Techniques spatiales d'analyse en spectrométrie des surfaces planétaires

François Poulet

Institut d'astrophysique spatiale, bâtiment 121, CNRS /
Université Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex, France
francois.poulet@ias.u-psud.fr

Introduction

L'exploration spatiale, qui a débuté dans les années 1960, a révolutionné l'image que nous nous faisions du système solaire, en révélant notamment la richesse des objets qui le composent. Si ces objets partagent une origine commune lors de la formation du système solaire, ils se caractérisent maintenant par une grande diversité qui démontre une évolution distincte modelée par des processus physiques exogènes et endogènes variés dont les contributions respectives ont varié avec le temps.

L'étude de la surface d'un corps du système solaire fait partie des champs de recherche majeurs de l'exploration spatiale car la surface contient des indices sur les conditions de la formation et de l'évolution de ce corps. Le paradigme de ces investigations est que les propriétés physiques d'une surface planétaire proviennent, d'une part, de la composition intrinsèque du corps et de son histoire géologique, et d'autre part, d'une modification de sa nature et de sa composition par des processus exogènes. Le processus exogène le plus important et le plus visible est le processus d'impact qui se produit à différentes échelles. Sur les corps massifs silicatés, le bombardement micrométéoritique peut produire des agrégats de particules d'origines endogène et exogène qui finissent par recouvrir la surface, tandis que sur les corps externes du système solaire, ce bombardement participe à la contamination de la surface glacée. Un autre type de bombardement qui affecte la composition d'une surface est le bombardement par des particules chargées dont l'origine et la quantité varient selon le corps étudié : solaire, magnétosphère et/ou cosmique. Les effets endogènes tels que le volcanisme deviennent prépondérants dans le cas des planètes telluriques. La surface de Mars est le cas le plus complexe des surfaces planétaires car il faut tenir compte d'éléments endogènes supplémentaires qui sont les interactions passées et présentes de la surface avec l'atmosphère et l'hydrosphère. De plus, ces interactions ont fortement varié avec le

temps. L'environnement primitif de Mars était certainement très actif et les résultats des missions spatiales passées et en cours viennent sans cesse le confirmer. Certains processus modifiant les caractéristiques physiques de la surface de Mars comme le volcanisme, l'atmosphère, l'apport météoritique et l'altération aqueuse ont été clairement mis en évidence. Par contre, la présence d'eau liquide à la surface combinée à un éventuel effet de serre reste une hypothèse de travail parmi d'autres.

Le meilleur moyen de déterminer les propriétés d'une surface planétaire est de combiner les mesures par télédétection avec les mesures *in situ* et la collecte d'échantillons qui sont ensuite étudiés en laboratoire. Pour l'instant, seule la surface de la Lune a été analysée selon ce protocole. La plupart de notre connaissance des autres corps du système solaire repose donc sur des mesures effectuées par télédétection depuis la Terre et/ou depuis le survol ou la mise en orbite de satellites d'observation munis d'une batterie d'instruments. Néanmoins, l'exploration future du système solaire s'oriente de plus en plus vers des missions ciblées nécessitant des mesures *in situ* à l'aide d'engins robotisés (« *landers* » ou « *rovers* »). Depuis le début des années 2000, l'exploration du système solaire vit une période faste avec les succès de plusieurs missions spatiales dont les charges utiles [1] contiennent en général différentes techniques spatiales en spectrométrie permettant de contraindre la composition du corps planétaire exploré.

