

Dépoussiérer la Lune

Étude du comportement de la poussière lunaire en vue
de futures missions d'exploration

Karolien Lefever et Sylvain Ranvier

A lors que les agences spatiales se préparent à retourner sur la Lune, les scientifiques et les ingénieur-e-s doivent relever le défi d'atténuer un risque environnemental majeur : la poussière. Les particules de poussière chargées constituent un risque sérieux pour la santé des explorateur-ric-e-s humain-e-s et pour les instruments spatiaux.



Représentation d'un astronaute travaillant sur la surface lunaire lors
d'une future mission Artemis.
© NASA



Poussière éclairée par un rayon de soleil. © Istock photo

Poussière sur Terre

La poussière est omniprésente et peut être une véritable nuisance. Sur Terre, vous pouvez trouver ce mélange de minuscules particules (acariens, fibres, terre, pollen...) sur les surfaces partout dans votre maison. Lorsqu'elle est dérangée, la poussière déposée peut se déplacer. Si certain-e-s apprécient de la voir s'illuminer d'un éclat de soleil, d'autres ne pourront s'empêcher d'éternuer. Heureusement, nous pouvons facilement nous débarrasser de la poussière en l'enlevant avec précaution à l'aide d'un chiffon ou en utilisant un aspirateur.

Poussière sur la Lune

La poussière peut être désagréable et insidieuse même au-delà de la surface et de l'atmosphère de la Terre, comme sur la Lune. Lorsque les astronautes de la mission Apollo sont revenus de la Lune, la poussière qui s'accrochait à leurs combinaisons spatiales irritait leur gorge et faisait pleurer leurs yeux. La poussière lunaire est constituée de minuscules particules tranchantes et abrasives de roches lunaires. Les roches et les minéraux présents à la surface de la Lune sont mécaniquement brisés en particules plus petites par les impacts de météorites et de micrométéorites. Elles sont chargées électrostatiquement et s'accrochent à toutes les surfaces, des combinaisons spatiales à l'électronique, en passant par l'optique, et s'infiltrèrent même dans les poumons des astronautes.

Contrairement à ce qui se passe sur Terre, il n'est pas facile de s'en débarrasser. Les équipages ont essayé d'utiliser une brosse ou leurs mains pour balayer la poussière tranchante et abrasive de leurs combinaisons spatiales, mais aucune de ces méthodes ne s'est avérée très efficace. La faible gravité de la Lune, un sixième de celle de la Terre, fait que ces minuscules particules restent en suspension plus longtemps et pénètrent plus profondément dans les poumons.

La présence de ces particules chargées, semblables à des poussières, sur la Lune - mais aussi sur Mars, les comètes et les astéroïdes - constitue un véritable défi pour les futures missions d'exploration (habitées ou robotisées) des corps du système solaire. En plus de compromettre la santé de l'astronaute par l'irritation et l'inhalation de la poussière lunaire, celle-ci a de nombreux autres effets dangereux (instrumentaux). Pour n'en citer que quelques-uns : déchirure de la combinaison spatiale, obscurcissement de la vision extérieure, fausses lectures d'instruments, accumulation de poussière et contamination par celle-ci, perte d'adhérence, encrassement des mécanismes, abrasion, problèmes de contrôle thermique (radiateurs surchauffés) et défaillances des joints d'étanchéité.

L'astronaute d'Apollo 17 Harrison Schmitt prélevant un échantillon de sol, sa combinaison spatiale recouverte de poussière. Image NASA AS17-145-22157. © NASA



Différences entre le sol terrestre et le sol lunaire

Même si l'on utilise la même terminologie pour parler de 'sol' terrestre ou lunaire, ils ont peu de choses en commun. Sur Terre, le sol est formé par des processus biologiques ou chimiques, alors que le sol lunaire ne contient pas de matière organique et, bien que les réactions chimiques induites par les radiations définissent plusieurs types de poussières, le sol est formé uniquement par le concassage mécanique des météorites et l'interaction avec le vent solaire et d'autres particules énergétiques.

