

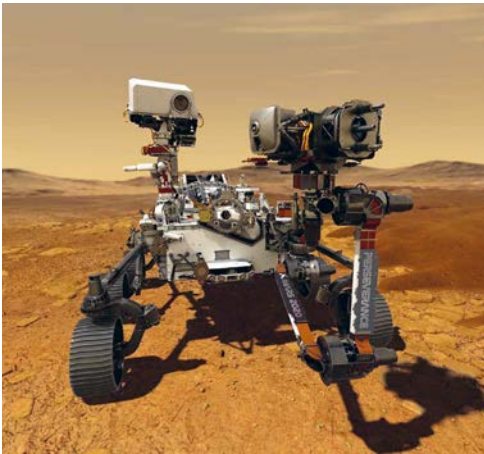
DE CHEMCAM À SUPERCAM : L'APPORT DE LA LIBS POUR LE SPATIAL

Cécile FABRE^{1*}, Bruno BOUSQUET²

¹ GeoRessources, UMR 7359, CNRS, Université de Lorraine, Vandoeuvre-les-Nancy, France

² CELIA, UMR 5107, CNRS, CEA, Université de Bordeaux, Talence, France

*cecile.fabre@univ-lorraine.fr



Suite aux succès de l'outil ChemCam, le prochain rover martien Perseverance comprend un nouvel instrument franco-américain, SuperCam, qui couple la LIBS à la spectroscopie Raman ainsi qu'à la spectroscopie infrarouge passive. Grâce à la corrélation des données atomiques et moléculaires obtenues, SuperCam permettra de caractériser la chimie des sols et des roches et d'y rechercher des bio-signatures.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010338>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

L'exploration martienne a pris son envol dans les années 70 avec les deux missions de landers Viking puis avec Phoenix en 2008. Puis les américains ont déployé des rovers pouvant se déplacer comme Sojourner en 1997, Spirit et Opportunity en 2004 et enfin Curiosity en 2012. Les objectifs de ces missions portent sur une meilleure connaissance de l'histoire géologique de la planète afin de mieux comprendre l'évolution de la Terre depuis sa création. On y recherche la preuve de la présence passée ou actuelle de l'eau, des traces infimes de gaz ou de vie, des structures géologiques uniques et l'on se met à rêver de missions humaines.

Les défis technologiques relevés par les équipes scientifiques de ces missions ont permis d'embarquer

une dizaine d'instruments à bord du rover Curiosity, en activité depuis 8 ans sur le sol martien. Pour la première fois utilisée en milieu extra-terrestre, la LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) y a dorénavant une place essentielle grâce à la possibilité d'analyser des échantillons à plusieurs mètres de distance. L'instrument ChemCam qui intègre la LIBS est le fruit d'une longue collaboration franco-américaine pilotée en France par l'IRAP (Toulouse) en lien avec le CNES pour la maîtrise d'ouvrage et aux États-Unis par le LANL.

À partir des analyses LIBS, il est ainsi possible de détecter à plusieurs mètres de distance les éléments légers jusqu'aux éléments plus lourds du régolithe, y compris pour de faibles concentrations de l'ordre du $\mu\text{g/g}$. Un autre avantage réside dans le fait que l'onde de choc générée lors de l'expansion du plasma permet de

retirer une éventuelle couche d'altération ou de poussière afin que les tirs suivants atteignent la roche vierge. Mieux encore, la LIBS permet de réaliser un profil géochimique sur les premières centaines de microns au sein de la cible en répétant les tirs laser en un même point. ChemCam se révèle donc être un guide opérationnel essentiel, qui fournit quotidiennement une identification rapide de l'ensemble des roches présentes autour du rover [1]. Il aide à l'échantillonnage de cibles géologiques avant d'utiliser d'autres instruments qui demandent des temps de mesures plus longs (fluorescence X de contact ou spectrométrie de masse). La LIBS mise en œuvre par ChemCam a permis d'obtenir les compositions élémentaires quantitatives pour les principaux oxydes (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O et K_2O). Il a aussi été possible de détecter et de

