

Transferts énergétiques par rayonnement dans un plasma simulant les conditions d'entrée en atmosphère martienne

Aniela KAMINSKA¹, Zygmunt SZYMANSKI², Jacek HOFFMAN², Pierre-Alban GOUY³, Damien VACHER⁴, Sébastien MENECIER⁴, Michel DUDECK^{5*}

¹Institute of Electric Power Engineering, IEPE, Poznan University of Technology, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznan, Pologne

²Division of Laser Technology Applications, Institute of Fundamental Technological Research, IPPT, 00-049 Warsaw, Pologne

³Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques, LAEPT, Clermont Université, Université Blaise Pascal, 24 avenue des Landais, 63171 Aubière Cedex, France

⁴Institut Pascal, UMR 6602, Clermont Université, Université d'Auvergne, Université Blaise Pascal, 24 avenue des Landais, 63171 Aubière Cedex, France

⁵Institut d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie - CNRS, 4 place Jussieu 75252 Paris, France

* (auteur correspondant : michel.dudeck@upmc.fr)

Résumé - Les surfaces des sondes d'exploration traversant à vitesse hypersonique l'atmosphère (CO₂-N₂) de la planète Mars reçoivent un flux d'énergie radiatif venant du plasma environnant. Un plasmatron à arc est utilisé pour simuler ce plasma et étudier son rayonnement. L'émission de la molécule CN (violet) a permis de montrer que les températures de rotation et vibration du plasma sont de l'ordre de 6500-7000 K.

Nomenclature

Kn	Nombre de Knudsen	T	Température cinétique, K ou eV
L	Dimension caractéristique, m	$T_{ex}(I)$	Température d'excitation de I, K ou eV
$l.p.m$	Libre parcourt moyen, m	$T_R(J)$	Température de rotation de J, K ou eV
T_e	Température électronique, K ou eV	$T_V(J)$	Température de vibration de J, K ou eV

1. Introduction

La planète Mars présente de nombreuses similitudes avec la Terre, l'analogie porte sur une période sidérale de révolution de 14h 37mn 22,7s qui est voisine de celle de la Terre, une surface ressemblant à celle de la Terre et une obliquité de son axe (25,19°) lui donnant des variations saisonnières. Elle montre aussi des différences notables avec la Terre. Plus petite, la planète rouge, dont le rayon équatorial est de 3396,2 km et la masse de 6,419.10²³ kg, présente une intensité de la gravité à sa surface, seulement de 3,711 m.s⁻². Cette faible force gravitationnelle entraîne la présence d'une atmosphère ténue dont la pression moyenne est de 600 Pa en surface. L'atmosphère de Mars est composée de dioxyde de carbone (95%), d'azote (3%), d'argon et de traces de vapeur d'eau, d'oxygène (1,3‰), de monoxyde d'azote (0,7‰), de O₃ et de H₂O₂ ce qui était peut-être la composition de l'atmosphère de la Terre à son origine [1,2,3,4].

La température de l'atmosphère martienne qui est fonction des saisons, est faible, en moyenne de - 43°C en raison de son éloignement plus important du Soleil (1,5 U.A.) comparé à celui de la Terre (1 U.A.). Les variations saisonnières de température entraînent la formation en hiver de calottes polaires de neige en CO₂. La température dans l'atmosphère (troposphère) de Mars décroît en fonction de l'altitude jusqu'à environ 50 km, puis elle est sensiblement constante (mésosphère). Contrairement à la Terre, la mésosphère n'est pas prolongée par une stratosphère présentant un réchauffement dû à l'absorption du rayonnement solaire par

l'ozone. L'atmosphère de Mars présente de forts mouvements convectifs avec des vents atteignant 100 m/s.