Je passerai en revue les différentes techniques spatiales qui sont utilisées dans l'étude des surfaces planétaires en insistant plus particulièrement sur les spécificités liées aux fortes contraintes issues de l'environnement spatial, et sur la comparaison *in situ* et télédétection (section 2). Parmi ces différentes techniques, les spectromètres proche-infrarouge (PIR i.e. couvrant une gamme spectrale comprise entre 1 et 5 µm) couplés à un système d'imagerie (d'où le nom spectro-imagerie ou imagerie hyperspectrale) sont des outils essentiels car ils permettent d'une part de caractériser les propriétés minéralogiques de la surface et d'autre part de remettre ces propriétés dans un contexte spatiale (couramment appelé géomorphologie) et ce à différentes échelles. Ce type d'instrument a déjà permis de faire des avancées majeures dans la caractérisation des objets planétaires à distance depuis un satellite (télédétection). Des améliorations sont toutefois indispensables afin de le rendre portable [2]. Je présenterai ainsi un récent verrou technologique franchi rendant possible sa miniaturisation nécessaire à sa portabilité à partir des récents développements instrumentaux (section 3). Enfin, deux exemples de complémentarité entre différentes techniques dans le cadre de l'exploration de la surface martienne seront présentés en section 4.

1 Exploration spatiale du système solaire

1.1 Archéométrie du système solaire

Un des principaux objectifs de l'exploration spatiale est de se rendre au plus près du corps étudié afin de caractériser à différentes échelles sa surface, sa structure interne et éventuellement son atmosphère par différentes techniques. Cela permet de mieux comprendre sa formation et son évolution et de replacer ces études dans le cadre de

1. Charge utile = ensemble d'instruments présents sur la plateforme de la mission.
2. Portabilité = technique in situ dans le cas spatial.

la formation et l'évolution du système solaire et de la recherche des conditions d'habitabilité sur ce corps. Ce dernier est un point essentiel pour certains objets et notamment Mars car elle va contraindre les techniques d'observations utilisées. L'étude des surfaces planétaires constitue l'approche la plus répandue et efficace pour essayer d'atteindre ces objectifs scientifiques. Plusieurs aspects de la surface sont étudiés, sa structure physique et ses compositions minéralogique, chimique et élémentaire à différentes échelles spatiales (du micron à plusieurs centaines de km selon les cas) faisant partie des caractérisations les plus communes et essentielles. Selon le cas d'étude et les missions spatiales, les techniques spatiales associées vont être diverses et s'adapter aux contraintes spécifiques de l'environnement spatial. Cependant, par analogie avec les études d'objets terrestres naturels ou artificiels, on pourrait résumer le cadre de ces études et de leurs mesures associées comme étant de l'archéométrie des surfaces planétaires (même si ce terme n'est pas vraiment utilisé dans le domaine du spatial).

1.2 Contraintes spécifiques à l'environnement spatial

L'instrumentation spatiale doit répondre à des contraintes très spécifiques qui sont beaucoup plus strictes que l'instrumentation sol. Elles sont les suivantes :

- Masse : l'envoi dans l'espace est extrêmement coûteux en énergie. Par conséquent, la charge utile d'un satellite ou d'un *rover* correspond en général à moins de 10% de la masse totale du système.
- Volume : ce paramètre est au premier ordre directement relié à la masse. Mais ce volume doit aussi permettre l'accommodation des autres instruments et des interfaces avec l'ensemble des systèmes qui permettent de faire fonctionner et commander les instruments. Un volume est ainsi alloué à chaque instrument qui n'est pas forcément optimisé pour des instruments possédant des systèmes optiques.
- Énergie / puissance : la puissance à bord est en général fournie par des panneaux solaires et peut être très limitée pour certaines missions, notamment celles qui explorent le système solaire externe ($>$ quelques unités astronomiques). Seules les missions qui disposent d'une source nucléaire n'ont pas cette contrainte, mais à l'heure actuelle, la NASA est la seule agence qui maitrise cette technologie. Pour exemple, la dizaine d'instruments à bord de l'atterrisseur Philae devait opérer avec une puissance moyenne de moins de 10 W pendant trois jours.
- Communications : les communications entre l'engin spatial et la Terre se font avec les bandes de fréquence S, X et Ka. La distance, la disponibilité des antennes terrestres et les configurations orbitales (éclipses, oppositions planétaires) limitent considérablement le débit de données. Par exemple, la mission JUICE qui va explorer le système de Jupiter est en cours de développement. Le scénario de mission et les capacités du satellite conduit à un débit de données limité à 1,4 Gbit/jour. Certains instruments tels que les imageurs et les spectro-imageurs produisent des données qui peuvent faire plusieurs centaines de Mbit.

