

Les brumes de Titan

Des grains organiques formés dans la haute atmosphère ionisée

Audrey CHATAIN

Résumé Titan, la plus grande lune de Saturne, possède une atmosphère un peu plus épaisse que notre Terre, et elle est étrange : elle est remplie de poussières orangées. La mission spatiale Cassini-Huygens s'en est approchée pour la première fois en 2004 et a découvert que ces poussières sont formées par une chimie induite par les UV et particules énergétiques dans la haute atmosphère. Cet article présente une étude réalisée au LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales) et au LPP (Laboratoire de Physique des Plasmas), combinant simulations expérimentales et analyses d'observations de Cassini, afin de comprendre comment ces aérosols organiques évoluent dans leur environnement ionisé.

Mots clés Titan, photochimie, aérosols organiques, atmosphères planétaires, plasmas de laboratoire, mission spatiale.

Abstract The hazes of Titan: organic particles formed in the ionized upper atmosphere

Titan, Saturn's largest moon, has an atmosphere slightly thicker than Earth's, and it is strange: it is filled with orange dust. The Cassini-Huygens space mission first approached it in 2004 and discovered that this dust is formed by chemistry induced by UV rays and energetic particles in the upper atmosphere. This article presents a study conducted at LATMOS and LPP, combining experimental simulations and analyses of Cassini observations, in order to understand how these organic aerosols evolve in their ionized environment.

Keywords Titan, photochemistry, organic aerosols, planetary atmospheres, laboratory plasmas, space mission.

<https://doi.org/10.1051/refdp/202683016>

Le système climatique de la lune de Saturne, Titan, est gouverné par la production intense d'aérosols organiques dans sa haute atmosphère, sous l'effet de rayonnements UV et de particules énergétiques. Ce phénomène s'est aussi certainement produit sur Terre au moment de l'apparition de la vie, avant la Grande Oxygénation.

Ces deux points motivent fortement les recherches sur les processus de formation et d'évolution des aérosols dans l'atmosphère de Titan.

Ce qu'on sait sur ces grains organiques

Titan, alerte pollution aux particules fines

Titan est une lune de Saturne étonnante, qui présente de nombreuses similitudes avec la Terre, dont en particulier un cycle hydrologique à sa surface et une atmosphère épaisse composée principalement de diazote [1]. Toutefois, une particularité majeure de Titan provient de ses aérosols. Des composés organiques orangés emplissent son atmosphère sous la forme d'aérosols et sédimentent à sa surface, formant localement des dunes. L'omniprésence des aérosols orangés dans l'atmosphère et à la surface est aisément observable sur les clichés de la *figure 1*. Les brumes d'aérosols sont particulièrement denses jusqu'à 500 km d'altitude.

La composition de l'atmosphère de Titan ressemble en particulier à celle de la Terre juste avant et aux débuts de l'apparition de la vie. Elle est composée principalement de diazote avec quelques pourcents de méthane, comme sur Terre avant l'évènement de la Grande Oxygénation, période lors de laquelle l'oxygène se répand dans l'atmosphère, il y a environ 2,3 milliards d'années. Des travaux suggèrent que la Terre à cette époque aurait également pu posséder une

brume organique [2]. L'étude de Titan est ainsi intéressante pour comprendre comment de la matière organique complexe prébiotique aurait pu se former et évoluer dans l'atmosphère de la Terre aux premiers instants de la vie.

Une chimie ionique complexe dans l'ionosphère

Titan a été visité par la mission Cassini-Huygens entre 2004 et 2017. La mission était composée d'un atterrisseur (Huygens), fourni par l'ESA, ainsi que d'un orbiteur (Cassini), réalisé par la NASA. Cassini a survolé Titan 126 fois et est descendu jusqu'à 880 km d'altitude. Cette mission a notamment permis une découverte fondamentale : les aérosols commencent à se former très haut dans l'atmosphère, à environ 1000-1200 km d'altitude [3].

À cette altitude se trouve l'ionosphère, une couche de l'atmosphère ionisée. Sur Titan, la principale source d'ionisation sont les photons solaires dans l'extrême UV. D'autres sources d'ionisation sont aussi présentes et dominant côté nuit, dont en particulier des électrons énergétiques en provenance de la magnétosphère de Saturne. Le dépôt d'énergie de ces photons et particules énergétiques conduit à la dissociation et à l'ionisation du diazote et du méthane de l'atmosphère, formant des radicaux, des espèces excitées, des ions et des électrons libres : c'est un plasma naturel.

