

Figure 4 : Profil vertical de la détection limite du méthane pour l'instrument NOMAD (figure en couleur en page 2 de couverture).

terminée, soit moins de 50 molécules de méthane par milliard (10^{12}) de molécules d'air. Cette valeur est 10 voire 100 fois plus faible que les valeurs observées auparavant. La Figure 4 illustre la sensibilité de NOMAD vis-à-vis du méthane. On y a reporté les valeurs minimales détectables pour différentes altitudes. On voit que le maximum de la sensibilité est localisé vers 10 km d'altitude. L'augmentation vers la surface dépend de la quantité de poussière : au plus de poussière dans l'atmosphère, au moins de lumière atteignant l'instrument, ce qui diminue sa sensibilité.

En ne prenant en considération uniquement que les processus de destruction atmosphérique, cela signifie tout de même que 500 tonnes de méthane pourraient être émises sur la durée de vie – estimée à 300 ans – de la molécule, encore que dispersées dans toute l'atmosphère, ce taux soit extrêmement faible. En d'autres mots, cela signifie que nous ne comprenons pas les mesures précédentes, qui impliquent, si elles sont correctes, que le méthane doit être détruit sur Mars par un processus très particulier, encore inconnu. Ce processus doit agir de manière très rapide, à

proximité des sources potentielles du méthane, c'est-à-dire dans les quelques mètres au-dessus de la surface, de manière à empêcher que le méthane n'atteigne les premiers kilomètres d'altitude où il devrait être observé par TGO.

Le mystère du méthane s'épaissit donc. Dans les mois qui suivent, NOMAD continue ses observations à la recherche du méthane dans l'espoir de pouvoir comprendre les processus impliqués.

MÉTHANE SUR MARS, UNE HISTOIRE AUX MULTIPLES REBONDISSEMENTS

Sébastien Viscardy

Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)

En étant un indicateur potentiel d'activité biologique passée ou présente, le méthane et sa détection dans l'atmosphère de Mars ont fait couler beaucoup d'encre ces quinze dernières années. L'existence même de ce gaz a suscité d'âpres débats dans la communauté scientifique, dont une partie n'a jamais caché son scepticisme. Alors qu'ont été

récemment rapportés plusieurs travaux élevant le mystère à un niveau inédit, nous avons jugé intéressant de retracer l'histoire tumultueuse des observations du méthane, dont l'intérêt s'inscrit dans le contexte plus général de la recherche des mécanismes sous-jacents à l'apparition de la vie sur Terre et – peut-être – ailleurs.

Introduction

L'évolution de la nature, de l'origine de l'univers à la formation d'êtres pluricellulaires en passant par la formation des atomes, des molécules et des systèmes stellaires, se fait selon une complexification croissante de la matière [Reisse, 2006]. L'émergence de

la vie sur Terre constitue l'un des événements les plus fascinants de l'histoire de l'univers, mais reste également l'une des énigmes les plus grandes à ce jour. Quels sont les mécanismes grâce auxquels la matière inanimée a pu s'auto-organiser pour créer des entités d'un nouveau genre – des organismes biologiques – capables de se reproduire et d'évoluer ? Quelles sont les conditions physico-chimiques requises pour que ces mécanismes puissent se déployer ? Ce sont ces questions fondamentales qui animent le monde de l'exobiologie depuis des décennies.

Pour aborder ces questions, deux approches complémentaires peuvent être adoptées. La chimie prébiotique s'inscrit dans une première approche – dite « ascendante » – et consiste à chercher les mécanismes de fabrication des briques élémentaires de tous les êtres vivants – en particulier les acides aminés composant les protéines – à partir des molécules les plus simples. La vie telle que nous la connaissons étant basée sur la chimie du carbone, le méthane (CH_4 , molécule organique la plus simple) est depuis longtemps suspecté d'avoir joué un rôle prépondérant dans l'émergence de la vie sur Terre. En suivant les idées avancées par Oparine, Haldane ou encore Urey, un étudiant de ce dernier, Stanley Miller, élabore en 1953 un dispositif expérimental reproduisant en laboratoire les conditions que la Terre aurait connues à ses débuts : océan d'eau chaude entouré d'une atmosphère réductrice (composée de méthane, d'ammoniac NH_3 , de dihydrogène H_2 et de vapeur d'eau H_2O) et soumise à des décharges électriques simulant des éclairs. C'est la fameuse « soupe primordiale ». Une semaine après le début de l'expérience, un certain nombre de composés organiques, incluant

plusieurs acides aminés utilisés par tous les organismes vivants, sont détectés sans que nul organisme biologique intervienne ! Cette expérience, aussi simple que désormais célèbre, suggère que ces briques élémentaires du vivant pourraient être facilement produites et devraient ainsi être abondantes et répandues dans l'univers. Ce qui est tout à fait juste, excepté que cette soupe primordiale ne semble en réalité pas si indispensable.

En effet, l'analyse de la météorite « Murchison » – du nom du village australien où elle est tombée en 1969 – montre plus tard qu'elle en regorge également et que, par conséquent, les briques élémentaires des protéines auraient pu être apportées massivement lors de l'intense bombardement que la Terre a subi au début de son histoire. D'autre part, depuis longtemps, les spécialistes des paléoclimats terrestres ne sont pas convaincus par l'hypothèse d'une atmosphère primitive contenant massivement du CH_4 et du NH_3 car ces molécules auraient été trop facilement détruites par le rayonnement du jeune Soleil. Au contraire, selon eux, c'est une atmosphère plutôt neutre, composée principalement de dioxyde de carbone CO_2 , de diazote N_2 et de vapeur d'eau, qui aurait dû entourer notre planète dans sa prime jeunesse. Or, des expériences en laboratoire montrent que ces conditions atmosphériques ne sont pas propices à la formation de molécules organiques telles que les acides aminés. L'hypothèse de l'origine exogène de ces briques élémentaires du vivant paraît dès lors privilégiée.

Mais tous les spécialistes ne partagent pas nécessairement cette idée. Quand bien même l'atmosphère primitive aurait été largement dominée par le CO_2 et le

N_2 , rien ne justifie de supposer que tous les gaz la constituant soient parfaitement bien mélangés et partout à l'équilibre. Des processus géochimiques opérant le long des dorsales océaniques sont connus depuis les années 1970 pour produire du méthane, de l'ammoniac et du dihydrogène, autrement dit, les agents réducteurs considérés par Stanley Miller dans son expérience de 1953. De plus, l'atmosphère étant alors dépourvue de couche d'ozone, les rayons ultraviolets pouvaient atteindre la surface des océans et ainsi fournir l'énergie nécessaire à la fabrication d'acides aminés – à l'instar des décharges électriques dans l'expérience de Miller [Albarède, 2012]. Cette thèse ravive ainsi l'intérêt pour l'expérience de Miller et accrédirait à nouveau un rôle essentiel au méthane. Depuis lors ont été conduites de nombreuses études expérimentales consistant à déterminer le rôle de ce gaz comme précurseur de molécules organiques plus complexes dans des environnements aussi variés que les systèmes hydrothermaux sous-marins et le milieu interstellaire [Kobayashi et al., 2017]. Quoi qu'il en soit, les deux thèses prêtant une origine endogène ou exogène aux briques élémentaires ne s'opposent pas l'une à l'autre. En l'absence de données directes sur les conditions régnant sur la jeune Terre, il est raisonnable d'imaginer que ces deux scénarios auraient pu tous les deux contribuer à l'apport de ces premiers acides aminés et, par conséquent, à l'émergence de la vie sur Terre.