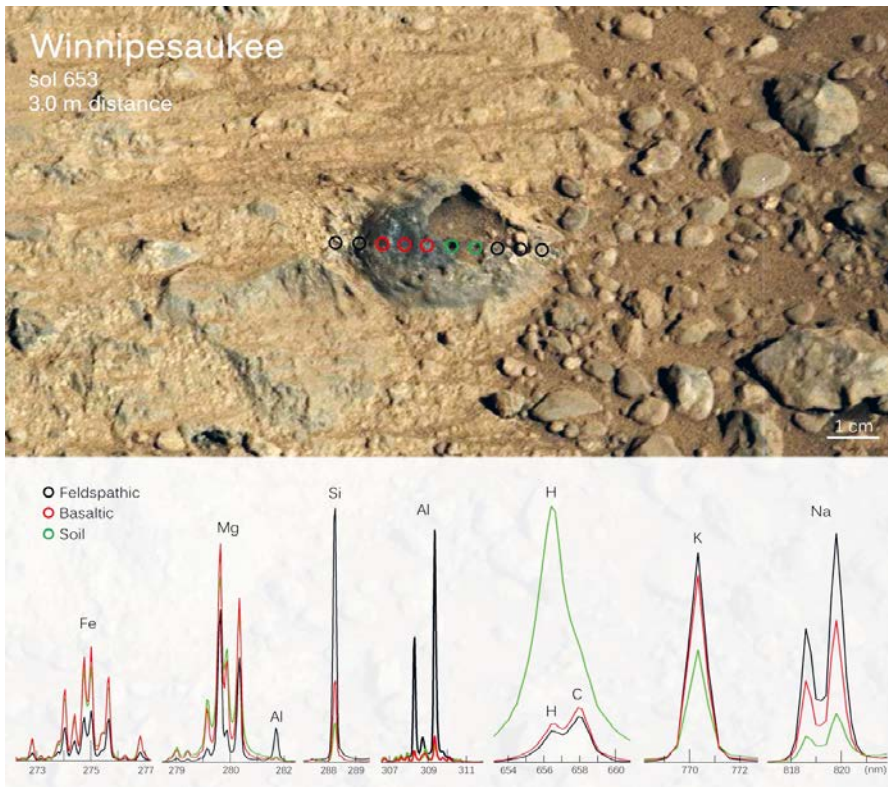


Figure 1. Photo du sol martien prise par Curiosity et raster de tirs lasers réalisé par ChemCam et spectres LIBS correspondant aux différentes compositions : feldspathique - noir ; basaltique - rouge ; « sol » -vert [3].

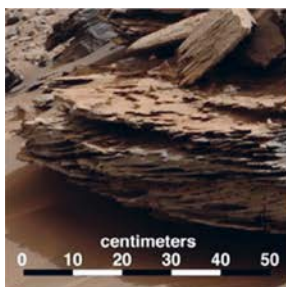
quantifier des éléments essentiels comme H, C, N, O, P et S [2]. Par ailleurs, F et Cl ont été détectés de manière indirecte via des bandes moléculaires associées à CaF et CaCl. La figure 1 montre une photo prise sur Mars par Curiosity ainsi qu'un raster de tirs laser effectué par ChemCam et les spectres LIBS correspondant à chaque point.

Figure 2. Objectifs généraux de la mission Mars 2020.

LE ROVER PERSEVERANCE POUR LA MISSION MARS 2020

L'instrument ChemCam a dépassé de très loin les objectifs primaires de la mission et a ouvert la voie au développement d'un nouvel instrument dénommé SuperCam. Cet instrument, plus complexe, vient d'être positionné sur le rover Perseverance qui partira en direction de la planète rouge en juillet 2020 pour 8 mois de croisière spatiale. SuperCam a été intégré puis testé sur le rover Perseverance au JPL, à Pasadena en Californie, en juillet 2019, puis le rover a été transféré en Floride en février 2020 afin d'être intégré au module de vol. Perseverance se posera sur Mars début 2021 et les opérations scientifiques sont prévues pour une période nominale allant jusqu'en août 2023. SuperCam permettra de connaître la minéralogie (Raman résolu dans le temps TRR et Luminescence TRL, Vis-IR), la chimie (LIBS) sur un même échantillon.