La présence de ces espèces réactives formées principalement d'azote, de carbone et d'hydrogène induit une chimie organique complexe. Le spectromètre de masse INMS (« *ion neutral mass spectrometer* ») embarqué sur la sonde Cassini a ainsi collecté des molécules et des ions positifs de masse allant jusqu'à 100 u (unité de masse atomique), sa limite de détection. Certains de ces composés ont pu être identifiés, notamment C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_3C_2H , C_3H_6 , C_4H_2 , C_6H_6 , HCN,

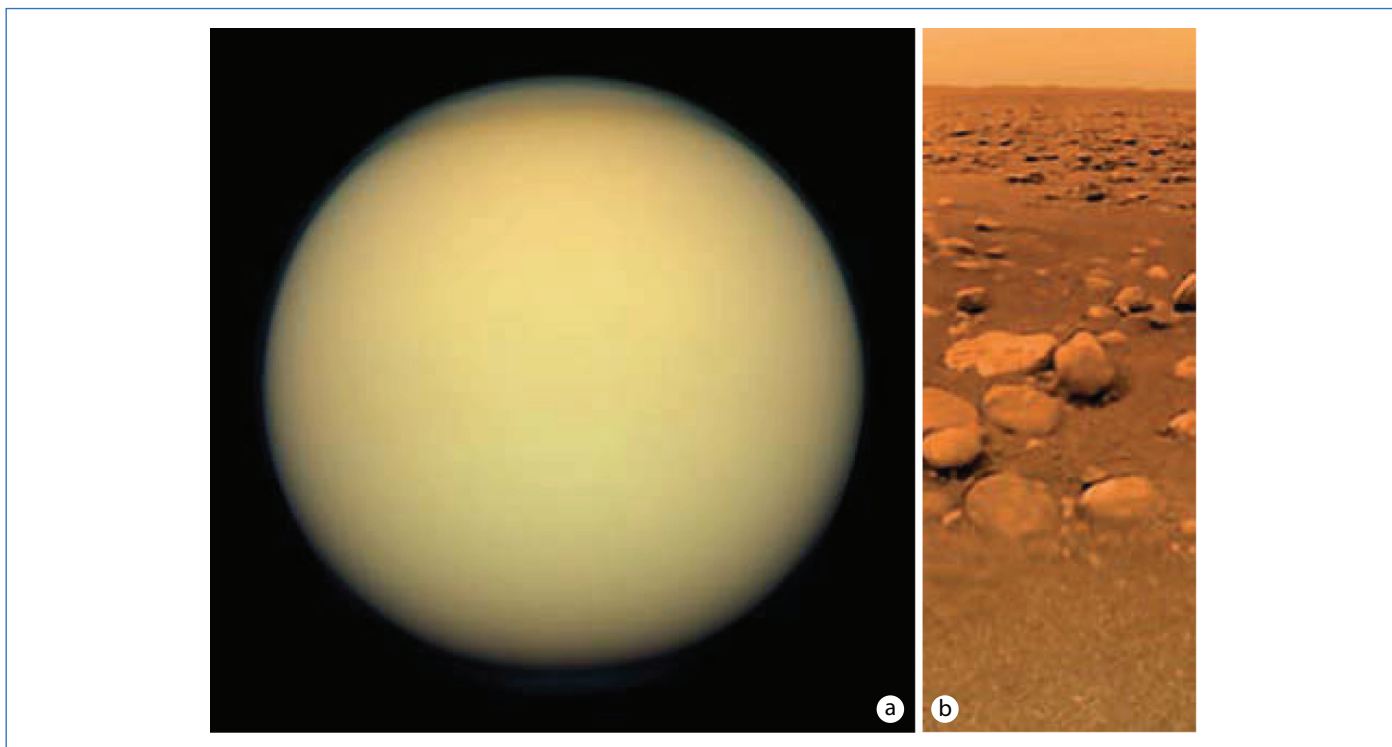


Figure 1 - (a) Titan observé par la sonde Cassini en janvier 2012. (b) Surface de Titan photographiée par la sonde Huygens en janvier 2005. © NASA/ESA.

CH_3CN , HC_3N , $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$, C_2N_2 et NH_3 . Des indices de la présence d'ions plus lourds ont pu être déduits des mesures du spectromètre CAPS (« *Cassini plasma spectrometer* »), avec des ions positifs jusqu'à 350 u/q (unité de masse atomique par charge) et des ions négatifs extrêmement lourds, jusqu'à 13 800 u/q. L'estimation de la taille de tels ions donne des petits aérosols, de 3,8 nm à plus de 38 nm selon leur charge. Pour aller plus loin dans la compréhension de la chimie atmosphérique conduisant à la production d'ions complexes, plusieurs modèles de photochimie ont été élaborés. Ils ont en particulier montré qu'une chimie couplée des espèces neutres et des ions est nécessaire pour expliquer les observations. La présence des aérosols dans l'ionosphère est toutefois plus complexe à modéliser. Ils interagissent électrostatiquement avec le plasma ; il s'agit d'un plasma qualifié de « poudreux ».