Une autre approche, dite « descendante », prend le problème dans le sens inverse. En partant des microorganismes actuels, on « remonte dans le temps » en extrapolant jusqu'aux êtres les plus simples. Deux types d'organismes vivant encore aujourd'hui seraient probablement apparus

sur Terre tôt dans son histoire. Les premiers, appelés méthanogènes, consomment du dioxyde de carbone et le réduisent en méthane. Les secondes, les méthanotrophes, extraient de l'énergie en convertissant en dioxyde de carbone du méthane ingurgité. Elles vivent nécessairement à proximité de sources de méthane, comme les sources hydrothermales que l'on trouve le long des dorsales océaniques. Ces deux types de microorganismes vivants font l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique pour leur relative simplicité. Mais encore aujourd'hui, savoir si la méthanogenèse ou la méthanotrophie ont pu être des métabolismes décisifs dans l'émergence de la vie reste une question ouverte et singulièrement complexe [Russell et Nitschke, 2017].

Nous avons vu jusqu'ici que le méthane est fortement lié à l'activité biologique et occupe une place prépondérante dans la recherche des processus menant à l'apparition de la vie sur Terre, qu'il soit considéré d'une part comme une source de carbone nécessaire à la fabrication de molécules organiques plus complexes ou, d'autre part, comme nutriment ou sous-produit des premiers organismes vivants. Dans ce contexte, on comprend les raisons pour lesquelles l'annonce d'une nouvelle détection de méthane sur Mars provoque des débats parfois animés au sein de la communauté scientifique et suscite toujours des articles sensationnalistes dans la presse quotidienne. Et pourtant, il serait trop hâtif de conclure à l'existence – passée ou présente – d'une vie martienne à partir des seules détections de ce gaz sur la planète rouge. En effet, bien que l'essentiel de la production de méthane

sur Terre soit dû à l'activité biologique, il existe également des processus purement géochimiques contribuant à entre 7 et 14% des émissions globales dans l'atmosphère [Etiopie, 2012], ce qui est loin d'être négligeable. Ces mécanismes de production du gaz étant d'une grande simplicité par rapport au métabolisme des microorganismes, même les plus primitifs, il est donc par défaut plus raisonnable de privilégier l'origine géochimique que de succomber à la tentation d'y voir nécessairement un signe d'une activité biologique sur Mars.

Cependant, quand bien même il n'y aurait pas de vie martienne, l'intérêt que présente cette planète dans la recherche des mécanismes sous-jacents à la transition entre l'inanimé et l'animé n'en serait aucunement amoindri. En ayant une histoire différente de celle de la Terre, la planète rouge et son exploration sont une formidable opportunité pour mieux comprendre les conditions nécessaires – et suffisantes – à l'émergence de la vie terrestre. Dans ce contexte, quels que soient les processus produisant du méthane sur Mars, son étude ne peut qu'apporter de précieuses informations à ces questions fondamentales.

Mais avant de chercher l'origine du méthane, il convient de s'assurer de son existence. Or, celle-ci a été fortement contestée au cours de ces quinze dernières années. C'est pourquoi nous nous pencherons ici sur l'histoire tumultueuse des détections rapportées depuis les premières missions martiennes.

Entrée du méthane sur la scène martienne

Les premières tentatives de me-

sure de méthane sur Mars ne sont pas récentes. En août 1969, l'équipe en charge du spectromètre infrarouge IRS à bord de Mariner 7 annonce publiquement en avoir détecté au-dessus de la calotte polaire australe [Sullivan, 1969]. Cependant, au vu des potentielles implications scientifiques, cette déclaration est faite à la hâte et est rapidement remise en cause par l'équipe IRS elle-même, les signaux détectés pouvant en effet être également « associés à des signatures spectrales de la glace de dioxyde de carbone excédant un millimètre qui, jusqu'alors, n'avaient pas été répertoriées » [Herr et Pimentel, 1969]. Et quelques années plus tard, les mesures réalisées par le spectromètre de Mariner 9 ne permettent à Maguire [1977] que d'en tirer une détection limite de 20 ppbv (parties par milliard en volume)¹.

Mais l'histoire des recherches du méthane martien ne débute sérieusement qu'il y a une quinzaine d'années. Grâce au Planetary Fourier Spectrometer (PFS), un instrument à bord du satellite Mars Express de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), Formisano et al. [2004] annoncent avoir détecté une concentration moyenne de 10 ± 5 ppbv autour du globe, avec des variations spatiales entre 0 et 30 ppbv. Quelques années plus tard, Geminali et al. [2008, 2010] analysent les mesures accumulées entre-temps par le PFS et confirment la présence de méthane dont l'abondance (14 ± 5 ppbv en moyenne) varierait spatialement et saisonnièrement, ce qu'observent également Fonti et Marzo [2010] avec le Thermal Emission Spectrometer (TES) à bord de l'orbiteur Mars Global Surveyor (MGS) de la NASA.

¹ Une détection limite de 20 ppbv doit être comprise comme suit : si méthane il y a, son abondance est nécessairement inférieure à 20 ppbv.

