

# Ciel et Terre

Bulletin de la Société Royale belge d'Astronomie,  
de Météorologie et de Physique du Globe

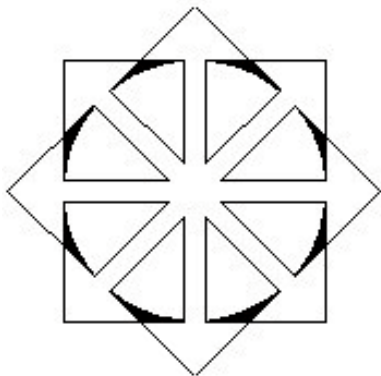
ISSN 0009-6709

Volume 135, n°4 Juillet - Août 2019

La problématique du méthane martien expliquée en graphique. Plusieurs origines ont été évoquées pour expliquer sa présence par le passé, impliquant la production dans le sous-sol, l'apport météoritique, etc. Les mécanismes de destruction photo-chimique bien établis sont également recensés mais ceux-ci n'arrivent pas à expliquer pourquoi le méthane semble avoir disparu de l'atmosphère de Mars entre avril et septembre 2018, période durant laquelle l'orbiteur TGO a réalisé ses mesures (Crédits : CNRS / Marco Savary Design).

## Sommaire

- 98 Méthane sur Mars, une espèce chimique en voie d'extinction rapide  
*Sébastien Viscardy*
- 107 ESPACE : Actualités et mises au point  
États-Unis – Japon – Russie – Europe – Chine – Inde  
*René Dejaille et Anne Haubrechts*
- 113 L'entretien de satellites en orbite - Est-il commercialement viable ?  
*Guy Stevins*
- 116 Un premier bilan climatologique pour les mois de juin et de juillet 2019  
*R. D.*
- 119 Les glaces du Mont-Blanc ont gardé des traces de pollution de l'époque Romaine  
*R. D.*
- 120 C'était dans *Ciel et Terre* il y a 95 ans...  
*Anne Haubrechts*
- 122 Dans le ciel du mois de septembre 2019  
*René Dejaille*
- 124 Dans le ciel du mois d'octobre 2019  
*René Dejaille*



# MÉTHANE SUR MARS, UNE ESPÈCE CHIMIQUE EN VOIE D'EXTINCTION RAPIDE

Sébastien Viscardy

Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)

*La recherche de méthane sur Mars a généré d'intenses débats dans la communauté scientifique depuis le début de notre siècle. En dépit des nombreuses détections rapportées et des hypothèses avancées afin de leur donner sens, l'existence de ce gaz est loin de faire consensus dans la communauté scientifique. En effet, si les observations elles-mêmes ont été abondamment contestées, leurs implications sur notre compréhension des processus se déroulant dans l'atmosphère martienne soulèvent également plusieurs problèmes nourrissant le scepticisme de nombreux planétologistes. Le comportement du méthane suggéré par l'ensemble des détections paraît – jusqu'à aujourd'hui – inconciliable avec notre compréhension actuelle de l'atmosphère martienne. C'est à l'analyse de ces problèmes théoriques et à certaines solutions avancées afin de les résoudre que le présent article est essentiellement consacré.*

## Introduction

Dans la recherche des mécanismes sous-jacents à la transition entre la matière inanimée et la matière vivante, le méthane occupe une place singulière en tant qu'indicateur potentiel d'activité biologique et en tant qu'ingrédient probablement essentiel à

l'émergence de la vie sur Terre. Les conditions chimiques de l'atmosphère de Mars sont telles que, selon tous les modèles de la photochimie atmosphérique, le méthane aurait un temps de vie de quelques centaines d'années. Par conséquent, toute détection du gaz signifie nécessairement que son émission dans l'atmosphère est récente sur l'échelle des temps géologiques, ce qui pourrait affecter fondamentalement l'image d'une « planète éteinte » à laquelle les premières missions martiennes laissent penser. De plus, le méthane rejeté dans l'atmosphère terrestre étant largement d'origine biologique, on ne peut exclure que sa détection sur Mars puisse être le signe d'une vie passée ou présente sur la planète rouge...

Dans le précédent numéro de *Ciel et Terre* [Viscardy, 2019], nous avons retracé l'histoire tumultueuse des observations du méthane sur Mars depuis les premières missions et avons vu que les détections du gaz faites à ce jour ont fait l'objet de contestations parfois virulentes, si bien que quelque quinze années après le début de cette histoire, aucun consensus n'a encore pu émerger<sup>1</sup>. L'année qui vient de s'écouler fut particulièrement riche en rebondissements. En s'appuyant

sur une longue série de mesures réalisées dans le cratère Gale au cours de plus de deux années martiennes<sup>2</sup>, l'équipe en charge de l'astromobile *Curiosity* de la NASA avança en juin 2018 que la teneur du fond en méthane<sup>3</sup> présenterait un cycle annuel, oscillant entre 0,24 et 0,65 ppbv<sup>4</sup> [Webster et al., 2018]. En avril 2019, l'équipe en charge du *Planetary Fourier Spectrometer* (PFS) à bord du satellite européen Mars Express confirma de façon indépendante [Giuranna et al., 2019] la présence de méthane au-dessus du cratère Gale un jour après que l'astromobile *Curiosity* eut détecté un pic [Webster et al., 2015]. Mais à peine dix jours plus tard, Korablev et al. [2019] révélèrent les premiers résultats de l'instrument belge NOMAD et de son homologue russe ACS, tous deux embarqués sur le *Trace Gas Orbiter* européen (ExoMars TGO). Bien que tous deux soient les instruments les plus sensibles de l'histoire de l'exploration martienne, aucune trace de méthane n'a pu être relevée au-dessus de quelques kilomètres d'altitude – les mesures à plus basses altitudes étant souvent empêchées par la présence de poussière – et l'analyse de l'ensemble des données récoltées entre avril et le début de septembre 2018 permit de conclure à une détection

<sup>1</sup> Nous recommandons au lecteur peu informé sur le sujet de lire préalablement notre article paru dans le numéro précédent de *Ciel et Terre* [Viscardy, 2019].

<sup>2</sup> Une année martienne dure environ 687 jours terrestres.