- Thermique : les instruments sont soumis à une gamme de température beaucoup plus importante que les instruments terrestres. L'amplitude de température peut aller jusqu'à 200°C dont des températures très basses mais également parfois très hautes pour des raisons de contamination terrestre (voir point concernant la protection planétaire).
- Radiation : un instrument spatial n'est pas protégé par l'atmosphère terrestre et par conséquent subit les effets radiatifs provenant du vent solaire, du rayonnement galactique et des magnétosphères. L'action typique d'une magnétosphère est de piéger et d'accélérer les particules, produisant d'intenses ceintures de rayonnement tel que la ceinture de Van Allen terrestre. Mais dans le cas de Jupiter par exemple, ce rayonnement est plusieurs milliers de fois plus fort que la ceinture de Van Allen. L'interaction des particules énergétiques avec les surfaces des capteurs, des composants électroniques et des éléments optiques, provoque une dégénérescence importante qui peut non seulement dégrader les performances mais aussi la durée de vie de l'instrument.
- Durée de vie : entre le développement d'un instrument et l'acquisition de données par ce même instrument, il peut y avoir plusieurs années, voire vingt ans ou plus. Certains effets mentionnés précédemment sont donc à intégrer sur la durée de vie de la mission.
- Protection planétaire : cette contrainte s'applique aux objets présentant un potentiel astrobiologique très important. Cela concerne Mars et les satellites glacés susceptibles de contenir des réserves d'eau liquide dans leur sous-sol. De manière à éviter toute contamination terrestre, les instruments doivent alors répondre à un protocole de décontamination défini par des règles dites de protection planétaire. Cela implique notamment que tous les composants soient chauffés à des températures très élevées (> 100°C) permettant de détruire le maximum de microbes.

Toutes ces contraintes s'appliquent aussi bien aux missions orbitales qu'aux missions *in situ*. Cependant, certaines de ces contraintes sont encore plus drastiques pour les missions *in situ* que pour les missions orbitales. Cela concerne notamment la masse, le volume, la puissance à bord et la protection planétaire.

L'ensemble de ces contraintes n'existe que très partiellement dans le cas d'instrumentation portable terrestre. Cependant, il est peut être possible que certaines solutions techniques mises en œuvre dans le cadre d'un programme spatial pour contourner ces contraintes et/ou y répondre pourraient être appliquées à l'instrumentation portable terrestre. Un moyen de s'affranchir ou de contourner les difficultés repose sur plusieurs concepts qui sont :

- Partage des ressources : les diagrammes fonctionnels de certains instruments peuvent être similaires permettant a priori de partager des ressources en termes de masse, volume ou de communications/contrôles. Parmi les ressources les plus faciles à mutualiser, il y a l'électronique principale qui a pour fonctionnalité d'interfacer l'instrument avec le satellite et de mettre en œuvre les TC/TM (TéléCommandes / TéléMétrie). Un exemple concret est fourni par l'instru-

ment SIMBIO-SYS qui est un ensemble de trois instruments (un imageur visible, une caméra stéréoscopique et un imageur hyperspectral visible et proche-infrarouge) à bord de la mission ESA / Bepi-Colombo (Flamini et al. 2010). Ainsi au lieu d'avoir une électronique pour chaque instrument, il a été décidé que ces trois instruments partageraient la même électronique permettant un gain significatif de masse et volume. Bien évidemment, un tel partage de ressources n'est pas sans inconvénient. En effet, cela a pour effet d'augmenter les risques puisque si l'électronique venait à avoir un problème fonctionnel, cela pourrait conduire à la perte de trois instruments. Une redondance des composants électroniques les plus sensibles a d'ailleurs été mise en place pour pallier certaines défaillances.

