaz à effet de serre d'origine anthropique, après le gaz carbonique. Elle est également présente en quantités 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 les exoplanètes géantes.

La méthode privilégiée pour la détermination de la composition chimique et des conditions physiques de ces atmosphères planétaires est la spectroscopie. Cette technique de diagnostic optique permet d'identifier les espèces chimiques d'après la lumière qu'elles absorbent ou réémettent aux différentes longueurs d'onde.

La compréhension du spectre d'une atmosphère planétaire nécessite donc de pouvoir modéliser correctement celui de ses différents composés. Par ailleurs, le spectre de ces atmosphères est largement dominé par les fortes bandes d'absorption du méthane, du fait de son abondance substantielle. Aussi, la détection des autres

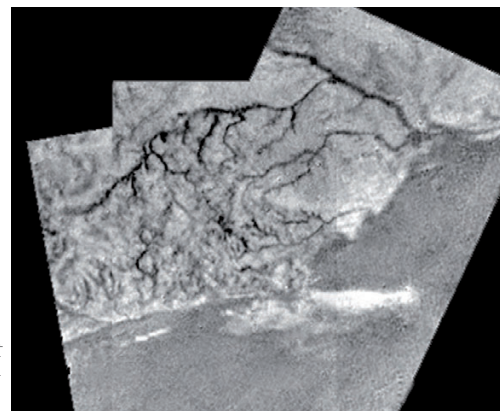
composés minoritaires (molécules organiques complexes...) nécessite de pouvoir « soustraire » le spectre de CH₄, et donc de disposer pour celui-ci d'un modèle extrêmement fiable, valide sur une large gamme de longueurs d'onde (depuis les micro-ondes jusqu'au proche infra-rouge). Ajoutons que, même observé à basse ou moyenne résolution, 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'identification d'un très grand nombre de raies spectrales.

Le méthane sur Titan

Titan, la plus grosse lune de Saturne, a un diamètre de 5150 km et possède une épaisse atmosphère, composée principalement d'azote (98 % en moyenne) qui n'absorbe pas la lumière, mais aussi d'une quantité importante de méthane, ainsi que d'un grand nombre d'autres molécules organiques, signe d'une activité chimique complexe.

La température de surface de Titan est de seulement -179 °C et l'eau n'y existe que sous forme de glace. Le méthane joue sur Titan un rôle semblable à celui de l'eau sur Terre. Il est présent sous forme de gaz dans l'atmosphère, forme des nuages et il existe de toute évidence des pluies de méthane, des rivières (fig.1) et des lacs de méthane mélangé à de l'éthane.

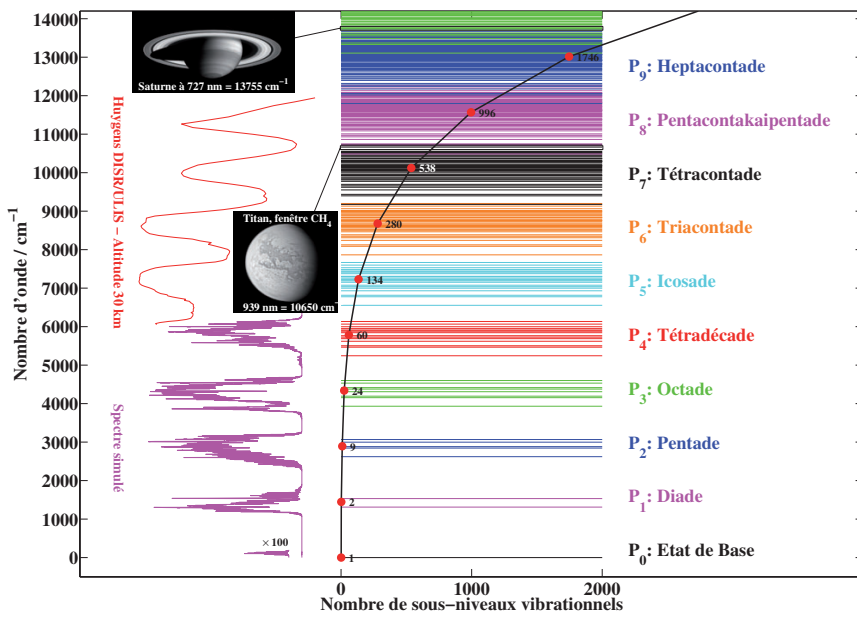
Cette vision de Titan est principalement issue des observations et mesures effectuées par les sondes spatiales comme Voyager 1 en 1980 et surtout la mission Cassini-Huygens (NASA/ESA/ASI) qui, depuis juillet 2004, a révolutionné notre connaissance du système de Saturne et en particulier de Titan. Le point d'orgue en fut la descente dans l'atmosphère de Titan et l'atterrissage à sa surface de la sonde européenne Huygens, le 14 janvier 2005.



