

Apollo 11

Récit d'un voyage lunaire

Le 12 septembre 1962, durant son discours prononcé à l'université Rice (États-Unis), le président américain John Fitzgerald Kennedy (1917-1963) annonce ce qui deviendra le projet le plus ambitieux de toute l'histoire de l'exploration spatiale.

« NOUS ALLONS ENVOYER SUR LA LUNE, A PLUS DE 380 000 KILOMETRES DU CENTRE DE CONTROLE DE HOUSTON, UNE FUSEE GEANTE DE PRESQUE 100 METRES DE HAUT, LA LONGUEUR DE CE TERRAIN DE FOOTBALL, FABRIQUEE AVEC DE NOUVEAUX ALLIAGES DONT CERTAINS N'ONT PAS ENCORE ETE INVENTES, CAPABLES DE SUPPORTER UNE CHALEUR ET UNE PRESSION PLUSIEURS FOIS SUPERIEURES A CELLES JAMAIS EXPERIMENTEES, ASSEMBLEE AVEC UNE PRECISION SUPERIEURE A CELLE DES MEILLEURES MONTRES, INCORPORANT TOUS LES EQUIPEMENTS NECESSAIRES A LA PROPULSION, AU GUIDAGE, AU CONTROLE, AUX COMMUNICATIONS, A L'ALIMENTATION ET A LA SURVIE, POUR ACCOMPLIR UNE MISSION ENCORE JAMAIS TENTEE, VERS UN CORPS CELESTE INCONNU, QUE NOUS FERONS REVENIR SUR LA TERRE, OU ELLE FERA SON ENTREE DANS L'ATMOSPHERE A UNE VITESSE PROCHE DE 40 000 KM/H, GENERANT UNE TEMPERATURE ATTEIGNANT LA MOITIE DE CELLE QUI REGNE A LA SURFACE DU SOLEIL, PRESQUE AUSSI CHAUDE QU'AUJOURD'HUI ET QUE NOUS SOMMES DETERMINES A LE FAIRE, LE FAIRE BIEN, ET LE FAIRE LES PREMIERS AVANT LA FIN DE LA DECENNIE, POUR CELA NOUS DEVONS FAIRE PREUVE D'AUDACE. »

Son propos résume alors toute la difficulté de cette entreprise, à une époque où la « conquête spatiale » ne fait que débiter, cinq ans après le lancement du premier satellite artificiel. Ce sont les prémices d'une course technologique effrénée entre les États-Unis et l'URSS (Union des républiques socialistes soviétiques). Une course dont l'apothéose sera le premier pas de Neil Armstrong (1930-2012) sur la surface de la Lune le 21 juillet 1969. Le plus difficile n'est pourtant pas de fouler le sol lunaire, mais d'effectuer le voyage entre la Terre et son satellite. Un exploit retracé ici pour le cinquantenaire de la mission Apollo 11.

De la Terre à la Lune

Le 16 juillet 1969 à 13 h 32 m 00 s UT¹, la fusée Saturn V décolle du complexe 39A du Kennedy Space Center à Cap Canaveral (États-Unis). Le lanceur de 110 mètres de haut emporte les astronautes Armstrong, Buzz Aldrin et Michael Collins à destination de la Lune, au cours de la onzième mission du programme Apollo de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Apollo 11 n'est pourtant pas la première mission habitée à destination de la Lune. Apollo 8, en décembre 1968, et Apollo 10, en mai 1969, ont déjà envoyé des équipages en direction du satellite naturel. Cependant, ces

missions ne se sont pas posées à la surface sélène. Leur rôle était de tester les technologies et techniques utilisées pour la suite du programme Apollo. En 1969, Apollo 11 décolle donc avec le but d'atteindre le sol lunaire.