- Miniaturisation : cette approche est a priori la solution la plus évidente mais elle reste difficile à mettre en œuvre car elle requiert souvent un saut technologique ou un nouveau concept instrumental qui demande de nombreux développements avant d'être validé. Je fournirai un exemple en section 3 qui a permis de gagner quasiment un facteur 3 ou 4 en termes de masse et volume.
- Programmation et analyse à bord : comme indiqué précédemment, les communications sont de manière générale limitées rendant la transmission des données d'un instrument vers la Terre difficile. Un ordre prioritaire sur le transfert de données peut alors être mis en place. Ces priorités sont définies sur la base d'une pré-analyse ou de traitement spécifique des données à bord. Cette pré-analyse peut consister à dégrader la résolution spatiale ou à sélectionner les données intéressantes sur la base de critères de qualité ou d'identification, de sorte que seules les données qui paraissent intéressantes seront ramenées sur Terre. Une autre solution (la plus couramment utilisée) consiste à compresser les données avant de les transmettre sur Terre. Il faudra alors bien définir le taux de compression afin de ne pas dégrader les données et/ou créer des artefacts.
- Retour d'échantillon : cette solution est d'une certaine manière la plus drastique car elle cherche à s'affranchir des contraintes. Et c'est celle qui a été retenue pour certaines missions, notamment Osiris-Rex (Lauretta et al., 2017) dont l'objectif majeur est de ramener des échantillons d'un astéroïde au détriment d'une analyse *in situ* et d'une caractérisation poussée de la surface de l'astéroïde cible.

1.3 Techniques spatiales en spectrométrie

Depuis le début de l'exploration spatiale, les techniques spatiales permettant de caractériser les surfaces planétaires n'ont cessé d'évoluer et de s'améliorer permettant ainsi de couvrir une gamme spectrale de plus en plus large avec une résolution spatiale de plus en plus grande. Ces techniques ont notamment pu bénéficier des améliorations des chaines de détection dans le PIR et des capacités des électroniques à traiter des volumes de données de plus en plus grand. Une classification des techniques en fonction des trois caractérisations majeures (composition élémentaire, composition chimique et composition minéralogique) est donnée en Figure 1.

Le premier instrument qui a permis de caractériser la composition d'une surface depuis l'orbite a été le spectromètre gamma, monté notamment sur les missions lunaires du programme Apollo. Le principe de ces instruments consiste à détecter le rayonnement gamma émis par les éléments K, Th, U et certains éléments majeurs comme O, Si, Fe, Mg, et Ti. Si cette technique a été très largement utilisée, son principal défaut vient de la résolution spatiale qui est très faible (par exemple de l'ordre de 300 km pour Mars). L'essentiel de l'information à plus grande résolution spatiale ($<$ km) est obtenu par la spectroscopie visible / PIR couvrant une gamme spectrale typiquement comprise entre 0,4 et 30 µm. Les premiers instruments à couvrir une partie de cette gamme ont été les spectromètres ponctuels IR. Puis s'est développée une nouvelle génération d'instruments dans les années 1990, à savoir les spectro-imageurs proche-infrarouge qui ont bien souvent révolutionné la connaissance de la minéralogie des surfaces non glacées et glacées avec une résolution spatiale pouvant aller jusqu'à moins de 20 m pour certains corps (Mars).