Simuler l'ionosphère de Titan en laboratoire

Une autre stratégie, complémentaire de la modélisation numérique, est la simulation en laboratoire. Reproduire la chimie de Titan expérimentalement présente trois intérêts majeurs : (1) le phénomène étudié est alors accessible, directement au laboratoire, et peut être répété ; (2) il est possible de faire varier volontairement certains paramètres pour étudier un processus en particulier ; (3) des instruments de pointe et non spatialisables peuvent être utilisés.

De telles expériences ont commencé dès 1953 avec l'expérience de Stanley Miller et Harold Urey dont l'objectif était de savoir si les composés organiques requis pour la vie auraient pu être produits dans l'atmosphère de la Terre primitive. Deux décennies plus tard, Carl Sagan et Bishun Khare ont réalisé de telles simulations de laboratoire adaptées à Jupiter, Saturne et Titan. Ils ont montré que l'exposition d'une atmosphère réductrice (du type $\text{N}_2\text{-CH}_4$) à des décharges électriques conduit à la formation d'un solide organique brun-orangé, qu'ils ont appelé « tholins » [4]. Aujourd'hui, nous savons grâce à la mission Cassini-Huygens que les aérosols de Titan sont formés à partir d'une chimie ionique complexe dans le plasma

ionosphérique. Il est alors possible de reproduire le plasma ionosphérique au laboratoire à l'aide d'une décharge plasma dans un mélange $\text{N}_2\text{-CH}_4$.

Une telle expérience a été développée au LATMOS : PAMPRE, pour « Production d'Aérosols en Microgravité par Plasma REactif ». Une décharge plasma radiofréquence en couplage capacitif (RF CCP) est allumée dans une chambre contenant un mélange de diazote et de méthane à 1 mbar. Un matériau solide brun-orangé se forme alors dans la décharge, tout comme pour l'expérience de Sagan et Khare. Toutefois, l'avantage d'utiliser une décharge RF CCP est que les tholins sont produits sous forme d'aérosols en lévitation électrostatique dans le plasma dans lequel ils séjournent quelques minutes [5]. Tout comme sur Titan, les molécules et ions de la phase gaz ont pu être étudiés par spectrométrie de masse et une grande ressemblance a été observée avec les mesures de Cassini. Après l'arrêt de la décharge plasma, les grains de tholins déposés au fond de la chambre peuvent être récoltés et analysés. Ce sont des grains sphériques d'environ 100 nm à 2 μm de diamètre, composés principalement de carbone, d'azote et d'hydrogène. L'analyse chimique des tholins par spectrométrie de haute résolution indique qu'ils sont constitués en partie de « briques » élémentaires telles que C_2H_2 et HCN.

Évolution des aérosols dans l'ionosphère

Que ce soit sur Titan ou dans PAMPRE, les tholins restent un certain temps au contact du plasma dans lequel ils se sont formés. Ils sont ainsi susceptibles d'interagir avec celui-ci. Quelques travaux ont montré que les tholins ne sont pas inertes entre autres aux UV et aux atomes d'hydrogène. Qu'en est-il des autres espèces du plasma ? Durant leur séjour dans le plasma, les aérosols sont continuellement au contact d'espèces très réactives (radicaux, espèces excitées, ions et électrons). Cette question a permis de formuler l'objectif de cette étude : étudier l'interaction entre les aérosols et le plasma dans l'ionosphère de Titan. Pour y apporter des

réponses, deux voies ont été suivies : la simulation en laboratoire et l'étude de données de la mission Cassini.

Évolution des aérosols organiques dans l'ionosphère : études au laboratoire

Méthode : simulation des espèces érosives à l'aide d'une décharge plasma en N_2-H_2

La première partie du projet a donc visé à reproduire en laboratoire l'interaction entre les aérosols et le plasma de l'ionosphère de Titan. L'idée est ainsi d'introduire des tholins dans une décharge plasma et d'observer les modifications induites sur les tholins et sur le plasma. Les interactions entre les aérosols et le plasma sont complexes. Deux principaux processus, d'effets opposés, ont lieu en parallèle dans l'ionosphère de Titan : (1) la croissance organique orchestrée par la formation de chaînes carbonées et (2) les processus d'évolution des structures chimiques. Le premier de ces processus ne peut être réalisé qu'à partir d'espèces contenant du carbone, à l'inverse du second qui peut avoir lieu sans espèces carbonées. Ce projet s'est essentiellement intéressé au processus (2), traitant de l'évolution des tholins. Ainsi, pour restreindre tous les processus de croissance organique dans l'expérience, uniquement du diazote et du dihydrogène ont été injectés dans la phase gaz.

