

Curiosity sur Mars, six ans d'exploration avec l'instrument ChemCam au sein du cratère Gale

Agnès Cousin IRAP Toulouse, Agnes.cousin@irap.omp.eu

Le rover Curiosity, « premier géologue » à la surface de Mars, a pour objectif de mettre en évidence l'habitabilité passée de la planète. Il est bardé d'instruments scientifiques dont la caméra ChemCam qui permet d'analyser à distance par spectroscopie la nature et la composition des roches à l'aide d'un faisceau laser. L'IRAP à Toulouse a mis au point la partie optique de l'instrument.

Mars est fascinante ! Observable à l'œil nu, sa teinte rougeâtre l'associe au dieu de la guerre ; son mouvement rétrograde intrigue les premiers astronomes ; l'observation d'étranges chenaux à la fin du XIX^e siècle lance le mythe des Martiens. Oxyde de fer, mouvements conjugués de la Terre et de Mars, rivières asséchées, l'époque moderne détruit les mythes et construit la science de demain...

En un demi-siècle, plus de 20 missions spatiales ont étudié Mars in situ. En ce moment, cinq orbiteurs (NASA, ESA et Inde) cartographient sa surface que deux rovers (NASA) sillonnent. De ces données, les scientifiques dévoilent une planète ordinaire au destin extraordinaire. Figée dans le temps depuis 3 milliards d'années, Mars a conservé la mémoire d'une époque qui vit sur Terre la transition d'un astre naissant chaud à une planète vivante. De tels processus ont-ils existé sur Mars ? Sont-ils universels ? L'étude de Mars nous permet de comprendre comment une planète devient habitable, voire habitée.

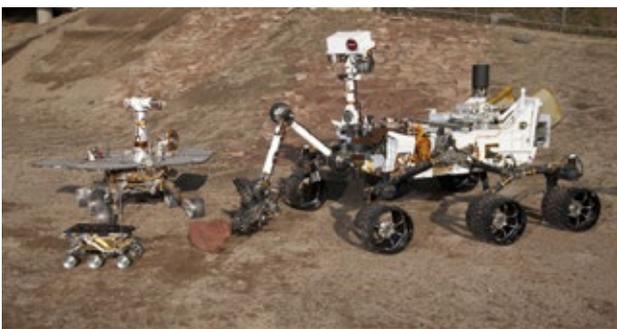


Fig.1. Photo des trois dernières générations des rovers martiens. Ces rovers sont les modèles expérimentaux. De gauche à droite : le rover le plus petit correspond à Sojourner (mission « Mars Pathfinder », atterri en 1997), puis un des rovers jumeaux Spirit et Opportunity de la mission « Mars Exploration Rovers » (atterris en 2004). À droite, le rover dernière génération, Curiosity (atterri en 2012). Crédits : NASA/JPL-Caltech.

En 2004, la NASA a lancé un appel d'offre pour équiper son nouveau robot martien, un monstre de

900 kg de la taille d'une voiture (figure 1), de 80 kg d'instruments scientifiques – ce qui représente plus de 10 fois la charge utile embarquée sur les robots précédents. *Curiosity* devient le « premier géologue » à la surface de Mars, dont l'objectif scientifique est de mettre en évidence l'habitabilité passée de la planète, à travers quatre axes principaux : (a) étudier le potentiel biologique, (b) caractériser la géologie et la géochimie du lieu, (c) investiguer le rôle de l'eau, (d) caractériser les radiations à la surface de la planète.

L'équipe de Toulouse à l'IRAP, en collaboration avec le LANL au Nouveau-Mexique, est sélectionnée en 2005 pour la construction de l'instrument original, ChemCam, qu'ils ont conçu ensemble. Son rôle : mesurer à distance la composition des roches et des sols. ChemCam utilise un laser de puissance pour vaporiser à distance des cibles martiennes, créant un plasma qui est analysé par spectroscopie optique – c'est ce qui est appelé la technique de spectroscopie induite par laser (figure 2).

