

# Le spectre infrarouge lointain du méthane dans l'atmosphère de Titan

Vincent Boudon, Tony Gabard, Olivier Pirali, Pascale Roy, Jean-Blaise Brubach, Laurent Manceron, Jean Vander Auwera, Athena Coustenis et Emmanuel Lellouch

## Résumé

Le spectre infrarouge lointain du méthane est observé en émission dans la stratosphère de Titan, le principal satellite de Saturne. Il permet de déterminer la concentration de méthane dans cet environnement. Or ce spectre, d'intensité très faible car uniquement induit par la distorsion centrifuge de la molécule, était très mal connu jusqu'à présent. Pour la première fois, il a pu être enregistré, en absorption et à haute résolution, sur la ligne AILES du synchrotron SOLEIL. Des mesures ont été effectuées à la fois pour le méthane pur et pour des mélanges méthane-azote. L'analyse a permis une détermination précise des intensités des raies du méthane, ainsi que des coefficients caractérisant l'élargissement de ces raies induit par les collisions avec l'azote. Ces nouvelles données spectroscopiques, indispensables à l'interprétation des mesures en planétologie, vont très probablement améliorer notre compréhension de la physico-chimie des atmosphères planétaires où le méthane est souvent présent.

## Mots-clés

**Méthane, Titan, infrarouge lointain, spectroscopie, atmosphère, rayonnement synchrotron.**

## Abstract

### The far infrared spectrum of methane in the Titan's atmosphere

The far infrared spectrum of methane is observed in emission in the stratosphere of Titan, Saturn's main satellite, allowing to determine its concentration in this environment. However this spectrum, which has a very low intensity because it is induced by the centrifugal distortion of the molecule only, was poorly characterized up to now. For the first time, it has been recorded, in absorption and at high resolution, at the AILES beamline of the SOLEIL synchrotron. Measurements have been performed for both pure methane and methane-nitrogen mixtures. The intensities of methane lines and coefficients characterizing the broadening of these lines induced by collisions with nitrogen have been accurately determined. These new spectroscopic data, essential to analyze measurements in planetology, will most probably improve our understanding of physico-chemical processes in planetary atmospheres where methane is often present.

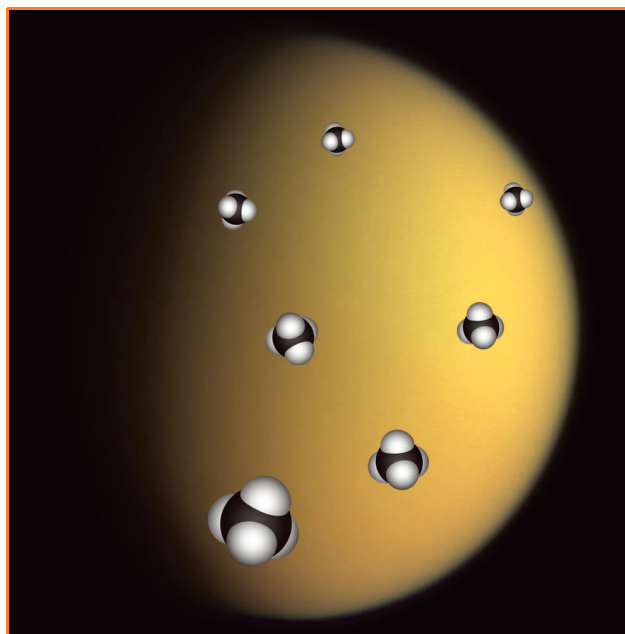
## Keywords

**Methane, Titan, far infrared, spectroscopy, atmosphere, synchrotron radiation.**

La molécule de méthane ( $\text{CH}_4$ ) est relativement abondante dans l'Univers. Sur Terre, c'est le composant principal du gaz naturel et le second gaz à effet de serre d'origine anthropique après le gaz carbonique. Elle est également présente 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.

Nous nous intéressons plus particulièrement ici à Titan, la plus grosse lune de Saturne (diamètre : 5 150 km). Elle possède une épaisse atmosphère, composée principalement de diazote (98 % en moyenne) qui n'absorbe pas la lumière, mais aussi d'une quantité importante de méthane, et d'un grand nombre d'autres molécules organiques, signe d'une activité chimique intense et complexe. La température de surface y est de seulement - 179 °C en moyenne et l'eau n'existe essentiellement 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

Illustration : M.-T. Dinh-Audouin/SCF.



comme témoignent les rivières et des lacs de méthane mélangé à de l'éthane observés par Cassini-Huygens (NASA/ESA/ASI) qui, depuis juillet 2004, a révolutionné notre connaissance du système de Saturne et en particulier de Titan.