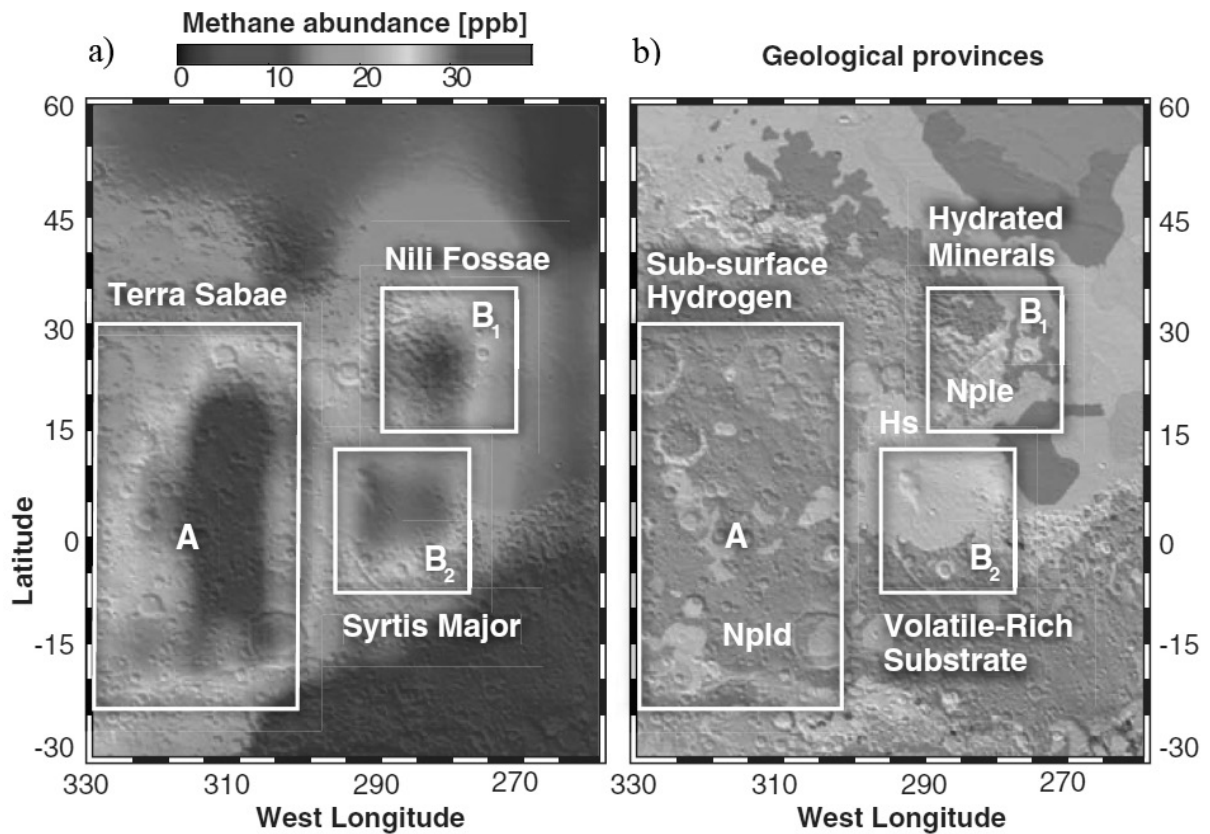


Figure 1 : a) Panache de méthane observé en 2003. b) Carte géologique de la même région. Les plus fortes concentrations en méthane observées dans les trois cadres coïncident avec des régions qui présentent des caractéristiques géologiques et minéralogiques suggérant la présence de méthane dans le sous-sol martien. (Crédit : Mumma et al. [2009]) (figure en couleur en page 2 de couverture).

Dans cette quête du méthane sur Mars, des mesures sont également réalisées dans les années 2000 grâce à des télescopes basés sur Terre. Krasnopolsky et al. [2004] rapportent une détection à hauteur de 10 ± 3 ppbv. Mais ce sont surtout les résultats obtenus en 2003 par Mumma et al. [2009] qui font grand bruit lorsqu'ils annoncent avoir observé un formidable panache de méthane s'étalant sur des millions de kilomètres carrés (voir Figure 1a). Ce panache gazeux, indiquant une éruption toute récente, présente des concentrations s'élevant jusqu'à 50 ppbv au-dessus de Terra Sabae, Syrtis Major et Nili Fossae (voir Figure 1a). Ces trois régions particulières présentent des caractéristiques minéralogiques qui en font des sources

plausibles de méthane sur Mars (voir Figure 1b). Cette coïncidence interpellante augmente ainsi la crédibilité des mesures rapportées.

Mumma et al. [2009] estiment avoir détecté une masse totale d'environ 42.000 tonnes de méthane, ce qui correspond à une abondance moyenne de 6 ppbv lorsque le gaz est parfaitement mélangé autour de la planète. Cependant, à cette observation effectuée en 2003 s'ajoute une autre datant de 2006 qui, elle, indique tout au plus une abondance de 3 ppbv. Par conséquent, le méthane aurait un temps de vie² de tout au plus quatre ans si la fameuse émission du gaz détecté en 2003 était unique, voire de seulement 200 jours si cet évène-

ment se reproduisait systématiquement chaque année...

Tout comme les variations spatiales et saisonnières observées par le PFS et le TES, ce résultat intrigue et nourrit le scepticisme d'une partie de la communauté scientifique. En effet, tous les modèles photochimiques indiquent que le méthane sur Mars devrait avoir un temps de vie non pas de quatre ans au maximum – comme semblent l'indiquer les mesures télescopiques réalisées par Mumma et al. [2009] – mais plutôt de l'ordre de... 300 ans ! D'autre part, la circulation atmosphérique sur Mars est si rapide que tout gaz émis en une région particulière devrait se répandre en tout point de l'atmosphère au bout de quelques mois.

² Le temps de vie d'une espèce chimique dans l'atmosphère est défini comme le temps nécessaire pour que son abondance initiale soit divisée par la constante de Neper $e = 2,718$.

Par conséquent, on s'attendrait à découvrir une distribution du gaz uniforme dans l'espace et stable dans le temps. D'éventuelles élévations des concentrations pourraient être constatées localement suite à des émissions récentes ou en cours, mais dans ce cas, elles devraient rapidement s'estomper et entraîner une accumulation progressive de l'abondance globale en méthane à mesure que ces émissions se succèdent. Or, rien de cela n'est observé.

Lefèvre et Forget [2009] tentent d'expliquer ces observations qui défient toute logique en recourant à un modèle de la circulation atmosphérique et de la photochimie martienne. Sans grande surprise, ils concluent qu'aucun mécanisme connu ne permet de rendre intelligibles les phénomènes observés, à moins d'invoquer l'existence d'un processus détruisant ou séquestrant le méthane avec une efficacité telle que son temps de vie moyen ne serait plus que de l'ordre de 200 jours. Mais cette hypothèse n'est pas exempte de problèmes considérables.

De nombreux travaux tentent d'identifier les sources les plus plausibles du méthane détecté et suggèrent différents mécanismes de production du gaz – qu'ils soient de nature biologique, géochimique ou autre. Diverses hypothèses sont avancées depuis les premières détections rapportées en 2004³. Certaines d'entre elles sont largement pertinentes car elles reposent sur des mécanismes bien connus et largement documentés sur Terre, si bien que les problèmes soulevés par l'ensemble des détections ne résident pas au niveau des sources potentielles du gaz, mais bien ailleurs...

A-t-on vraiment vu du méthane sur Mars ?

Ailleurs ? Oui, et pas n'importe où : dans les observations elles-mêmes, soutiennent fermement certains scientifiques, et ce dès leur publication. La critique la plus virulente paraît en 2011 lorsque Zahnle et al. [2011] consacrent un article fondamental à l'analyse détaillée des mesures rapportées dans la littérature et soulignent les nombreuses faiblesses dont souffrent la plupart d'entre elles. Les détections enregistrées par PFS [Formisano et al., 2004 ; Geminale et al., 2008, 2010] et par TES [Fonti et Marzo, 2010] sont en effet à la limite des capacités de ces instruments en orbite. En outre, le méthane n'est repéré qu'à une seule longueur d'onde du spectre et non aux autres – le signal étant trop faible – qui composent ensemble l'empreinte spectrale associée à cette molécule organique. Dès lors, il est difficile, sinon impossible, d'y voir la preuve indubitable de son existence, ce que les auteurs de ces travaux admettront eux-mêmes plus tard [Giuranna et al., 2019 ; Fonti et al., 2015]. D'autre part, la prétendue détection effectuée depuis la Terre par Krasnopolsky et al. [2004] ne semble être que le résultat d'un artefact instrumental...

