

Sonde Huygens

Quand Titan nous déconcerte

TITAN : LA VÉNUS FROIDE ?

Un des grands objets de fascination pour les astronomes spécialistes de la planétologie du Système Solaire consiste en l'existence de deux corps, l'un planétaire, l'autre satellitaire, qui possèdent en commun d'avoir une atmosphère tellement épaisse qu'il est difficile de voir leur surface à partir de l'espace. Le premier de ces corps, la planète Vénus, a pourtant vu ses secrets mis à nu par un radar à synthèse d'ouverture, porté par la sonde Magellan lancée par la navette Atlantis le 4 mai 1989, qui a pu cartographier plus de 70% de la surface de notre voisine. Magellan suivait les sondes Venera 15 et 16 qui furent lancées par les Russes en 1983 et qui cartographièrent Vénus à basse résolution. Sa surface, caractérisée par une température de 450 °C, pression extrême dans une atmosphère pauvre en molécules complexes, a été atteinte à plusieurs reprises par les sondes russes de la série Venera avant les années 70. Le second de ces corps, Titan, satellite de 5150 kilomètres de diamètre en orbite autour de Saturne (qui, avec ses satellites constitue un véritable petit système solaire), possède lui aussi une atmosphère très épaisse, mais très riche en molécules complexes et très froide où des phénomènes étonnants se produisent dans le domaine physico-chimique selon des lois faisant appel à un « effet tunnel »¹ mis en évidence en laboratoire par l'équipe du scientifique russe Goldanskii et par son homologue néerlandais Mayo Greenberg plus connu pour ses travaux sur la physique des grains et des molécules interstellaires. La composition de l'atmosphère de Titan fait penser à « une Terre mise au congélateur ». Sa chimie complexe jointe à sa très basse température (moins 179°C de moyenne) en fait un monde à part, sur lequel une multitude de données viennent d'être apportées par la sonde Huygens. Transporté jusqu'à Saturne par la sonde américaine Cassini, l'ensemble des deux engins complémentaires a été lancé par une fusée Titan 4 en Octobre 1987.

CASSINI-HUYGENS : UN EXPLOIT

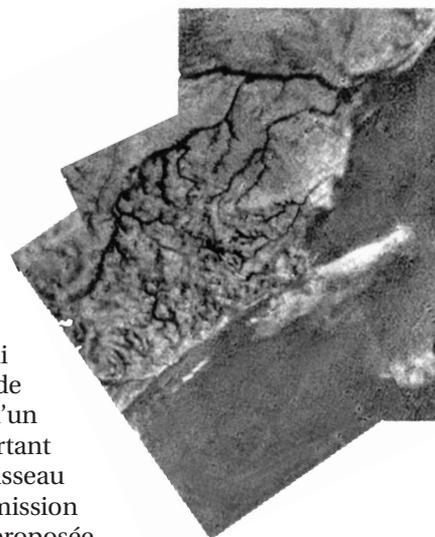
Ce projet a été mené en coopération, presque une symbiose totale, entre la Nasa, l'Agence Spatiale Européenne ESA, et l'Agence Spatiale Italienne ASI. Il existait une forte demande de la communauté scientifique pour la réalisation de la mission Cassini-Huygens, en particulier pour l'étude de Titan, de son atmosphère et de sa surface

PHILIPPE JAMET

dont les propriétés faisaient l'objet de controverses, et qui est la cible unique de Huygens ainsi qu'un objet d'étude important pour son vaisseau porteur Cassini. La mission Huygens a été proposée en 1982 par l'astronome français, Daniel Gautier, de l'observatoire de Meudon. La phase d'étude a été marquée par de très nombreux aléas, allant jusqu'à un risque d'abandon du projet suite à des pressions budgétaires exercées par le Congrès américain. Grâce à la forte mobilisation des européens, les américains ont décidé de tenir leurs engagements. Il fallut également faire face à l'hostilité des écologistes qui manifestèrent le jour du lancement sous prétexte que la sonde Cassini emportait un générateur électrique radio-isotopique RTG² (une micro centrale nucléaire), seul moyen envisageable de fournir l'énergie, à une telle distance du Soleil et pour une telle durée. Nous décrirons ici Cassini, bien sûr, mais surtout Huygens. Cette sonde a bénéficié d'une bonne couverture médiatique, aiguissant la curiosité de nombre de gens qui ne sont pas intéressés par l'espace, qui ont élevé leur esprit vers le ciel en apprenant l'exploit réalisé par la science et la technologie européenne qui venaient de leur montrer les premières photographies en provenance d'un monde si étrange et pourtant si semblable à la Terre.