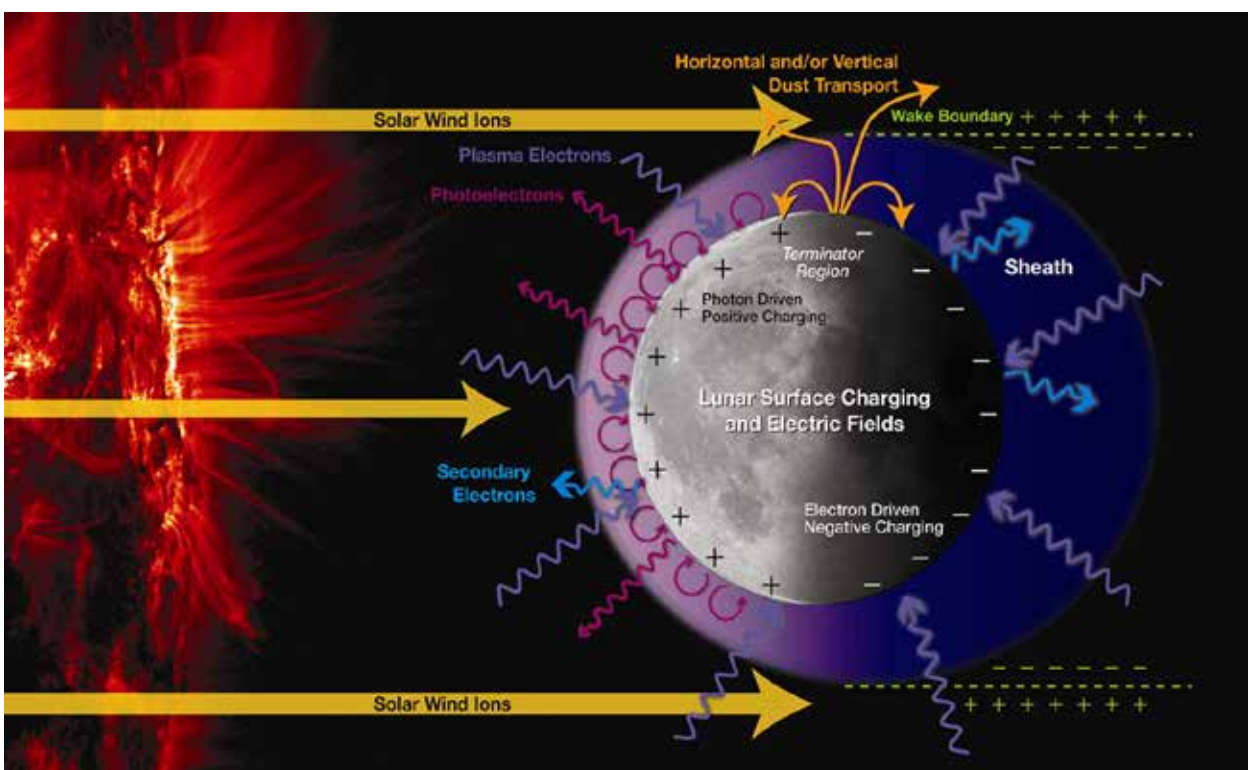
Contrairement à la Terre, où les cailloux s'arrondissent grâce aux éléments naturels au fil du temps, facilitant leur manipulation, les sols lunaires ne sont pas exposés à l'érosion. Sans vent ni eau pour user les bords, les grains du sol lunaire ont tendance à être très tranchants et anguleux, avec des surfaces fraîchement fracturées. Tranchante comme du verre, mais fine comme de la poudre : la poussière lunaire peut avoir une taille inférieure à 20 microns, ce qui la rend particulièrement nuisible, d'une manière que nous ne voyons pas sur Terre.

De plus, la poussière lunaire n'est pas tassée, comme cela se passe sur la Terre. Toute activité à la surface peut en soulever des seaux pleins, même sans que des astronautes ne marchent à la surface ou qu'un module lunaire ne pose ses pieds sur le sol, on a vu des particules et des nuages de poussière flotter à plusieurs centimètres, voire à plusieurs mètres, au-dessus de la surface. Et ce, malgré l'absence de vent ou d'eau à la surface pour les soulever ! De minuscules particules peuvent même être transportées sur de grandes distances sur la Lune. Les scientifiques attribuent la mobilisation de la poussière à des forces électrostatiques. Des phénomènes similaires pourraient se produire sur d'autres corps dépourvus d'air, tels que les comètes et les astéroïdes.