La décharge choisie pour l'expérience est de type continu (DC ou « glow »). Ces décharges plasma sont les plus simples à concevoir et étudier, avec l'avantage de présenter une large zone de plasma homogène. Un flux de gaz est injecté dans un tube en Pyrex à une pression d'environ 1 mbar et une décharge électrique est initiée entre deux électrodes métalliques placées de part et d'autre du tube.

La première étape a été de caractériser le plasma N_2-H_2 . La présence de dihydrogène dans un plasma de diazote entraîne la formation d'espèces très réactives, en particulier les atomes H et N, ainsi que les radicaux NH et NH_2 , des espèces vibrationnellement excitées $N_2(v)$ et des ions comme N_2H^+ , NH_4^+ ou H_3^+ [6]. Ces ions ont été mesurés sur Titan et les modèles chimiques prédisent également la présence de radicaux et espèces excitées.

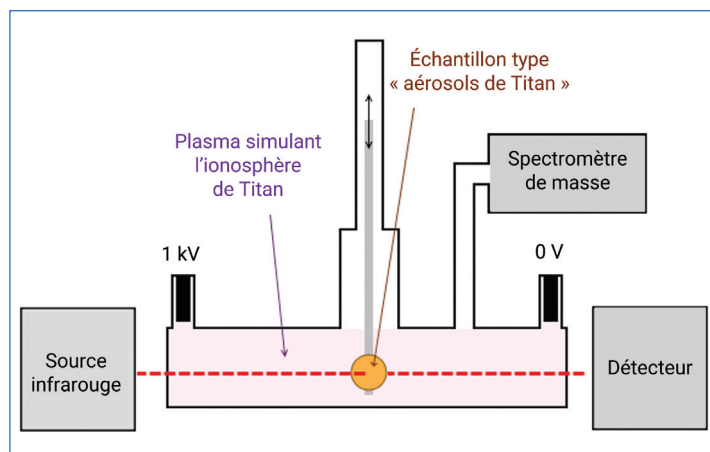


Figure 2 - Schéma de l'expérience THETIS.

Développement de l'expérience THETIS

La deuxième étape du projet a été d'introduire des tholins dans le plasma N_2-H_2 et de caractériser les éventuelles évolutions. Un nouveau dispositif expérimental a été conçu pour l'occasion, nommé THETIS (« *Tholins Evolution in Titan's Ionosphere Simulation* »). Il permet d'ajouter l'échantillon de tholins sous vide après allumage du plasma et se couple à différents instruments pour étudier *in situ* l'échantillon et le plasma (voir figures 2 et 3). Les tholins sont préalablement formés dans PAMPRE et étalés sur une fine grille métallique servant de support.

Évolution morphologique et chimique des aérosols

Lorsque la grille de tholins est introduite dans un plasma de diazote pur, aucun effet n'est visible. À l'inverse, lorsqu'elle est introduite dans un plasma contenant 0,5 à 5 % de H_2 , il est possible d'observer l'érosion de la pastille à l'œil nu. Plus en détail, des images prises au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que les grains de tholins initialement sphériques sont creusés et présentent des marques d'érosion de quelques dizaines de nanomètres (voir figure 4). La structure chimique des tholins a également été observée par spectroscopie d'absorption infrarouge [7]. L'absorption d'un faisceau infrarouge par les tholins renseigne sur les