<sup>3</sup> Rappelons qu'il s'agit de l'abondance en méthane lorsque celui-ci est uniformément réparti dans l'atmosphère martienne.

<sup>4</sup> Le ppbv, signifiant partie par milliard en volume, est une unité couramment utilisée en sciences de l'atmosphère pour exprimer le rapport de mélange d'un constituant. Ainsi, une abondance en méthane de 1 ppbv signifie qu'en moyenne, sur un milliard de molécules prises au hasard, l'une d'entre elles est du méthane.

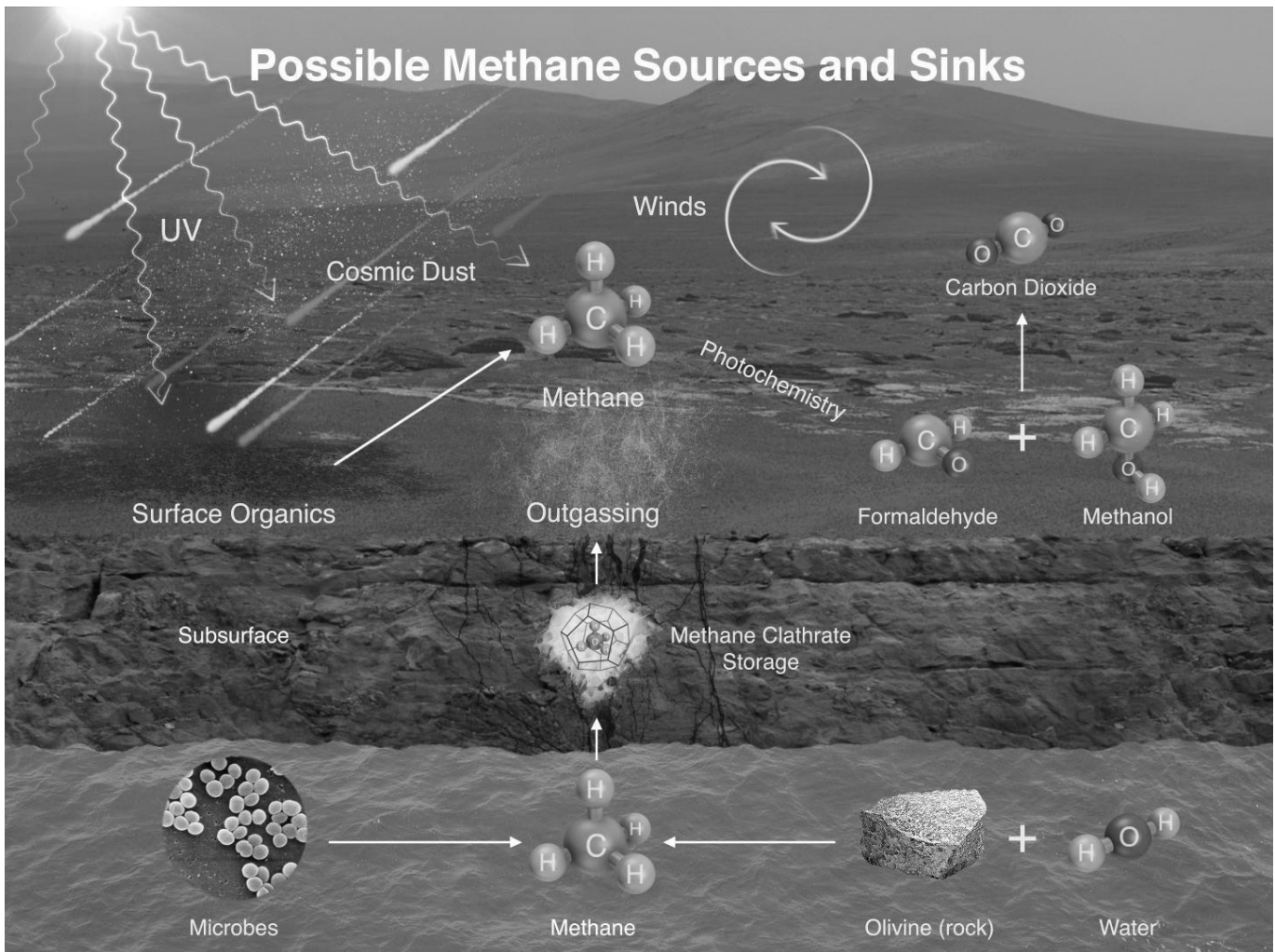


Figure 1 : Schéma des principaux processus de production et de destruction du méthane sur Mars (Crédits : NASA / JPL / SAM-GSFC / U. Michigan) (figure en couleur en page 2 de couverture).

limite de 0,05 ppbv<sup>5</sup>. Au vu des nombreuses contestations des détections rapportées au cours des quinze dernières années, pour les plus sceptiques, il ne fait aucun doute que cette annonce sonna le glas de la prétendue existence du méthane martien. L'affaire serait donc close. Cependant, le 23 juin dernier, la NASA annonça la détection par *Curiosity* de l'abondance de loin la plus importante – environ 21 ppbv – depuis le début de la mission de l'astromobile américain [NASA JPL, 2019]. Cette annonce aussi surprenante qu'inattendue relance un débat qui semble n'en plus finir.

Cependant, toutes les détections

rapportées dans la littérature scientifique jusqu'à ce jour ont été contestées [Viscardy, 2019]. Et si quelques-unes d'entre elles n'ont pas été entièrement rejetées, elles ne font pas pour autant l'objet d'un large consensus dans le monde des spécialistes de la planète rouge, et ce pour des raisons théoriques. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la question des sources potentielles de méthane sur Mars est très secondaire dans le débat actuel<sup>6</sup>. Si un consensus sur l'existence de ce mystérieux gaz devait un jour émerger, les sources ne poseraient aucun problème car certains mécanismes avancés sont bien connus et documentés sur

Terre et différentes indications géologiques sur Mars les rendent tout à fait crédibles. D'autres sont relativement plausibles, bien qu'encore hypothétiques (voir Figure 1). Le scepticisme est en réalité largement alimenté par la vitesse à laquelle le méthane martien semble disparaître, impliquant l'existence d'un processus de destruction encore inconnu et dont les conséquences posent sérieusement d'autres problèmes. Ce sont essentiellement les questions sur lesquelles nous nous attarderons dans cet article. Mais avant cela, nous évoquerons brièvement les sources de notre mystérieux gaz qui semblent les plus plausibles.