1. Rivières de méthane « asséchées » photographiées par la sonde Huygens lors de sa descente sur Titan.

© NASA/JPL/Space Science Institute

* Une version longue de cet article est parue en mai 2008, dans *uB Sciences* n°3, la revue de la recherche de l'Université de Bourgogne.



à la formation de nitriles tel que le cyanure d'hydrogène (HCN). La polymérisation de certains composés donne naissance à un matériau complexe constituant les particules solides de la brume orangée qui emplit l'atmosphère. Celles-ci servent de noyaux de condensation pour l'éthane et d'autres gaz, et tombent continuellement à la surface de Titan. Tout ceci permet de dresser le schéma d'un véritable « cycle du méthane » sur Titan, à l'image du cycle de l'eau sur Terre.

La spectroscopie étant l'un des principaux outils d'étude de la physico-chimie de l'atmosphère de Titan, il est nécessaire de pouvoir disposer de modèles très fiables du spectre de CH₄. Une forte interaction entre planétologues et spectroscopistes est donc indispensable.

Le spectre du méthane

La simplicité de la molécule de méthane n'est qu'apparente, surtout si l'on considère la structure fine de son spectre d'absorption. CH₄ possède plusieurs particularités spectroscopiques remarquables. Tout d'abord, cette molécule est très symétrique, les quatre atomes d'hydrogène étant placés aux sommets d'un tétraèdre régulier. Une seconde caractéristique essentielle du spectre du méthane est liée à l'organisation de ses niveaux d'énergie. Les fréquences caractéristiques de vibration des atomes de la molécule, au nombre de quatre, présentent entre elles des rapports simples.

2. La complexité du spectre du méthane. Les traits horizontaux représentent les niveaux d'énergie de vibration. La courbe noire donne le nombre de sous-niveaux vibrationnels par polyade. Les noms correspondent aux différentes bandes d'absorption. Différentes régions spectrales sont illustrées par des images et des spectres : en mauve, un spectre simulé des polyades inférieures ; en rouge, un exemple de spectre enregistré sur Titan par la sonde Huygens.

L'orbiteur Cassini continue de survoler Titan régulièrement afin de l'observer avec ses différents instruments (caméras, spectromètres, radar...), complétant ainsi les observations effectuées depuis l'orbite terrestre (téléscope spatial Hubble, satellite ISO) ou depuis le sol à plus haute résolution spectrale (téléscopes CFHT, VLT, Keck...).