La méthode privilégiée pour déterminer la composition chimique et les conditions physiques des atmosphères planétaires est la spectroscopie. Cette technique de diagnostic optique permet d'identifier les espèces chimiques d'après la lumière qu'elles absorbent ou émettent aux différentes longueurs d'onde. La molécule de méthane elle-même possède de nombreuses bandes d'absorption intenses, de l'infrarouge moyen au visible en passant par l'infrarouge proche. Ces bandes sont actuellement abondamment étudiées au laboratoire, tant sur le plan expérimental que théorique [1], pour aboutir à une modélisation précise du spectre d'absorption du méthane [2]. Les calculs de transfert radiatif s'en trouvent améliorés, facilitant l'identification d'espèces gazeuses minoritaires (dont le spectre est masqué par celui du méthane) et l'étude des propriétés de surface de Titan une fois la contribution de l'atmosphère basse (troposphère) connue.

L'étude de la plus haute atmosphère (stratosphère) est tout aussi importante. Plusieurs molécules y sont observées, cette fois en émission. Il s'agit en particulier, là encore, du méthane (*figure 1*) et de plusieurs de ses dérivés. Le méthane possède une série de raies dans le domaine de l'infrarouge lointain (THz<sup>(1)</sup>), utilisées pour mesurer sa concentration dans la stratosphère de Titan et ses éventuelles variations en latitude. Toutefois, ce spectre était jusqu'à présent mal caractérisé. Nous avons entrepris d'y remédier grâce à des mesures effectuées au synchrotron SOLEIL.

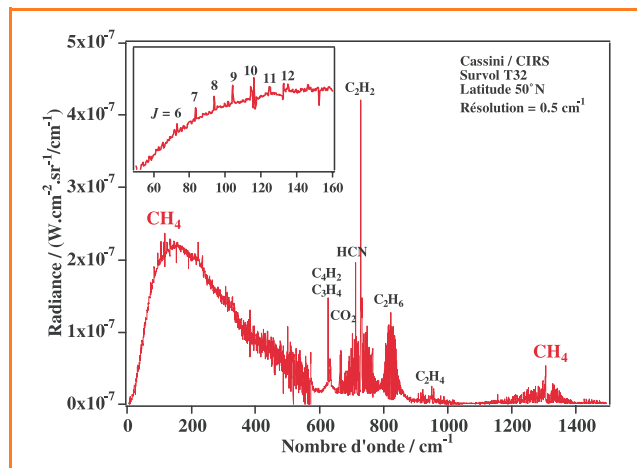


Figure 1 - Spectre de la stratosphère de Titan enregistré par l'instrument CIRS à bord de la sonde Cassini.

L'insert montre les raies du méthane dans l'infrarouge lointain, observées en émission.

## Mesures à SOLEIL

Du fait de sa grande symétrie, la molécule CH<sub>4</sub> ne possède pas de moment dipolaire électrique permanent et ne devrait donc pas posséder de spectre de rotation dans la région THz. Cependant, la distorsion de la molécule par effet centrifuge induit un très petit moment dipolaire électrique qui conduit à un tel spectre. Ce moment magnétique est

cependant extrêmement faible et le mesurer précisément en laboratoire est donc un défi. Jusqu'à présent, seules des études à haute pression et à faible résolution spectrale ont permis de l'observer [3]. Cependant, les intensités individuelles des raies, nécessaires à une modélisation correcte du spectre en vue des applications planétologiques, restaient inaccessibles. Afin d'obtenir un rapport signal sur bruit compatible avec des mesures précises à haute résolution dans un spectre d'aussi faible intensité, il faut disposer d'une source très brillante dans cette région spectrale. Le rayonnement synchrotron s'est donc avéré la source idéale pour cette étude.

Nous avons utilisé la ligne AILES de SOLEIL [4]. Elle est munie d'un spectromètre à transformation de Fourier Bruker IFS 125HR et d'une cuve à multiples passages, de type White, permettant un très long parcours optique dans le gaz étudié, qui augmentent encore la sensibilité de l'expérience.

Dans un premier temps, nous avons enregistré différents spectres du méthane pur pour différentes pressions (10 à 100 mbar) et des résolutions adaptées (variant de 0,0007 à 0,007 cm<sup>-1</sup>). Le trajet d'absorption dans la cuve multipassage a été ajusté à 151 m. Dans un second temps, et afin de se rapprocher du cas de l'atmosphère de Titan, nous avons enregistré des spectres dans des conditions de pression similaires, mais cette fois pour des mélanges contenant 5 % de méthane dans N<sub>2</sub> et pour des pressions totales de 100 à 800 mbar.