Le site d'atterrissage est le cratère d'impact Jezero, de 49 km de diamètre, et qui abrite une zone sédimentaire présentant des contextes hydrothermaux dans un environnement potentiellement habitable. Il conviendra notamment d'y décrire les processus et les environnements passés responsables de l'altération des roches ignées primaires et leur degré d'altération. Les quatre objectifs ●●●●



EXPLORATION GEOLOGIQUE

- Découverte d'un environnement géologique passé
- Compréhension de processus de formation et d'altération



HABITABILITE ET BIOSIGNATURES

- Tester l'habitabilité du site
- Chercher la preuve d'une vie passée
- Sélectionner au mieux des sites qui ont pu préserver des biosignatures



RETOUR D'ECHANTILLONS

- Sélection de roches et sols
- Intégrer le panel le + large possible de la géologie
- Déposer les échantillons sur la surface martienne pour un futur retour



VERS UNE MISSION HUMAINE

- Enregistrer la température, l'hydrométrie, le vent et la poussière
- Démontrer la possibilité de convertir *in situ* le CO₂ atmosphérique en O₂

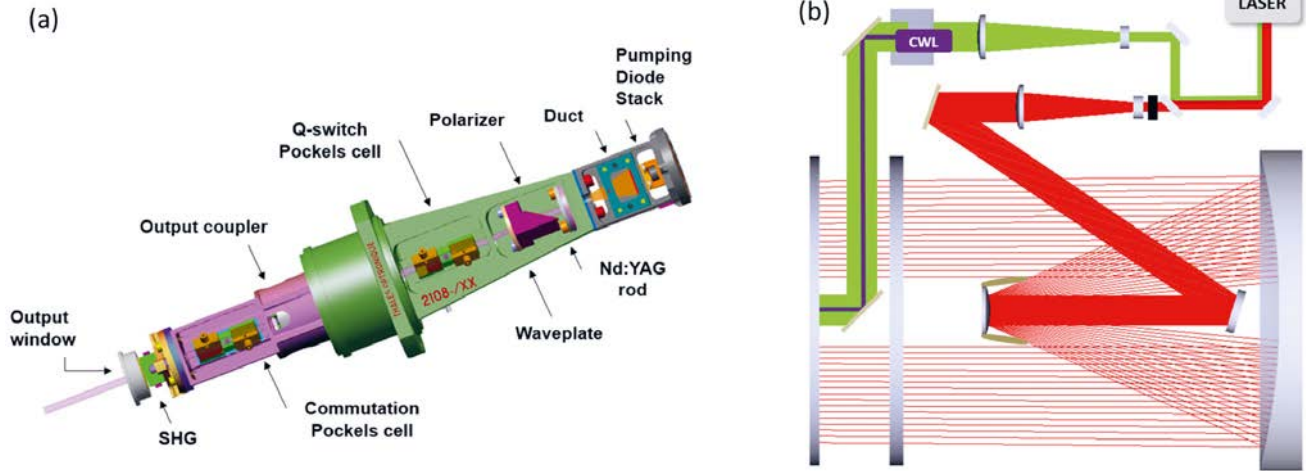


Figure 3.

(a) Schéma du laser de SuperCam.
 (b) Schéma décrivant la propagation du faisceau à 1064 nm (rouge), focalisé sur la cible à l'aide du télescope pour la LIBS et celle du faisceau à 532 nm (vert), collimaté pour la spectroscopie Raman [4].

de la mission Mars 2020 sont décrits sur la figure 2 et vont de l'exploration géologique à la recherche de biosignatures en passant par la sélection et le conditionnement des échantillons les plus pertinents pour un futur retour sur Terre jusqu'à l'étude des conditions d'une possible mission humaine.