Les techniques développées pour les mesures *in situ* sont plus nombreuses, et incluent les techniques précédemment introduites. Certains instruments (spectroscopie VIS / NIR / IR) montés par exemple sur un mât permettent ainsi de réaliser des observations de type télédétection. D'autres instruments plus complexes (diffraction X, LIBS, spectromètre de masse couplé à la chromatographie en phase gazeuse) ont été développés dans le cadre de certaines missions, permettant la caractérisation d'échantillons recueillis par un système d'échantillons. Ces caractérisations *in situ* se font alors bien souvent aux échelles microscopique et millimétrique selon les instruments et nécessitent en général un principe actif (source radioactive, laser, système de chauffage...). Chacune de ces techniques a nécessité des adaptations particulières afin de répondre aux contraintes liées au spatial. La Figure 1 pourrait aussi laisser entendre qu'une multitude de missions a déjà opéré ces types d'instruments. Or il n'en est rien. En effet, la plupart des instruments sont récents (diffraction X, LIBS sur le *rover* Curiosity/NASA en opération depuis 2012) ou sont en cours de développement (spectroscopies proche-infrarouge et Raman pour des missions prévues après 2018). On voit donc que l'instrumentation dite portable dans le spatial n'en est qu'à ses premiers pas. Par ailleurs, les missions *in situ* ont une mobilité très limitées (de quelques dizaines de mètres à une dizaine de km pour les *rovers* martiens les plus performants) compliquant la comparaison des analyses *in situ* avec les données orbitales. Cependant, cet effort de fusion de données est extrêmement important car il permet de contextualiser certaines observations réalisées à l'échelle globale.

2 Exemple d'une nouvelle génération d'instrument portatif spatial

La notion de portabilité dans le spatial peut être assimilé à un instrument qui réalise des observations dans le cadre d'une mission *in situ*. Comme évoqué précédemment (section 2.2), le développement d'un tel instrument nécessite un saut technologique ou alors une révision du concept fonctionnel de l'instrument. Afin d'illustrer mes propos, je vais montrer l'exemple d'une nouvelle génération de spectro-imageurs proche-infrarouge très bien adaptés à l'analyse *in situ* d'échantillons de surface et qu'on appelle microscope hyperspectral.

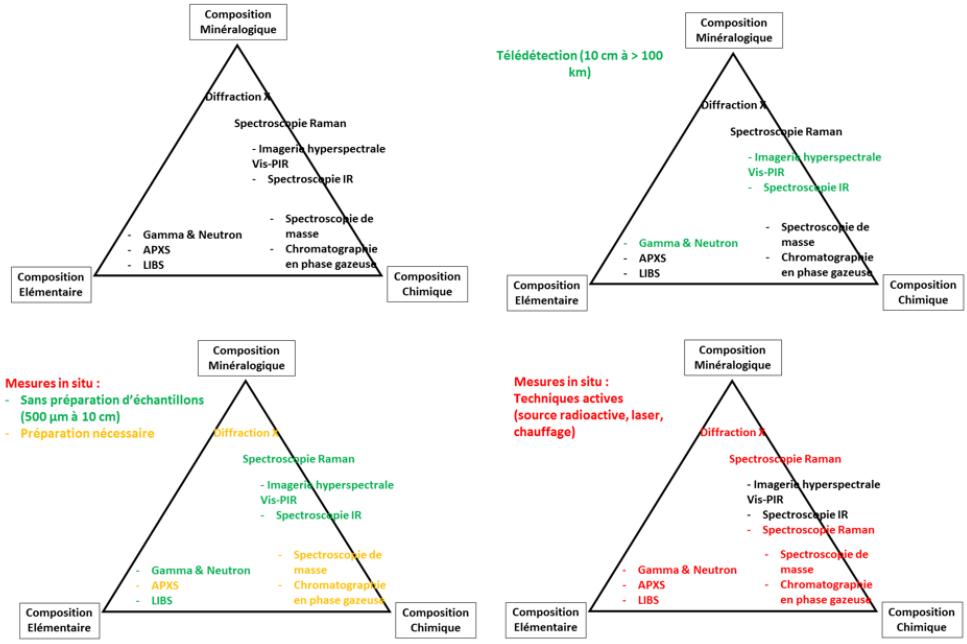


FIGURE 1 – Techniques spatiales en spectrométrie déjà utilisées ou en cours de développement dédiées à l'étude des surfaces planétaires (ici APXS : Alpha Particule X-ray Spectrometer). Les spécificités relatives aux missions orbitales (télédétection) et mesures *in situ* sont soulignées.