Lorsque la mission Apollo s'est mise en orbite autour de la face cachée de la Lune, les astronautes ont vu un arc de lumière incroyablement brillant à l'horizon juste après le coucher du Soleil. Le point lumineux en haut est la planète Vénus.
© NASA

Plusieurs phénomènes de charge de poussière en jeu. Figure tirée de 'Heliophysics Science and the Moon' NASA Advisory Council Report, utilisée avec l'autorisation de son créateur, le Dr Jasper Halekas.



Charge de la poussière

La poussière lunaire peut avoir un aspect et un comportement différents en fonction de sa position sur la surface par rapport au Soleil (angle zénithal). Par exemple, la face orientée vers le Soleil (côté jour) est constamment exposée au rayonnement solaire. L'irradiation solaire dans le domaine des UV et des rayons X entraîne une photoémission d'électrons, ce qui confère à la poussière du côté jour une légère charge électrique positive, avec un potentiel d'environ +10 V. Cette charge électrique fait qu'elle s'accroche à tout, comme avec l'électricité statique sur Terre.

Du côté nuit, la surface n'est influencée que par l'environnement plasmatique. Le principal courant électrique est dû à la collecte d'électrons du plasma, partiellement atténuée par l'émission d'électrons secondaires de la surface, ce qui induit un potentiel négatif estimé entre -100 V et -200 V en dehors de la magnétosphère terrestre.

Près du 'terminateur', la région entre la face ombragée et la face éclairée par le Soleil, de forts champs électriques sont présents en raison de la transition rapide entre les potentiels positifs et négatifs. Des structures à moyenne ou petite échelle, telles que des cratères ou des rochers, peuvent même amplifier cet effet. Ce champ électrique pourrait être à l'origine de la lévitation électrostatique et du transport horizontal des grains de poussière lunaire, entraînant un dépôt net de poussière de l'hémisphère sombre vers l'hémisphère ensoleillé.



Le projet DUSTER

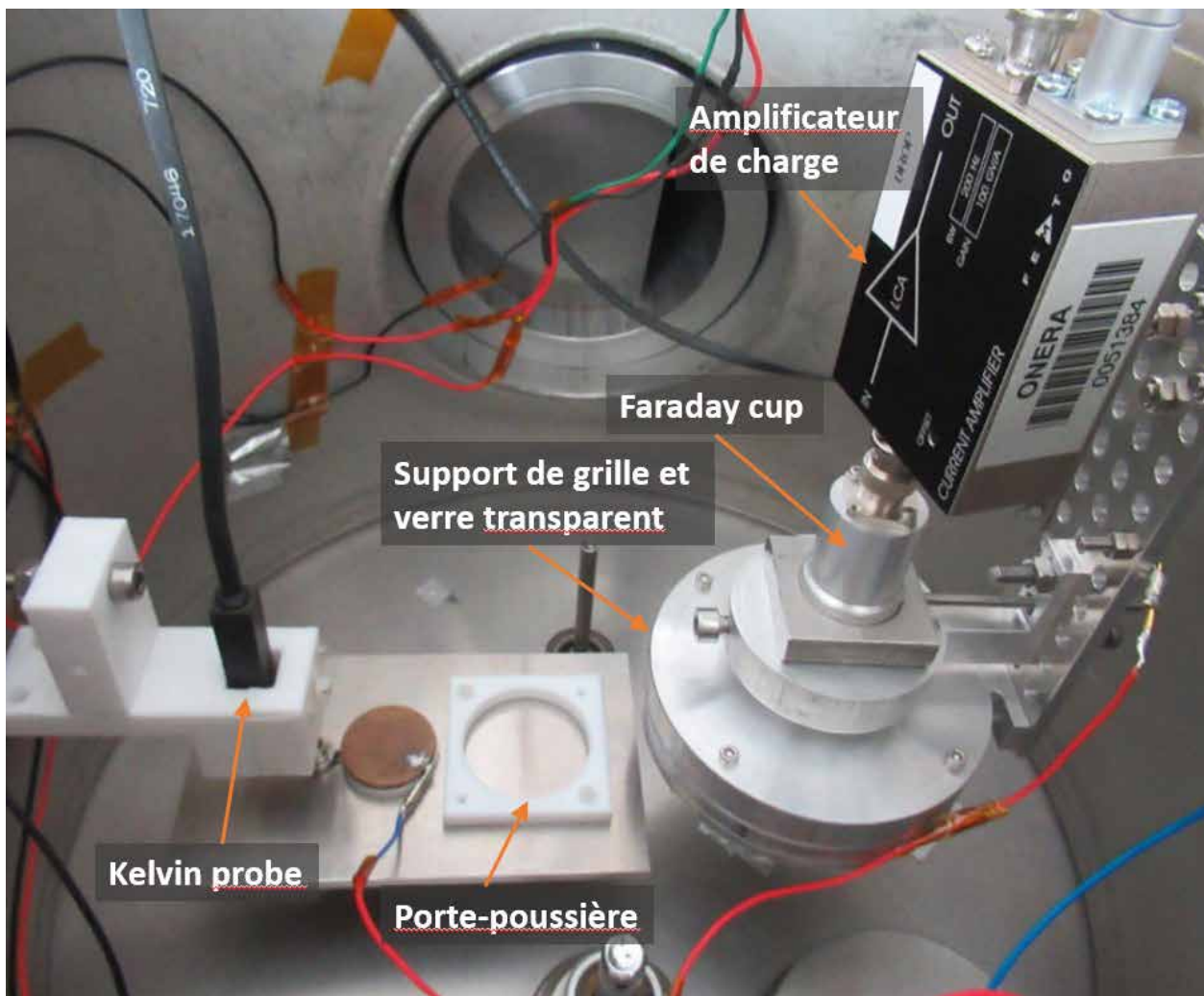
Alors que des agences spatiales comme la NASA se préparent à retourner sur la Lune, des équipes internationales de scientifiques et d'ingénieur-e-s étudient les propriétés physiques de la poussière lunaire proche de la surface afin d'évaluer les risques de pollution par la poussière et de trouver des moyens d'en atténuer efficacement les dangers. Parmi elles, une équipe dirigée par l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB), qui unit ses efforts à ceux de l'ONERA, du Laboratoire français d'aérospatiale (France), de l'Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC-IAA, Espagne) et de Thales Alenia Space-España (TAS-E, Espagne) dans le cadre du projet Horizon Europe DUSTER.