En revanche, Zahnle et al. [2011] reconnaissent que les observations télescopiques rapportées par Mumma et al. [2009] sont sensiblement plus convaincantes. Elles montrent en effet des signaux nettement plus forts et, contrairement aux autres mesures, à différentes longueurs d'onde. Néanmoins, ils les remettent en question pour la raison suivante. Les spectres enregistrés par des télescopes situés

sur Terre sont nécessairement et significativement affectés par la composition de l'atmosphère terrestre, celle-ci contenant des quantités de méthane nettement plus importantes que celles attendues sur Mars. Pour éviter tout problème de contamination des données spectrales, les mesures ne sont réalisées que lorsque la vitesse relative entre les deux planètes est suffisamment élevée pour que l'effet Doppler puisse être exploité. Ainsi, les raies spectrales d'origine martienne subissent un décalage vers le bleu lorsque la Terre se rapproche de Mars et vers le rouge lorsqu'elle s'en éloigne, permettant ainsi de différencier les contributions des deux planètes aux spectres d'absorption récoltés. De plus, le traitement de ces spectres nécessite que soient prise en compte la composition de l'atmosphère terrestre et, en particulier, la composition isotopique du méthane. Cependant, Zahnle et al. [2011] contestent la validité de ce traitement en invoquant une possible contamination terrestre qui ne serait pas rendue compte dans la littérature scientifique. En effet, lors d'un décalage vers le bleu (ce qui était le cas lors des mesures du panache en 2003), les raies spectrales du $^{12}\text{CH}_4$ martien – composé du principal isotope du carbone – coïncideraient avec le $^{13}\text{CH}_4$ terrestre supposé être vingt fois plus abondant. Par contre, lors d'un décalage vers le rouge (situation à l'époque des mesures de 2006), cette coïncidence n'est plus possible, ce qui, selon Zahnle et al. [2011], expliquerait pourquoi l'abondance en méthane obtenue quelque trois années après l'observation du panache paraît nettement plus basse. À priori, ces arguments semblent tenir la route, et l'interprétation des mesures télescopiques par Mumma et al. [2009] mise en échec. Mais

³ Nous renvoyons le lecteur intéressé par plus d'informations sur les sources potentielles de méthane sur Mars vers Yung et al. [2018], Gloesener et al. [2013] et Vandaele [2015].

ceux-ci démontrent plus tard qu'il n'en est rien et réfutent cette analyse en tout point, relevant les erreurs commises par ses auteurs et les conséquences totalement improbables qui en découlent. En effet, argumentent Villanueva et al. [2013], la distance entre la Terre et Mars est tellement grande que cette dernière ne mesure que sept secondes d'arc dans le ciel⁴. Dans ces conditions, si le panache n'était qu'une illusion créée par le ¹³CH₄ terrestre, il faudrait en conclure que la composition isotopique du méthane sur Terre varie drastiquement sur des distances infiniment petites, ce qui est littéralement impensable, d'autant plus qu'elle est connue pour être restée particulièrement stable au cours des derniers millénaires.

En somme, bien que les différentes détections discutées jusqu'ici aient systématiquement soulevé le scepticisme d'une partie de la communauté scientifique après leur publication, il ne fait aucun doute que l'étude menée par Zahnle et al. [2011] marque un tournant notable dans l'histoire des observations du méthane sur Mars. Ainsi sont définitivement abandonnées la plupart des mesures, excepté celles de Mumma et al. [2009] qui résistent à la critique. Mais les conséquences de ce « grand nettoyage » sont énormes. Et dire que le doute quant à l'existence même du méthane martien s'installe sérieusement relève de l'euphémisme. Cependant, à l'époque où paraît l'étude de Zahnle et al. [2011], deux missions vers Mars sont déjà en préparation, dont l'un des objectifs n'est autre que de détecter notre mystérieux gaz sur la planète rouge.

Lorsque Curiosity s'en mêle

La première mission, baptisée Mars Science Laboratory (MSL), repose sur l'astromobile Curiosity atterrissant au cœur du cratère Gale en août 2012 et à bord duquel se trouvent plusieurs instruments hautement sophistiqués, dont le Tunable Laser Spectrometer (TLS). La méthode exploitée par ce dernier (la spectroscopie laser réglable) est largement utilisée pour mesurer les concentrations de méthane dans l'atmosphère terrestre. Avec une résolution spectrale ultrafine, le TLS présente des performances sans commune mesure avec celles des instruments évoqués jusqu'ici et semble, par conséquent, l'outil idéal pour confirmer ou infirmer la présence de méthane sur Mars.

A peine un an après le début de la mission MSL, Webster et al. [2013] publient les premiers résultats obtenus par Curiosity : sur les six mesures effectuées au cours des 300 premiers sols⁵, aucune détection de méthane n'a été enregistrée ; seule une détection limite de 1,3 ppbv a pu être rapportée !

Nous sommes bien loin des dizaines de ppbv annoncées précédemment. Tout au plus se trouve dans l'atmosphère de Mars un cinquième de la quantité détectée par Mumma et al. [2009] en 2003. L'affaire semble donc définitivement enterrée : si le méthane martien existe, c'est dans des quantités infimes à l'échelle de la planète. Ces nouvelles mesures publiées à la suite de l'étude critique menée par Zahnle et al. [2011] semblent mettre définitivement un point final au débat et donner ainsi raison aux plus sceptiques. Mais...

L'équipe en charge du TLS poursuit les mesures et améliore l'algorithme de traitement des mesures. Fin 2014 se tient la réunion annuelle de l'American Geophysical Union. Une conférence de presse est organisée, au cours de laquelle l'équipe TLS fait une annonce saisissante : cinq pics de méthane s'élevant jusqu'à 10 ppbv ont été détectés ! En outre, une méthode d'enrichissement des échantillons d'air prélevés dans l'atmosphère martienne est également utilisée, permettant de détecter le méthane même lorsqu'il n'est présent que dans des proportions infimes. En dehors des pics observés en utilisant la technique classique d'ingestion directe, cette méthode d'enrichissement, appliquée à deux reprises, a révélé des quantités inférieures à 1 ppbv (voir Figure 2). Les mesures de pics répétés et entrecoupés de valeurs nettement plus basses indiquent des fluctuations importantes de la concentration du gaz qui ne peuvent être interprétées que comme des signes d'émissions sporadiques de méthane.