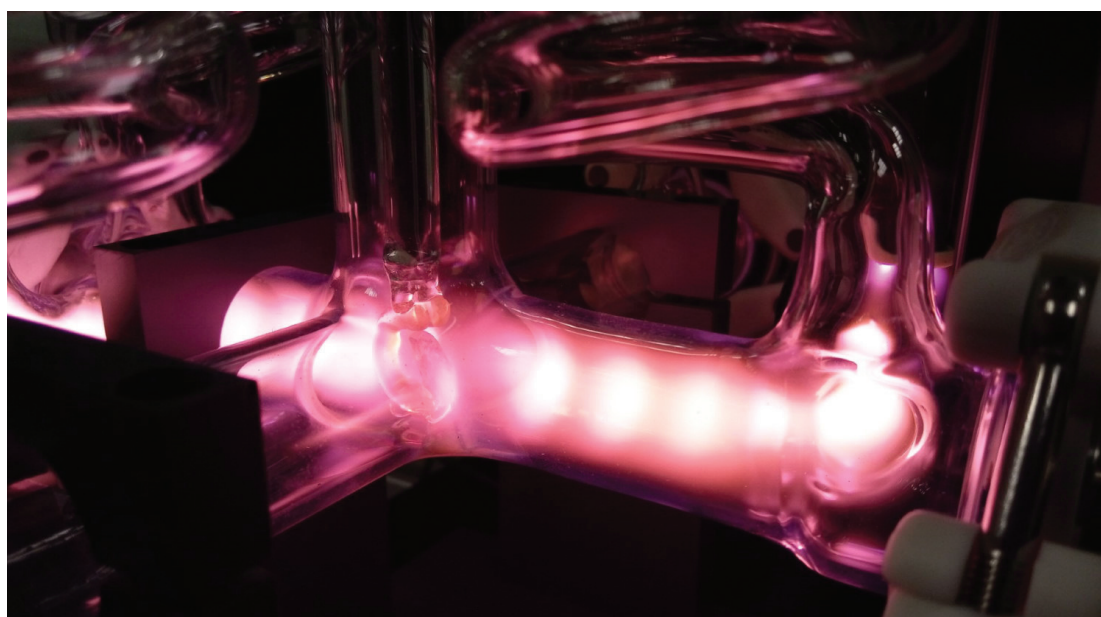


Figure 3 - Photographie de l'expérience THETIS. L'échantillon est visible au centre du plasma.

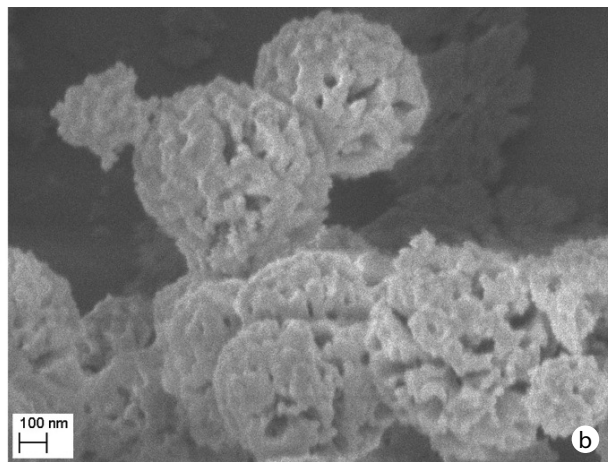
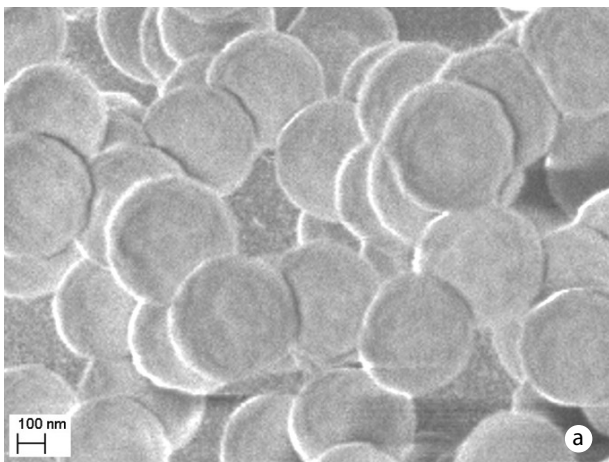


Figure 4 - Images des tholins (a) produits dans PAMPRE et (b) après exposition à un plasma de N_2-H_2 .
Images prises par N. Ruscassier au LGPM/CentraleSupélec.

fonctions chimiques présentes. Cette technique montre que les fonctions chimiques des tholins évoluent lorsqu'ils sont exposés au plasma de N_2-H_2 .

En particulier, les fonctions nitriles ($C\equiv N$) diminuent fortement en comparaison des autres fonctions. Les doubles liaisons semblent aussi diminuer par rapport aux amines (NH) et aux bandes CH. Plus en détail dans les bandes des nitriles, les isonitriles ($-N\equiv C$) disparaissent très rapidement et une autre bande de nitriles plus stable se forme.

Évolution du plasma en contact avec les tholins

L'étude de la phase gaz a également révélé qu'elle est fortement modifiée par la présence des tholins [8]. La mesure des espèces neutres et des ions positifs par spectrométrie de masse montre que de nombreuses nouvelles espèces contenant du carbone apparaissent, dont en particulier du cyanure d'hydrogène HCN et des composés formés de nitriles (NH_3-CN , $NC-CN$). Des ions très insaturés sont aussi observés, tels que C^+ , C_2^+ , C_2H^+ , C_3^+ , C_3H^+ et $C_3H_2^+/C_2N^+$.

À l'inverse, la production d'ammoniac diminue par rapport au cas sans tholins.