TITAN AVANT HUYGENS

Au même titre que la planète Mars et son passé chaotique, ou bien des satellites de Jupiter (Europa, Ganymède et Callisto) qui semblent receler des réserves d'eau salée, Titan est l'objet de rêves justifiant par eux seuls l'élaboration des hypothèses les plus hardies. C'est en 1655 que Christiaan Huygens, aussi découvreur des anneaux de Saturne, découvrit Titan grâce aux améliorations qu'il



apporta à l'optique astronomique lors de ses séjours à l'observatoire de Paris. Le module porteur a reçu son nom de Cassini, astronome italien qui non seulement mit en évidence la célèbre division qui porte son nom dans les anneaux de Saturne, mais découvrit aussi deux satellites entre 1671 et 1684. Les sondes Pioneer 11 (qui passa en septembre 1979 à 356000 kilomètres de Titan) et Voyager 1 (qui passa en Novembre 1980 à 4500 kilomètres) n'ont que peu éclairci le mystère de Titan, mais suffisamment pour justifier la mission actuelle. Grâce aux sondes précitées, aux observations réalisées par le télescope spatial Hubble et à partir des observatoires terrestres, il était déjà possible aux planétologues de dresser une ébauche du portrait de Titan.

Photographie d'un réseau fluvial façonné par le méthane liquide abondant sur Titan

Premier point important, Titan est le seul satellite du système solaire à posséder une véritable atmosphère ; d'autres satellites de taille comparable, comme Ganymède ou Callisto n'en possèdent pas. Cependant, jusqu'au début du XX^e siècle, Titan n'attira pas particulièrement l'attention des astronomes. C'est en 1908 que l'astronome José Comas Sola suggéra l'existence d'une atmosphère après avoir relevé un obscurcissement de la lumière vers le limbe (bord apparent du disque d'un astre) de Titan, cette thèse fut l'objet d'âpres controverses.

Les résultats de travaux, menés au cours de la première guerre mondiale par le britannique Jeans, sur les conditions permettant à un satellite de conserver son atmosphère, concordaient avec cette thèse. Selon Jeans, si Ganymède et Callisto n'ont pu conserver leur atmosphère primitive, ce n'était pas seulement en raison de leur faible gravité en comparaison de la Terre ou Vénus, mais aussi à cause de leur température, basse, mais insuffisamment pour compenser l'agitation thermique des molécules atmosphériques qui tend à éjecter celles-ci vers l'espace. En ajustant le paramètre de température de son modèle pour qu'il corresponde à peu près à l'environnement de Saturne, Jeans constata que l'agitation thermique (due au rayonnement solaire) devenait insuffisante pour contre-carrer la gravité de Titan et il détermina non seulement les fourchettes potentielles de température de surface et atmosphériques, mais aussi les gaz susceptibles de satisfaire à ces conditions : azote moléculaire, méthane ou les gaz lourds de type argon.

Après la seconde guerre mondiale, à la suite d'importantes découvertes dans les domaines de la chimie et de la biologie, Titan devint peu à peu un sujet d'étude prioritaire. En 1944, deux cent quatre vingt neuf ans après la découverte de Huygens, un autre hollandais, Gerard Kuiper, établit définitivement la présence d'une atmosphère dense autour de Titan. La confirmation des thèses de José Comas Sola et de Jeans allait être à l'origine d'importantes études à partir d'observatoires terrestres. Cependant, Titan, considéré unanimement comme structuré autour d'un noyau rocheux de silicates entouré de glaces exotiques d'ammoniac et de méthane, allait longtemps opposer une farouche résistance aux investigations des astrophysiciens, trompés par les apparences et par les limites techniques des observations spectroscopiques. S'il est relativement facile d'identifier certains

composants atmosphériques à partir de leur signature spectrale dans l'infrarouge (cas du méthane CH₄, repéré dès 1944 par Kuiper), certains de ceux-ci (azote moléculaire, argon) sont en revanche beaucoup plus « discrets » dans l'infrarouge. Ainsi, jusqu'au milieu des années 70, les observations laissaient croire à une atmosphère essentiellement constituée de méthane. Pourquoi, en effet, alors qu'il est aussi présent dans les atmosphères de Saturne et Jupiter, le méthane est-il plus faible dans le spectre de ces planètes que dans celui de Titan ? Ce fut le grand mérite de Laurence Trafton (Université du Texas) de remettre en cause ce modèle. C'est à partir de ces contradictions, relevées également en France par Daniel Gautier, Bruno Sicardy, André Brahic et Guy Israël, que furent établis d'autres modèles atmosphériques de Titan en rejetant la thèse du « majoritairement méthane » qui était aussi peu compatible avec les modèles de nébuleuse primitive et ceux de formation des planétésimaux par accréation.