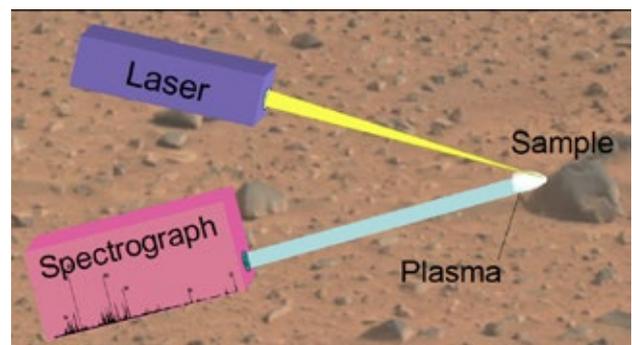


Fig.2. Ce schéma illustre la technique de spectroscopie induite par laser (appelée LIBS en anglais pour « Laser Induced Breakdown Spectroscopy »). La focalisation d'un laser à forte puissance sur une cible va créer un plasma. La lumière du plasma peut ensuite être analysée par spectroscopie afin de connaître les espèces chimiques présentes dans la cible. Crédits : NASA/JPL-Caltech.

De cette analyse submillimétrique (entre 300 et 500 microns), les scientifiques en déduisent la composition

chimique de Mars à une distance allant de 2 à 7 m du robot. ChemCam est également équipé d'une micro-caméra (RMI – « Remote Micro Imager ») qui permet d'étudier la morphologie et la texture des cibles visées.

Le site d'atterrissage choisi pour *Curiosity* est le cratère de Gale, qui est un bassin d'impact d'environ 150 km de diamètre. Celui-ci s'est formé il y a environ 3,8 Ga (milliards d'années) à l'interface entre les hauts terrains cratérisés de l'hémisphère sud et les plaines de l'hémisphère nord. Le cratère présente un mont central haut de 5 km riche en sédiments, appelé « Aeolis Mons » ou encore Mont Sharp. Les données infra-rouges acquises depuis l'orbite ont montré que ces terrains sédimentaires étaient enrichis en minéraux formés en présence d'eau. Les dépôts les plus anciens, situés à la base du Mont Sharp sont datés d'environ 3,6-3,8 Ga. Ils contiennent des phyllosilicates, qui sont des minéraux secondaires formés lors d'une altération aqueuse. En remontant la stratigraphie vers le sommet, on observe une transition entre les phyllosilicates et les sulfates, ces derniers se formant dans des environnements plus appauvris en eau. Les terrains les plus anciens présentant une variété de minéraux secondaires pourraient alors avoir préservé les environnements aqueux passés, et donc de possibles marqueurs organiques. De plus, les changements minéralogiques observés en fonction de la stratigraphie indiquent que l'environnement a évolué avec le temps, possiblement lié à une variation climatique.

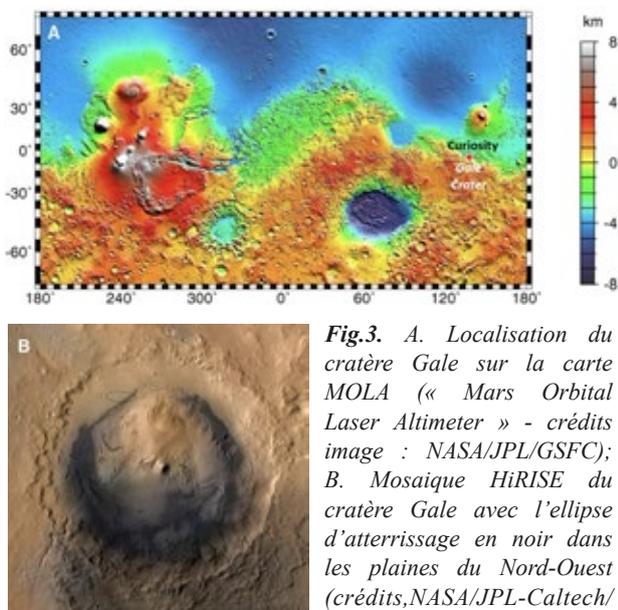


Fig.3. A. Localisation du cratère Gale sur la carte MOLA (« Mars Orbital Laser Altimeter ») - crédits image : NASA/JPL/GSFC); B. Mosaïque HiRISE du cratère Gale avec l'ellipse d'atterrissage en noir dans les plaines du Nord-Ouest (crédits, NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS).