<sup>5</sup> Voir aussi Vandaele et Lefever [2019] dans le précédent numéro de *Ciel et Terre*.

<sup>6</sup> Par source, nous entendons le type de lieu et le mode d'émission du méthane dans l'atmosphère et non le mécanisme de production du gaz – biologique, géochimique, etc.



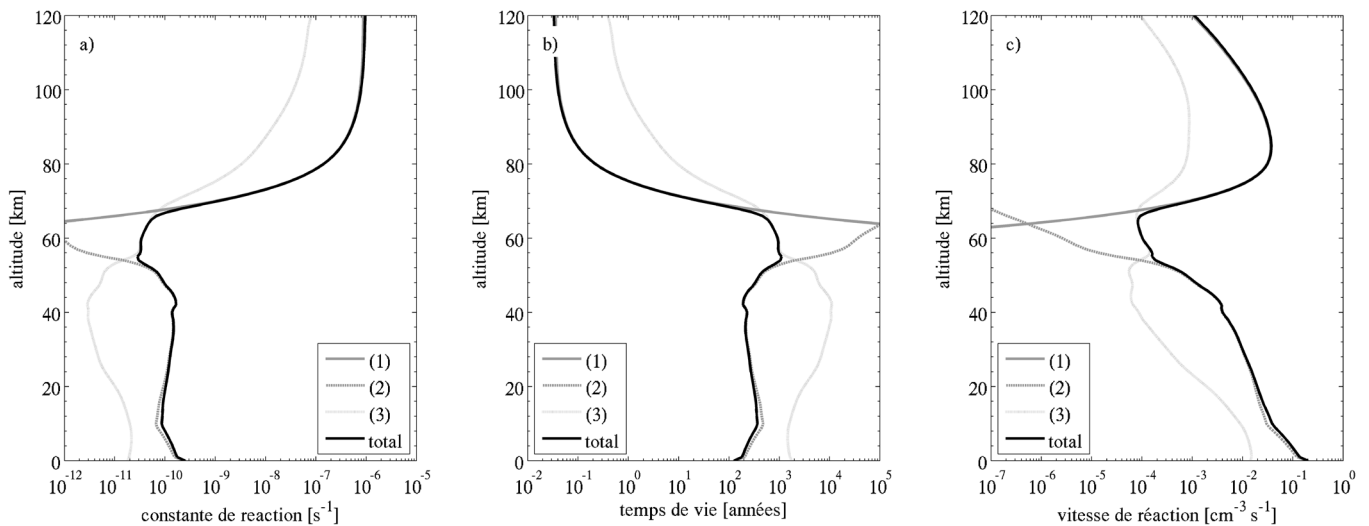
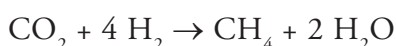


Figure 2 : a) Constantes d'ordre 1 des réactions (1-3) : dans le cas des réactions (2) et (3), ces constantes sont obtenues en multipliant  $k_1$  et  $k_2$  par les concentrations respectivement en OH et en  $O(^1D)$  ; b) Temps de vie définis comme l'inverse des constantes d'ordre 1 des réactions (1-3) ; c) Vitesse des réactions (1-3) en considérant un rapport de mélange en méthane de 6 ppbv.

### Sources potentielles de méthane sur Mars

Une activité biologique dans le sous-sol martien n'est pas à exclure d'emblée de la liste des sources potentielles de méthane sur la planète rouge. Pour certains astrobiologistes, il n'est en effet pas totalement improbable que des méthanogènes – microorganismes bien connus sur Terre et appartenant à la catégorie des archées – existent ou aient existé à des profondeurs suffisamment grandes pour y trouver de l'eau liquide. Cependant, dans l'état de nos connaissances actuelles, il est infiniment plus raisonnable d'envisager d'autres processus beaucoup plus simples, moins coûteux en termes d'hypothèses – rasoir d'Ockham oblige – et tout aussi bien connus sur Terre : les processus géochimiques.

La réaction dite de Sabatier



est une voie de production de méthane abiotique bien établie sur Terre [Etiopie et Sherwood Lollar, 2013]. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est largement présent

dans les systèmes géologiques. Sur Mars, il n'est autre que le constituant principal (~96 %) de l'atmosphère, si bien que sa présence dans le sous-sol ne devrait pas faire défaut. Quant au dihydrogène ( $\text{H}_2$ ), il pourrait être produit par l'hydratation de l'olivine (processus de serpentinisation), minéral principal des péridotites, ou par la radiolyse de l'eau [Oehler et Etiopie, 2017]. La réaction de Sabatier nécessite la présence de catalyseurs métalliques comme le fer, le nickel, le chrome ou encore le ruthénium qui, contrairement aux autres métaux cités, permet à la réaction de Sabatier de produire efficacement du méthane à des températures très basses (20-25 °C) et, par conséquent, de se dérouler également loin de systèmes hydrothermaux [Etiopie et Ionescu, 2015]. Or, le ruthénium a été trouvé en quantité appréciable dans des météorites martiennes, ce qui soutient l'idée que ce processus de production de méthane abiotique puisse se dérouler sur Mars. Les autres métaux tels que le fer et le nickel sont nettement plus présents. Mais ils nécessitent des températures plus élevées (supérieures à 200 °C) pour

que la catalyse de la réaction de Sabatier soit efficace, conditions qui peuvent être rencontrées par exemple à de grandes profondeurs [Oehler et Etiopie, 2017].

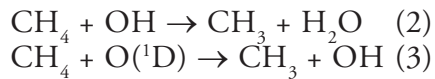
Une fois généré, le méthane peut rester piégé pendant une période relativement longue dans des cavités souterraines sous le pergélisol, lequel joue le rôle de bouchon en empêchant la montée du méthane vers la surface. Il peut enfin être libéré épisodiquement dans l'atmosphère en gagnant la surface le long de failles formées à travers le pergélisol lors de l'impact d'une météorite ou de mouvements de terrain. Le méthane produit dans le sous-sol martien peut également être emprisonné dans des structures hydratées appelées « clathrates » [Gloesener et al., 2013]. Des changements de température et de pression peuvent provoquer la fonte partielle ou la sublimation de ces structures, permettant ainsi la libération du gaz dans l'atmosphère.