Les astrophysiciens considèrent rapidement comme acquis que l'atmosphère épaisse de Titan, qui apparaît polarisée lors d'observations dans des circonstances favorables, contient d'importantes quantités de particules en suspension ou « aérosols » qui diffusent la lumière solaire vers la surface et dans les différentes strates de l'atmosphère expliquant ainsi la largeur anormalement grande des bandes du méthane dans les observations spectroscopiques. Ces aérosols furent aussi considérés comme la cause principale de « l'inversion de température » (le sol est plus froid que l'atmosphère), constaté par les chercheurs américains et français. Parallèlement aux travaux effectués dans les années 1970 par Caldwell, Jaffe et Owen obtenaient la preuve d'une température de surface (90°K ou -183°C) très inférieure à celles des couches atmosphériques supérieures. Quelle peut être la nature des particules en suspension et leur processus de formation ? Comment est structurée l'atmosphère ? Certains pensaient que le méthane n'en est peut être pas le composant principal et que l'existence d'autres composants atmosphériques pourraient perturber les *transitions de vibration* du méthane en élargissant ses raies spectrales dans l'infrarouge. Principal suspect, confirmé par les travaux en laboratoire, l'azote moléculaire. Au milieu des années 70, une première tentative d'explication de la formation des aérosols à haute altitude (200km) par photo-dissociation de l'azote et du méthane sous l'effet du rayonnement UV solaire apparut. En septembre 1979, Pioneer 11 lors de son passage à 356000 kilomètres de Titan, réussit, en dépit de circonstances peu favorables (une éruption solaire perturba les transmissions), à envoyer quelques photographies qui permirent aux astrophysiciens de conclure que, très probablement, l'azote et le méthane sont les principaux constituants de l'atmosphère et que le modèle de photodissociation par les UV solaires était le plus vraisemblable. On constata aussi que l'atmosphère de Titan contient de l'éthane et de l'acétylène. Il fallut toutefois attendre novembre 1980, avec le survol de Titan par Voyager 1, pour que soient confirmées les hypothèses précédentes et découvrir que les produits de dissociation formés en haute atmosphère étaient encore plus variés et complexes que prévu mais aussi qu'ils présentaient une forte analogie avec la chimie « prébiotique » qui fut en œuvre sur la Terre.

Avant le spectaculaire succès de Cassini-Huygens, ce furent les observations de Voyager 1 qui firent le plus avancer notre connaissance de Titan. Confirmant les données reçues par les radiotélescopes, il mesura une température au sol extrêmement basse (93°K ou -178°C) réduisant quasiment à néant l'agitation thermique des molécules des couches basses et moyennes de l'atmosphère. Dans ces conditions, la gravité de Titan suffit pour conserver une atmosphère épaisse, constamment alimentée par les aérosols formés dans les hautes couches atmosphériques et tombant, depuis au moins quatre milliards d'années à sa surface. Voyager 1 confirma aussi l'épaisseur de l'atmosphère et la pression au sol (1,6 bars). La combinaison de ces deux facteurs suscite des hypothèses étonnantes et permettrait au méthane (maintenant considéré comme constituant 6% de l'atmosphère) et à certains de ses dérivés obtenus par photodissociation d'exister sous leur « point triple »³ ! Il fut même envisagé l'existence d'une couche nuageuse donnant naissance à des pluies ou des chutes de « neiges » de méthane. Mais, comme le disait Jean-Pierre Lebreton, responsable scientifique de la sonde européenne Huygens, « on ne cesse d'avancer des hypothèses, mais la seule réponse est d'attendre les résultats de la mission Huygens ».

Toutefois, les données les plus lourdes de conséquences que nous a rapporté Huygens concernent la découverte de composés organiques complexes dans l'atmosphère de Titan déjà soupçonnés, il est vrai, après le passage de Pioneer. Ces éléments sont très nombreux dans la haute atmosphère à cause de la dissociation de l'azote moléculaire (N₂) et du méthane (CH₄) par les UV solaires et par l'impact d'électrons à haute énergie provenant, en grande partie, de l'intense champ magnétique de Saturne.