SUPERCAM, LES ASPECTS TECHNIQUES

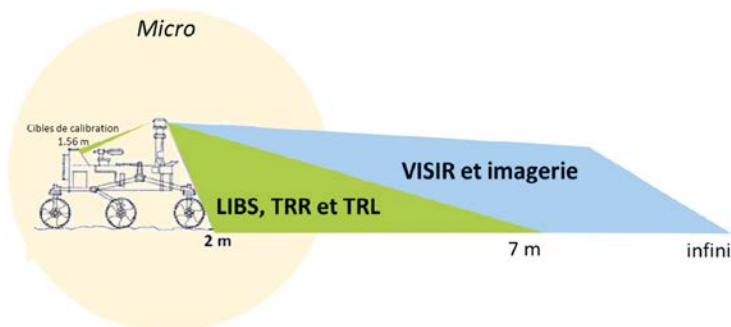
L'instrument SuperCam [4, 5] est constitué d'une partie située en haut

du mât du rover, et contenant un laser et un télescope parmi d'autres instruments, reliée par une fibre optique et par une connexion électrique à une

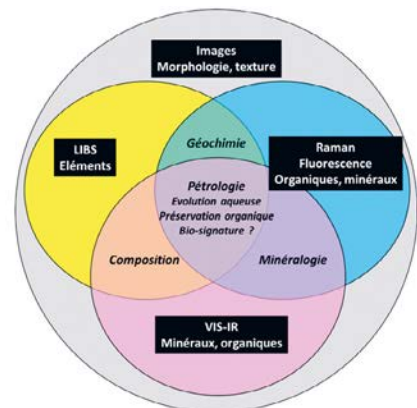
seconde partie située dans le châssis du rover, et contenant un ensemble de spectromètres.

Un laser Nd:YAG pompé diodes délivre des impulsions de 4 ns et d'environ 24 mJ à 1064 nm pouvant délivrer des rafales d'impulsions jusqu'à 10 Hz. Le faisceau infrarouge sortant du laser peut être doublé en fréquence en traversant un cristal doubleur lorsque son état de polarisation est adapté. Une cellule de Pockels (cf. Fig. 3(a)) est utilisée

L'OUTIL SUPERCAM



SuperCam permet de connaître la minéralogie (Raman résolu dans le temps TRR, Luminescence TRL, Vis-IR) et la chimie (LIBS) sur un même échantillon. La calibration de ces outils sera faite sur les cibles embarquées à l'arrière



du rover. La spectroscopie Raman et la luminescence apportent dans cette mission une nouvelle dimension sur la détection des composés organiques qui est un des objectifs principaux de la mission Perseverance.

pour commuter la polarisation entre deux états, l'un permettant de traverser le cristal doubleur sans subir de changement et l'autre permettant d'obtenir un doublage de fréquence efficace et de délivrer un faisceau vert à 532 nm d'environ 12 mJ co-propageant avec le faisceau infrarouge. Alors que le faisceau infrarouge est focalisé par le télescope pour former un spot entre 300 µm et 600 µm de diamètre sur la cible, le faisceau vert reste quant à lui collimaté et atteint la cible avec un diamètre de 2 à 8 millimètres (Fig. 3(b)).

La cible située jusqu'à 7 m du rover reçoit l'un ou l'autre des faisceaux selon des séquences prédéfinies. Parmi elles, on peut citer à titre d'exemple une séquence dédiée à la mesure conjointe LIBS/Raman du type : 30 tirs à 1064 puis 200 tirs à 532 par point - raster de 10 points - 2 répétitions. La LIBS est la première de la séquence car l'endommagement de la cible se fait sur une petite surface comparée à la zone d'émission du signal Raman et l'onde de choc qui accompagne la formation du plasma LIBS sert à nettoyer la surface de poussières.