Voilà un retournement de situation pour le moins inattendu ! Ces résultats révélés par Webster et al. [2015] marquent une nouvelle étape dans l'histoire du méthane sur Mars. A ce stade-ci, on pourrait s'attendre à ce qu'émerge enfin un consensus scientifique en faveur de l'existence désormais avérée du méthane martien. Mais au lieu de cela s'élèvent à nouveau certaines critiques. Seulement, cette fois-ci, ce ne sont plus les détections proprement dites qui sont remises en cause – elles semblent en effet convaincantes – mais l'origine martienne du gaz détecté. En voici la raison. Au début de la mission, L'équipe TLS se rend compte qu'elle fait face à un pro-

⁴ Une seconde d'arc correspond à un 3600° de degré. Autrement dit, au moment de la détection du panache, Mars nous apparaissait depuis la Terre aussi petit qu'un ballon de basket-ball situé à une distance de... 7 km !

⁵ Un sol est un jour martien, dont la durée est de 24 heures 39 minutes.

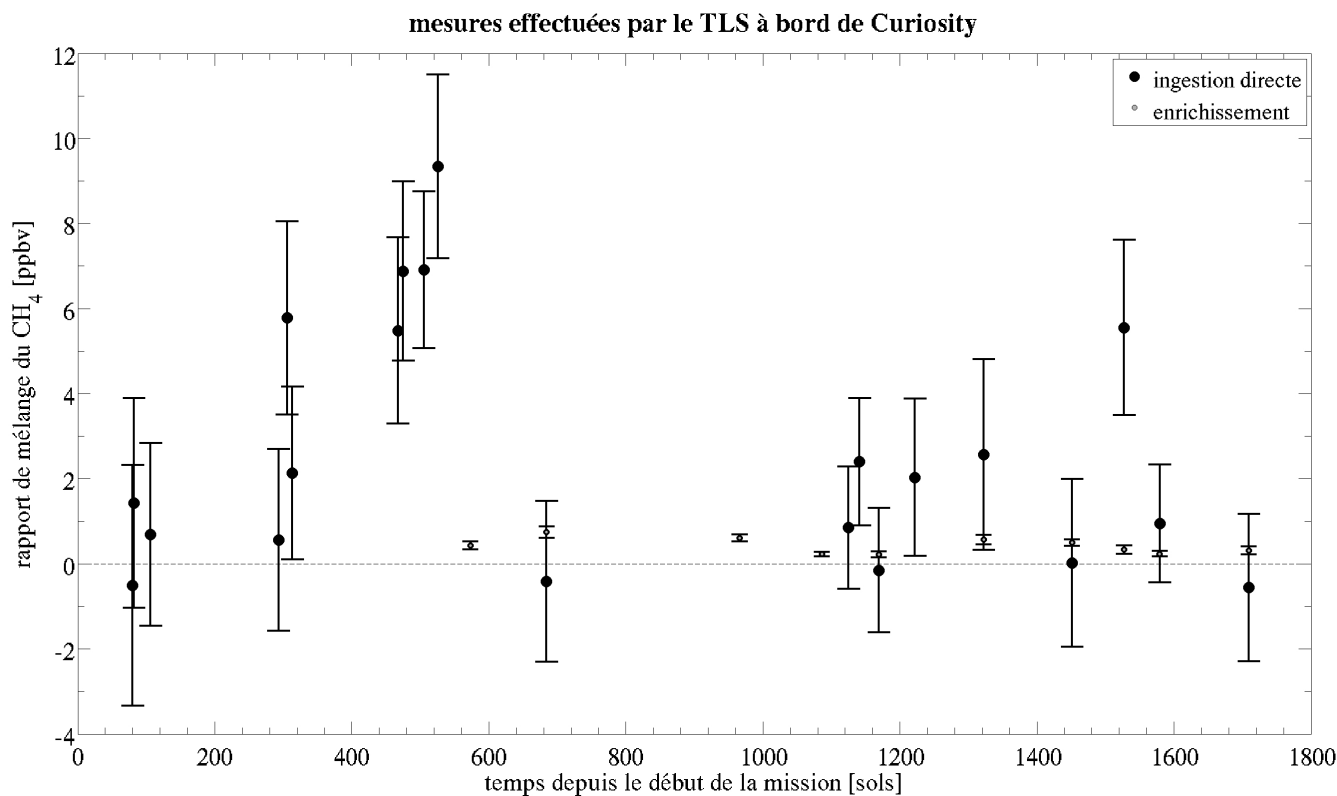


Figure 2 : Mesures réalisées grâce au TLS à bord de l'astromobile Curiosity jusqu'au 27 mai 2017 et rapportée par Webster et al. [2018]. Deux méthodes de mesure sont utilisées : l'ingestion directe (en noir) et l'ingestion avec enrichissement (en gris).

blème : les premières mesures du gaz sont anormalement élevées. Elle se voit contrainte d'admettre que l'instrument a été victime de fuites avant l'envoi de Curiosity vers Mars, lequel a ainsi embarqué de l'air contenant ~10 ppmv de méthane... terrestre. L'équipe TLS a procédé au pompage de l'air dans la chambre contaminée afin de rendre négligeable la contribution terrestre aux mesures ultérieures. Néanmoins, Zahnle [2015] n'est pas convaincu et, vu les soucis rencontrés, il lui semble plus raisonnable d'envisager que Curiosity contienne toujours du méthane terrestre infiltré dans d'autres parties de l'astromobile – en dépit des opérations de « nettoyage » – et qui contaminerait les échantillons d'air martien analysés.

Ce cas de figure n'est pas impos-

sible mais malgré tout improbable selon les responsables des mesures [Bontemps, 2015]. Il semble en effet difficile de concevoir que les mesures effectuées au cours des 300 premiers sols soient si basses qu'aucune détection n'est obtenue, et que subitement, l'air terrestre piégé dans quelques recoins de Curiosity viennent contaminer les mesures en une série de pics variant entre 5 et 10 ppbv et s'étendant sur 60 sols (entre Sol 467 et Sol 525 ; voir Figure 2). Cependant, affirmer l'existence de méthane martien nécessitent des preuves incontestables. Or, ces problèmes évoqués plus haut jettent un doute et compromettent ainsi la crédibilité des détections.

Cela n'empêche pas pour autant l'équipe TLS de continuer la campagne de mesures. Trois ans

plus tard, Webster et al. [2018] rapportent les observations récoltées au cours des deux années suivantes en exploitant plus souvent la méthode d'enrichissement des échantillons en méthane (voir Figure 2). Un phénomène énigmatique semble être dévoilé : le gaz est non seulement détecté systématiquement lorsque cette technique est utilisée⁶, mais aussi son abondance semble osciller annuellement entre 0,24 et 0,65 ppbv et être inversement corrélée à la pression atmosphérique (voir Figure 3b). Pour cette raison, Webster et al. [2018] en déduisent que ces détections indiquent la teneur du fond en méthane⁷, autrement dit que ces mesures sont représentatives de l'abondance en tout point de l'atmosphère martienne. Ceci étant, les variations annuelles de la pression atmosphérique sont

⁶ Rappelons que sa sensibilité est plus importante que la méthode classique d'ingestion directe.