Molécule	Symbole	Quantité
Constituants principaux		Pourcentage
Azote	N ₂	87-99
Argon	Ar	0-6
Méthane	CH ₄	1-6
Constituants mineurs		Parties / million
Hydrogène	H ₂	2000
Hydrocarbures		
Ethane	C ₂ H ₆	20
Acétylène	C ₂ H ₂	4
Ethylène	C ₂ H ₄	1
Propane	C ₃ H ₈	1
Méthylacétylène	C ₃ H ₄	0.03
Diacétylène	C ₄ H ₂	0.02
Corps Azotés		
Acide Cyanhydrique	HCN	1
Cyanogène	C ₂ N ₂	0.02
Cyanoacétylène	HC ₃ N	0.03
Actéonitrile	CH ₃ CN	0.003
Oxydes		
Monoxyde de Carbone	CO	50
Dioxyde de Carbone	CO ₂	0.01

Quatre de ces composés sont également présents dans les nuages interstellaires et dans les comètes (monoxyde de carbone, acide cyanhydrique, cyanure de méthyle, cyanoacétylène). Cela signifie-t-il, comme le pensent

certains scientifiques américains de l'équipe de la sonde Huygens, que l'apport de matériaux volatiles par des comètes, a contribué à la formation de l'atmosphère de Titan? L'examen de photographies d'un autre satellite de Saturne, Dioné (diamètre 1120 km), prises lors du programme Voyager, montre qu'il est criblé d'impacts dont certains sont des cratères de plus de cent kilomètres de diamètre... Titan, avec sa plus forte gravité, a dû également être intensément bombardé. Cependant, ceci n'enlève rien à la validité des thèses de Jeans pour qui la basse température de Titan suffit à maintenir l'atmosphère originelle. L'apport cométaire ne serait alors que complémentaire et accélérateur d'un phénomène quasi-inéluctable menant à la chimie prébiotique et faisant de Titan une sorte de Terre primitive. Il existe de façon certaine sur Titan au moins l'un des trois principaux matériaux pour la synthèse des acides aminés, à savoir l'acide cyanhydrique, les deux autres étant l'eau (H₂O) et le formaldéhyde (CH₂O). On ne peut exclure la présence de ce dernier sur Titan comme le suggèrent les travaux menés par les scientifiques russes Goldanskii, Barkalov, Kaplan et Kiryukin sur la formation de molécules complexes en milieu froid par « Effet Tunnel »¹. Pour ce qui est de l'eau, on pensait que celle-ci ne pouvait exister à l'état liquide sur Titan. Une hypothèse originale, excluant l'eau dans la formation des molécules complexes, considérait que « l'effet tunnel »¹, jouant lors de la photodissociation du méthane, constituait une possibilité réelle « d'accrochage » pour l'élaboration de ces molécules. L'ammoniac (NH₃), existant probablement en phase solide sur Titan pourrait alors prendre la place de l'eau, et par réaction avec l'acide cyanhydrique et (le possible) formaldéhyde, déboucher sur la formation de protéines et d'acides aminés. La glycine, par exemple, peut être synthétisée à partir de formaldéhyde et d'acide cyanhydrique. Elle est l'un des vingt acides aminés considérés essentiels pour l'émergence de processus vivants. Selon Jean Pierre Lebreton, « l'étude de la chimie organique sur Titan pourrait nous fournir d'importantes indications sur la chimie prébiotique qui était à l'œuvre sur Terre après la naissance du système solaire ». Concernant la question de « l'atmosphère primitive », quelques différences notables existeraient entre la Terre et Titan, notamment aux proportions de CO et CO₂. D'autres différences seraient dues à l'absence de chimie du froid sur Terre à cause de sa température originelle relativement élevée. Le dernier point d'interrogation était de savoir si Titan est un monde figé depuis quatre milliards d'années ou un monde en perpétuelle évolution.