L'atterrissage de *Curiosity* fut un réel succès malgré l'incroyable challenge technique, le 6 août 2012 (figure 3). Depuis plus de 6 ans, nous sommes aux

commandes de ChemCam qui travaille dur tous les jours. L'objectif du rover est de gravir le Mont Sharp mais la route est longue, avec une succession de sites géologiques particulièrement intéressants à analyser.

Le site d'atterrissage a été baptisé « Bradbury Rise ». Cette plaine, proche d'un cône alluvial, expose à sa surface quelques roches magmatiques ainsi que des conglomérats qui ont été transportés. Les roches magmatiques, observées principalement au début de sa progression (figure 4), ont montré une diversité inattendue : certaines sont de types basaltiques comme précédemment observées par les missions MER (« Mars Exploration Rovers »), alors que d'autres sont très enrichies en silice et en alcalins (composition felsique), présentant même des phénocristaux de plagioclases (figure 5).

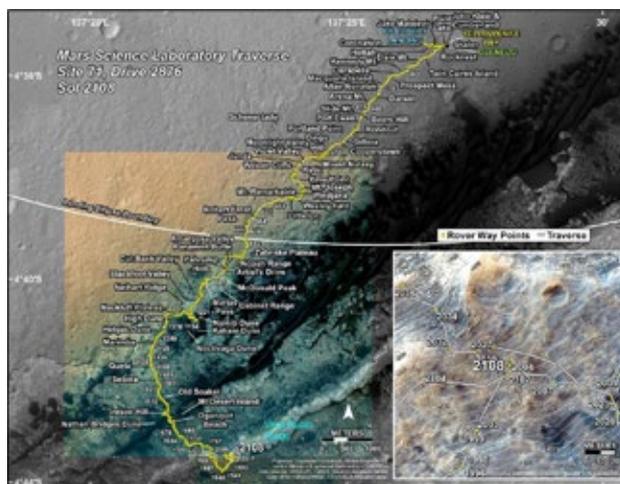


Fig.4. Trajectoire réalisée par *Curiosity* jusqu'au sol 2 108 (13 juillet 2018), avec les principales étapes – crédits : NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona.

Certaines contiennent du fluor, élément observé pour la première fois sur Mars. Ces résultats surprenants ont mis en évidence un magmatisme martien bien plus complexe qu'on ne se l'imaginait. Les conglomérats (figure 5), d'après la texture et la morphologie des clastes qui les forment, ont été transportés par des rivières. Ceux-ci viennent des flancs du cratère et représentent donc la croûte ancienne de la planète.

Peu de temps après l'atterrissage, *Curiosity* s'est déplacé vers l'Est pour étudier un site appelé « Yellowknife Bay » (figure 4), riche en dépôts sédimentaires variés (argilites et grès). Le rover a d'ailleurs réalisé son premier forage à « Sheepbed », zone riche en argilite, et qui correspond à un ancien lac.

Non loin de là, le rover est allé étudier un site appelé « Shaler », correspondant à des grès fins, roches nécessitant une fois de plus la présence d'eau pour se former. Ces roches sédimentaires semblent dériver