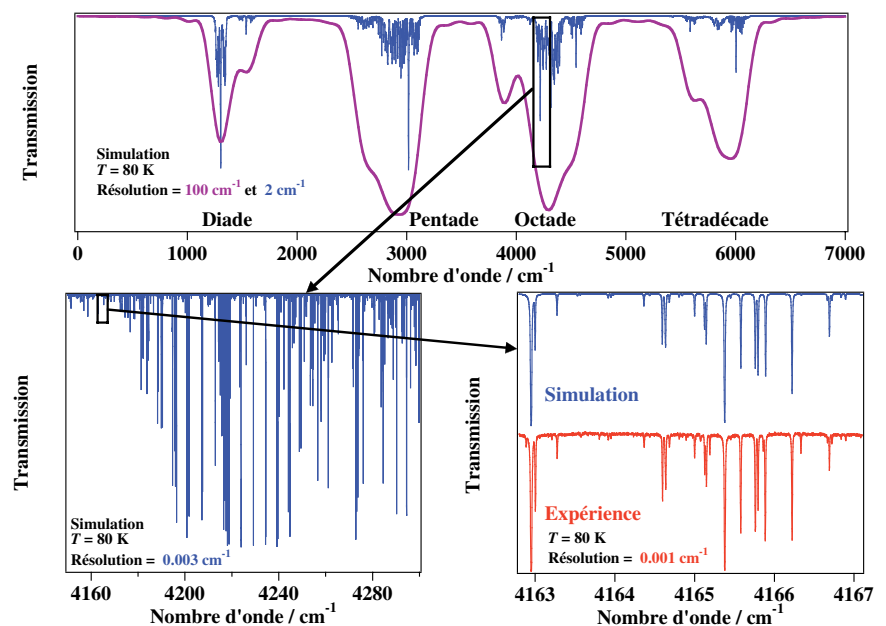
Les spectres enregistrés par l'instrument DISR de la sonde Huygens au cours de sa descente dans l'atmosphère de Titan, qui a duré 2 h 30, sont dominés par une série de larges bandes d'absorption régulièrement espacées, dues au méthane.

Les images prises lors de la descente de Huygens, combinées aux images radar de l'orbiteur Cassini fournissent d'autres informations. Environ 1% de cette surface est recouvert par des réseaux fluviaux (fig. 1). Les régions polaires sont en grande partie couvertes de larges étendues lisses, interprétées comme des lacs de méthane et d'éthane.

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 de Titan par le rayonnement solaire et devrait avoir totalement disparu depuis longtemps. Il y a donc des sources de méthane capables d'alimenter l'atmosphère. Les lacs ne suffisent pas, selon les modèles récents, à expliquer les quantités observées (environ 5 % de méthane près de la surface et 1,5 % dans la stratosphère). Une autre possibilité serait la présence de méthane piégé dans des cristaux de glace, appelés

clathrates. Il pourrait remonter peu à peu vers la surface ou être relâché lors d'éruptions cryovolcaniques.

Par ailleurs, la décomposition du méthane dans la haute atmosphère donne lieu à une série de réactions chimiques menant à des composés variés tels que l'éthane (C₂H₆) et d'autres hydrocarbures plus complexes. La dissociation de l'azote (N₂) et sa recombinaison avec le méthane conduisent

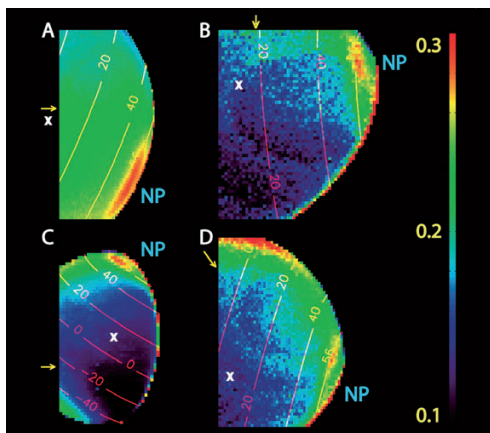


3. Le spectre du méthane simulé à différentes résolutions spectrales de plus en plus élevées, montrant la structure rotationnelle (en bleu). Dans le panneau supérieur, la courbe mauve représente un spectre calculé à basse résolution. Le panneau en bas à droite compare une petite partie du spectre calculé avec le spectre mesuré en laboratoire (en rouge).

La conséquence en est que les niveaux d'énergie de vibration se groupent en « paquets » appelés *polyades*⁽¹⁾, régulièrement espacés. Plus on monte en énergie, plus le nombre de niveaux dans chaque polyade augmente (fig. 2). Ce groupement est responsable des larges bandes d'absorption de CH₄.