TITAN APRÈS HUYGENS

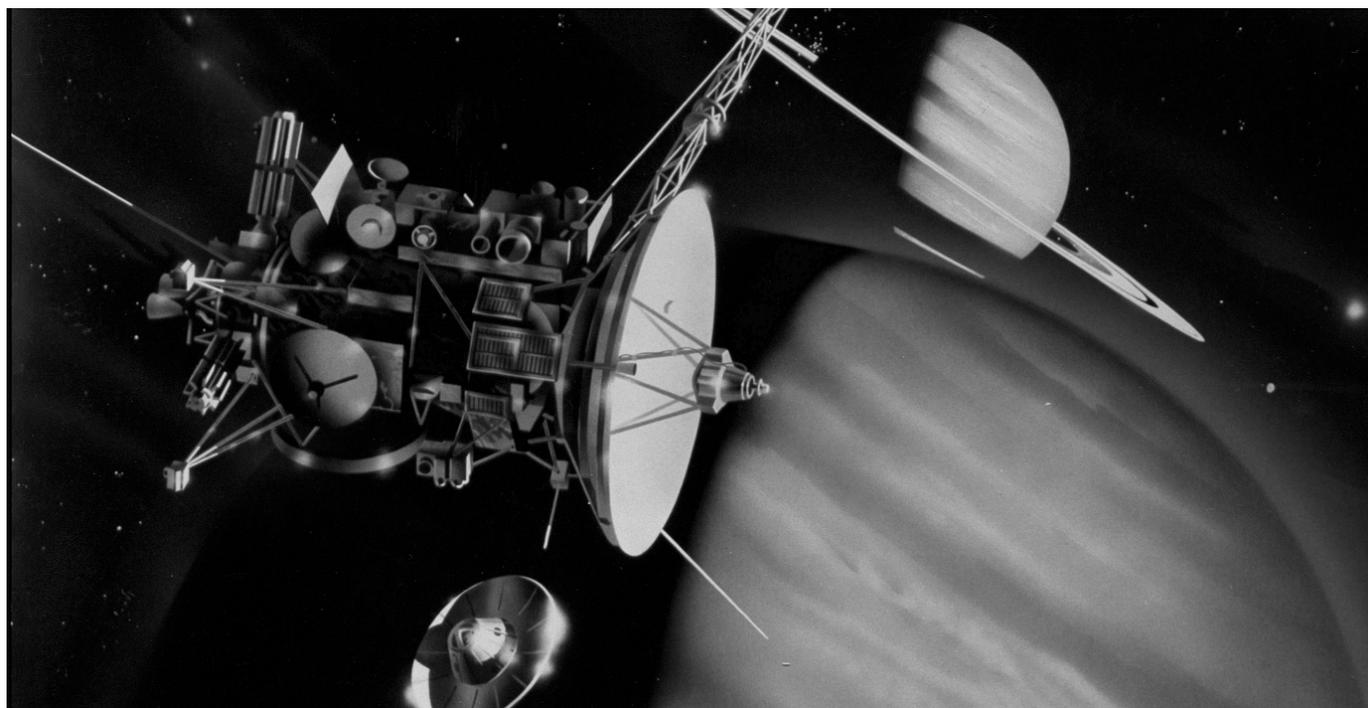
Selon le document de l'ESA « Fiche descriptive Cassini-Huygens », le montant des investissements de la NASA sur la sonde Cassini a été d'environ 2,1 milliards de dollars tandis que l'ESA investissait 360 millions d'euros sur Huygens. Le projet suscita tellement d'enthousiasme en Europe que des universités et des centres de recherche investirent environ 100 millions d'euros dans le financement des instruments embarqués à bord de Huygens. Toutefois, le pays européen qui s'est le plus impliqué sur l'ensemble de la mission reste l'Italie. En effet, l'ASI (Agence Spatiale italienne) a investi 145 millions d'euros pour le financement de l'antenne à grand gain, d'une partie de trois des instruments scientifiques de Cassini et de la totalité de l'un des instruments de Huygens.

Avant son arrivée dans le système de Saturne, la sonde a effectué près de sept ans de voyage, en faisant appel, faute de moteurs suffisamment puissants, à quatre manoeuvres de levier gravitationnel lors de ses survols de Vénus (en avril 1998 puis en Juin 1999), de la Terre (en août 1999) et de Jupiter (en décembre 2000). Cela montre combien la propulsion par réacteur nucléo-électrique sera plus adaptée pour un vol direct vers les planètes extérieures, comme se sera le cas pour JIMO ⁴. L'ensemble Cassini-Huygens est arrivé dans le système de Saturne le 1er juillet 2004. Il s'est satellisé, tout en commençant à faire fonctionner ses RTG ² et ses instruments scientifiques.