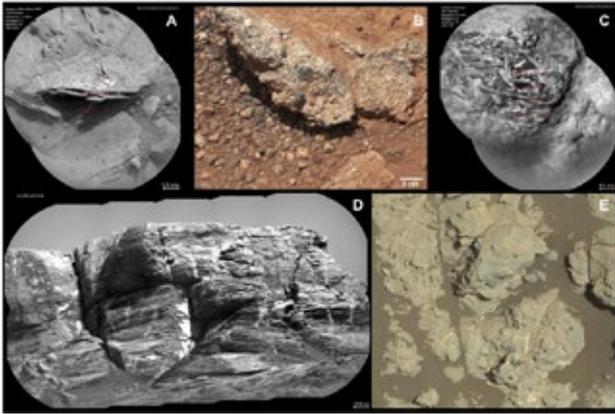


Fig.5. Images de différentes cibles analysées au long du parcours. A/ Image RMI de la cible « John_Klein_RP3 », correspondant à un « Raised Ridge » observé à Yellowknife Bay; B/ Image MastCam d'un conglomérat observé dans les plaines de Bradbury, proche du site d'atterrissage ; C/ Image RMI de la cible « Harrison », roche magmatique effusive présentant des phénocristaux de plagioclase ; D/ Panorama d'images RMI de la transition vers Vera Rubin Ridge, où les laminations des argilites sont clairement visibles, ainsi que les veines de sulfates de calcium ; E/ Image MastCam de la cible « Funzie », correspondant à une argilite où les laminations sont également présentes, ainsi que les veines de sulfate de calcium.

Crédits pour les images RMI : NASA/JPL Caltech/CNES/CNRS/LANL/IRAP/IAS/LPGN ; crédits pour les images MastCam : NASA/JPL-Caltech/MSSS.

de sources basaltiques et apparaissent principalement non altérées, avec cependant les traces de divers processus diagénétiques, comme des veines de sulfates de calcium ou encore des « raise ridges » enrichies en magnésium (figure 5).

Les formations sédimentaires de « Cooperstown » (figure 4) représentent des dépôts de plusieurs mètres d'épaisseur à faciès variés, allant du grès à grain fin au conglomérat, et correspondant à un système de deltas. Les deltas se forment lorsqu'un cours d'eau se jette dans une grande étendue d'eau telle qu'un lac (mais aussi l'océan ou la mer), où les alluvions charriées se déposent. L'orientation de ces dépôts montre que le cours d'eau s'écoulait du nord vers le sud, et donc probablement depuis les bords du cratère. Ces formations sont particulièrement intéressantes car elles présentent un enrichissement en potassium cinq fois plus élevé que la croûte moyenne martienne. Cet enrichissement semble lié à la présence de minéraux tels que des feldspaths potassiques ou encore des phyllosilicates de type illite. Ces minéraux semblent être dérivés de divers types de roches ayant été charriées par le cours d'eau.

Curiosity a atteint la base du Mont Sharp en septembre 2014 (au sol 801 - un sol correspondant à un jour sur Mars), en arrivant au site appelé « Pahrump Hills » (figure 4), appartenant à la « Murray Formation », que *Curiosity* continue d'étudier actuellement. Les

dépôts rencontrés à « Pahrump Hills » représentent des argilites en fines couches plus ou moins épaisses, représentant un environnement de lac plus ou moins profond. L'observation de « mudcracks », fissures de dessiccation, suggère que les dépôts autour du lac se sont asséchés. De nombreuses structures diagénétiques sont également observées, telles que des nodules dendritiques ou encore des veines de sulfate de calcium.

Tout au long du parcours différents types de formations diagénétiques ont pu être observés et analysés. Les veines de sulfate de calcium (figure 5) sont les plus courantes et montrent différentes textures. Certains nodules, assez sombres, ont révélé la présence de sulfate de magnésium, alors que d'autres sont enrichis en fer, manganèse, et phosphore. Des dépôts de surface enrichis en manganèse ont aussi été découverts, révélant des conditions très oxydantes à l'époque de leur formation.

Les dépôts observés dans les plaines de Bradbury et tout au long de la formation Murray montrent que le cratère de Gale correspondait à un environnement fluvio-lacustre il y a environ 3,5 Ga, et qui a perduré dans le temps. Les cours d'eau s'écoulaient depuis les bords du cratère et se jetaient dans les lacs présents en son sein. Le changement d'environnement, devenant plus aride, a induit la formation de dépôts de sulfates autour de ces lacs. Des eaux souterraines ont interagi avec les dépôts sédimentaires (grès et argilites, dépôts fluvio-lacustres) durant leur lithification mais également après, ce qui suggère que l'eau liquide sur Mars a perduré en sub-surface après que l'environnement soit devenu plus aride.