Le lanceur Saturn V fonctionne sur le principe des fusées à étages décrit en 1919 par l'ingénieur américain Robert H. Goddard (1882-1945) dans son livre *A Method of Reaching Extreme Altitudes*. Le procédé est le suivant : un objet capable de créer une réaction chimique propulsant du gaz dans une direction (action) sera propulsé dans la direction opposée (réaction). C'est le principe des fusées à eau dont la pression expulse l'eau vers le sol, propulsant la fusée dans les airs en réaction. Mais pour gagner en efficacité, Goddard imagine qu'il sera préférable d'installer une autre fusée au sommet de la première. Ainsi, le décollage du premier lanceur permet d'en envoyer un second à une altitude plus élevée, lui permettant d'initier sa propulsion plus tard. En multipliant ainsi les « étages » de fusée, il est possible de créer un lanceur capable d'atteindre de grandes altitudes en réduisant la masse, puisque chaque lanceur « vide » peut ensuite être largué. La fusée Saturn V utilisée pour la mission Apollo 11 comporte trois étages. Au sommet, dans ce qui constitue le quatrième étage de la fusée,

¹ Universal Time. Le temps universel (UT) est une référence de temps au niveau international. Cette dernière est définie sur le temps moyen de Greenwich. Pour obtenir l'heure légale aujourd'hui en France, il convient d'ajouter une heure en hiver ou deux heures en été. En 1969, l'heure

d'été n'est cependant pas encore instaurée en France, et il convient d'ajouter une heure au temps UT pour obtenir l'heure légale.

se trouvent le module de commande et de service (CSM, Command/Service Module) et le module lunaire (LEM, Lunar Excursion Module). Le CSM est le vaisseau contenant l'équipage. Il constitue le poste de pilotage de la mission en orbite terrestre ou lunaire et durant le trajet Terre-Lune. Le LEM est quant à lui le vaisseau destiné à se poser sur la Lune et servant de base pour les astronautes en exploration.

Pour Apollo 11, le vol de la fusée Saturn V à trois étages est entièrement automatisé et calibré à la seconde près (fig. 1). Après 2 minutes et 42 secondes et une altitude de 56 kilomètres, les moteurs du premier étage se coupent, sont éjectés et le deuxième étage prend le relais. Après 9 minutes et 8 secondes et une altitude de 185 kilomètres, le deuxième étage est largué et les moteurs du troisième et dernier étage s'allument. Onze minutes et 39 secondes après le décollage, les moteurs s'arrêtent : Apollo 11 est en orbite basse à 190 kilomètres de la surface.

Au cours des premières minutes en orbite, les différentes stations radio se relaient autour du monde (aux Canaries et en Australie notamment) pour suivre le signal du vaisseau Apollo 11 et déterminer sa trajectoire exacte. Cette étape est nécessaire pour deux raisons. Premièrement, s'assurer que le vaisseau est bien en orbite et ne va pas

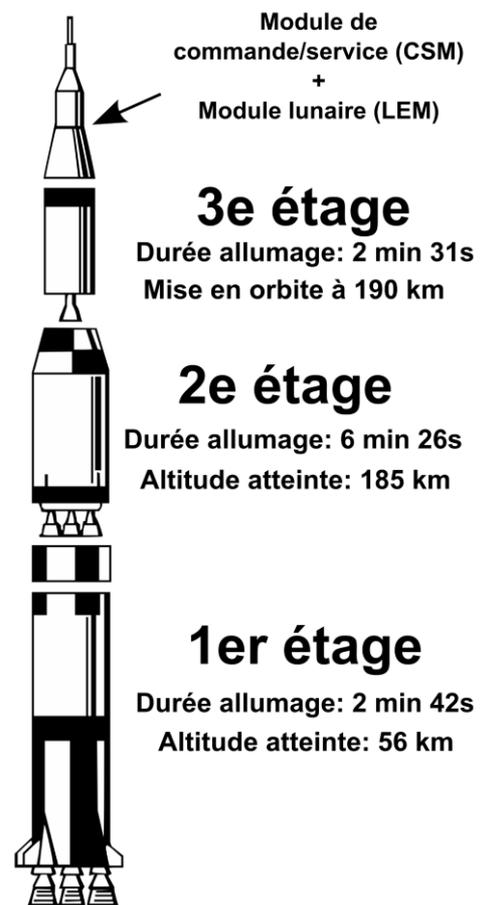


Figure 1 – Schéma de la fusée Saturn V et de ses différents étages activés au cours du lancement. Le sommet de la fusée contient le vaisseau, l'équipage et le matériel à destination de la Lune. © A. Richard.