⁷ En anglais, on parle de « background level », c'est-à-dire l'abondance en méthane lorsqu'il est mélangé uniformément dans l'atmosphère entière.

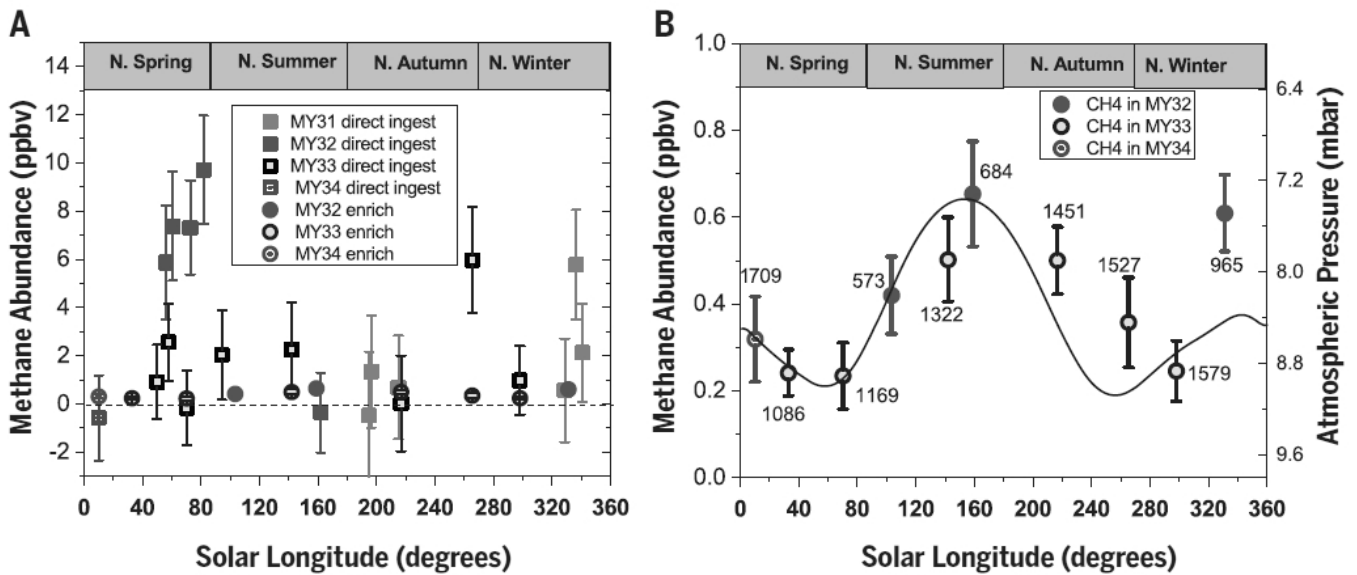


Figure 3 : a) Ensemble des mesures enregistrées par le TLS à bord de Curiosity en fonction des saisons. b) Evolution temporelle du niveau du fond du méthane dans l'atmosphère martienne à cheval sur trois années martiennes. Ces mesures sont également indiquées par des marqueurs gris dans la Figure 2. La pression atmosphérique mesurée par Curiosity est superposée aux mesures et se lit sur l'axe de droite inversé. (Crédit : Webster et al. [2018]) (figure en couleur en page 2 de couverture)

beaucoup plus faibles que celles que le méthane semble montrer et ne peuvent donc pas expliquer à elles seules l'ampleur du cycle observé. Une étude des corrélations possibles avec plusieurs paramètres mesurés par l'astromobile (température à la surface, intensité du rayonnement ultraviolet, etc.) est également effectuée, mais aucune d'entre elles n'apparaît concluante. C'est donc sur ce mystère que nous laissons Webster et ses collègues à l'issue de leur article.

Au moment où Webster et al. [2018] publient ces résultats étonnants, débute la phase scientifique d'une autre mission très attendue : ExoMars. Il s'agit d'un satellite baptisé Trace Gas Orbiter (TGO) – sous l'égide de l'ESA et de l'agence spatiale russe Roscosmos – et ayant à son bord deux instruments d'une sensibilité sans précédent dans l'histoire des orbiteurs martiens : NOMAD (instrument conçu en Belgique et géré par le département d'aéronomie planétaire de l'IASB ; Vandaele [2015, 2018]) et ACS (instrument russe). Comme son nom le

laisse entendre, l'objectif scientifique du TGO est d'étudier la composition de l'atmosphère martienne et, en particulier, les composés chimiques à l'état de trace, dont notre mystérieux méthane. De par les capacités de ces deux instruments, cette mission devrait apporter des informations précieuses – et sans doute définitives – au débat qui anime la communauté scientifique depuis quinze ans.

D'un rebondissement à un autre

En attendant les premiers résultats de cette mission, une autre étude paraît en avril 2019, rapportant de nouvelles mesures effectuées par... le PFS. Nous avons vu plus haut que cet instrument souffrait d'une résolution spectrale relativement basse et que les mesures rapportées auparavant présentaient un signal trop faible pour pouvoir conclure sans ambiguïté à la présence de méthane dans l'atmosphère martienne. Pour surmonter ce problème, les spectroscopistes en charge du PFS ont adopté une technique – appelée

« spot-tracking » – consistant à imprimer un mouvement de rotation à l'instrument de manière à viser continuellement une région particulière au cours de son survol. Lorsque les conditions sont favorables, cette nouvelle approche permet de récolter plus de 200 spectres d'absorption et d'augmenter considérablement le signal d'une présence éventuelle de méthane. Le recours à cette technique permettrait ainsi d'accroître la confiance à accorder aux mesures effectuées par le PFS. Étant donné que Curiosity se trouve au cœur du cratère Gale, c'est cette région qui est choisie pour unique cible dès décembre 2012. Depuis lors, aucune détection n'a été obtenue, et seules des détections limites de quelques ppbv ont pu être estimées. Aucune détection... à l'exception d'un seul passage au-dessus du cratère. Le 16 juin 2013, le PFS détecte $15,5 \pm 2,5$ ppbv ! Ce résultat annoncé par Giuranna et al. [2019] est en soi remarquable, mais il devient totalement inédit lorsque l'on réalise que cette détection est obtenue moins d'un jour après celle d'un pic de méthane de $5,78 \pm 2,27$ ppbv enre-