Logo du projet Horizon Europe DUSTER. Il représente la lune avec des particules de poussière chargées de différentes tailles, positionnées ou soulevées de sa surface, avec en arrière-plan la Terre vue de la surface lunaire. © IASB

DUSTER, abréviation de 'Dust Study, Transport, and Electrostatic Removal for Exploration Missions', vise à étudier la charge électrostatique et l'adhésion des grains de poussière dans le régolithe, ce qui est essentiel pour comprendre le transport des poussières à la surface des corps sans air, au moyen d'expériences en laboratoire, et à développer un modèle technique d'un instrument capable d'effectuer les mesures nécessaires pour étudier ces phénomènes in situ, à la surface de la Lune. En développant la technologie nécessaire pour déplacer électrostatiquement les grains de poussière de manière contrôlée, il s'agit d'un premier pas vers un dispositif de nettoyage de surface sensible.

La chambre à vide Dust Regolith Or Particles (DROP) de l'ONERA (Toulouse) qui permet de réaliser les expériences en laboratoire. © ONERA





Tests sur des poussières lunaires artificielles dans un environnement spatial simulé

Pour mieux comprendre le chargement du régolithe dans les environnements spatiaux, l'équipe DUSTER étudie d'abord le chargement des poussières en laboratoire par une approche expérimentale et de modélisation.

L'installation DROP (Dust Regolith Or Particles) de l'ONERA Toulouse reproduit les conditions de l'environnement lunaire de la manière la plus réaliste possible. Cette chambre à vide est équipée d'une pompe turbomoléculaire permettant des tests à une pression de 10^{-6} mbar. Pour simuler l'irradiation solaire du sol, un faisceau de photons ultraviolets sous vide (VUV) égal à 1 flux solaire est utilisé pour illuminer la couche de poussière. Le potentiel moyen de la poussière après l'irradiation VUV est mesuré à l'aide d'une sonde Kelvin sans contact. La poussière attirée par la grille et les électrodes est recueillie par une coupe de Faraday.

Grâce à ce dispositif, ils mesurent plusieurs grandeurs physiques, notamment le champ électrique nécessaire pour déplacer les grains chargés, la charge électrique transportée par les grains

Mise en place du détecteur de poussière pour le projet DUSTER. Un regard à l'intérieur de la chambre DROP. Le porte-poussière lunaire mesure 5×5 cm² avec un trou central pour les simulants de poussière lunaire. La grille servant à attirer les particules de poussière est collée sur le support de grille. Le verre transparent est maintenu par le porte-verre et sert à observer visuellement le dépôt de poussière. La coupe de Faraday mesure le courant, qui est ensuite amplifié par l'amplificateur de charge. Sur la gauche, vous pouvez également voir la sonde Kelvin, utilisée pour mesurer le potentiel poussière. © ONERA

mobilisés, les paramètres de charge et le champ électrique à la surface de la couche de poussière.

L'accès direct au sol lunaire est compliqué. C'est pourquoi les scientifiques et les ingénieurs utilisent des poussières lunaires artificielles, conçues pour simuler celles que l'on trouve à la surface de la Lune, afin d'étudier le comportement de la poussière lunaire dans leurs laboratoires. Plusieurs types de simulants de poussière lunaire sont disponibles, dont JSC-1A, LHS-1 et LMS-1. L'ONERA a choisi le JSC-1A (Johnson Space Center-One A), broyé à partir de roches basaltiques, à des fins de test.

Les premiers résultats sont très encourageants. Ils indiquent qu'il est possible, en laboratoire, d'attirer les grains de poussière par des forces électrostatiques, de mesurer un courant lorsqu'ils entrent et sortent de la coupe de Faraday et d'en déduire la quan-

tité de charges électriques que ces grains de poussière transportent. Il s'agit d'une étape importante pour le projet.

Un prototype d'instrument pour les mesures in situ

Sur base des résultats des essais en laboratoire, un prototype d'instrument in situ sera conçu, fabriqué et testé dans un environnement contrôlé. L'instrument compact DUSTER devrait permettre une analyse in situ des propriétés de la poussière (mécaniques et électriques) et du transport électrostatique lorsqu'il sera installé sur un petit atterrisseur lunaire.

Enfin, il devrait permettre d'extraire de manière contrôlée les grains de poussière d'un régolithe naturel exposé à un environnement naturel (c'est-à-dire non contrôlé). Pour ce faire, l'instrument sera composé de trois capteurs : une sonde de Langmuir, une sonde de champ électrique et une sonde de poussière constituée d'une électrode haute tension couplée à un électromètre.

Les sondes de Langmuir et de champ électrique captureront respectivement l'environnement plasmatique ambiant et le champ électrique à proximité de la surface, tandis que la sonde de poussière appliquera une force contrôlée sur les poussières chargées pour les attirer et mesurera le courant résultant de la mobilisation des particules de poussière chargées dans la coupe de Faraday.

Les paramètres obtenus permettront de déterminer le champ électrique nécessaire pour attirer/collecter les poussières en fonction des conditions environnementales (éclairage, densité du plasma et température), ce qui permettra de concevoir des équipements destinés à réduire la présence de poussières électrostatiques et à recueillir des échantillons de poussière dans une grande variété d'environnements (Lune, Mars, comètes ou astéroïdes).

L'IAA conçoit actuellement le boîtier électronique qui abritera les cartes d'alimentation, les cartes de contrôle et de traitement de l'instrument DUSTER. Ils développent également l'unité de traitement et le logiciel embarqué qui permettront d'obtenir les données scientifiques à renvoyer vers la Terre.

Les auteur-e-s

Karolien Lefever est responsable du service 'Communication et Documentation' à l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB).

Sylvain Ranvier est scientifique au sein du groupe de recherche 'Couplage magnétosphère-ionosphère' à l'IASB, et coordinateur du projet DUSTER.

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation HORIZON de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 101082466.



Erratum

Dans l'article consacré à la mission Juice paru dans le numéro précédent de *Science Connection*, on peut lire, par erreur, que la station spatiale de Kourou est située au bord de l'océan Pacifique. Il s'agit évidemment de l'océan Atlantique. Avec nos remerciements à nos lecteur-ice-s attentif-ive-s.