La lumière provenant de la cible est collectée par le télescope puis transportée dans une fibre optique de 300 µm de cœur de près de 6 m de long avant d'être répartie vers les trois spectromètres situés dans le châssis du rover, et couvrant les gammes spectrales 243.5-341.7 nm pour le premier, 382.1-467.5 nm pour le second et 535-853 nm pour le dernier. Il est important de noter que le dernier spectromètre, équipé de 3 réseaux en transmission permettant de former trois bandes spectrales sur le capteur, dispose d'un module d'amplification qui permet non seulement d'obtenir du

gain mais aussi d'enregistrer des spectres sur une durée aussi courte que la centaine de nanoseconde, ce qui est très utile pour filtrer temporellement le signal Raman d'une éventuelle luminescence.

Notons enfin que l'instrument SuperCam comprend également - en haut du mât du rover - une caméra haute résolution afin de fournir des images du contexte d'analyses spectroscopiques, un spectromètre infrarouge qui analyse séquentiellement les composantes du spectre réfléchi par la cible (spectroscopie passive) à l'aide d'un AOTF. Un microphone permet aussi d'enregistrer les sons dans la gamme 100 Hz - 10 kHz, dont ceux causés par l'onde de choc lors de l'expansion du plasma LIBS et un jeu de 25 cibles de calibration (synthétiques et naturelles) est monté sur l'arrière du rover pour disposer d'un moyen de calibration tout au long de la mission.

CONCLUSION

La LIBS a permis d'analyser de nombreux échantillons géologiques à la surface du sol martien depuis 2012 grâce à l'instrument ChemCam installé à bord du rover Curiosity et qui a déjà effectué plus d'un million de tirs laser. Fort de ce succès, la LIBS a été de nouveau choisie par la NASA pour constituer l'un des outils d'analyse mis en œuvre par l'instrument SuperCam, installé à bord du rover Perseverance, qui atteindra le sol martien en février 2021. L'analyse corrélative des spectres LIBS et Raman obtenus à partir d'un même laser sur des échantillons situés à plusieurs mètres de distance du rover fournira de précieuses informations sur la minéralogie ainsi que sur de possibles traces de vie. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R. C. Wiens, S. Maurice, MSL Science Team, *Elements* **11**, 33 (2015)
- [2] D. E. Anderson, B. L. Ehlmann, O. Forni *et al.*, *J. Geophys. Res.: Planets* **122**, 744 (2017)
- [3] R. C. Wiens *et al.*, *Mars. Icarus* **289**, 144 (2017)
- [4] S. Maurice *et al.*, *Space Sci. Rev.* (accepté) (2020)
- [5] R.C. Wiens *et al.*, *Space Sci. Rev.* (accepté) (2020)



IUMTEK est une startup deeptech dont l'objectif est de concevoir des instruments de mesure pour le monitoring temps réel *in situ* de procédés industriels, sans préparation ni prélèvement d'échantillons. IUMTEK a été fondée en octobre 2017 avec le CEA Investissement et relève de la filière de valorisation de la Direction des Energies du CEA Saclay. À ce titre, IUMTEK dispose d'une licence d'exploitation de brevets du CEA & ORANO Cycle.

L'objectif des développements instrumentaux est d'intégrer la LIBS au cœur des lignes de production, en concevant des instruments capables de détecter les composants élémentaires des intrants des process, qu'ils soient à l'état liquide, solide, ou aérosol. Grâce à la LIBS, l'augmentation de la réactivité décisionnelle permet, avec l'aide de techniques d'intelligence artificielle, des retours sur investissement rapides se traduisant par l'élimination de rebuts, et par l'optimisation des process et du monitoring *in situ* temps réel de la production.

IUMTEK propose également des développements de modules photoniques et logiciels spécifiques à une demande métier.



L'analyseur TX 1000 de conception IUMTEK est un instrument polyvalent de détection d'éléments chimiques élémentaires qui permet une identification rapide et fiable dans les solides, liquides et milieux gazeux.

IUMTEK est basé aux Loges en Josas, au sein de l'accélérateur Accelair du groupe Air Liquide. ●

CONTACT

Ronald BERGER-LEFÉBURE
ronald.bergerlefebure@iumtek.com
<https://iumtek.com/>