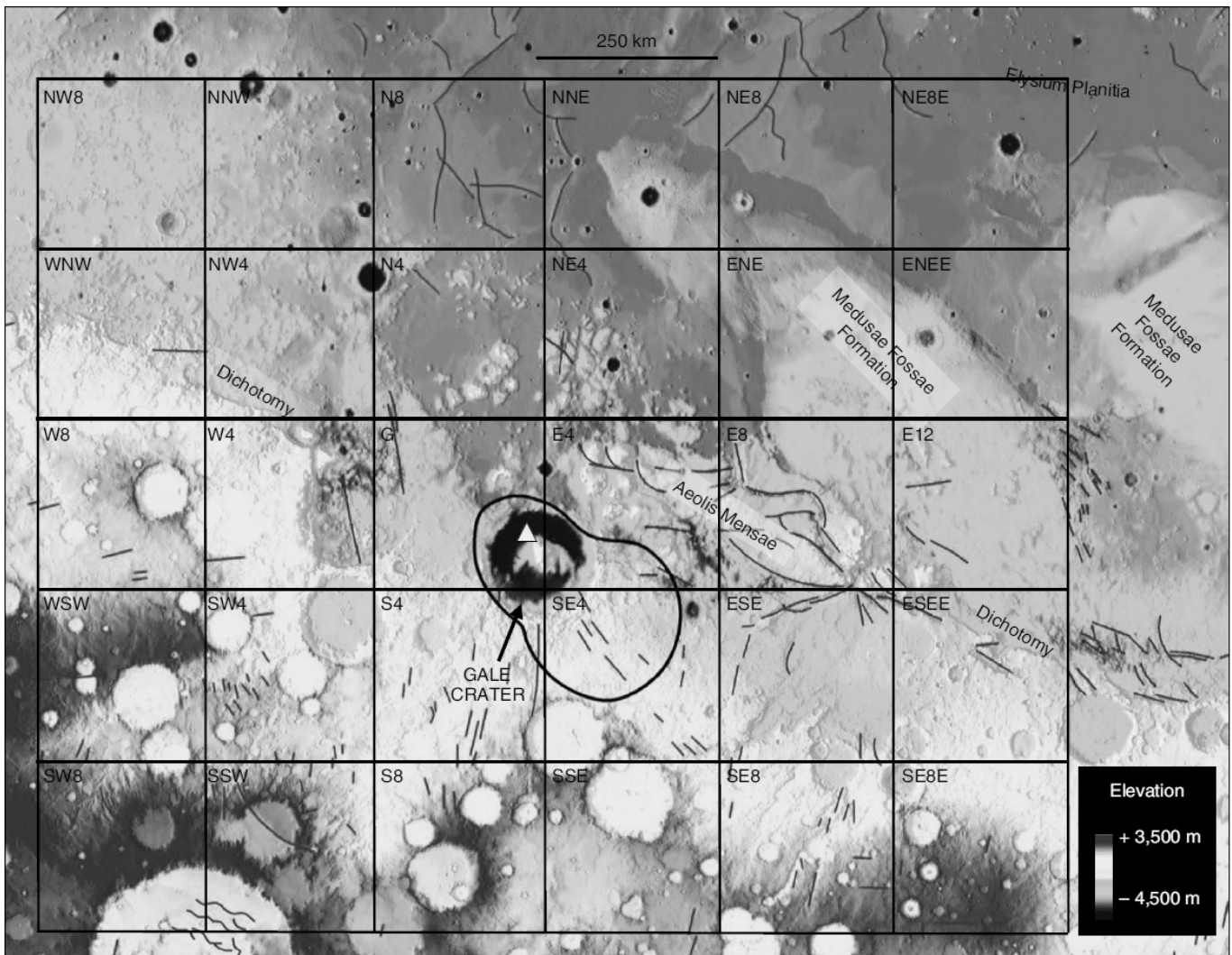


Figure 4 : Région autour du cratère Gale (au centre de la figure) dans lequel se situe l'astromobile Curiosity (position indiquée par le triangle). La zone observée par le PFS le 16 juin 2013 est représentée par la courbe fermée en noir. La grille composée de trente parcelles est la région analysée par les modélisateurs et les géologues de façon indépendante dans l'étude rapportée par Giuranna et al. [2019], chaque bloc (dont le label est indiqué dans le coin gauche supérieur) étant considéré comme une source potentielle du méthane détecté par les deux instruments. (Crédit : Giuranna et al. [2019]) (figure en couleur en page 2 de couverture)

gistré par Curiosity (Sol 305 ; voir Figure 2). Ainsi, pour la première fois, deux instruments indépendants révèlent la présence du gaz dans des proportions comparables, dans la même région et presque simultanément ! Ce résultat apporte la confirmation faisant défaut jusqu'alors et apparaît comme l'énième rebondissement d'une histoire singulièrement mouvementée.

Mais cette étude menée par Giuranna et al. [2019] ne se contente pas de rapporter cette détection. En effet, une rapide analyse des observations de méthane disponibles indique qu'il

s'agit d'un panache dont l'émission a eu lieu en dehors du cratère Gale, au maximum quelques jours avant d'être détecté par Curiosity en premier lieu et par le PFS moins d'un jour plus tard. Cet événement apparaît donc comme la situation idéale pour rechercher une source de méthane martien. Ainsi les modélisateurs de l'IASB, développant un modèle de la circulation atmosphérique sur Mars, sont contactés par l'équipe en charge du PFS. Ils utilisent toutes les observations récoltées par le PFS et Curiosity en juin 2013 afin de contraindre des simulations d'émissions de méthane et de

déterminer les sources probables du gaz détecté. En faisant l'hypothèse – très raisonnable – d'une émission à la surface de Mars, les modélisateurs explorent une large région de plus d'un million de kilomètres carrés et centrée sur le cratère, considérant individuellement chacune des trente parcelles d'environ 250 kilomètres de côté comme source possible du gaz (voir Figure 4). Cependant, vu le trop faible nombre de mesures enregistrées par PFS et Curiosity, les simulations numériques, décrivant l'évolution du méthane dans l'atmosphère suite à son émission en un lieu donné, ne sont pas suffisamment contraintes, si bien

qu'il est impossible de déterminer avec certitude la zone de provenance du méthane. Pour contourner ce problème, une approche statistique est développée, permettant d'attribuer une probabilité à chacune des trente parcelles composant la région explorée. Il ressort de cette étude numérique que deux d'entre elles, situées à environ 500 kilomètres à l'est du cratère Gale (parcelles E8 et ESE ; voir Figure 4), apparaissent comme les sources les plus probables du méthane détecté. Ce résultat soulève une autre question : cette région pointée par les modélisateurs présente-t-elle des caractéristiques géologiques qui soutiendrait cette suggestion ? Pour y répondre, deux géologues prennent part à cette collaboration internationale et examinent de façon indépendante la région couverte par les trente parcelles. Cette analyse débouche sur un résultat tout à fait remarquable : la zone correspondant aux deux mêmes parcelles (E8 et ESE) présente les meilleures indications d'ordre géologique pour une émission possible de méthane dans le domaine exploré autour du cratère Gale. En effet, dans cette région appelée Aeolis Mensae, se trouvent de nom-

breuses failles par lesquelles le gaz pourrait remonter à la surface, ainsi que de la glace d'eau à faible profondeur pouvant séquestrer le gaz jusqu'à ce qu'il soit relâché dans l'atmosphère martienne. Ainsi, et pour la première fois, une étude confirme de façon indépendante la présence de méthane sur Mars et suggère un scénario décrivant l'évolution du méthane depuis son émission jusqu'à sa détection par deux instruments différents. Ces résultats remarquables renforcent par conséquent la confiance que l'on peut avoir dans les mesures effectuées à la fois par le PFS et Curiosity.