Les instruments de ce type développés pour les missions orbitales reposent sur un réseau de diffraction qui décompose la lumière solaire réfléchie par une surface planétaire un peu à la manière d'un prisme. L'acquisition d'un cube-image (x, y, λ) se fait alors en utilisant un détecteur matriciel ayant pour dimensions x et λ, le système de dispersion renvoie les différentes longueurs d'ondes sur une ligne de la matrice, les pixels devenant alors des éléments spectraux. L'avancée du satellite par rapport à la surface du corps observée fournit alors la dimension y. Un tel type d'instrument requiert des ressources importantes en termes de masse et de volume et n'est pas forcément adapté à la miniaturisation nécessaire aux missions *in situ* qui ont en plus peu de mobilité. Le nouveau concept utilisé dans le cadre des missions *in situ* est alors basé sur l'acquisition séquentielle d'images monochromatiques de la manière suivante : un faisceau de lumière monochromatique illumine un échantillon d'intérêt et la lumière interagit ensuite avec l'échantillon puis est renvoyée vers le détecteur grâce à un système d'optiques permettant la concentration du rayonnement émergent sur un détecteur matriciel. Le cube image est donc construit séquentiellement en sélectionnant longueur d'onde par longueur d'onde. Sur ce point, le filtre acousto-optique (AOTF, *Acousto-Optic Tunable Filter*) est une solution particulièrement intéressante : la dispersion d'un faisceau lumineux s'effectue en faisant interagir ce faisceau avec une onde acoustique dans un cristal (Leroi et al. 2009 ; Bibring et al. 2017). L'onde acoustique, commandée électroniquement, sélectionne la longueur d'onde filtrée sans nécessiter de

pièce mobile. D'autre part, l'efficacité de ce genre de filtre est bien meilleure que celle des réseaux (jusqu'à plusieurs ordres de grandeur), notamment grâce à une ouverture importante. La Figure 2 illustre le principe d'acquisition d'une image hyperspectrale d'un échantillon donné.

Ce type d'instrument a été développé à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) et sélectionné pour plusieurs missions dont Mascot/Hayabusa2/JAXA (Ho et al. 2017) et Exomars2020/ESA (Vago et al. 2017). La masse est inférieure à 2 kg (contre +10 kg pour des spectro-imageurs à base de réseaux) et son volume de l'ordre de 150 mm^3. La résolution spatiale est de 25 µm/pixel pour un champ de vue de quelques mm^2. La limitation principale de cet instrument provient du fait qu'il est nécessaire d'être quasiment en contact avec l'échantillon. Cependant, le système peut également fonctionner en transmission, c'est-à-dire que la lumière solaire peut être transmise et filtrée par l'AOTF ce qui pourrait permettre a priori de faire des observations à distance. Le développement d'une maquette d'un tel instrument est en cours à l'IAS grâce au soutien d'un programme R&D du CNES. L'objectif est d'avoir un premier exemplaire vol de ce type d'instrument à l'horizon 2022.

3 Exploration spatiale de Mars : une étude multi-instruments

Mars est de très loin l'objet planétaire le plus étudié en raison de son grand intérêt scientifique et de son accessibilité relativement plus aisée que d'autres corps. Depuis la fin des années 1960, ce sont plusieurs dizaines de missions spatiales (orbitale et *in situ*) qui se sont succédées afin de percer les secrets de sa surface et évaluer les conditions d'habitabilité lors de son passé (3.5 milliards d'années ou plus). À l'heure actuelle, Mars est observé par quatre sondes orbitales et deux *rovers*. En dépit de ces nombreuses investigations présentes et passées, il est parfois difficile de réconcilier les mesures orbitales et *in situ* concernant la composition de surface. Cela pourrait indiquer une grande diversité de composition (Sautter et al. 2015). Mais on ne peut pas exclure que de telles variations pourraient aussi provenir de la différence de résolution spatiale et des capacités de détection et de sensibilité entre les instruments qui sont en orbite et ceux qui sont au sol.