Interaction entre les aérosols et le plasma

Ces expériences ont montré que les tholins interagissent avec le plasma de N_2-H_2 dans lequel ils sont introduits. Dans le domaine de la microélectronique, plusieurs travaux ont étudié un processus similaire, avec notamment l'exposition de films formés de carbone et d'hydrogène à des plasmas de N_2-H_2 . Ces expériences conduisent également à la production de HCN, qui s'explique de la manière suivante : des atomes N du plasma s'adsorbent à la surface des films, puis réagissent progressivement avec les atomes de carbone du film pour former une triple liaison $C\equiv N$. Ensuite, un atome H s'y greffe, formant la molécule stable HCN.

Enfin, le bombardement ionique ayant lieu à la surface du film éjecte la molécule de HCN dans la phase gaz. Ce processus a très certainement lieu aussi sur les tholins et est cohérent avec nos observations : les mesures en absorption IR montrent la formation d'une nouvelle bande de $C\equiv N$ ainsi que la diminution globale de tous les nitriles, et l'étude de la phase gaz révèle l'apparition de HCN. D'autres processus de surface sont proposés et illustrés sur la figure 5.

L'expérience THETIS a mis en évidence l'interaction forte des grains de tholins avec les diverses espèces de plasmas dont, en particulier, les radicaux (atomes H et N, et NH). Des espèces du plasma s'adsorbent à la surface, modifient les liaisons chimiques de tholins et forment des fragments qui sont éjectés dans la phase gaz. Ces mécanismes, notamment la formation de nitriles sur les aérosols et de HCN en phase gaz, pourraient également être à l'œuvre dans l'ionosphère de Titan.

Des électrons perturbés par la présence des aérosols dans l'ionosphère : observations de la mission Cassini

Méthode : réanalyse des données de la sonde de Langmuir de Cassini

Un second grand axe de cette étude a été de chercher des indices dans les observations de Cassini confirmant une interaction aérosols-plasma dans l'ionosphère. Les grains des

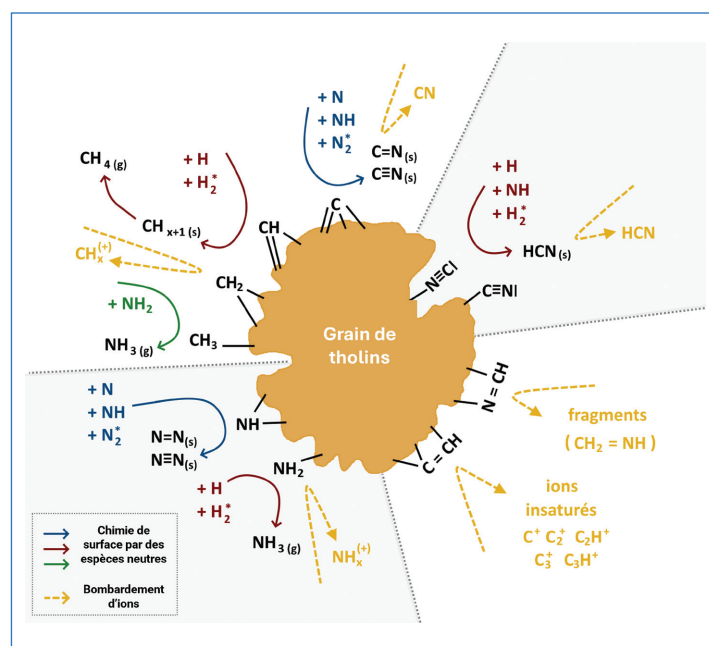


Figure 5 - Schéma représentant des suggestions de processus à l'œuvre à la surface d'un grain de tholins plongé dans un plasma de N_2-H_2 .



Figure 6 - Position de la sonde de Langmuir, repérée par la flèche rouge, sur la sonde Cassini. © NASA.

aérosols n'ont pas été directement détectés dans l'ionosphère par Cassini par manque d'instruments adaptés, mais le plasma autour a, quant à lui, été étudié en détail. Ce projet a été réalisé en collaboration internationale avec l'équipe de l'Institut Suédois des Plasmas Spatiaux (IRF) à Uppsala. Cette équipe a conçu la sonde de Langmuir à bord de Cassini, qui permet d'étudier les espèces chargées de faible énergie, et particulièrement les électrons [9].

La sonde de Langmuir est une sphère en titane de 5 cm de diamètre au bout d'une tige qui la positionne à plus de 1,5 m du corps du satellite (voir *figure 6*). Cette sphère est soumise à un potentiel électrique qui varie de façon continue entre -4 et $+4$ V. Lorsque le potentiel de la sonde est inférieur à celui du plasma, elle attire les ions positifs, et lorsqu'il est supérieur, elle attire les électrons. La mesure d'intérêt est le courant dû aux électrons parcourant la sonde.