## Analyse des données

Les données recueillies ont pu être analysées grâce aux modèles développés par le groupe de Dijon, d'une part pour la modélisation du spectre de la molécule isolée (positions et intensités des raies), et d'autre part pour les profils spectraux (élargissement des raies par collisions avec l'azote).

Les spectres du méthane pur ont permis une détermination précise du moment dipolaire électrique induit par la distorsion centrifuge [5]. Les paramètres ainsi obtenus autorisent une modélisation fiable du spectre du méthane dans cette région, tant en absorption (*figure 2*) qu'en émission. Il est à noter que ces résultats ont déjà été appliqués aux mesures du satellite Herschel dans l'atmosphère de Neptune [6].

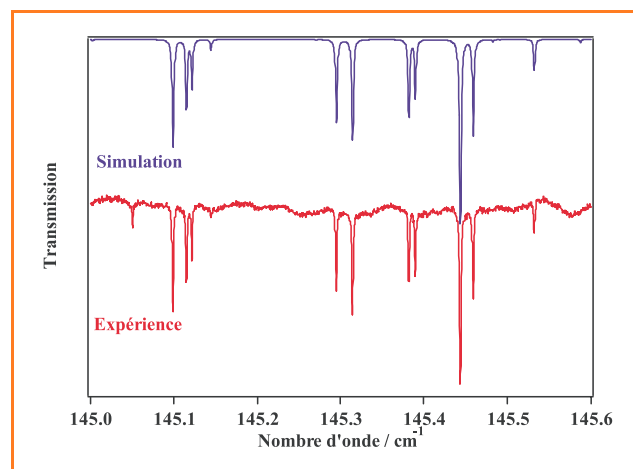


Figure 2 - Détail de la région R(13) du spectre d'absorption THz du méthane enregistré à SOLEIL (en rouge), comparée à la simulation (en bleu).

La raie supplémentaire apparaissant à gauche sur le spectre expérimental est due à la vapeur d'eau.

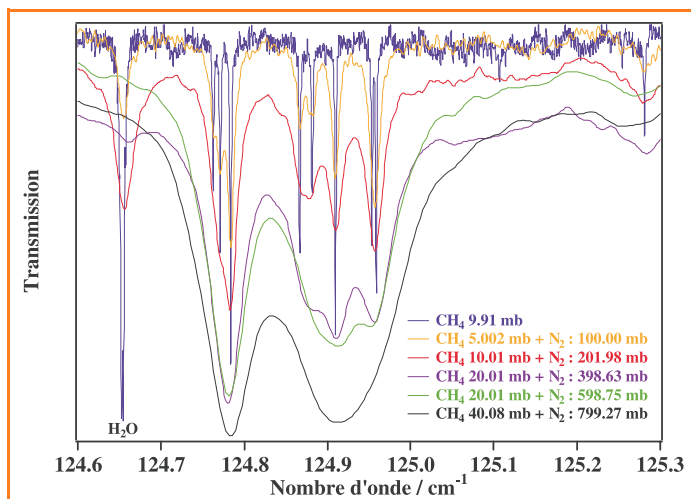


Figure 3 - Détail de la région R(11) du spectre d'absorption THz du méthane enregistrée à SOLEIL pour du méthane pur et dans différents mélanges avec de l'azote.

Les spectres des mélanges méthane-azote (figure 3) ont quant à eux permis une première détermination des coefficients caractérisant l'élargissement des raies de CH<sub>4</sub> par collisions avec N<sub>2</sub>. Ce point est extrêmement important pour la modélisation réaliste de spectres d'atmosphères planétaires. Cette partie de l'analyse est toutefois toujours en cours.

## Conclusion et perspectives

La combinaison du rayonnement synchrotron et de la spectroscopie à haute résolution a permis l'étude détaillée du spectre infrarouge lointain de la molécule de méthane. Cette étude devrait contribuer à améliorer les modèles d'atmosphères planétaires. Dans le cas de Titan, il reste toutefois du travail à accomplir. En particulier, l'étude des coefficients d'élargissement des raies par collisions avec l'azote devrait être reprise à basse température (moins de 100 K) afin de se rapprocher des conditions réelles. En effet, ces coefficients s'extrapolent très mal en température. Les applications planétologiques en général et concernant Titan plus particulièrement sont nombreuses [7] et permettent entre autres de déterminer les effets saisonniers sur le climat du satellite, une étude d'intérêt très proche de celui de notre planète.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du contrat ANR « CH<sub>4</sub>@Titan » (BLAN08-2\_321467). Jean Vander Auwera remercie le Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS, Belgique, contrats FRFC et IISN) et l'Action de Recherches Concertées de la Communauté française de Belgique pour le soutien financier reçu.