Figure 1 : La planète Mars photographiée par la caméra du télescope spatial Hubble (2004)

2. L'entrée en atmosphère martienne

Les conditions d'entrée d'une sonde d'exploration dans les hautes couches de l'atmosphère martienne dépendent de la mission (orbiter, atterrissage d'un rover). La sonde arrive à une vitesse de 8 km/s et peut dépasser 11 km/s (dans un référentiel martien). Si la sonde pénètre dans l'atmosphère, le régime de l'écoulement gazeux qui l'entoure sera initialement de type moléculaire libre et caractérisé par un nombre de Knudsen plus grand que 1, $Kn > 10$. Le nombre de Knudsen correspond au rapport entre le libre parcours moyen (*l.p.m.*) des particules de l'atmosphère et une dimension caractéristique L de la sonde, $Kn = l.p.m. / L$. Les collisions sont seulement entre les molécules de l'atmosphère et la surface de la sonde, il n'y a pas d'onde de choc. Lors de la descente de la sonde, le libre parcours moyen va décroître et pour $1 < Kn < 10$, une onde de choc d'une épaisseur de quelques libres parcours moyen apparaîtra et des conditions de glissement devront être introduites pour la vitesse et la température à la surface de la sonde. Ensuite au cours de la descente, l'écoulement gazeux autour de la sonde sera de type hydrodynamique (continu, $Kn < 0,1$) avec une onde de choc de faible épaisseur.

Cette phase hydrodynamique doit être examinée en détail. En effet, l'énergie cinétique à l'amont du choc sera transformée en énergie thermique et la température cinétique pourra être alors de plusieurs dizaines de milliers de K . Cette énergie provoquera la dissociation des molécules et l'ionisation, qui sont des phénomènes endothermiques, l'excitation des modes internes des molécules (énergies et température de rotation et de vibration) et des phénomènes radiatifs. Pour les entrées à très grande vitesse, le flux d'énergie vers la surface de la sonde sera essentiellement radiatif et prépondérant devant les effets convectifs. Cette densité de flux sur la surface peut atteindre plusieurs MW/m^2 . Il est donc essentiel de connaître les mécanismes de création et les propriétés radiatives pour dimensionner les protections thermiques (TPS) de la sonde afin d'optimiser leurs masses tout en gardant un coefficient de sécurité suffisant pour la réussite de la mission.

L'ESA a lancé un programme européen d'étude sur les rentrées martiennes et la commission européenne a lancé en 2008 un programme européen FP-7 Space « Phys4Entry » sur les rentrées martiennes (Italie : Univ. de Bari, Perugia, CNR, CIRA, Politecnico de Turin,

SER&PS, Espagne : Univ. de Barcelone, Russie : IMP, Belgique : VKI, France : ISA, EM2C, Pologne : IEPE). Les études abordent de manière complémentaire les approches théoriques, numériques et expérimentales.

3. Le plasmatron de l'IEPE

Les moyens expérimentaux utilisés pour ces études diffèrent suivant l'objectif recherché. On notera principalement trois objectifs : - étudier le comportement d'une surface (TPS) en présence d'un flux énergétique comparable à celui d'une rentrée et venant d'une source de plasma à basse pression (avec une composition initiale martienne) (IRS avec des arcs jets ou des MPD, ONERA-Le Fauga avec une source à rafale), - étudier les propriétés de l'onde de choc de tête (IST avec un tube à choc cinétique en construction, MIP), - étudier les propriétés radiatives du plasma se formant autour d'une sonde d'exploration martienne : plasmatron à arc (IEPE, LAEPT, DLR), source radio fréquence (LAEPT, EM2C, VKI, MIP).

Le plasmatron (figure 2) de l'IEPE est une source à arc qui est utilisée à pression atmosphérique ou à pression réduite. L'arc est créé entre une cathode pointue qui est en tungstène thorié (diamètre : 6 mm) et une anode formée de plusieurs anneaux en cuivre (diamètre intérieur : 12 mm, longueur : 30 mm). Le diamètre intérieur délimite un canal cylindrique permettant l'expansion de l'arc. Les anneaux sont isolés les uns des autres et l'injection du gaz plasmagène peut se faire entre deux anneaux successifs en créant un effet de vortex dans le canal permettant la stabilisation de l'arc. L'arc est créé entre la cathode et le premier anneau et un second arc peut être ajouté entre deux anneaux successifs [5]. Cathode et anode sont refroidies par des circuits d'eau. L'arc est amorcé par une décharge HV-HF et alimenté par deux sources électriques de puissance montées en série. Le jet de plasma se détend ensuite dans une chambre d'expansion cylindrique d'une longueur de 780 mm et d'un diamètre intérieur de 100 mm.