Détection de plusieurs populations d'électrons dans les données Cassini

Généralement, dans un plasma ionosphérique, les électrons sont thermalisés par des collisions avec les molécules de leur environnement. Dans ce cas, la sonde de Langmuir mesure

une unique population d'électrons, représentée par une « bosse » dans le graphe de la dérivée seconde du courant électronique en fonction du potentiel de la sonde. Toutefois, les données montrent que dans l'ionosphère, pour des altitudes inférieures à 1 300 km, il n'y a pas une, mais deux, trois ou même parfois quatre telles bosses [10]. *A priori*, la sonde de Langmuir mesure donc plus d'une population d'électrons. L'ajustement du signal à partir des équations théoriques permet de déterminer la densité et l'énergie des électrons pour chaque population.

Lors d'un survol de Titan, la sonde Cassini réalise une trentaine de mesures dans l'ionosphère. Cela permet de suivre l'évolution de la densité et de l'énergie des électrons en fonction de l'altitude. Selon que la sonde est passée côté jour, proche du terminateur, ou côté nuit, les profils sont différents. Cassini a traversé 57 fois l'ionosphère de Titan, ce qui a permis de réaliser des statistiques sur les comportements des différentes populations d'électrons [11].

Des électrons émis par les aérosols

Cette étude a permis d'obtenir des indications sur l'origine des populations d'électrons (voir *figure 7*). La première population

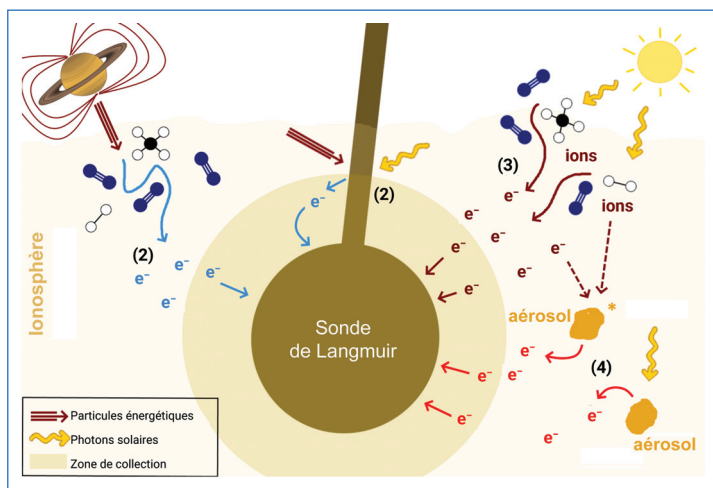


Figure 7 - Schéma proposant l'origine des quatre populations d'électrons observées par la sonde de Langmuir dans l'ionosphère de Titan.

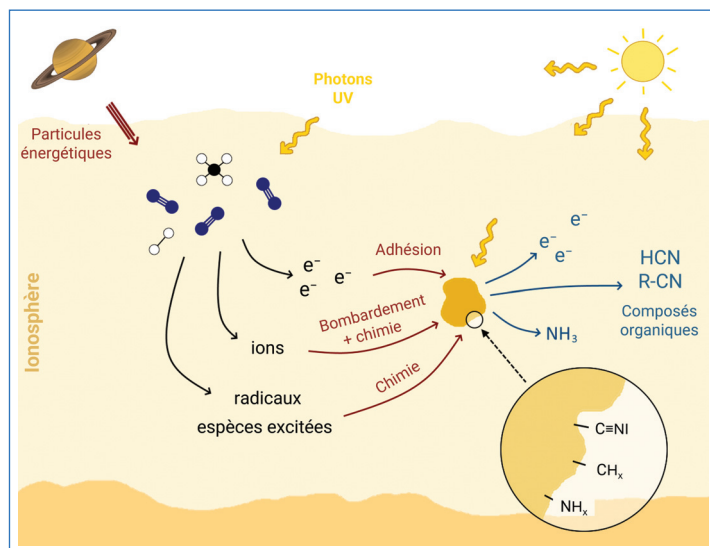


Figure 8 - Schéma bilan des interactions entre les aérosols organiques et les espèces du plasma ionosphérique de Titan discutées dans cette étude.

est attribuée à des électrons émis par la tige à proximité de la sonde après collision avec un photon solaire ou une particule énergétique provenant de la magnétosphère. La seconde population, toujours présente avec des densités et énergies constantes, est attribuée à des électrons thermalisés, provenant à l'origine de la magnétosphère. La densité de la troisième population est, pour sa part, fortement corrélée à l'illumination solaire et son énergie est globalement constante en dessous de 1 100 km. Elle est ainsi attribuée aux électrons formés par la photoionisation des molécules de l'ionosphère de Titan.