Parmi les mécanismes pouvant générer du méthane dans le sous-sol martien et mener à une émission dans l'atmosphère,

ceux décrits brièvement ci-dessus semblent à l'heure actuelle les plus plausibles, tous les ingrédients nécessaires semblant en effet être réunis. Par ailleurs, la possibilité que ces mécanismes soient à l'œuvre sur Mars n'est pas fondamentalement remise en question. Le problème véritable est que, si l'on en croit les observations, la vitesse à laquelle disparaît notre fameux gaz est incompatible – et de loin – avec notre compréhension théorique de l'atmosphère martienne. C'est de cela que nous allons discuter maintenant.

### Méthane un jour, méthane toujours ?

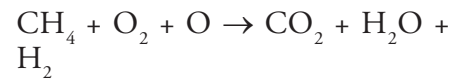
L'atmosphère et la surface de la planète Mars sont connues pour être relativement oxydées. Sa couleur rougeâtre, due aux oxydes de fer en abondance et visible à l'œil nu depuis la Terre, était déjà connue par nos lointains ancêtres. Dans ces conditions d'oxydation, le méthane, composé chimique réducteur, ne peut survivre indéfiniment après avoir été relâché dans l'atmosphère. En effet, selon la photochimie martienne telle qu'on la connaît actuellement, ce gaz devrait être essentiellement détruit par les réactions suivantes :



et dont les constantes de réactions<sup>7</sup> sont respectivement  $J$ ,  $k_1$  et  $k_2$ . La photolyse du méthane (1) n'est possible que dans la haute atmosphère, avec un maximum d'efficacité à environ 80 km d'altitude (voir Figure 2a). A cette altitude, il n'a une durée de vie que d'environ dix jours (voir Figure 2b). Mais la densité de l'air y est si faible que la quantité de méthane qui y est détruite par unité de temps reste modérée (voir Figure 2c). A basse altitude, ce sont les réactions (2) et (3) qui sont largement dominantes. Leurs contributions respectives dépendent fortement de l'abondance en vapeur d'eau variant au cours des saisons<sup>8</sup>, mais en somme, elles sont responsables d'environ la moitié de la perte totale en méthane, l'autre moitié étant due à sa photolyse à haute altitude. Les modèles de l'atmosphère martienne, simulant le transport des espèces chimiques composant l'atmosphère et l'ensemble des réactions photochimiques dans lesquelles elles sont impliquées, prédisent tous un temps de vie moyen du méthane de plusieurs centaines d'années – d'environ 300 ans pour les modèles les plus récents<sup>9</sup>.

Dès lors que le méthane est

converti en méthyl ( $\text{CH}_3$ ) s'en suit une série de réactions d'oxydation plus rapides, qui s'achève par la production de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et dont le bilan net est [Yung et al., 2018] :



La Figure 3 indique les observations rapportées jusqu'à ce jour ainsi que la teneur du fond en méthane résultant du mélange de la quantité observée ou suggérée par des simulations numériques. L'évolution attendue de la teneur du fond, estimée par Mumma et al. [2009] et obtenue par la dissipation du panache observé en 2003 (6 ppbv), est indiquée par la droite continue. Le problème théorique auquel nous faisons face saute aux yeux : cette évolution est en total désaccord avec toutes les mesures ultérieures, depuis celle enregistrée par Mumma et al. [2009] en 2006 (3 ppbv) jusqu'à la détection limite de 0,05 ppbv obtenue par le TGO [Korablev et al., 2019], en passant par les détections relevées par *Curiosity* dans le cratère Gale [Webster et al., 2018] ou encore la limite supérieure rapportée en 2016 par Aoki et al. [2017]. Par conséquent, si les détections sont réelles, un processus inconnu de destruction ou de séquestration de ce gaz est nécessaire pour rendre intelligibles toutes les mesures<sup>10</sup>.

<sup>7</sup> Dans la réaction (1),  $h\nu$  représente le rayonnement solaire. Notons que dans l'atmosphère martienne, le méthane est essentiellement détruit par les rayons ayant une longueur d'onde de 121.567 nm, connue sous le nom de Lyman- $\alpha$ . OH et O(<sup>1</sup>D) sont respectivement le radical hydroxyle et l'atome d'oxygène dans un état excité. La constante de photodissociation  $J$  s'exprime en  $\text{s}^{-1}$  (réaction d'ordre 1) ; les réactions (2) et (3) étant d'ordre 2, leurs constantes de réaction  $k_1$  et  $k_2$  s'expriment en  $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ .

<sup>8</sup> Notons que dans le cas illustré dans la Figure 2, la vapeur d'eau est relativement abondante et la source principale de OH. Inversement, sa présence plus abondante limite celle de O(<sup>1</sup>D). Par conséquent, la réaction (2) contribue plus largement à l'oxydation du méthane. La situation s'inverse lorsque l'atmosphère est moins humide.

<sup>9</sup> Le temps de vie  $\tau$  se définit comme le temps nécessaire pour que la quantité initiale en méthane dans l'atmosphère soit divisée par le nombre d'Euler  $e \approx 2,72$ . Ce temps de vie ne signifie donc pas que tout le méthane émis dans l'atmosphère est détruit après un temps  $\tau$ .

<sup>10</sup> Notons qu'un examen détaillé montrerait que, même en mettant à part l'observation du panache de 2003, il est difficile – voire impossible – de réconcilier les autres détections comme celle rapportée par Giuranna et al. [2019] avec la détection limite du TGO sans invoquer un tel processus inconnu.