Dans des environnements tels qu'une atmosphère planétaire contenant quelques pour cent de méthane et dans laquelle la lumière solaire parcourt plusieurs centaines de kilomètres, même les polyades très excitées, extrêmement faibles lorsqu'observées en laboratoire, peuvent absorber pratiquement toute la lumière aux longueurs d'onde correspondantes. La figure 2 montre ainsi une image de Saturne, prise par la sonde Cassini, sur laquelle les zones sombres correspondent à l'absorption de la lumière dans la région d'une polyade très excitée. Cette absorption de la lumière par le méthane est aussi responsable de l'opacité de l'atmosphère de Titan. Il existe cependant des fenêtres de transparence entre ces polyades. Celles-ci permettent d'observer les autres composés de cette atmosphère et constituent de plus le seul moyen de « voir » la surface de Titan depuis l'espace. Toujours sur la figure 2, 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.

La modélisation de l'absorption de la lumière par le méthane dans de telles atmosphères nécessite donc de considérer un très grand nombre d'états excités, mais la complexité ne s'arrête pas là ! À la structure vibrationnelle du spectre se superpose sa structure rotationnelle, due au nombre encore supérieur d'états de rotation (fig. 3), rendant obligatoire l'étude à haute résolution, si l'on veut reproduire très finement le profil des bandes observées, qui dépend de la structure sous-jacente. Par ailleurs, le calcul des intensités doit être aussi précis que possible, en vue de la mesure des concentrations,

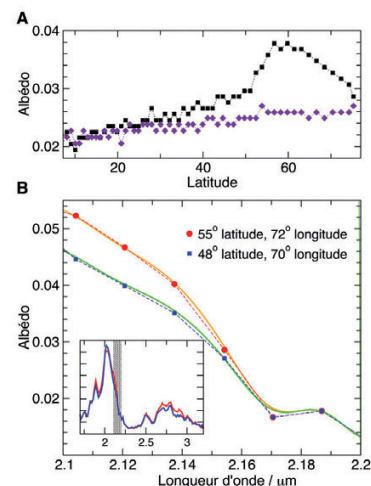


sachant que, de plus, ces intensités dépendent de la température. Réciproquement, la précision du modèle d'intensités conditionne celle de la mesure de température. Enfin, un modèle fiable apporte une bien plus grande souplesse qu'une interpolation à partir de données de laboratoire, forcément limitées.

Résultats récents

Les listes de raies calculées 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 μm [1]. L'intérêt d'utiliser un domaine spectral large au lieu d'une analyse fenêtre par fenêtre dans les études antérieures, est de permettre une meilleure contrainte sur le modèle d'aérosols de Titan, et une détermination de l'abondance du méthane dans la basse atmosphère. Les mesures d'albédo de la surface de Titan, obtenues simultanément dans plusieurs fenêtres infrarouge ont permis de contraindre la composition de la surface de Titan, compatible avec la présence de glace d'eau.



4. La mesure de l'albédo de Titan révèle la présence d'un nuage d'éthane.

À gauche : cartes de l'albédo (proportion de lumière solaire réfléchie) de Titan à 2,8 μm obtenues par l'instrument VIMS de la sonde Cassini. La tache en rouge près du pôle nord (NP) est un nuage d'éthane. En haut à droite : albédo en fonction de la latitude à 2,11 μm (en noir) et à 2,17 μm (en mauve), révélant la diffusion par un nuage visible à 2,11 μm, au-delà de 51°N. En bas à droite : spectres mesurés (points) et simulés (courbes) à deux latitudes différentes. La différence entre les spectres à ces deux latitudes reflète la diffusion par le nuage d'éthane, situé vers 30 à 50 km d'altitude. Figure d'après la référence [2].

(1) Les noms des polyades viennent du Grec et correspondent au nombre de niveaux vibrationnels (sur le même principe que les noms des polygones). Ces noms sont consacrés dans la littérature sur le méthane.

►► 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 du méthane.

Dès les années 1980, l'équipe a été 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 de Tomsk (Russie) et le Jet Propulsion Laboratory à Pasadena (USA). 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 à une description unifiée des premières polyades d'une molécule (en positions et en intensités). Au début des années 1990, les travaux de l'équipe ont débouché sur une licence logicielle commercialisée par le CNRS. Par la suite, l'ensemble des outils développés ont été mis en ligne à disposition de la communauté scientifique. Voir le site <http://icb.u-bourgogne.fr/OMR/SMA>.