Enfin, la quatrième population n'est présente que côté jour et en dessous de 1 200 km, altitude à partir de laquelle les aérosols commencent à se former. Il est possible qu'elle soit due à des électrons émis par les aérosols après qu'ils ont été percutés par un photon solaire énergétique (photoémission) ou après avoir été chauffés au-delà d'un certain seuil par la chimie environnante (émission thermo-ionique). Ces deux mécanismes ont été observés en laboratoire.

En attendant la mission Dragonfly

La mise en place de l'expérience THETIS et l'analyse des données de la sonde de Langmuir de Cassini dans l'ionosphère de Titan ont permis d'observer l'interaction entre les aérosols organiques et les espèces du plasma environnant. Les grains sont eux-mêmes chimiquement modifiés par interaction avec des espèces réactives telles que les atomes H et N (radicaux). Les aérosols participent aussi à l'évolution du plasma, en adsorbant certaines espèces et en en formant de nouvelles, dont en particulier HCN et des électrons (voir figure 8). Ces travaux ont permis de déceler des mécanismes se produisant à la surface des aérosols sur Titan. La prochaine étape sera de les modéliser.

Après leur traversée de l'ionosphère, l'aventure des aérosols n'est pas terminée, ils s'agglomèrent et deviennent des noyaux de condensation des espèces gazeuses. Lorsqu'ils sédimentent à la surface, ils ont encore certainement évolué. La mission Dragonfly de la NASA prévoit d'étudier la surface de Titan dans quelques années. Elle donnera accès à la composition et à la morphologie des aérosols une fois au sol. Toutefois, il reste encore des études à mener au laboratoire pour faire le lien entre les aérosols de l'ionosphère et les grains sédimentés à la surface.

Cet article a été initialement publié dans *Reflets de la physique, la revue de la Société Française de Physique (SFP)*, dans le numéro 83 de janvier 2026, accessible en ligne*. Il est reproduit dans *L'Actualité Chimique*, avec l'aimable accord de son autrice, dans le cadre d'un partenariat entre les deux revues impliquant la division Chimie physique (DCP), commune à la SCF et la SFP.

* www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2026/01/contents/contents.html

- [1] A. Le Gall *et al.*, *Les mondes de Saturne*, Belin, **2022**.
- [2] G. Arney *et al.*, The pale orange dot: the spectrum and habitability of hazy Archean Earth, *Astrobiology*, **2016**, 16, p. 873-99, <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1422>
- [3] J. H. Waite Jr. *et al.*, The process of tholin formation in Titan's upper atmosphere, *Science*, **2007**, 316, p. 870-5, <https://doi.org/10.1126/science.1139727>
- [4] C. Sagan, B. Khare, Tholins: organic chemistry of interstellar grains and gas, *Nature*, **1979**, 277, p. 102-7, <https://doi.org/10.1038/277102a0>
- [5] C. Szopa, G. Cernogora, L. Boufendi, J.J. Correia, P. Coli, PAMPRE: a dusty plasma experiment for Titan's tholins production and study, *Planet Space Sci.*, **2006**, 54, p. 394-404, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.12.012>
- [6] A. Chatain *et al.*, Characterization of a DC glow discharge in N₂-H₂ with electrical measurements and neutral and ion mass spectrometry, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **2023**, 32, 035002, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/acc132>
- [7] A. Chatain *et al.*, Interaction dust-plasma in Titan's ionosphere: an experimental simulation of aerosols erosion, *Icarus*, **2020**, 345, 113741, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113741>
- [8] A. Chatain, N. Carrasco, L. Vettier, O. Guaitella, Interaction dust-plasma in Titan's ionosphere: feedbacks on the gas phase composition, *Icarus*, **2023**, 396, 115502, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115502>
- [9] J.-E. Wahlund *et al.*, Cassini measurements of cold plasma in the ionosphere of Titan, *Science*, **2005**, 308, p. 986-9, <https://doi.org/10.1126/science.1109807>
- [10] A. Chatain *et al.*, Re-analysis of the Cassini RPWS/LP data in Titan's ionosphere: 1. Detection of several electron populations, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **2021**, 126, e2020JA028412, <https://doi.org/10.1029/2020JA028412>
- [11] A. Chatain *et al.*, Re-analysis of the Cassini RPWS/LP data in Titan's ionosphere: 2. Statistics on 57 flybys, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **2021**, 126, e2020JA028413, <https://doi.org/10.1029/2020JA028413>

Audrey CHATAIN* est chargée de recherche au CNRS au LATMOS (Laboratoire Atmosphères et Observations Spatiales), Département Système solaire, Guyancourt.

*audrey.chatain@latmos.ipl.fr