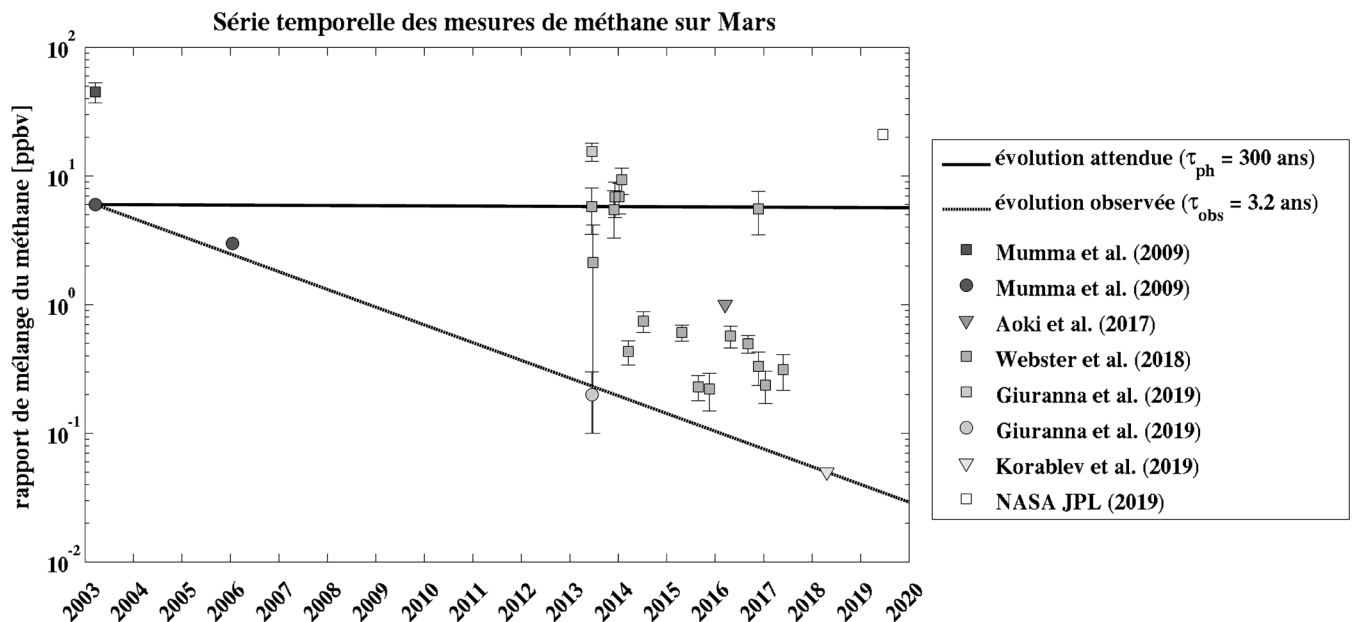


Figure 3 : Ensemble des mesures de méthane sur Mars rapportées à ce jour dans la littérature. Différents types de mesures apparaissent et doivent être distingués de la façon suivante : les détections locales sont indiquées par des carrés  $\square$ . Les ronds  $\circ$  correspondent à la teneur du fond résultant du mélange parfait de la quantité de méthane détecté (panache observé en 2003 par Mumma et al. [2009]) ou suggéré par les simulations numériques (Giuranna et al. [2019]). Les détections limites, quant à elles, sont indiquées par des triangles renversés. La ligne continue montre l'évolution attendue de la teneur du fond estimée en 2003 par Mumma et al. [2009] en considérant un temps de vie photochimique  $\tau_{ph}$  de 300 ans. La ligne pointillée reliant ce point à la détection limite de 0,05 ppbv obtenue par NOMAD et ACS à bord du TGO [Korablev et al., 2019] est obtenue en supposant que le temps de vie « observé » est de 3,2 ans. Etant donné qu'aucune émission entre 2003 et 2019 n'est prise en compte et que le rapport de mélange de 0,05 ppbv en 2018 est une limite supérieure, ce temps de vie de 3,2 ans est à considérer lui-même comme une limite supérieure (figure en couleur en page 2 de couverture).

Or, si de nombreux mécanismes hypothétiques ont été avancés, aucun ne semble convaincant, les uns étant peu plausibles, les autres étant largement surestimés et bon nombre posant plus de problèmes qu'ils n'en résolvent. Car le désaccord entre la théorie et les observations que l'on vient d'évoquer est énorme. En effet, ce processus inconnu devrait être si efficace et rapide que le temps de vie du méthane serait tout au plus de quelque trois ans<sup>11</sup> (impliquant une évolution singulièrement différente ; voir Figure 3, ligne pointillée), autrement dit au minimum cent fois plus court que ce à quoi l'on s'attendrait. Il est cependant difficile d'imaginer que ce processus n'affecte que le méthane, laissant inchan-

gée l'abondance des autres espèces chimiques. Une oxydation du méthane au minimum cent fois plus rapide que prédite par la photochimie martienne telle qu'on la connaît aurait des conséquences dramatiques sur des constituants atmosphériques aussi importants que le monoxyde de carbone (CO) et l'oxygène ( $O_2$ ). Or, bien qu'ils nécessitent encore de nombreuses améliorations, les modèles actuels décrivant la composition chimique de l'atmosphère martienne semblent présenter un accord raisonnable avec les observations des espèces chimiques les plus importantes [Daerden et al., 2019], et les désaccords existant encore à l'heure actuelle sont bien moins importants que ce que suggérerait la

disparition si rapide du méthane observé. Des mécanismes de séquestration du méthane ont également été proposés. Dans ce cas, le méthane ne serait pas détruit mais simplement piégé et ainsi « rendu invisible ». Le processus de ce type défendu par Knak Jensen et al. [2014] et reposant sur une étude expérimentale dans des conditions martiennes est sans doute celui qui a retenu le plus l'attention de la communauté scientifique ces dernières années [Yung et al., 2018]. Selon cette équipe danoise, les grains de quartz constituant la poussière et emportés par les vents martiens seraient érodés, libérant des sites actifs sur lesquels le méthane pourrait réagir en formant des liens covalents entre le sili-

<sup>11</sup> Le résultat du TGO étant une détection limite, le vrai temps de vie « observé » pourrait en effet être encore plus court.