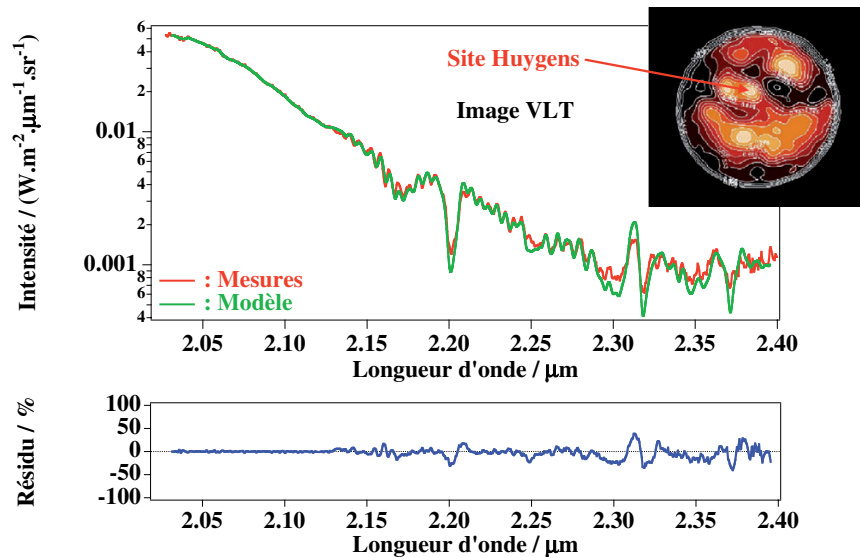
C'est donc grâce à une activité fondamentale de longue haleine, largement ouverte sur les collaborations internationales, que des réponses précises et déterminantes pour l'interprétation des données des missions spatiales ont pu être apportées.

►► UN THERMOMÈTRE HI-TECH

fabriqué en Bourgogne...

La mesure des températures des différentes couches de l'atmosphère de Titan par la sonde Cassini est basée sur l'intensité du spectre infrarouge du méthane dans la région autour de 7 μm. Cette technique s'appuie sur la modélisation réalisée à Dijon (et publiée en 1989) des paramètres des raies spectrales. Ces derniers constituent des étalons secondaires dans ce domaine.

Ce thermomètre mesure des températures entre 80 et 200 K, avec une précision de l'ordre de degré.



5. Modélisation de l'albédo de Titan.

En haut à droite : image du VLT. Les zones brillantes correspondent à des régions d'albédo élevé. En haut : spectre mesuré autour du site d'atterrissage de Huygens avec un pouvoir de résolution de 700 (en rouge) et spectre simulé (en vert). En bas, différence relative entre mesure et meilleur modèle (en bleu). Au-delà de 2,12 μm , l'erreur de mesure est de $\pm 27\%$. Le profil vertical de la brume et l'albédo de surface à 2 μm ont été déterminés à partir de ces mesures. Figure d'après [4].

Références

- 1 • A. Coustenis *et al.*, "Titan's 3-Micron Spectral Region from ISO High-Resolution Spectroscopy", *Icarus*, **180** (2006), 176-185.
- 2 • C.A. Griffith *et al.*, "Evidence for a Polar Ethane Cloud on Titan", *Science*, **313** (2006) 1620-1622.
- 3 • A. Negrão *et al.*, "Titan's Surface Albedo from Near-Infrared CFHT/FIS Spectra: Modeling Dependence on the Methane Absorption", *Planetary and Space Science*, **54** (2006) 1225-1246.
- 4 • A. Negrão *et al.*, "2- μm Spectroscopy of Huygens Probe Landing Site on Titan with VLT/NACO", *Journal of Geophysical Research*, **112** (2007) E02S92.