Le prochain *rover* qui va explorer la surface de Mars est le *rover* NASA/Mars2020 (lancement en 2020). La charge utile du *rover* contient une série d'instruments qui permettront de fournir pour le même échantillon les compositions élémentaire avec un LIBS et minéralogique / chimique avec un Raman et un spectromètre PIR. Cet ensemble d'instruments est réuni sous le nom de Supercam (Wiens et al. 2016). Cette synergie des mesures devrait permettre de lever certaines ambiguïtés liées aux capacités (détection, sensibilité, quantification) de chacun de ces instruments et de fournir la meilleure caractérisation possible de l'environnement du *rover* entre 2 et 7 m (distances pour laquelle les 3 instruments seront opérationnels).

Cette approche d'observations multi-instruments d'un même échantillon est nouvelle et prometteuse. Elle sera également mise à l'œuvre pour l'analyse d'échantillons martiens recueillis par le système de distribution d'un autre *rover* dont le lancement est également prévu en 2020. Il s'agit du *rover* ESA/Exomars2020 qui contiendra un laboratoire permettant d'analyser un échantillon de roches grâce à un microscope hy-

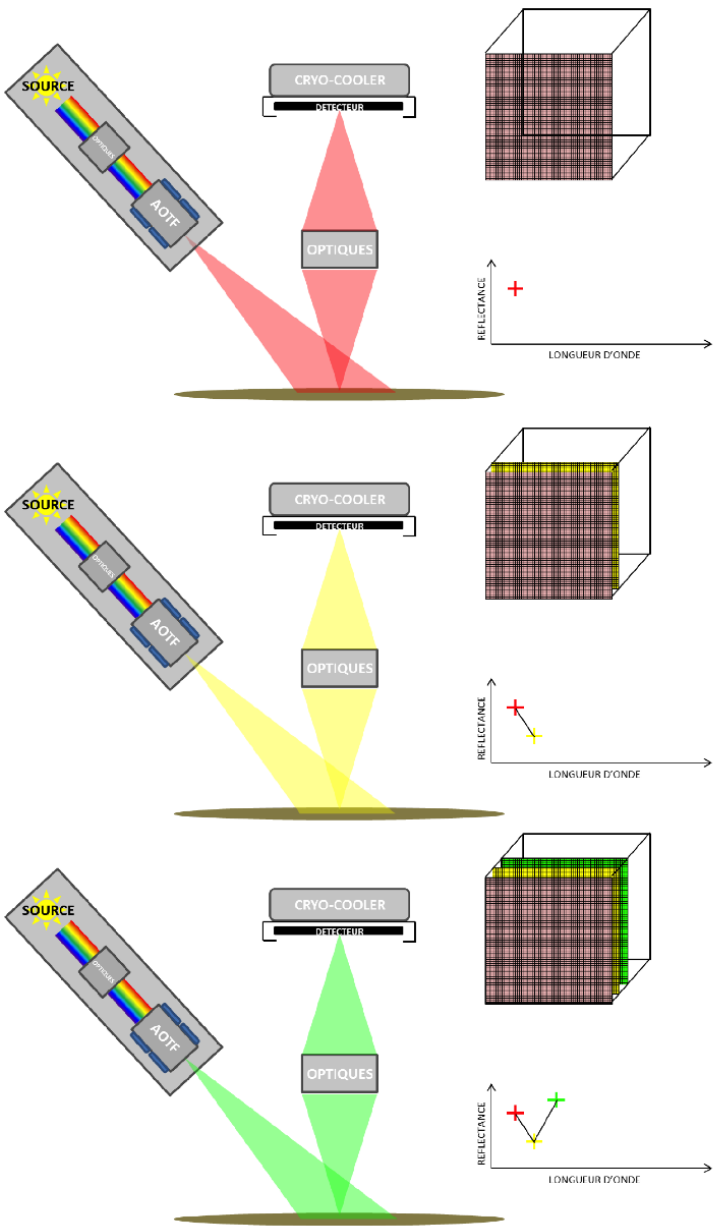


FIGURE 2 – Illustration de la construction d'un cube de données d'un spectro-imageur PIR à base d'AOTF. Chaque couleur indique une lumière monochromatique émise par une source blanche et filtrée par l'AOTF. La lumière monochromatique est alors réfléchie par l'échantillon puis recueillie sur un détecteur PIR munie d'un cryo-cooler qui maintient la température du détecteur à des températures basses requises pour limiter le bruit du détecteur.

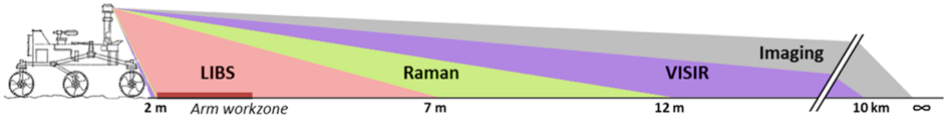


FIGURE 3 – Illustration des distances d'observations des 3 techniques de spectroscopie (LIBS, Raman, VISIR [VISibleInfra-Rouge]) qui seront à bord du *rover* Mars2020 (Wiens et al. 2016). L'observation d'un échantillon de la surface de Mars par ces instruments fournira une étude multi-instrument encore jamais réalisée dans le cadre de l'exploration du système solaire.