retomber dans l'atmosphère. Deuxièmement, connaître la trajectoire exacte est nécessaire pour déterminer à quel moment la manœuvre pour rejoindre la Lune doit être réalisée. Après le décollage, le vaisseau a donc atteint une orbite quasi circulaire autour de la Terre, avec une période de 1 heure et 28 minutes et une vitesse moyenne de près de 28 000 kilomètres par heure. La prochaine étape consiste à passer de l'orbite quasi circulaire

autour de la Terre à une trajectoire elliptique allant jusqu'à la Lune. Il s'agit de l'orbite de transfert.

circulaire durant les premières heures de vol. Cette altitude maximale de 198 kilomètres est insuffisante pour atteindre la

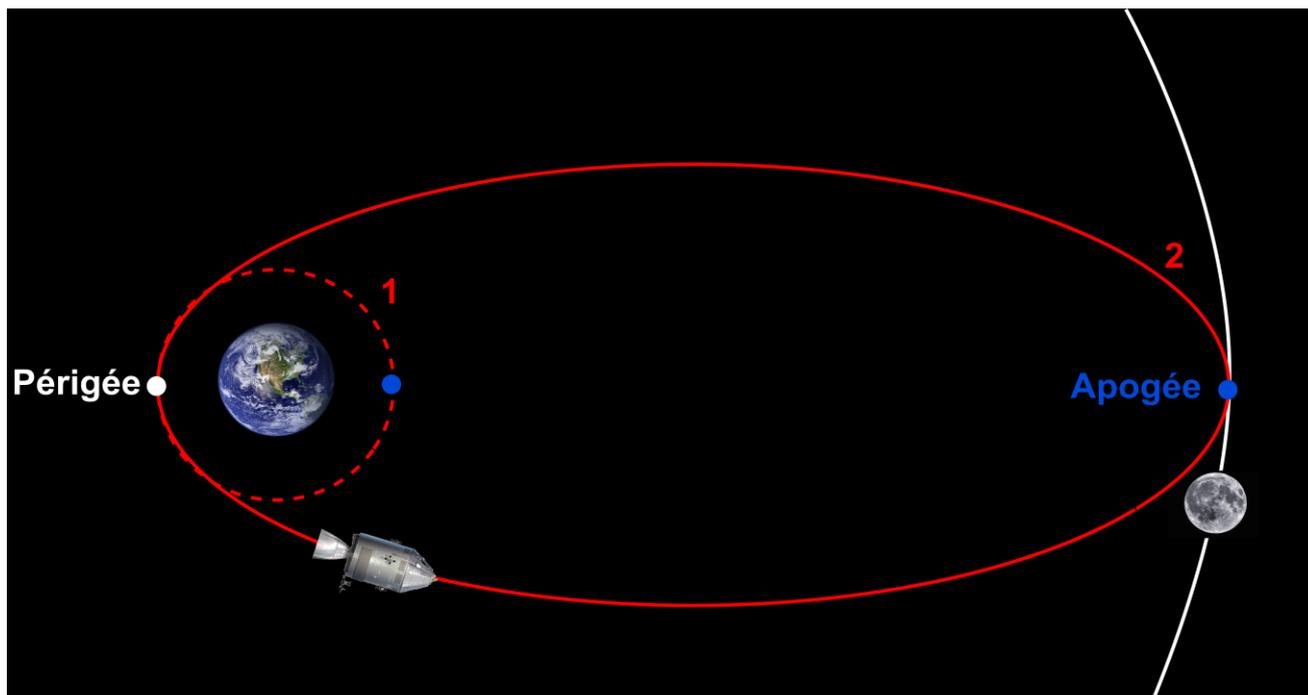


Figure 2 - Après le décollage, le vaisseau évolue sur une orbite quasi circulaire (1) à une altitude d'environ 190 kilomètres. En accélérant lors du passage au périgée, l'orbite s'allonge (2) jusqu'à ce que l'apogée atteigne l'orbite de la Lune à près de 380 000 km. © A. Richard.