## Note et références

- (1) Domaine situé entre 100 GHz et 10 THz, soit en longueur d'onde entre 3 mm et 30  $\mu$ m.
- [1] Albert S., Bauerecker S., Boudon V., Brown L.R., Champion J.-P., Loëte M., Nikitin A., Quack M., Global analysis of <sup>12</sup>CH<sub>4</sub> lines in the 0-4800 cm<sup>-1</sup> region, *Chemical Physics*, **2009**, 356, p. 131.
- [2] Boudon V., Champion J.-P., Gabard T., Loëte M., Coustenis A., De Bergh C., Bézard B., Lellouch E., Drossart P., Hirtzig M., Negrão A., Griffith C.A., Methane in Titan's atmosphere: from fundamental spectroscopy to planetology, *Europhysics News*, **2009**, 40, p. 17.
- [3] Wishnow E.H., Orton G.S., Ozier I., Gush H.P., The distortion dipole rotational spectrum of CH<sub>4</sub>: a low temperature far-infrared study, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **2007**, 103, p. 102.

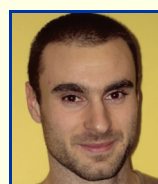
- [4] Roy P., Rouzières M., Qi Z., Chubar O., The AILES infrared beamline on the third generation synchrotron radiation facility SOLEIL, *Infrared Physics and Technology*, **2006**, 49, p. 139.
- [5] Boudon V., Pirali O., Roy P., Brubach J.-B., Manceron L., Vander Auwera J., The high-resolution far-infrared spectrum of methane at the SOLEIL synchrotron, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **2010**, 111, p. 1117.
- [6] Lellouch E., Hartogh P., Feuchtgruber H., Vandenbussche B. et al., First results of Herschel/PACS observations of Neptune, *Astronomy & Astrophysics*, **2010**, 518, p. L152.
- [7] De Bergh C., Courtin R., Bézard B., Coustenis A., Lellouch E., Hirtzig M., Drossart P., Campargue A., Kassi S., Wang L., Boudon V., Tyuterev V., Nikitin A., Applications of a new methane linelist to modeling of Titan's spectrum in the 1.58 micron window, *Planetary and Space Sciences*, sous presse.



V. Boudon



T. Gabard



O. Pirali



P. Roy



J.-B. Brubach



L. Manceron



J. Vander Auwera



A. Coustenis

**Vincent Boudon** (auteur correspondant) est chargé de recherche CNRS et **Tony Gabard** maître de conférences et au Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne à Dijon<sup>1</sup>.

**Olivier Pirali** est chercheur CNRS au Laboratoire de Photophysique moléculaire de l'Université Paris-Sud<sup>2</sup> et au synchrotron SOLEIL (Ligne AILES)<sup>3</sup>. **Pascale Roy**, chercheur CNRS, est responsable et coordinatrice de la ligne AILES<sup>3</sup>. **Jean-Blaise Brubach** est chercheur au synchrotron SOLEIL<sup>3</sup>.

**Laurent Manceron** est chercheur CNRS au LADIR, Université Pierre et Marie Curie<sup>4</sup>.

**Jean Vander Auwera** est maître de recherche FRS-FNRS au Service de Chimie Quantique et Photophysique, Université Libre de Bruxelles<sup>5</sup>.

**Athena Coustenis** est chercheur CNRS (photo © O. Daudet/C&EP) et **Emmanuel Lellouch**, astronome, au LESIA, Observatoire de Paris à Meudon<sup>6</sup>.



E. Lellouch

<sup>1</sup> Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS/Université de Bourgogne, 9 avenue A. Savary, BP 47870, F-21078 Dijon Cedex.

Courriels : Vincent.Boudon@u-bourgogne.fr ; Tony.Gabard@u-bourgogne.fr

<sup>2</sup> Laboratoire de Photophysique moléculaire, CNRS, Bât. 210, Université Paris-Sud, F-91405 Orsay Cedex.

<sup>3</sup> Ligne AILES - Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

Courriels : Olivier.Pirali@synchrotron-soleil.fr ; Pascale.Roy@synchrotron-soleil.fr ; Jean-Blaise.Brubach@synchrotron-soleil.fr

<sup>4</sup> LADIR, UMR 7075 CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Case 49, 4 place Jussieu, F-75252 Paris Cedex.

Courriel : Laurent.Manceron@upmc.fr

<sup>5</sup> Service de Chimie Quantique et Photophysique, CP 160/09, Université Libre de Bruxelles, 50 avenue F.D. Roosevelt, B-1050 Bruxelles.

Courriel : jauwera@ulb.ac.be

<sup>6</sup> LESIA, Observatoire de Paris - Section de Meudon, 5 place Jules Janssen, F-92195 Meudon Cedex.

Courriels : Athena.Coustenis@obspm.fr ; emmanuel.lellouch@obspm.fr