perspectral PIR (tel que décrit dans la section 3) puis un spectromètre Raman et de finir par une analyse destructive par un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse (Vago et al. 2017). La caractérisation de l'échantillon observé par chacune de ces techniques nous fournira une opportunité unique de fusionner les données et éventuellement de révéler des bio-signatures.

Conclusion

Bien que les objectifs de l'instrumentation spatiale en spectrométrie apparaissent similaires à l'instrumentation portable terrestre, à savoir caractérisation à distance ou *in situ* d'un échantillon ou d'une région d'intérêt, les contraintes inhérentes au spatial conduisent à développer des instruments beaucoup plus complexes et chers que les instruments portatifs. Cependant, les deux disciplines pourraient avoir intérêt à partager leur retour d'expérience afin de potentiellement améliorer les aspects techniques et les méthodologies d'observations et d'analyse à l'échelle microscopique.

Références

Bibring J.-P. et al., The MicrOmega Investigation Onboard Hayabusa2. Space Sci Rev 208, 401-412 (2017).

Flamini, E. et al., SIMBIO-SYS : The spectrometer and imagers integrated observatory system for the BepiColombo planetary orbiter. Planet. Space Sci. 58, 125-143 (2010).

Ho T.-M. et al., MASCOT—The Mobile Asteroid Surface Scout Onboard the Hayabusa2 Mission, Space Sci Rev 208, 339-374 (2017).

Lauretta D.S. et al., OSIRIS-REx : Sample Return from Asteroid (101955) Bennu. Space Science Reviews 212, Issue 1-2, 925-984 (2017).

Leroi V. et al., Micromega/IR : Design and status of a near-infrared spectral microscope for in situ analysis of Mars samples, Planet. Space Sci. 57, 8-9, 1068-1075 (2009).

Sautter V. et al., In situ evidence for continental crust on early Mars, Nature Geo. 8, Issue 8, 605-609 (2015).

Vago J.L. et al., Habitability on Early Mars and the Search for Biosignatures with the ExoMars Rover, Astrobiology 17, Issue 6-7, 471-510 (2017).

Wiens R.C. et al., SuperCam Remote Sensing on the Mars 2020 Rover : Science Goals and Overview. 3rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Mission, LPI Contribution No. 1980, id.4136 (2016).