Ils devraient lui permettre d'observer Saturne, ses satellites et ses anneaux et lui permettre de réaliser pour Saturne ce que Galiléo a réalisé pour Jupiter. Le 25 décembre 2004, Huygens s'est séparée de Cassini pour un

très basse température du sol de Titan. Les transmissions vers Cassini ont duré tant que celui-ci était visible au dessus de l'horizon. Ce 14 janvier 2005, à 17h19 (heure de Paris), au centre d'opérations spatiales de l'ESA (ESOC, situé à Darmstadt), c'était le soulagement, marquant un succès attendu pendant sept ans. Il est intéressant de noter que la sonde a fonctionné bien au delà des espérances, elle a transmis des données (captées par les radio télescopes terrestres) pendant quatre heures alors qu'en 1997, les scientifiques européens déclaraient à la presse spécialisée qu'ils seraient satisfaits que Huygens continue de fonctionner au sol entre six minutes et une demi-heure. C'est aussi la première fois qu'une sonde atterrit sur le sol d'un satellite d'une des planètes extérieures.

Revenons maintenant aux résultats. A partir de 160 km d'altitude, les six instruments multifonctions ont



voyage de 22 jours qui lui a permis d'atteindre l'atmosphère de Titan. La traversée de l'épaisse atmosphère de Titan constituait un enjeu scientifique et technologique important puisque la capsule, en forme de soucoupe, qui protégeait la sonde dut subir un important échauffement (dû à la forte densité de l'atmosphère) pour ralentir la vitesse de 18000 à 1400 km/h en seulement trois minutes. Grâce à l'ouverture successive de plusieurs parachutes, la vitesse a été réduite à seulement 300 km/h. Du fait de la courte durée de la mission, la sonde a commencé à relayer ses mesures à Cassini quatre minutes après le début de la phase de descente. A 160 kilomètres d'altitude, les instruments de collecte et d'analyse des aérosols ont été exposés à l'atmosphère et, à environ 120 kilomètres, le parachute principal a été relayé par un plus petit qui a conduit la sonde au sol avec succès à 13h34 (heure de Paris). L'atterrissage de la sonde, le 14 janvier 2005, s'est produit, non sur une mer d'éthane ou de méthane, mais sur un sol où une carapace d'hydrocarbures et de méthane gelé semble recouvrir une couche de sable mou et imbibé des formes liquides que prennent certains éléments à la

Largage de la sonde européenne Huygens, à partir de Cassini, vers Titan (vue d'artiste).

enregistré des données lors de la traversée de toutes les couches atmosphériques, près de la surface (ou l'on soupçonnait la présence d'un « smog photochimique ») et à la surface, qui s'est révélée quelque peu différente des divers modèles proposés. Martin Tomasko, investigateur principal responsable du radiomètre spatial imageur de descente DISR, a déclaré : « Nous détenons aujourd'hui les informations nécessaires à la compréhension de ce qui façonne Titan. Les traces de précipitation, d'érosion, d'abrasion mécanique et d'autres formes d'activité hydrogéologique montrent que les processus qui ont façonné Titan sont très proches de ceux qui ont modelé la Terre ». Les scientifiques de l'ESA, se référant aux spectaculaires images prises par le DISR, estiment en effet que Titan présente de remarquables analogies avec la Terre du point de vue météorologique et géologique. « Certaines images font apparaître un réseau complexe de chenaux de drainage étroits allant d'une zone claire de plateaux vers des zones de plus basse altitude, plus lisses et plus sombres.

Ces chenaux se rejoignent pour former des systèmes fluviaux qui se dirigent vers des lacs asséchés dans lesquels on peut déceler des formes rappelant étrangement les îles et les hauts plateaux de notre planète ». Toujours selon l'équipe Huygens, à l'ESA, les données du chromatographe en phase gazeuse et du spectromètre de masse GCMS et celles du module scientifique de surface SSP confortent les données recueillies par le DISR : les observations de la sonde scientifique européenne font supposer une activité hydrologique récente due à un fluide qui ne peut être de l'eau (à cause de la basse température) mais probablement du méthane qui, selon son point triple,² peut exister sous forme liquide, gazeuse ou solide dans les conditions physiques qui règnent sur Titan. Huygens a mis en évidence l'existence de rivières et de lacs aujourd'hui asséchés mais il se peut que cet état soit temporaire et qu'il existe des cycles de variation de l'état du méthane. En conséquence, ces rivières et ces lacs seraient plus ou moins régulièrement alimentés par des pluies ou des chutes de neige puis asséchés par évaporation. Le sol de Titan, tout au moins sur le site de l'atterrissage, semble se caractériser par une croûte due, probablement à des précipitations de méthane, surplombant un matériau « à la consistance de sable ». Il existe deux hypothèses pour expliquer cette configuration du sol. Des précipitations de méthane seraient abattues pendant plusieurs milliards d'années, se seraient agglomérées en petites boules élastiques avec des poussières ou de petits conglomérats rocheux hérités de la période d'accrétion.