Pour en savoir plus

- S. Atreya, « Le Méthane, Signe de Vie sur Mars et Titan ? », *Pour la Science*, **356** (2007) 38-45.
- C. Porco, « Cassini, 1000 jours autour de Saturne », *Pour la Science*, **360** (2007) 44-51.
- *Encyclopedia of the Solar System*, édité par L.-A. Mc Fadden, P. R. Weissman et T. V. Johnson, Academic Press / Elsevier (2007).

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 (fig. 2), autour de 2,1 à 2,2 μm . Comme illustré sur la figure 4, 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. L'éthane (C_2H_6), principal produit de la photodissociation du méthane par le rayonnement solaire dans la haute atmosphère de Titan, 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 régions. Ce résultat important a été publié dans la revue *Science* [2].

Les coefficients d'absorption du méthane calculés dans l'infrarouge moyen permettent une modélisation correcte de l'absorption atmosphérique de Titan mesurée par le télescope CFHT [3], à partir de laquelle les variations d'albédo de surface peuvent être déduites.

Enfin, des spectres ont été enregistrés entre 2,03 et 2,40 μm à l'aide d'un des télescopes du VLT pour différentes régions de Titan, dont le site d'atterrissage de la sonde Huygens, comme on peut le voir sur la figure 5 [4]. Les coefficients d'absorption du méthane calculés dans l'infrarouge moyen permettent, en utilisant le profil d'abondance du méthane mesuré par la sonde Huygens, une modélisation correcte de l'absorption atmosphérique de Titan, à partir de laquelle l'albédo de surface peut être déduit dans un domaine spectral non couvert par l'instrument DISR.

Conclusion et perspectives : ce qu'il reste à faire

Malgré ces succès du modèle « dijonnais » pour la spectroscopie du méthane, un très gros travail reste encore à effectuer pour une interprétation globale des données planétologiques, qu'il s'agisse des mesures à relativement basse résolution spectrale par les instruments VIMS et DISR des sondes Cassini et Huygens, ou de mesures enregistrées depuis la Terre à plus haute résolution spectrale mais peu résolues spatialement. La modélisation précise raie par raie du spectre d'absorption de CH_4 n'est, pour l'instant, correcte que pour la région englobant les quatre premières polyades (fig. 2). Une meilleure modélisation du spectre du méthane à courte longueur d'onde permettrait de cartographier avec précision le profil vertical de la brume et son évolution saisonnière, ainsi que l'albédo de surface. La détermination de l'albédo dans différentes fenêtres spectrales fournirait des contraintes essentielles sur les divers composés présents à la surface (glace d'eau, hydrocarbures liquides, dépôts photochimiques...), et leur répartition sur le satellite.

Deux défis majeurs se présentent maintenant. Le premier concerne l'étude des polyades plus élevées (pour l'interprétation des données de la sonde Huygens, par exemple). Le nombre de niveaux quantiques en jeu dans ces polyades devient gigantesque et de nouvelles approches théoriques vont devoir être envisagées. La contribution de la chimie quantique, qui a réalisé d'énormes progrès ces dernières années, devrait se révéler essentielle.

Le second défi concerne la modélisation la plus précise possible des profils spectraux. En effet, dans une atmosphère comme celle de Titan, le spectre d'absorption du méthane est influencé par les autres molécules présentes (*via* des collisions), et en premier lieu l'azote, pour lequel peu d'études existent. Ceci est une source d'incertitude dans les modélisations actuelles de spectres planétaires (fig. 5), ce qui affecte les valeurs des paramètres physiques obtenus.

Il serait aussi possible d'analyser avec une bien meilleure précision les signatures spectrales de composés mineurs (monoxyde de carbone, éthane...) qui se superposent à celles du méthane, et ainsi de cartographier leurs abondances. Les signatures de molécules non encore détectées pourraient également être recherchées. À terme, ce type d'étude se révélera indispensable, non seulement pour l'interprétation des spectres planétaires et stellaires, mais aussi pour l'atmosphère terrestre, dans laquelle le méthane est un gaz à effet de serre très important. La modélisation du spectre du méthane est un sujet interdisciplinaire, qui est amené à fédérer de nombreuses compétences et thématiques. ■