L'orbite de transfert, ou trajectoire d'Hohmann, est une trajectoire intermédiaire entre deux objets du Système solaire. La première des trois lois de la mécanique céleste énoncée par l'astronome Johannes Kepler (1571-1630) dès 1609 stipule qu'un objet se déplace autour d'un corps massif sur une trajectoire elliptique. Ainsi, le vaisseau Apollo tourne autour de la Terre sur une ellipse dont le périgée (point le plus proche de la Terre) se trouve à une altitude de 194 kilomètres et l'apogée (point le plus éloigné de la Terre) à 198 kilomètres. La trajectoire d'Apollo 11 est donc presque

Lune située à près de 380 000 kilomètres. Pour y parvenir, une solution existe : augmenter la distance de l'apogée. L'orbite circulaire va s'étirer alors, de telle manière que le périgée restera à 194 kilomètres, mais que lors de son apogée, le vaisseau aura couvert la distance le séparant de la Lune (fig. 2).

Pour allonger l'orbite et augmenter la distance de l'apogée, il faut gagner de la vitesse. Sur la trajectoire circulaire autour de la Terre, la vitesse d'Apollo 11 est d'environ 28 000 km/h. Atteindre la Lune nécessite une vitesse d'environ 39 000

km/h, soit un gain de plus de 10 000 km/h ! Deux heures et 44 minutes après le décollage, Apollo 11 rallume le moteur du dernier étage de la fusée pendant exactement 5 minutes et 47 secondes, gagnant ainsi suffisamment de vitesse pour atteindre une distance de 380 000 kilomètres. Cette nouvelle trajectoire, bien que s'éloignant grandement de la Terre, demeure malgré tout une orbite elliptique géocentrique. Par conséquent, si rien ne vient modifier la route du vaisseau, il reviendra vers la Terre et repassera au périgée à 194 kilomètres de la surface. Trois heures après le décollage, Apollo 11 est donc en route vers la Lune à une vitesse de 39 000 km/h.

380 000 kilomètres de vide

Lors du transfert vers la Lune, une manœuvre importante et dangereuse reste à réaliser. Après le décollage, le CSM occupe le sommet du troisième étage de la fusée. Sous celui-là se trouve le LEM, dans un autre compartiment de l'étage. Le CSM doit donc se détacher de la fusée en se servant de ses propres propulseurs, se retourner et s'amarrer au LEM afin de l'extraire de son compartiment (Figure 3). Un rendez-vous spatial nécessaire afin de pouvoir utiliser le module destiné à se poser sur le sol lunaire. Une fois l'amarrage effectué, LEM et CSM ne forment qu'un seul et même vaisseau qui se

détache du dernier étage de la fusée. L'étage devenu inutile est envoyé alors sur une trajectoire autour du Soleil, où il continue d'évoluer encore aujourd'hui.

Le 17 juillet 1969, après 22 heures de vol et une nuit de sommeil, les astronautes reçoivent de Houston les informations du jour : la sonde automatique Luna 15 envoyée par l'URSS se dirige vers la Lune, le vice-président américain appuie le projet d'envoyer un Homme sur Mars d'ici 2000 et un mini-sous-marin est à la recherche du monstre du Loch Ness. Mais leur voyage n'est pas de tout repos. De nombreuses activités les occupent durant le transfert de la Terre vers la Lune, notamment préparer les corrections de trajectoire. En effet, afin d'arriver de façon précise dans le voisinage

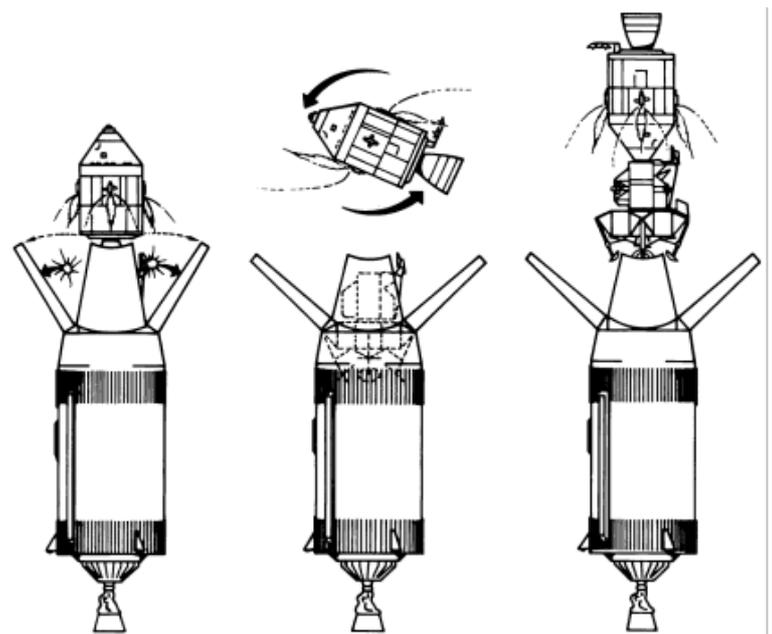


Figure 3 - Manœuvre d'amarrage entre le module de commande/service (CSM) et le module lunaire (LEM) durant le trajet vers la Lune. © NASA.

de la Lune, le vaisseau doit réaliser quelques manœuvres. Cela commence par une détermination de sa position et de sa vitesse : ces informations sont données conjointement par les mesures radio depuis la Terre et par les observations au sextant de l'équipage d'Apollo 11, qui se repère grâce aux étoiles et l'horizon de la Terre désormais lointaine (fig. 4). Une fois la position

l'orientation du vaisseau. En effet, afin d'éviter que la chaleur des rayons du Soleil ne s'accumule sur une partie de la surface du vaisseau, celui-là est mis en rotation lente. Ainsi, le Soleil éclaire progressivement tout le vaisseau, répartissant la chaleur. Conséquence de cette manœuvre, les paraboles dédiées à la communication avec la Terre ne pointent pas toujours dans la