En plus des dépôts fluvio-lacustres, *Curiosity* a étudié, proche du site d'atterrissage, un dépôt éolien fossile (inactif) appelé « Rocknest », où l'instrument CheMin (minéralogie) a fait sa première analyse. Ensuite, fin 2015 et mi-2016, *Curiosity* a réalisé deux campagnes d'analyse dans un champ de dunes encore actives (figure 6). C'est la première fois qu'un rover étudie des dunes actives *in situ* sur une autre planète, ce qui a permis non seulement d'étudier



Fig.6. Panorama MastCam de « Namib Dune », une des dunes étudiées par *Curiosity*. Cette dune fait environ 5 mètres de haut et se déplace d'environ un mètre par an. Sur cette image la base de la dune se situe à environ 7 mètres du mât du rover. Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS.

leur chimie et leur minéralogie par rapport aux sols martiens, mais aussi de comprendre les dynamiques impliquées dans le déplacement de celles-ci.

ChemCam est le premier instrument à pouvoir analyser les sols à une échelle submillimétrique, permettant d'étudier à la fois les sols très fins (< 500 microns) et les grains plus grossiers qui sont souvent présents en surface. Les analyses effectuées de manière quasi-systématique ont permis de montrer que la composante fine des sols était relativement homogène avec une composition appauvrie en silicium, alors que les gros grains présentent plus de diversité. Certains d'entre eux proviennent de l'érosion des roches locales, alors que d'autres semblent provenir d'autres sources.

Actuellement, après plus de 2 100 sols à étudier la surface de Mars, *Curiosity* se situe sur un escarpement appelée « Vera Rubin Ridge » (VRR) en hommage à l'astronome éponyme. Cet escarpement, d'environ 6.6 km de long et environ 200 m de large (figure 4), semble appartenir à la « Murray Formation », malgré sa différence morphologique. VRR est constituée principalement d'argilites plus ou moins stratifiées (figure 5), correspondant donc toujours à un environnement lacustre. En plus de sa morphologie, VRR a la particularité de présenter une signature orbitale très enrichie en hématite (oxyde de fer). La présence d'hématite associée avec les dépôts sédimentaires suggère que ce relief abriterait un environnement passé différent de ceux étudiés par le rover jusqu'à présent, qui aurait pu

être habitable. Cependant, les observations faites par *Curiosity in situ* ont révélé que les roches analysées avaient une composition chimique proche de celles analysées au sein de la « Murray Formation ». Les enrichissements en fer, possiblement dus à la présence d'hématite, sont principalement observés dans les formations diagénétiques (nodules, veines). L'équipe scientifique est actuellement en train de planifier un forage, afin de mieux connaître la minéralogie complexe de cet escarpement. Les données minéralogiques des instruments CheMin et SAM aideront à mieux interpréter les différents processus de formation de ces oxydes de fer, ainsi que leur environnement de dépôt. La prochaine étape consiste à continuer la progression vers les dépôts enrichis en argile d'après les données orbitales (figure 7), où le rover se focalisera sur la recherche de marqueurs biologiques.

Curiosity a parcouru plus de 19 km en six ans, et a parcouru un dénivelé de près de 400 m depuis les plaines de Bradbury jusqu'aux flancs du Mont Sharp. L'instrument ChemCam est le premier à pouvoir analyser des cibles à distance. Il est donc largement utilisé par l'équipe scientifique, à raison d'une à deux heures en moyenne par jour. C'est pourquoi ChemCam a analysé plus de 2 400 cibles martiennes avec plusieurs centaines de tirs laser sur chacune d'entre elles, correspondant à plus de 570 000 spectres acquis.

■



Fig.7. Mosaïque du Mont Sharp réalisée par *Curiosity*, depuis le site de Vera Rubin Ridge. Au centre de l'image on aperçoit les dépôts enrichis en argile, que le rover devrait rencontrer très prochainement. Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS.