

PLANETOLOGIE - II

LA CONFERENCE DE HOUSTON Sur les échantillons lunaires rapportés par « Apollo-11 »¹

Jacques JEDWAB
Professeur à L'université libre de Bruxelles²

I. – Aucun minéral abondant n'a été trouvé dont on ne connaisse un équivalent terrestre ou météoritique

La récente conférence de Houston, que l'on peut qualifier d'exceptionnelle sans trop d'emphase, a réuni quelque cinq cents personnes, chercheurs, collaborateurs, invités et journalistes, pendant quatre jours. Environ 150 communications ont été présentées avec une régularité d'horloge, groupées sous des thèmes généraux : chimie organique et inorganique, vent solaire et rayons cosmiques, minéralogie et pétrographie, propriétés physiques (luminescence, mécanique, calorimétrie, magnétisme, électricité), spectrographie Mössbauer, cristallographie, isotopes radiogéniques, phénomènes d'impact, micropaléontologie, etc.

Chaque fin de journée, les participants se réunissaient pour faire le point des résultats acquis et des problèmes débusqués, surtout à l'usage de la presse, mais chacun y a trouvé sa nourriture, puisque il était matériellement impossible de suivre toutes les sessions. Pendant toute la conférence, des conversations animées à la buvette continuaient les discussions commencées en public et jamais achevée faute de temps.

Les organisateurs ont réussi le tour de force de distribuer avant la clôture une série complète des textes des communications qui n'avaient pourtant été déposées que le lundi au matin.

Voilà pour la surface. Le contenu est évidemment plus important, mais aussi beaucoup plus difficile à maîtriser : chacun s'est approché des mêmes objets, les échantillons lunaires avec son propre langage de spécialiste, et dans ce domaine, somme toute très limité de la connaissance, les jargons spécialisés et les traditions d'écoles rendaient déjà certains échanges difficiles. Derrière ces barrières de langage encore surmontables s'ouvre l'immense domaine de l'interprétation des données matérielles.

Il faut reconnaître que les chercheurs ne se sont pas trop complus dans les théories. On a bien sûr présenté des explications, on a comparé les valeurs trouvées à celles qui sont maintenant bien connues des roches terrestres et des météorites, mais il n'y a pas eu de vraies disputes, de celles qui entrent dans les annales de l'histoire. Mais peut-on discuter avec passion de données parcellaires, encore soumises aux contraintes de la brièveté et des délais fixes ?

¹ Article publié dans le quotidien « *Le Soir* » du vendredi 23 janvier 1970.

² Jacques JEDWAB est actuellement à la retraite mais poursuit ses recherches en microminéralogie.

En attendant la grande synthèse toujours désirée et jamais atteinte pour cause de progrès irrépressibles, nous allons tenter de présenter sous forme abrégée quelques résultats intéressant le grand public.

Minéralogie

Toutes les roches et poussières contiennent pratiquement les mêmes minéraux. Aucun minéral abondant n'a été trouvé dont on ne connaisse un équivalent terrestre ou météoritique.

Minéraux abondants : oxyde (ilménite) et deux silicates (clinopyroxène et plagioclase).

Minéraux rares : **Oxydes** : chromite, baddeleyite, ulvospinelle, pseudobrookite, cristobalite, tridymite et dysanalyte. **Silicates** : olivine, pyroxmangite ferreuse (le fameux minerai jaune), feldspath potassique et silicate de zirconium, titane et yttrium. **Métaux** : fer métallique et fer-nickel, cuivre. **Sulfures** : troilite, chalcopyrite « tranquillite » (ce minéral qui a été baptisé après la conférence, présente de grandes similitudes avec la murdochite, découverte en 1953 dans un minerai de l'Arizona). **Phosphate** : apatite. **Phosphore** : schreibersite. **Carbure** : cohenite.

Minéraux douteux : Mica, graphite, corindon, alliage cuivre-zinc.

Absences notables : Magnétite, grenat, quartz, oxydes hydratés.

La composition minéralogique des roches dures indique qu'elles se sont toutes formées assez rapidement à partir d'un seul type de magma très riche en titane, calcium, fer et magnésium, pauvre en aluminium et sodium, dépourvu d'eau et d'oxygène libre. Il n'est pas encore clairement établi que ce magma riche en titane n'est pas lui-même un produit de différenciation antérieure.

Les poussières contiennent des fragments de roches et de minéraux des roches, ainsi qu'une importante proportion de verre en fragments et sphères. C'est également dans les poussières que l'on trouve la plus grande proportion de particules de fer-nickel d'origine très probablement météoritique.

On peut dire de façon générale que l'on n'a pas trouvé de composés minéraux très extraordinaires, traduisant des conditions de température et pression ou des compositions chimiques radicalement différentes de ce que l'on connaissait ou attendait. La solidification sous vide poussé, qui est évidemment inconnue sur terre, ne semble pas à première vue avoir fortement influencé la minéralogie, sauf en ce qui concerne le fer.

Pétrographie

La texture des roches dures montre que l'on a généralement affaire à des roches d'épanchement de type basaltique à microgabbroïque, de **densité 3,1**. Leur refroidissement s'est produit dans un intervalle de température assez étroit et supérieur à **1.000° centigrades**, mais avec une vitesse suffisamment lente pour que toute la matière ait le temps de cristalliser : il n'y a pas de composante vitreuse dans les roches dures, alors qu'elle est abondante dans les poussières. Nous reverrons ce point plus loin.

Les déficits en silicium, aluminium et sodium par rapport aux roches basaltiques terrestres sont attribués à la volatilisation de ces éléments sous le vide poussé régnant à la surface lunaire. Les bulles sont très fréquentes dans toutes les roches : elles indiquent que les constituants gazeux étaient présents avant la solidification. Contrairement à celles que l'on trouve dans les roches volcaniques terrestres, ces bulles sont vides de tout gaz ou

liquide.

Une importante proportion de fragments de roches plus ou moins durs se révèlent à l'examen microscopique être des agglomérats de poussières. Ils ont été décrits sous le nom de brèches (« breccias » en anglais). Leur formation est due à des impacts de météorites et d'éclats lunaires.

De faibles quantités de roches très claires, ayant une **densité de 2,7** et la composition minérale des anorthosites ont été trouvées par plusieurs chercheurs dans les poussières. Ces fragments pourraient provenir des plateaux entourant la mer de la Tranquillité. Si cette découverte se confirme, cela signifierait que les matériaux lunaires ont subi une évolution assez poussée. Mais les quantités de matière concernées doivent de toute manière être faibles, puisque la densité globale de la lune est très proche de celle des roches trouvées en abondance à la surface. (Différence très fondamentale avec la terre.)

II. – Il y a plus d'or immédiatement récupérable dans les eaux des vaisseaux ménagères que dans les roches de notre satellite.

Rappelons tout d'abord que tous les éléments chimiques du Tableau de MENDELEEV sont déjà connus sur terre et dans les météorites, à part le technetium et le promethium. Il n'y avait donc pas d'espoir de trouver des éléments inconnus. Ce n'est que par les variations dans les proportions relatives que des différences peuvent se manifester entre matériaux lunaires, terrestres et météoritiques.

Un résultat très important est que les éléments chimiques abondants dans les roches éruptives terrestres le sont également dans les roches lunaires. La subdivision, classique en géochimie, des éléments en un groupe de majeurs (**supérieurs à 1%**) et de mineurs ou rares (**inférieurs à 1%**) s'applique donc parfaitement à l'interprétation des analyses chimiques des matériaux lunaires.

Nous avons déjà parlé plus haut de la richesse relative en titane, calcium et fer, de la pauvreté en aluminium et sodium. L'eau n'est présentée qu'en traces (**quelques centièmes de pour cent**) et le fer trivalent est totalement absent, ce qui est assez extraordinaire. La composition chimique globale ne ressemble parfaitement à aucune roche terrestre ou météorite connue. Elle se rapproche de celles des basaltes terrestres et des eucrites météoritiques.

Des éléments rares, dont les teneurs sont très faibles dans les roches basaltiques terrestres, sont enrichis **de 10, 100 ou 1000 fois** dans les roches lunaires. Ce sont les zirconium, les hafnium, le baryum, l'yttrium, le chrome et les Terres Rares. Ces dernières, **au nombre de 14**, sont particulièrement intéressantes, car leurs proportions relatives, très bien connues dans les roches et minéraux terrestres et météoritiques, sont très significatives de l'histoire des matériaux inorganiques. Un appauvrissement marqué de l'euporium, la seule Terre Rare qui existe à la valence 2 au lieu des valences 3 et 4 habituelles, montre encore une fois que les roches lunaires se sont formées en l'absence d'oxygène.

Certains éléments métalliques comme le zinc, le thallium, le cadmium et le bismuth sont appauvris dans les roches lunaires (toujours relativement aux roches terrestres ou aux météorites). Cela peut être dû au dégazage final dont il a été question plus haut, ou à une température de cristallisation plus élevée pour la lune que pour la terre.

L'analyse des poussières est très importante, car c'est par elle que l'on peut tenter

d'apprécier l'importance des apports météoritiques. D'après les teneurs légèrement excédentaires en iridium, argent, nickel, cobalt et or, on estime cet apport (en météorites des divers types) à **1 ou 2%**. L'absence de plomb non-radiogénique et de mercure est intéressante, car ces éléments devraient également être enrichis par ces apports météoritiques. S'ils se volatilisent lors des impacts, on ne sait pas encore ce qu'il en advient par la suite.

La presse s'est beaucoup intéressée aux traces d'or et d'autres métaux précieux détectés dans les matériaux lunaires. Il faut insister sur l'absence totale d'intérêt économique de ces concentrations microscopiques, au risque d'anéantir de nombreux rêves d'opulence. Même si ces métaux étaient trouvés en concentrations supérieures à celles que l'on connaît sur terre (et nous avons vu plus haut que la géochimie s'y oppose implicitement), il faut se rendre compte que des exploitations minières à de telles distances, sous des conditions si rudes et avec des frais de transport qu'aucun homme d'affaire n'oserait évaluer, sont décourageantes pour de nombreuses décennies encore. Il est certain que les eaux de mer et de vaisselles ménagères (je parle de celles qui sont faites à la main nue) contiennent plus d'or immédiatement récupérable que les roches lunaires.

Datations absolues

Deux découvertes importantes sont à relever sous ce chapitre. Tout d'abord le **très grand âge des roches et poussières** qui va de **3,6 à 4,6 milliards d'années**.

Alors que sur terre l'âge le plus ancien que l'on ait trouvé (en Afrique du Sud) est **de 3,2 milliards**, et que d'une façon générale les roches très anciennes n'apparaissent que dans des zones très érodées ou sur des superficies très étroites, on est directement tombé sur la lune dans des formations dont l'âge correspond en gros à celui de formation de la terre. Cette observation peut servir de confirmation à l'idée déjà ancienne que tous les matériaux terrestres accessibles ont participé à plusieurs cycles de transport, activés à la fois par les phénomènes de convection du manteau et d'érosion / sédimentation, absents de la Lune.

La deuxième découverte est que les **poussières lunaires**, qu'un premier examen pourrait faire provenir des roches, sont en fait **plus âgées de 0,5 à 1 milliards d'années** que ces dernières. On a provisoirement attribué cette anomalie à la présence sur la Lune de roches encore plus anciennes qui se seraient mélangées aux poussières de la mer de la Tranquillité. Un rajeunissement apparent des roches dures pourrait aussi avoir été provoqué par leur fusion la plus récente.

Phénomènes d'impacts

De nombreuses preuves d'un bombardement continu de la surface lunaire ont été rassemblées : minéraux déformés, fracturés ou fondus, agglomérations de poussières et surtout, abondance de fragments de verres dans les poussières. A ce sujet, il est intéressant de noter que les roches dures ne contiennent pas de composante vitreuse, sauf des enduits superficiels produits sur place par les impacts. Si les verres ne se forment pas lors du refroidissement des roches épanchées, ils doivent se former ultérieurement, c'est-à-dire lors d'impacts de météorites ou d'éclats lunaires (impacts secondaires). Ces verres contiennent d'ailleurs régulièrement des gouttelettes de fer-nickel très finement dispersées, d'origine météoritiques. L'extrême fragmentation des grains de verres et de minéraux, leur haute teneur en un isotope d'aluminium d'origine solaire, et la fréquence des phénomènes de déformation cristalline montrent que les

impacts se produisent souvent et depuis très longtemps. Rappelons ici que les sismographes déposés par « Apollo-12 » enregistrent environ un événement semaine et par 100 km².

Chimie organique

Comme la plupart des chercheurs s'y attendaient, les méthodes analytiques raffinées utilisées ont détecté de faibles quantités de **composés carbonés** : hydrocarbures, porphyrines, acides aminés, carbures, oxyde de carbone, anhydride carbonique. Suivant les chercheurs et les échantillons, les réponses ont été positives ou négatives, donc très erratiques. L'origine des composés organiques est généralement attribuée à une contamination par les rétrofusées et par les manipulations de laboratoire. Cependant, les rapports isotopiques du carbone montrent que la totalité de ce dernier ne peut être d'origine terrestre, et que la teneur originale des poussières est de l'ordre de **10 microgrammes par grammes**. Comme on sait actuellement que des composés organiques peuvent se former par voie entièrement abiogène, personne n'a émis l'opinion que de très faibles quantités de composés organiques décelés pourraient avoir été produites par des organismes vivants. D'ailleurs, l'analyse des gaz libérés lors de la dissolution des poussières par l'acide fluorhydrique, qui attaque les silicates, montre qu'une part importante du méthane présent est incluse dans ces silicates, ce qui signifie que son entrée dans les structures très stables des minéraux remonte à la solidification des roches qui s'est produite **au dessus de 1.000°C**.

Micropaléontologie et microbiologie

La recherche de structures cellulaires microscopiques attribuables à des formes organisées de vie ancienne ou récente a été entièrement négative. Des cultures de poussières lunaires faites avec des méthodes de la bactériologie, dans une très large gamme de conditions de température, milieux nutritifs et atmosphère ont également été négatives. Il n'y a donc **aucune trace de vie actuelle ou passée** dans les poussières lunaires.

Comme on peut le voir, la moisson scientifique est abondante. Et encore n'avons-nous pu présenter qu'une faible partie des données immédiatement interprétables. Mais une masse énorme de chiffres, d'observations demandent à être étudiée, évaluée, critiquée. Toutes les conséquences des faits établis n'ont pas encore été déduites, et surtout, on ne sait pas encore ce que pensent les astronomes et astrophysiciens de ces données : il semble que des choses très fondamentales sortiront de ces mises en regard des compositions et densités des roches lunaires avec ce que l'on sait des moments d'inertie des planètes ou des nuages protoplanétaires.

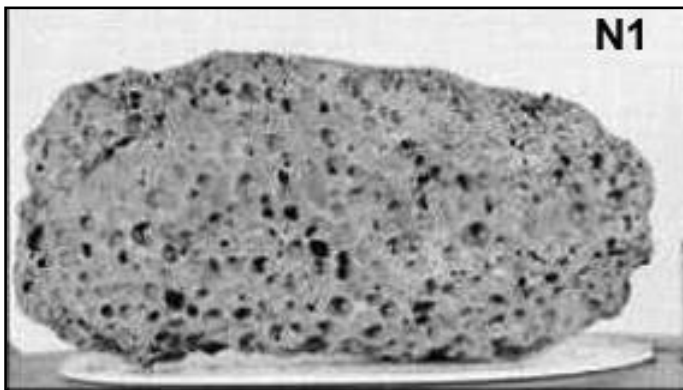
Une ère très excitante s'est ouverte pour la science, mais le grand public risque de rester longtemps sur sa faim de réponses claires et évidentes aux problèmes qu'il se pose à propos de la Lune et des planètes.

LES ECHANTILLONS LUNAIRES RAMENES SUR TERRE

La Lune est le seul objet du système solaire pour lequel des échantillons ont été ramenés sur Terre, ce qui a permis leur étude par des moyens classiques.

1. Quelques échantillons ramenés par les missions Apollo

L'**observation à l'oeil nu des échantillons** donne déjà des renseignements concernant **la structure et la composition** vraisemblable, comme pour tout échantillon terrestre.



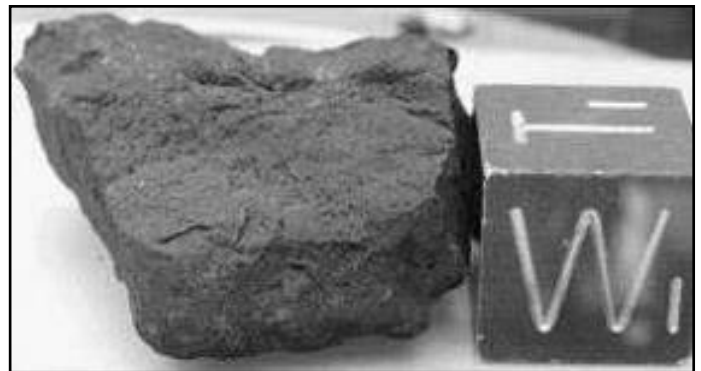
Basalte vésiculaire (échantillon 15016 - Apollo 15)

L'aspect poreux de cet échantillon le fait ressembler à une pierre ponce d'origine terrestre et traduit sa nature volcanique.

Basalte (échantillon 10049 - Apollo 11)

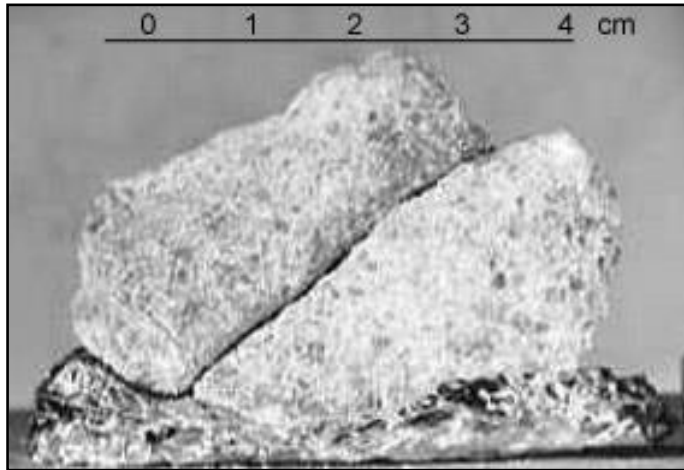
Le cube donné comme échelle mesure **1 cm de côté**.

Cette roche est typique des mers lunaires. Sa couleur est, sur Terre, caractéristique des roches volcaniques riches en oxyde de fer.



Gabbro anorthositique

Dans cette roche le minéral dominant est représenté par un feldspath. La zone noire de surface correspond à du verre dont la formation semble liée à la fusion due à un impact météoritique.



Dunite bréchique (échantillon 72415,0 - mission Apollo 17)
Origine : Station 2 (South Massif)

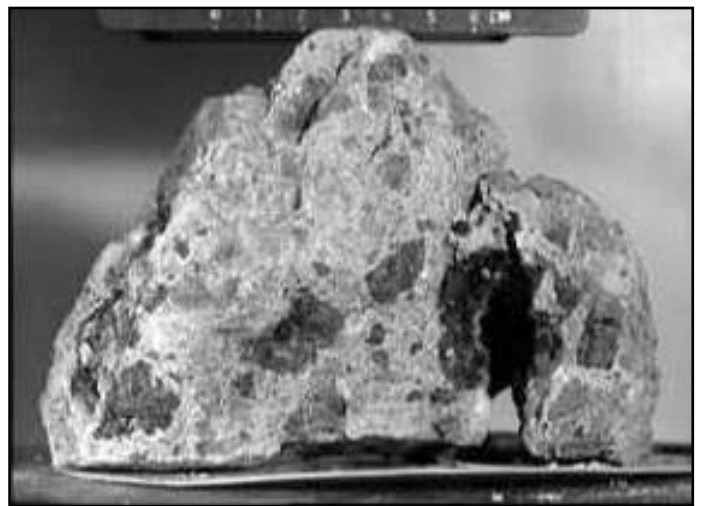
Masse 32 grammes

Cette dunite est une variété de péridotite composée à **90 %** d'olivine. Roche grenue, plutonique, ultrabasique et de **densité 3,5**, son origine semble être profonde. Son aspect bréchique est lui aussi lié à des impacts météoritiques.

Brèche "blanche"

(Echantillon no. 67015 - mission Apollo 16)

Récolté sur le bord du cratère North Ray, sa matrice claire est formée de minéraux finement fracturés, elle lie entre eux des éléments de roches de nature et d'origine diverses. Le minéral dominant est le feldspath. La composition des inclusions anguleuses noires, à grain très fin, n'est pas déterminable à l'oeil nu.



Brèche sombre

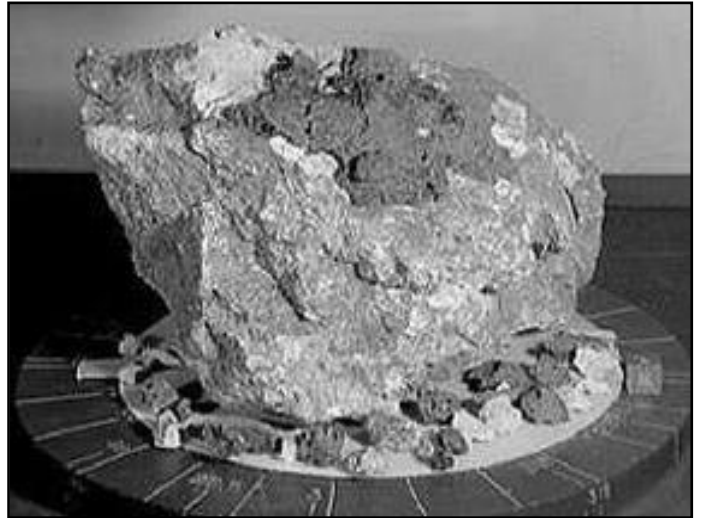
(Echantillon no. 68815 - mission Apollo 16)

Ce fragment provient d'un bloc rocheux de la station 8, mesurant **1,20 mètre de haut sur 1,5 mètre de long**. Cet échantillon très dur comporte de multiples types d'inclusions. Dans la matrice sombre on trouve de nombreuses particules métalliques.

Un prélèvement de sol a été fait au pied de ce bloc pour permettre d'étudier l'érosion des matériaux de surface de la lune.

**Brèche entourée de fragments
basaltiques sombres provenant des
"mers" et de fragments clairs
caractéristiques des Hautes Terres.**
(Mission-Apollo-17)

Les fragments constitutifs de cette brèche représentent des débris d'éjectas d'impact météoritique. Les différents fragments peuvent provenir d'une assez grande distance et représenter un véritable échantillonnage des éléments rocheux de la zone d'impact. Les échantillons sombres disposés autour de la brèche sont des basaltes, les éléments clairs proviennent des Hautes Terres. Ces fragments sont riches en feldspath grisâtre calco-sodique. C'est ce feldspath qui donne sa couleur claire et donc son albédo élevée aux roches de ces régions.



Felsite (échantillon n° 12013 - mission Apollo 12)

Cette roche est très différente des autres échantillons lunaires. Il s'agit ici d'un équivalent microcristallin d'un granite. La silice est présente en quantité anormalement élevée par rapport aux roches lunaires connues. Des exemples similaires ont été trouvés sur d'autres sites en particulier au cours de la mission Apollo 14.

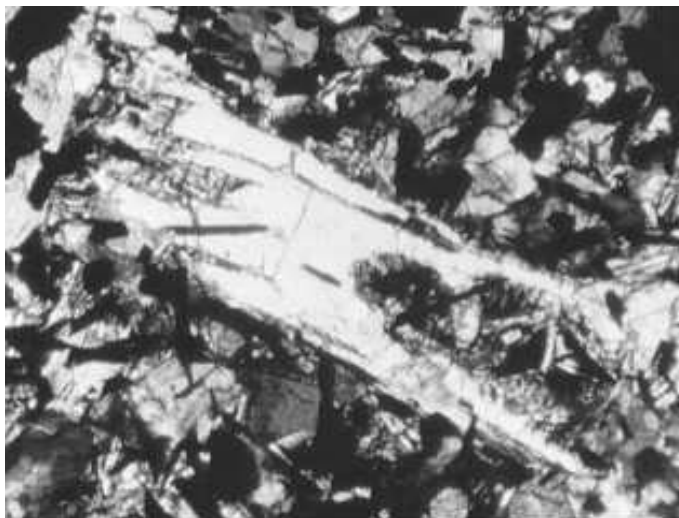
Source des photographies :

<http://epsc.wustl.edu/admin/resources/moon/howdoweknow.html>

et <http://www.apolloexplorer.co.uk/>

Echantillons ramenés par les missions soviétiques en vol automatique (300 g)	date	Site :
Luna 16	12 - 09 - 70	Mer des Crises - surface
Luna 20	14 - 02 - 72	- surface
Luna 24	09 - 08 - 76	- à 2 m de profondeur,
Echantillons ramenés par les missions habitées américaines		
Apollo 11 ----- 21,75 kg	16 - 07 - 69	Mer de la Tranquillité
Apollo 12 ----- 34,3 kg	14 - 11 - 69	Océan des Tempêtes
Apollo 14 ----- 42,8 kg	31 - 01 - 71	Faïlle Hadley
Apollo 15 ----- 70,7 kg	26 - 07 - 71	Faïlle Hadley
Apollo 16 ----- 94,3 kg	16 - 04 - 72	Plateau Descartes
Apollo 17 ----- 110,4 kg	07 - 12 - 72	Taurus-Littrow

2. Un des premiers échantillons étudiés au microscope

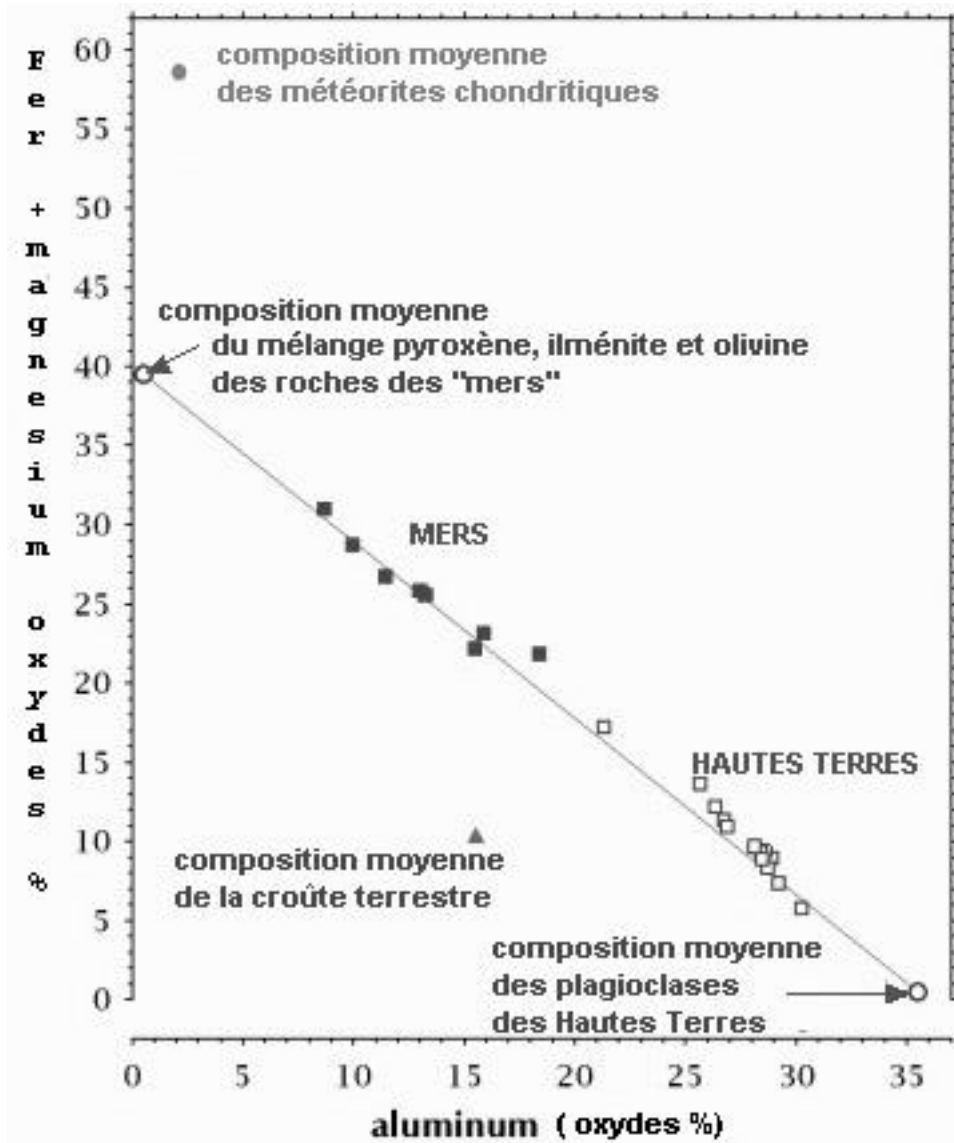


(échantillon 10022 - mission Apollo 11)
Lumière polarisée analysée
Taille de la photographie : 1 cm
Le phénocrystal est constitué par un pyroxène partiellement altéré.
Minéraux bleu clair et blancs : plagioclases.
Minéraux noirs : ilménite (oxyde de fer et de titane).
Minéraux bleus et verts ou orange et rouge : pyroxène.
La roche de structure microcristalline a une composition pauvre en silice mais riche en fer. Il s'agirait donc d'une roche ressemblant à un basalte ou un microgabbro.

La croûte lunaire est formée essentiellement par 4 minéraux : **feldspath plagioclase**, **pyroxène**, **olivine** et **ilménite** représentent 98% des matériaux cristallisés des roches. Une grande partie des roches est formée par du verre, mais son analyse révèle les mêmes composants chimiques que l'ensemble des minéraux. Les 2% restants sont composés par des feldspaths potassiques et des oxydes, en particulier de fer.

Composition moyenne du sous-sol	
silicium	20 %
magnésium	19 %
fer	10,2 %
aluminium	3,2 %
calcium	3,2 %

Ce diagramme souligne la dualité de la croûte lunaire entre "Mers" et Hautes Terres.



Pratiquement tout l'aluminium des roches est contenu dans les plagioclases, le fer et le magnésium dans les pyroxènes, l'olivine et l'ilménite. Il est frappant que toutes les roches d'origine lunaire sont alignées sur ce diagramme. On peut donc prévoir que toute météorite dont la position dans le diagramme ne correspond pas à cet axe ne peut en aucun cas provenir de la Lune.

Les roches d'origine terrestre ne peuvent qu'exceptionnellement faire partie de cet ensemble, ainsi que le montre sur le diagramme la position de la moyenne des roches magmatiques terrestres.

Nomenclature des roches lunaires	Composition minéralogique
Roches caractéristiques des Hautes Terres	
anorthosite	>90% plagioclase
anorthosite noritique et norite anorthositique	60-90% plagioclase, pour le reste surtout de l'orthopyroxène
anorthosite gabbroïque et gabbro anorthositique	60-90% plagioclase, pour le reste surtout du clinopyroxène
anorthosite troctolitique et troctolite anorthositique	60-90% plagioclase, pour le reste surtout de l'olivine
norite	10-60% plagioclase, pour le reste surtout de l'orthopyroxène
gabbro	10-60% plagioclase, pour le reste surtout du clinopyroxène
troctolite	10-60% plagioclase, pour le reste surtout de l'olivine
Basaltes caractéristiques des mers lunaires	
Composition variable	feldspath, pyroxène, olivine et illménite
Brèches	
Composition très variable : dans une même brèche on peut trouver des éléments provenant des mers et des Hautes Terres, en fonction de la localisation des impacts météoritiques de grande taille.	
source : http://epsc.wustl.edu/admin/resources/moon/howdoweknow.html	

Source : <http://www.educnet.education.fr/planeto/res/spectroplanetosite/microsc.htm>