cium (Si) du quartz et un groupe méthyl (CH<sub>3</sub>). Les mesures en laboratoire indiquent sans ambiguïté un effet sur l'abondance en méthane. Cependant, l'étude n'est pas exempte de problèmes. Les auteurs ont utilisé des grains de quartz à l'état cristallin alors que ceux-ci sont rares sur Mars et donc peu représentatifs [Lefèvre, 2018]. De plus, l'atmosphère martienne simulée en laboratoire ne contient que du dioxyde de carbone et du méthane. Or d'autres espèces comme la vapeur d'eau pourraient entrer en compétition dans ce processus et réduire significativement l'efficacité de la séquestration du méthane sur les grains de quartz. Enfin, une séquestration n'est pas un processus de destruction et laisse ainsi la possibilité au méthane d'être relâché dans l'atmosphère sous certaines conditions qui restent à déterminer [Yung et al., 2018], auquel cas nous reviendrions au point de départ : un processus de destruction resterait à découvrir. En somme, ce mécanisme inconnu est difficilement réconciliable avec notre compréhension de l'atmosphère martienne et, après des années de recherche, aucun de ceux qui ont été proposés ne semble ni convaincant ni réellement efficace. Les détections du méthane présentent un comportement singulièrement mystérieux. Or, selon la célèbre maxime que l'on doit à Carl Sagan, « des affirmations extraordinaires nécessitent des preuves extraordinaires » [Sagan, 1998]. Compte tenu des critiques visant les détections du gaz elles-mêmes, il est difficilement justifiable de remettre en cause la théorie en invoquant des processus inconnus, a fortiori si des années d'effort n'ont pas permis d'en dévoiler des pistes vraiment sérieuses. Selon les experts sceptiques, il est donc raisonnable de penser que le méthane martien relève plus de l'illusion que d'un fait scien-

tifiquement établi (voir par ex. Zahnle et al. [2011]). Il s'agit en effet de la position la plus simple : s'il n'y a pas de méthane sur Mars, la contradiction entre la théorie et les observations est levée et le mystérieux processus de destruction inconnu n'est plus à découvrir. Cependant, avant de conclure à l'inexistence du méthane martien, il nous semble que certaines questions nécessiteraient d'être réglées.

### Zones d'ombre à éclaircir

Admettons qu'il n'y ait pas de méthane sur Mars. Dans ce cas, il nous paraît indispensable d'effectuer une critique systématique et rigoureuse de chacune des détections rapportées à ce jour. Une telle analyse des premières observations a été menée par Zahnle et al. [2011] et plusieurs d'entre elles ont été rangées aux oubliettes. Mais les arguments avancés à l'encontre de l'étude de Mumma et al. [2009] ont été à juste titre rejetés plus tard par Villanueva et al. [2013] en montrant qu'ils souffraient d'erreurs importantes. D'autre part, si certaines critiques des mesures plus récentes se font entendre (par ex. Zahnle [2019]), elles n'ont pas encore fait l'objet d'une étude approfondie et soumise au processus de relecture par les pairs.

Le méthane sur Mars attire grandement l'attention des planétologues et astrobiologistes parce que sa présence dans l'atmosphère, si elle devait être définitivement avérée, impliquerait nécessairement une émission récente et laisserait ainsi penser que la planète est plus active que ce que nous avaient montré les premières missions martiennes. Cependant, le méthane pourrait trouver son origine ailleurs que dans le sous-sol. En effet, des débris et autres poussières de

chondrites carbonées se trouvant dans l'espace interplanétaire et comportant des quantités appréciables de carbone pénètrent dans l'atmosphère martienne. Keppler et al. [2012] ont montré expérimentalement que leur exposition au rayonnement ultraviolet du Soleil générerait rapidement du méthane, en faisant ainsi une autre source potentielle. Bien entendu, le méthane martien ne présenterait plus le même intérêt scientifique si ces débris interplanétaires devaient en constituer la seule source. Cependant, il nous semble important de la prendre en considération dans la discussion qui nous occupe à la lumière de la détection limite de 0,05 ppbv obtenue par le TGO. En effet, Moores et al. [2017] ont estimé que ce mécanisme devrait générer un rapport de mélange moyen d'environ 2 ppbv dans l'atmosphère martienne, soit au minimum 40 fois plus élevée que ce qu'autorisent les résultats du TGO. Or, ceux-ci ont été rapportés par Korabiev et al. [2019] avec une certaine prudence. En réalité, il aurait été légitime – mais plus risqué – d'abaisser la détection limite à environ 0,01 ppbv. Par conséquent, l'estimation effectuée par Moores et al. [2017] serait en désaccord avec le TGO d'un facteur 200 ou plus. Face à ce constat se présentent deux possibilités : soit la contribution des sources exogènes est largement surestimée, soit le temps de vie du méthane est au minimum 200 fois plus court que le temps de vie prédit par les modèles photochimiques. Le problème évoqué ici reste encore ouvert et, nous semble-t-il, mérite qu'on lui apporte une réponse argumentée. Une revisite des calculs rapportés par Moores et al. [2017] montrant qu'ils présentent une surestimation d'au moins deux ordres de grandeur permettrait de lever une incohérence entre cette source



exogène, la détection limite du TGO et notre compréhension de la photochimie martienne. Dans le cas contraire, nous aurions une indication indirecte de l'existence d'un processus inconnu détruisant beaucoup plus rapidement le méthane martien. De plus, cette indication ne nous serait offerte non plus sur base de détections bien souvent contestées et obtenues par des instruments présentant quelques problèmes ou faiblesses, mais sur base d'une détection limite obtenue par les deux instruments les plus sensibles et qui, à ce jour, n'ont été la cible d'aucune critique.