L'affaire est-elle donc réglée ? Est-ce enfin la preuve ultime de l'existence de méthane sur Mars ? Non, car les choses se compliquent rapidement. En effet, à peine dix jours plus tard sont rapportées les premières mesures effectuées par le TGO [Korablev et al., 2019]. Les deux instruments NOMAD et ACS ont scanné l'atmosphère de Mars entre avril et août 2018 [Vandaele, 2019]. Les résultats sont sans appel : si méthane martien il y a, son abondance n'est guère plus élevée que... 0,05 ppbv ! Étant donné que la

photochimie atmosphérique telle qu'on la connaît implique que le temps de vie du méthane sur Mars devrait être de l'ordre de 300 ans, l'abondance détectée précédemment par d'autres instruments – dont l'équivalent de 6 ppbv en 2003 – n'aurait pas pu décroître drastiquement en quelques années, si bien que le TGO aurait dû en détecter une partie. Or, ce n'est pas le cas. Ces nouvelles observations récoltées par NOMAD et ACS sont d'une qualité telle que l'on ne peut les remettre en cause. Elles ont été obtenues par deux instruments différents, gérés par deux équipes indépendantes, et dont la sensibilité est à l'heure actuelle sans égale. Par conséquent, si c'est bien du méthane qui a été détecté précédemment par les télescopes terrestres [Mumma et al., 2009], Curiosity [Webster et al., 2015, 2018] et le PFS [Giuranna et al., 2019], où est-il donc passé ? Que nous faudrait-il pour réconcilier l'ensemble des détections accumulées au cours des quinze dernières années ? À quel prix ? C'est à ces questions que nous tenterons d'apporter quelques éléments de réponse dans un prochain numéro de *Ciel et Terre*.

Références

- Albarède, F., *Geochemistry. An Introduction*, Cambridge University Press, Cambridge, **2009**.
- Bontemps, J., Mystery of methane on Mars: The saga continues, *Astrobiology Magazine*, **2015**.
- Etiopie, G., Methane uncovered, *Nature Geoscience*, 5, 373-374, **2012**.
- Fonti, S. et Marzo, G. A., Mapping the methane on Mars, *A&A*, 512, A51, **2010**.
- Fonti, S., Mancarella, F., Liuzzi, G., Roush, T. L., Chizek Frouard, M., Murphy, K., et Blanco, A., Revisiting the identification of methane on Mars using TES data, *A&A*, 581, A136, **2015**.
- Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N. et Giuranna, M., Detection of methane in the atmosphere of Mars, *Science*, 306, 1758-1761, **2004**.
- Geminale, A., Formisano, V. et Giuranna, M., Methane in Martian atmosphere: Average spatial, diurnal, and seasonal behavior, *Planet. Space Sci.*, 56, 1194-1203, **2008**.
- Geminale, A., Formisano, V. et Sindoni, G., Mapping methane in Martian atmosphere with PFS-MEX data, *Planet. Space Sci.*, 59, 137-148, **2011**.
- Giuranna, M., Viscardi, S., Daerden, F., Neary, L., Etiopie, G., Oehler, D., Formisano, V., Aronica, A., Wolkenberg, P., Shohei, A., Cardesín-Moinelo, A., Marín-Yaseli de la Parra, J., Merritt, D., et Amoroso, M., Independent confirmation of a methane spike on Mars and a source region east of Gale Crater, *Nature Geosc.*, 12, 326-332, **2019**.

Références (suite)

- Gloesener, E., Karatekin, Ö. et Dehant, V., Le méthane et les clathrates sur Mars, *Ciel et Terre*, 129(1), 2-11, **2013**.
- Herr, K. C. et Pimentel, G. C., Infrared Absorptions near Three Microns Recorded over the Polar Cap of Mars, *Science*, 166, 466-499, **1969**.
- Kobayashi, K., Geppert, W. D., Carrasco, N., Holm, N. G., Mousis, O., Palumbo, M. E., Waite, J. H., Watanabe, N. et Ziurys, L. M., Laboratory Studies of Methane and Its Relationship to Prebiotic Chemistry, *Astrobiology*, 17, 786-812, **2017**.
- Korablev, O. et al., No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations, *Nature*, 568, 517-520, **2019**.
- Krasnopolsky, V. A., Maillard, J. P., et Owen, T. C., Detection of methane in the martian atmosphere: evidence for life?, *Icarus*, 172, 537-547, **2004**.
- Lefèvre, F. et Forget, F., Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics, *Nature*, 460, 720-723, **2009**.
- Maguire, W. C., Martian Isotopic Ratios and Upper Limits for Possible Minor Constituents as Derived from Mariner 9 Infrared Spectrometer Data, *Icarus*, 32, 85-97, **1977**.
- Mumma, M. J., et al., Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003, *Science*, 323, 1041-1045, **2009**.
- Reisse, J., La longue histoire de la matière, *Presses Universitaires de France*, Paris, **2011**.
- Russell, M. J. et Nitschke, W., Methane: Fuel or Exhaust at the Emergence of Life?, *Astrobiology*, 17, 1053-1065, **2017**.
- Sullivan, W., 2 Gases Associated With Life Found on Mars Near Polar Cap, *New York Times*, 8 août **1969**.
- Vandaele, A. C., Du méthane sur Mars ?, *Ciel et Terre*, 131(1), 15-21, **2015**.
- Vandaele, A. C. et al., NOMAD, an Integrated Suite of Three Spectrometers for the ExoMars Trace Gas Mission: Technical Description, Science Objectives and Expected Performance, *Space Sci. Rev.*, 214:80, **2018**.
- Vandaele, A. C., et Lefever, K., Mission ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) NOMAD : les premiers résultats, *Ciel et Terre*, 135(3), 66-69, **2019**.
- Webster, C. et al., Low Upper Limit to Methane Abundance on Mars, *Science*, 342, 355-357, **2013**.
- Webster, C., et al., Mars methane detection and variability at Gale crater, *Science*, 347, 415-417, **2015**.
- Webster, C., et al., Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations, *Science*, 360, 1093-1096, **2018**.
- Yung, Y. et al., Methane on Mars and Habitability: Challenges and Responses, *Astrobiology*, 18(10), 1221-1242, **2018**.
- Zahnle, K., Freedman, R. S., et Catling, D. C., Is there methane on Mars?, *Icarus*, 212, 493-503, **2011**.
- Zahnle, K., Play it again, SAM, *Science*, 347, 370-371, **2015**.