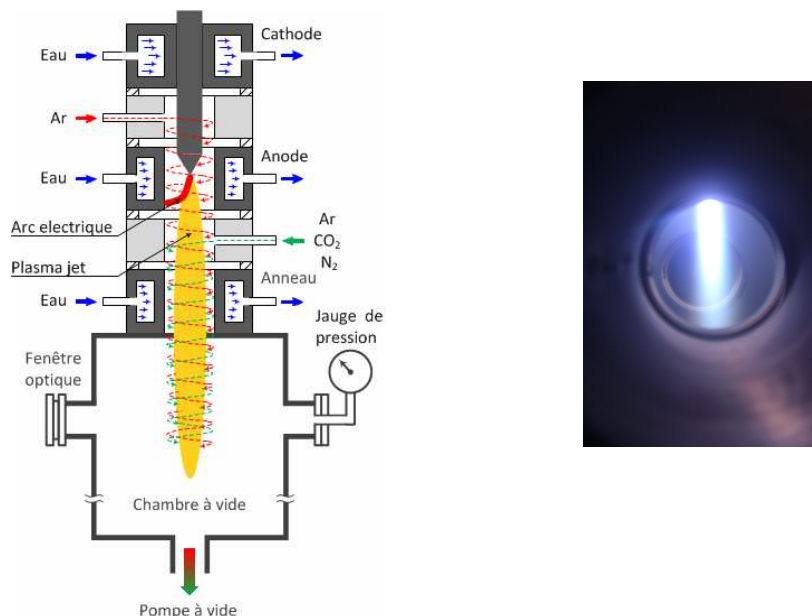


Figure 2 : Schéma du plasmatron de l'IEPE (Poznan) et photographie d'un jet de plasma de mélange d'azote et dioxyde de carbone

Le plasmatron et la chambre sont coaxiaux. La basse pression dans la chambre est obtenue par deux pompes primaires à palettes de 1,5 kW et une pompe Roots de 4 kW. La pression dans la chambre d'expansion est comprise entre 10 Pa et 1 atm. Le jet de plasma obtenu dans la chambre est axisymétrique sans effet de vortex en raison de la forte expansion axiale du jet [6]. Le plasmatron peut fonctionner avec les gaz suivants pour étudier les rentrées martiennes: CO₂, N₂, Ar ou des mélanges CO₂, N₂, Ar. Des mesures ont été réalisées tout d'abord avec de l'argon pour requalifier l'installation après avoir opéré des modifications du plasmatron, installé un nouveau caisson et un nouveau système de pompage. Une modélisation hydrodynamique de l'écoulement ionisé dans le plasmatron a été réalisée précédemment pour de l'argon [7].

4. Les températures de rotation et de vibration du plasma de rentrée en atmosphère martienne

Un milieu gazeux ionisé est souvent en fort déséquilibre. En effet, les processus réactifs impliquant des espèces neutres et chargées ne sont pas généralement à l'équilibre (cinétiques chimiques en hors équilibre), les distributions en vitesses des différentes particules ne sont pas maxwelliennes et même parfois non isotropes, et les populations des niveaux ne sont pas réparties suivant une distribution de Boltzmann. On peut cependant admettre que le jet de plasma est caractérisé seulement par deux températures de translation (températures cinétiques) soit une température électronique T_e et une température T commune aux molécules et atomes qu'ils soient neutres ou ionisés avec $T_e \neq T$. Pour les atomes A , on définira aussi une température d'excitation $T_{ex}(A)$ et pour les molécules M , on définira des températures de rotation $T_R(M)$, de vibration $T_V(M)$ et d'excitation $T_{ex}(M)$. Ces températures de rotation et de vibration sont associées à des énergies de rotation $E_R(M)$ et de vibration $E_V(M)$ quantifiées. Lorsqu'il y a équilibre thermique complet, toutes les températures sont égales, $T_e = T_i = T = T_{ex} = T_R = T_V$ ce qui n'est généralement pas le cas des plasmas à basse pression et des plasmas en relaxation après une onde de choc. La spectroscopie d'émission permet de déterminer les températures de rotation et de vibration en comparant les spectres enregistrés avec des simulations numériques nécessitant la connaissance de données spectrales et en utilisant une transformation d'Abel tenant compte du caractère axisymétrique du jet de plasma.