Il nous reste un dernier point que nous souhaitons aborder dans cette discussion. Nous avons dit plus tôt que notre compréhension actuelle de la photochimie martienne était relativement bonne. Les modèles photochimiques présentent un accord très raisonnable avec les observations des espèces les plus abondantes, rendant difficilement plausible l'hypothèse de l'existence d'un mystérieux processus de destruction du méthane dont l'efficacité permettrait d'expliquer les ob-

servations. Il y a cependant une espèce chimique qui semble faire défaut à ce constat : le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ). En effet, Encrenaz et al. [2019] ont comparé les observations récoltées sur plusieurs années (entre 2001 et 2018) aux résultats obtenus par les deux seuls modèles de la circulation atmosphérique décrivant la photochimie sur Mars (voir Figure 4) : le modèle français « Laboratoire de Météorologie Dynamique » (LMD) [Lefèvre et al., 2004, 2008] et le modèle belge « GEM-Mars » développé à l'IASB [Daerden et al., 2019]. Le constat est clair : plusieurs désaccords importants sautent aux yeux. Premièrement, les prédictions des modèles présentent de grandes différences, en particulier au milieu de l'année. Deuxièmement, aucune simulation n'est en accord avec les observations dans plusieurs cas. Enfin, celles-ci montrent d'importantes différences d'une année à l'autre entre  $L_s = 75^\circ$  et  $110^\circ$  ainsi qu'autour de  $L_s = 150^\circ$  et  $210^\circ$ . Sans entrer dans les détails de la photochimie, il est à noter que l'abondance en  $H_2O_2$  dépend de celle de la vapeur d'eau.

Certes, l'abondance de cette dernière varie selon les années, mais ces variations ne permettent pas d'expliquer celles du peroxyde d'hydrogène, plongeant les auteurs de cette étude dans une certaine perplexité et les conduisant à émettre l'hypothèse que : « un processus d'origine inconnue inhibe occasionnellement la production de  $H_2O_2$  » [Encrenaz et al., 2019]. Dans le cadre de notre discussion sur le comportement du méthane, il est intéressant de noter que  $H_2O_2$  est un réservoir en radicaux OH capables de détruire le méthane. Ceci étant dit, il serait certainement trop hâtif d'établir un lien avec le mystérieux processus de destruction du méthane. Mais ces désaccords surprenants laissent à penser que la photochimie martienne présente encore des zones d'ombres qui doivent être éclairées. Et par conséquent, rejeter la possibilité d'un tel processus au prétexte que la photochimie est bien comprise n'est peut-être plus aussi justifié que ce que l'on pensait.

Enfin, dans ce contexte, certains mécanismes de destruction proposés jusqu'ici attribuent au

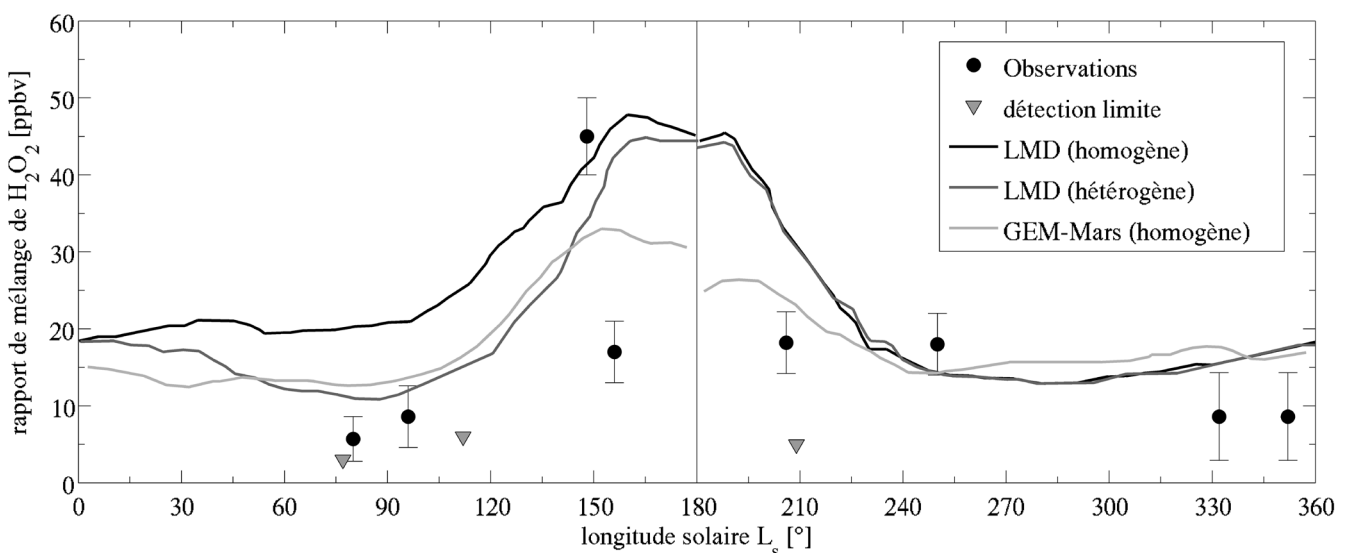


Figure 4 : Peroxyde d'hydrogène  $H_2O_2$  sur Mars. Comparaison entre les mesures et les résultats de simulations numériques obtenus par deux modèles : le modèle français « Laboratoire de Météorologie Dynamique » (LMD) [Lefèvre et al., 2004, 2008] et le modèle belge « GEM-Mars » développé à l'IASB [Daerden et al., 2019]. Une des deux simulations réalisées avec le LMD inclut de la chimie hétérogène opérant à la surface des particules de glace d'eau des nuages (adapté d'une figure d'Encrenaz et al. [2019]).



peroxyde d'hydrogène un rôle éventuel dans la disparition si rapide du méthane [Atreya et al., 2006].  $H_2O_2$  n'est pas capable de réagir avec notre mystérieux gaz. Cependant, Atreya [2019] a tout récemment suggéré que ce composé chimique devrait pouvoir diffuser dans le sous-sol martien et réagir avec certains minéraux et le rayonnement cosmique pénétrant sous la surface. Ces réactions devraient mener à la production de superoxydes tels que  $HO_2$  et  $O_2^-$  qui seraient relâchés dans l'atmosphère selon les mêmes processus conduisant à l'émission de méthane. Ainsi ces superoxydes, capables de réagir avec ce dernier, pourraient être la cause de sa rapide disparition. En outre, cette destruction du méthane prendrait place près de la surface martienne et pourrait ainsi expliquer pourquoi le TGO, ne pouvant que rarement chercher du méthane au-dessous de quelques kilomètres d'altitude, n'aurait pas détecté ce gaz dans des abondances similaires à celles relevées par *Curiosity* à un mètre

au-dessus de la surface. Ce mécanisme nous paraît encore extrêmement hypothétique et nécessite d'être considérablement développé avant d'en juger la pertinence et l'efficacité. Néanmoins, il est intéressant de noter que cette hypothèse ainsi que les étonnantes observations du comportement de  $H_2O_2$  suggéreraient que ce composé chimique évolue d'une façon plus complexe que prévue et soit impliqué dans des processus qui restent à identifier plus clairement, laissant ainsi une porte entrouverte derrière laquelle pourrait se trouver une explication rendant intelligibles les détections de méthane.