L'autre hypothèse invoque une remontée de méthane

par capillarité depuis le sous-sol. Il pourrait exister en sous-sol, grâce à une source de chaleur interne, des quantités importantes d'eau liquide, qui, après avoir humecté la partie du sol située sous la croûte sur deux à trois mètres, se solidifie en glace lorsqu'elle remonte vers la surface. Cela, et bien d'autres faits, démontre que Titan n'est pas un astre mort mais un monde de processus dynamiques, comme la terre, où les phénomènes les plus marquants se produisent selon des cycles plus ou moins réguliers. D'autre part, le réchauffement du sol lors du poser de la sonde, phénomène attendu par les scientifiques, a eu pour conséquence des émanations de méthane gazeux, provoquées par l'évaporation subite du matériau de surface, tendant à conforter la thèse selon laquelle le méthane joue un rôle central dans la géologie de Titan. Il en est de même pour la météorologie atmosphérique. Même si l'azote moléculaire est le composant principal de l'atmosphère, c'est le méthane qui joue sur Titan le rôle joué par l'eau sur Terre. Les images de l'instrument DISR ont aussi montré la présence de petits galets arrondis dans le lit d'une rivière asséchée. L'instrument, programmé pour pouvoir automatiquement répondre à certains stimuli, a pu, au moyen de mesures spectrales, nous aiguiller sur une hypothèse selon laquelle ces galets ne seraient pas pierreux, mais composés de blocs de glace extrêmement durs. L'interaction entre le sol et l'atmosphère est caractérisée par de perpétuelles précipitations de brume organique et de méthane. Selon l'ESA, « Ce matériau sombre qui se dépose en surface provient de l'atmosphère de Titan. Par un effet de lessivage, les précipitations de méthane entraînent cette substance des hautes altitudes vers le sol, où elle se concentre au fond des chenaux de drainage et dans les lits des rivières,

Descente de Huygens avec ses parachutes vers Titan et atterrissage de la sonde.



contribuant à la formation des zones sombres visibles sur les images du DISR ».

Avant la mission Cassini-Huygens, nous connaissons l'existence du volcanisme sur la Terre, Vénus, Mars et Io (satellite de Jupiter). Huygens, grâce aux systèmes collecteurs d'aérosols du GCMS, a détecté de façon indiscutable, de l'argon 40 qui serait la trace d'une activité volcanique ayant engendré non pas des éruptions de lave, comme sur Terre, mais de glace d'eau et d'ammoniac.

Il existe des similitudes entre les processus géophysiques de notre planète et ceux de Titan, mais les différences sont considérables du point de vue de la chimie. Sur Titan, tout au moins en surface, le méthane liquide remplace l'eau liquide, il y a de la glace d'eau au lieu de roches silicatées, des dépôts de particules d'hydrocarbures à la place de sol terreux. Les volcans éjectent de la glace à très basse température au lieu de lave. Comme l'a déclaré Jean Pierre Lebreton : « Nous avons là des résultats extraordinaires et les données de Huygens sont absolument passionnantes. Et nous n'en sommes qu'au début ! Les données vont occuper les scientifiques pendant de nombreuses années. » Nous avons vu que Huygens aurait fonctionné un peu plus de quatre heures. Le grand « défaut » de la sonde européenne, malgré son incontestable succès, était d'être condamnée à une durée de vie limitée à la surface de Titan. Selon Roger-Maurice Bonnet, ancien directeur des programmes scientifiques de l'ESA, les opportunités offertes par Huygens étaient réduites par deux facteurs :

- la source d'énergie constituée de batteries alimentant le module avait une durée de vie forcément limitée ;
- la capacité à communiquer avec Cassini, qui était, lors de ses orbites, la plupart du temps hors de portée de Huygens et ne pouvait donc servir de relais de communications.