Le spectromètre optique utilisé Acton, SpectraPro2500i fonctionnant avec une caméra ICCD - Andor, iStar de l'IPPT-PAN est équipé de trois réseaux de 2400, 1800 et 600 traits/mm. La largeur de la fenêtre d'entrée du spectromètre est comprise entre 20 et 50 μm et l'image du plasma est obtenue en focalisant la visée sur la fente d'entrée du spectromètre par une lentille achromatique de focale 180 mm, montée sur une table de déplacement. La réduction de la dimension de la taille du plasma sur la fente d'entrée est de 6,25. La fente d'entrée est perpendiculaire à la direction du jet de plasma. La fonction d'appareil est de 0,4 Angström et la résolution spatiale le long de la fente est de 1,62 mm. Une telle configuration axisymétrique, après avoir identifié l'axe du jet de plasma et sa dimension radiale, permet de d'effectuer une inversion d'Abel pour déduire les propriétés locales du jet de plasma.

Les résultats présentés concernent un mélange initial CO₂-N₂ dans une proportion massique 43%-57% (différentes des proportions martiennes pour cette première étude), un courant d'arc de 360 A et un débit massique total de 1,4 g.s⁻¹. Dans ces conditions la tension d'arc mesurée est de 55 V ce qui donne une puissance apportée de 19,8 kW. La pression statique dans la chambre d'expansion est de 5 kPa. Pour un plasma formé à partir d'un mélange initial CO₂-N₂, on recherche l'émission dans la gamme proche UV de molécules connues pour l'intensité du rayonnement émis même si leurs concentrations sont faibles. L'émission moléculaire de N₂ et N₂⁺ est trop faible pour être enregistrée. L'émission spectrale

la plus intense est celle de la molécule CN dans le violet ($B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$) à 388,4 nm ($\Delta v = 0$). La molécule CN est formée principalement par les processus $C + N + M \rightarrow CN + M$, où M est un troisième corps, $C_2 + N \rightarrow CN + C$, $C_2 + N_2 \rightarrow CN + CN$. Les figures 4 et 5 présentent respectivement des spectres du CN violet pour $\Delta v = 0$ et $\Delta v = +1$, enregistrés à une distance de 70mm de l'anode du plasmatron. Ces spectres expérimentaux, sont ensuite comparés avec des spectres simulés numériquement par le code SPARTAN de Lino da Silva (IST, Portugal) [8] pour différentes valeurs de la température de vibration. La température donnant la meilleure concordance entre spectre enregistré et spectres simulés est $T_{v,(CN)} = 6500-7000$ K. Il est à noter que le spectre est normalisé afin de s'affranchir de la concentration de l'espèce considérée, ceci dans le but d'étudier seulement l'influence de la température de rotation et de vibration.

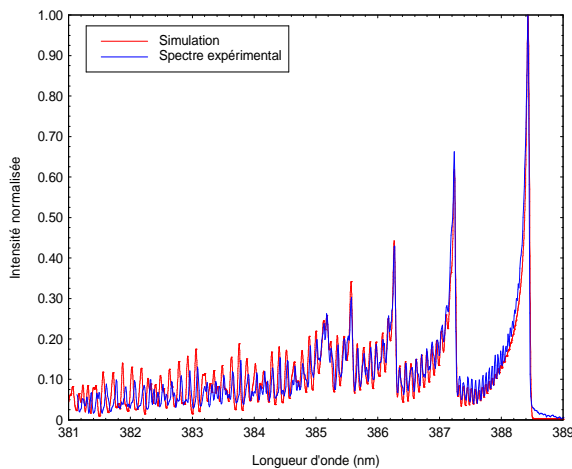


Figure 3 : Spectre du CN violet ($\Delta v = 0$)