### Une histoire sans épilogue ?

Au travers de cet article et du précédent [Viscardy, 2019], nous avons tenté de retracer l'histoire des observations du méthane sur Mars, d'aborder les problèmes qu'elles soulèvent sur le plan théorique et d'exposer la controverse qui en découle. Nous

ne prétendons cependant pas à l'exhaustivité du sujet, le nombre de travaux qui y sont consacrés étant considérable. Nous avons préféré nous concentrer sur les événements essentiels d'une histoire aux multiples rebondissements et de nous consacrer aux points qui nous semblent les plus importants afin de donner une idée claire des questions débattues jusqu'à ce jour.

En juillet dernier se tenait à Caltech une conférence internationale consacrée à la planète Mars. Au vu des nombreuses études récentes, un débat a été organisé sur le méthane martien dans le but de réconcilier l'ensemble des observations rapportées. Nous pensons pouvoir dire que la conclusion principale à l'issue de ce débat est que la communauté des experts reste divisée et que l'on est en droit de se demander ce qui permettra de les mener vers un consensus, quel qu'il soit. L'histoire du méthane sur Mars semble décidément être une histoire sans épilogue...

### Références

- Atreya, S. K. et al, Oxidant Enhancement in Martian Dust Devils and Storms: Implications for Life and Habitability, *Astrobiology*, 6(3), 439-450, **2006**.
- Atreya, S. K. et al., Methane on Mars from MSL-Curiosity and ExoMars-Trace Gas Orbiter: A Destructive Role of Surface Oxidants?, *Ninth International Conference on Mars*, LPI Contrib. No. 2089, **2019**.
- Daerden, F., Neary, L., Viscardy, S., García Muñoz, A., Clancy, R. T., Smith, M. D., Encrenaz, T., et Fedorova, A., Mars atmospheric chemistry simulations with the GEM-Mars general circulation model, *Icarus*, 326, 197-224, **2019**.
- Encrenaz, T., Greathouse, T. K., Aoki, S., Daerden, F., Giuranna, M., Forget, F., Lefèvre, F., Montmessin, F., Fouchet, T., Bézard, B., Atreya, S. K., DeWitt, C., Richter, M. J., Neary, L. et Viscardy, S., Ground-based infrared mapping of  $H_2O_2$  on Mars near opposition, *Astronomy & Astrophysics*, 627, A60, **2019**.
- Etioppe, G. et Sherwood Lollar, B., Abiotic methane on Earth, *Review of Geophysics*, 51, 276-299, **2013**.
- Etioppe, G. et Ionescu, A., Low-temperature catalytic  $CO_2$  hydrogenation with geological quantities of ruthenium: a possible abiotic  $CH_4$  source in chromitite-rich serpentinized rocks, *Geofluids*, 15, 438-452, **2015**.
- Giuranna, M., Viscardy, S., Daerden, F., Neary, L., Etioppe, 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 Geoscience*, 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**.
- Keppler, F., Vigano, I., McLeod, A., Ott, U., Früchtel, M., et Röckmann, T., Ultraviolet-radiation-induced methane emissions from meteorites and the Martian atmosphere, *Nature*, 486, 93-96, **2012**.
- Knak Jensen, S. J. et al., A sink for methane on Mars? The answer is blowing in the wind, *Icarus*, 236, 24-27, **2014**.
- Korablev, O. et al., No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations, *Nature*, 568, 517-520, **2019**.
- Lefèvre, F. Lebonnois, S., Montmessin, F. et Forget, F., Three-dimensional modeling of ozone on Mars, *Journal of Geophysical Research*, 109, E07004, **2004**.
- Lefèvre, F., et al., Heterogeneous chemistry in the atmosphere of Mars, *Nature*, 454, 971-975, **2008**.
- Lefèvre, F., The enigma of methane on Mars, in *Biosignatures for Astrobiology*, Cavalazzi, B. et Westall, F. (Eds), Springer, Cham, Suisse, pp. 253-266, **2018**.
- Moore, J. E., Smith, C. L., et Schuerberg, A. C., UV production of methane from surface and sedimenting IDPs on Mars in light of REMS data and with insights for TGO, *Planetary and Space Science*, 147, 48-60, **2017**.
- NASA Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Curiosity's Mars Methane Mystery Continues, 23 juin **2019**, <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7433>.
- Oehler, D. Z. et Etiope, G., Methane Seepage on Mars: Where to Look and Why, *Astrobiology*, 17, 1233-1264, **2017**.
- Sagan, C., Billions and billions. Thoughts on life and death at the brink of the millennium, Ballentine, New York, **1998**.
- Vandaele, A. C., et Lefever, K., Mission ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) NOMAD : les premiers résultats, *Ciel et Terre*, 135(3), 66-69, **2019**.
- Villanueva, G. L., Mumma, M. J., Novak, R. E., Radeva, Y. L., Käufel, H. U., Smette, A., Tokunaga, A., Khayat, A., Encrenaz, T. et Hartog, P., A sensitive search for organics (CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), hydroperoxyl (HO<sub>2</sub>), nitrogen compounds (N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, HCN) and chlorine species (HCl, CH<sub>3</sub>Cl) on Mars using ground-based high-resolution infrared spectroscopy, *Icarus*, 223, 11-27, **2013**.
- Viscardy, S., Méthane sur Mars, une histoire aux multiples rebondissements, *Ciel et Terre*, 135(3), 69-79, **2019**.
- 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., and Catling, D. C., Is there methane on Mars?, *Icarus*, 212, 493-503, **2011**.
- Zahnle, K., The paradox of Mars methane, *Ninth International Conference on Mars*, LPI Contrib. No. 2089, **2019**.