Si l'on voulait une mission permettant d'effectuer des investigations plus longues que Huygens, deux éléments seraient nécessaires :

- l'embarquement d'un générateur radio isotopique, avec une durée de vie quasi illimitée ;
- un orbiteur spécifique pour Titan relayant les informations transmises par la sonde depuis la surface.

Il faut ajouter à cela des projets de ballons dirigeables spécifiques à Titan qui sont déjà dans les cartons de l'ESA... En attendant la réalisation de tels projets, signalons que la sonde Cassini, au cours des quarante orbites qu'elle décrira de 2004 à 2008 dans le système de Saturne, consacrera également une partie de son temps à l'analyse de l'atmosphère supérieure et des nombreux constituants atmosphériques de Titan, à des mesures des températures et des vents, de la distribution des aérosols en fonction de l'altitude et par rapport aux gaz environnants, à des sondages réguliers de la surface pour en déterminer la composition et les variations temporelles.

Titan est loin de nous avoir livré tous ses secrets et justifie, à lui seul, une mission ayant d'avantage de possibilités que la sonde Huygens.

NOTES

1. Effet Tunnel : Ce terme désigne un processus confirmé en radioactivité alpha et par les recherches sur les semi-conducteurs, qui peut se substituer, en milieu très froid, à l'énergie d'activation habituellement mise en jeu par la chimie classique pour la formation des molécules complexes. A ces températures, les lois de la chimie classique n'opèrent plus mais, en vertu de l'effet tunnel, certains atomes arrivent très lentement à vaincre les forces de répulsion exercées par d'autres atomes. Ainsi, ils arrivent à former de grosses molécules, voire des associations de molécules. Ce processus semble caractéristique des nuages interstellaires, des noyaux cométaires...

2. RTG : Radio-isotope Thermoelectric Generator. Générateur thermoélectrique à radio-isotope. Générateur basé sur l'effet thermoélectrique (à base de thermocouples) dont la source de chaleur est la désintégration atomique d'une masse d'éléments radioactifs.

3. Point Triple : Ce terme désigne la température et la pression à laquelle, sous certaines conditions, un corps peu exister sous les formes solide, liquide et gazeuse. La désignation du point triple d'un élément dans les conditions climatiques d'une planète permet de déterminer s'il est possible de trouver cet élément dans ces trois phases dans l'environnement. Le point triple de l'eau (de l'ordre de $-0,1^{\circ}\text{C}$ à 1600 millibars, pression atmosphérique de Titan) permet de savoir immédiatement qu'elle ne peut exister sous ses formes liquide ou gazeuse sur cette planète où la température de surface est de -180°C . Le point triple du méthane dans ces conditions est autour de -160°C , on peut en déduire la présence de méthane dans ces trois phases sur cette planète.

4. JIMO : Jupiter Icy Moons Orbiter. Mission d'exploration des lunes de Jupiter qui pourrait être lancée après 2011.

INSTRUMENTS SCIENTIFIQUES DE HUYGENS

ACP – Aerosol Collector and Pyrolyser

(Collecte d'aérosols et pyrolyse) Un collecteur d'aérosols pour l'analyse de l'atmosphère et des particules qui l'obscurcissent.

DWE – Doppler Wind Experiment

Un instrument de mesure de la vitesse du vent par effet Doppler. Caractéristiques zonales des vents par poursuite de la sonde depuis l'Orbiteur.

GCMS – Gas Chromatograph and Mass Spectrometer

Structure chimique de l'atmosphère de Titan. Appareil conçu pour identifier et mesurer divers constituants atmosphériques. Il est également équipé d'échantillonneurs de gaz qui seront remplis aux altitudes élevées afin d'être analysés un peu plus tard dans la descente quand plus de temps sera disponible.

HASI – Huygens Atmosphere Structure Instrument

Structure physique de l'atmosphère de Titan. Mesurer les propriétés physiques et électriques de l'atmosphère et d'un microphone à bord qui renverront des bruits de Titan.

SSP – Surface Science Package

Ensemble de capteurs pour déterminer les propriétés physiques de la surface à l'emplacement de l'impact de Huygens. La charge utile comprend un accéléromètre pour mesurer l'impact de la décélération et des instruments pour mesurer l'indice de la réfraction, la température, la conductivité thermique, et la vitesse du son.

DISR – Descent Imager/Spectral Radiometer

Imageur et radiomètre spectral. L'imageur prendra des images au cours de la descente et une fois au sol, mais également des mesures spectrales. Cent mètres avant son impact l'instrument devrait acquérir les spectres de la matière présente sur la surface.