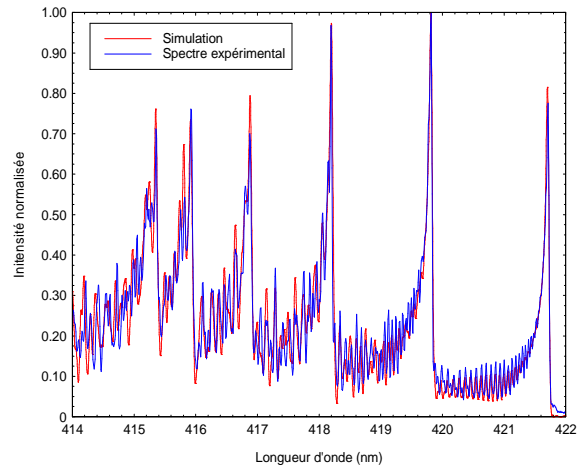


Figure 4 : Spectre du CN violet ($\Delta v = +1$)

Les figures 3 et 4 ont permis de montrer que le déséquilibre thermique était faible $T_R \sim T_V$ dans le jet de plasma. La température de rotation est généralement assimilée à la température de translation (température cinétique) du gaz bien que certains écarts puissent apparaître entre les températures de rotation en raison de la présence d'atomes légers dans la molécule étudiée (par exemple en comparant les énergies de rotation de CN et NH). Il en est de même pour les températures de vibration qui se rapprochent de la température d'excitation des molécules. Une émission du système C_2 de Swan a été aussi observée mais pas exploitée.

A une distance de 50 mm de la sortie (anode) de la source de plasma plusieurs raies atomiques ont été observées : émission de l'azote atomique N I dans les régions 740-746 nm, 818-824 nm et 856-874 nm, d'oxygène O I à 777.19, 777.41, 777.53 nm. Plus loin de l'anode, ces émissions sont faiblement détectées par le spectromètre optique. Des premières déterminations de la densité et de la température électroniques ont été obtenues ; à partir de l'émission de l'hydrogène atomique H_β , la densité électronique mesurée est de $1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ (une faible quantité d'hydrogène est présente dans le plasma venant sans doute de la vapeur d'eau), et la température électronique obtenue à partir de l'azote atomique N est de 8400K.

Conclusion

La source de plasma à arc de l'IEPE de Poznan permet de créer des jets stationnaires de plasma simulant partiellement l'environnement ionisé se créant autour d'une sonde pénétrant

à vitesse hypersonique dans l'atmosphère martienne. L'étude du jet obtenu à partir d'un mélange initial de CO₂ et de N₂ (43%-57%) a été réalisée par spectroscopie d'émission. L'émission de la molécule CN (violet) a permis de monter l'équilibre entre les températures rotationnelle et vibrationnelle de cette molécule (6500-7000K), la température rotationnelle de CN est assimilée à la température cinétique du plasma. Les premières mesures optiques de densité ($1,3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$) et de température électroniques (8400K), effectuées à partir d'émissions atomiques (H β , N I) seront confrontées ultérieurement avec des mesures locales qui seront effectuées par sonde de Langmuir.

Références

- [1] M.D. Smith et al, Mars atmosphere, R. Haberle et al, éditeurs, Cambridge University Press (2012)
- [2] M.M. Shapley et al, Mars, University of Arizona Press (1992)
- [3] N. Barlow, Mars: An introduction to its interior, surface and atmosphere, Cambridge University Press (2008)
- [4] Th. Encrenaz, La planète Mars : un autre destin, Reflets de la physique, *Revue de la Société Française de Physique*, n°30, juillet-août 2012
- [5] A. Kaminska, M. Dudeck, Electric fluctuations of DC and AC arcs in plasma torches, *High Temp. Material Processs* **1** (1997) 205-218
- [6] A. Kaminska, M. Dudeck, Regimes of arcs plasma flow at low pressure, *J. Phys. III France* **7** (1997) 195-209
- [7] A. Kaminska, B. Lopez, B. Izrar, M. Dudeck, Modeling of an argon plasma jet generated by a dc arc, *Plasma Sources Science and Technology* **17**, n°3, Article ID 035018, 2008
- [8] M. Lino da Silva, Simulation des propriétés radiatives du plasma entourant un véhicule traversant une atmosphère planétaire à vitesse hypersonique : application à la planète Mars, Thèse de l'Université d'Orléans, 2004

Remerciements

L'étude a été réalisée dans le cadre du programme de la communauté européenne (FP7/2007-2013) sous le numéro de convention 242311 « Phys4Entry – Planetary Entry Integrated Models ».