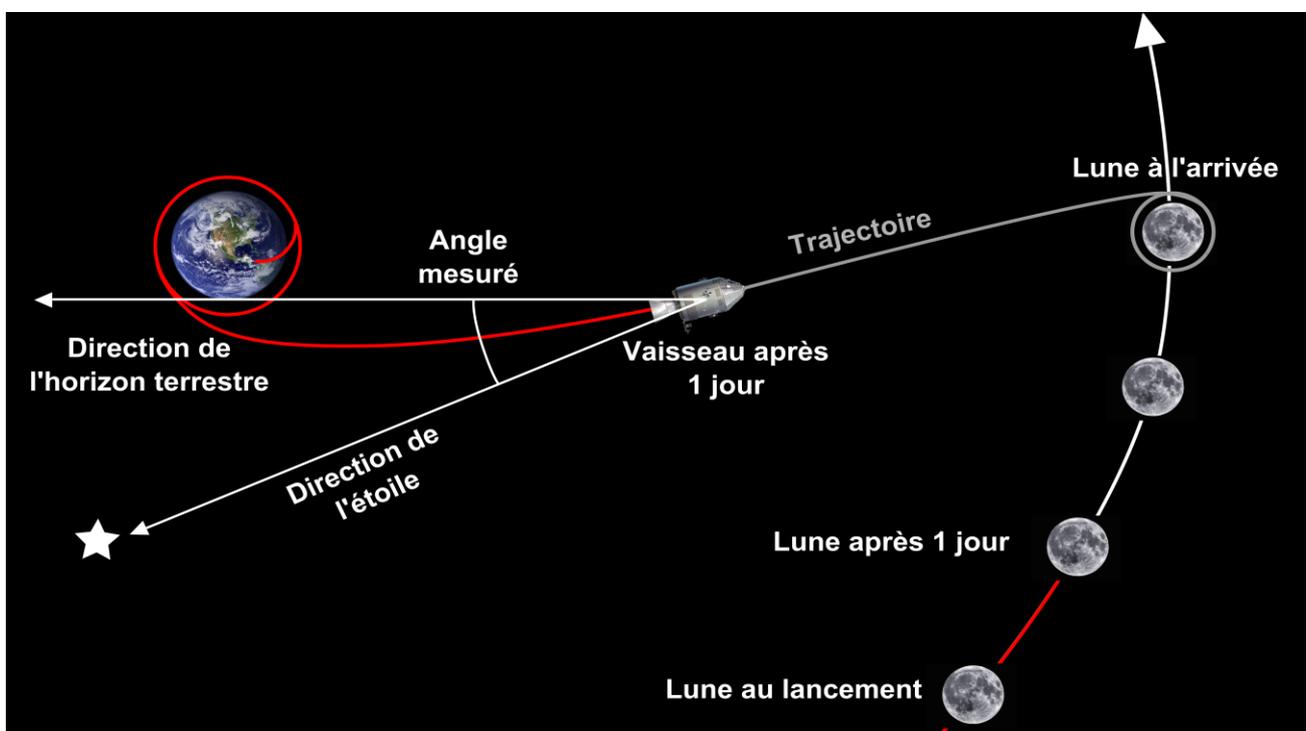


Figure 4 - . Principe du positionnement du vaisseau au sextant. En mesurant l'angle entre une étoile connue et l'horizon terrestre, et en répétant la mesure avec deux autres étoiles, le vaisseau peut connaître sa position par triangulation. Cette mesure est complémentaire des mesures radios effectuées depuis la Terre. © NASA/ A. Richard

déterminée, Apollo 11 prépare un allumage du moteur du module de commande pendant 3 secondes. Une durée bien faible, mais qui fait gagner 6,5 mètres par seconde et suffit pour ajuster précisément la trajectoire.

Le voyage se poursuit sans encombre, ponctué régulièrement par la perte du signal radio entre l'équipage et la Terre du fait de

bonne direction et les conversations ne cessent de se brouiller ou se couper. Ce temps de transfert vers la Lune est l'occasion d'obtenir également des images télévisées de la Terre et de la vie à bord du module de commande, qui seront retransmises aux États-Unis. Les astronautes partagent ainsi leur vue unique de la planète, du cockpit du

vaisseau et de leurs travaux à bord avec les équipes et le public sur Terre.

Après 61 heures de vol, et au cours de la troisième nuit des astronautes, le vaisseau quitte la *sphère d'influence* de la Terre pour entrer dans celle de la Lune. Ce moment marque une transition importante dans le plan de vol. En effet, l'orbite de transfert suivie par Apollo 11 est géocentrique. Le vaisseau est piégé dans l'attraction gravitationnelle de la planète et sa trajectoire, bien que très elliptique, demeure

autour de la Terre. Or, d'après la loi de gravitation universelle d'Isaac Newton (1643-1727), plus l'objet s'éloigne de l'astre attracteur, plus l'attraction est faible. Ainsi, en s'éloignant de la Terre, le vaisseau est moins attiré par la planète. En contrepartie, il s'approche de la Lune et l'attraction exercée par celle-là augmente en conséquence. Il existe un moment charnière où l'attraction exercée par la Lune sur le vaisseau dépasse celle exercée par la Terre. Le vaisseau quitte alors son orbite autour de

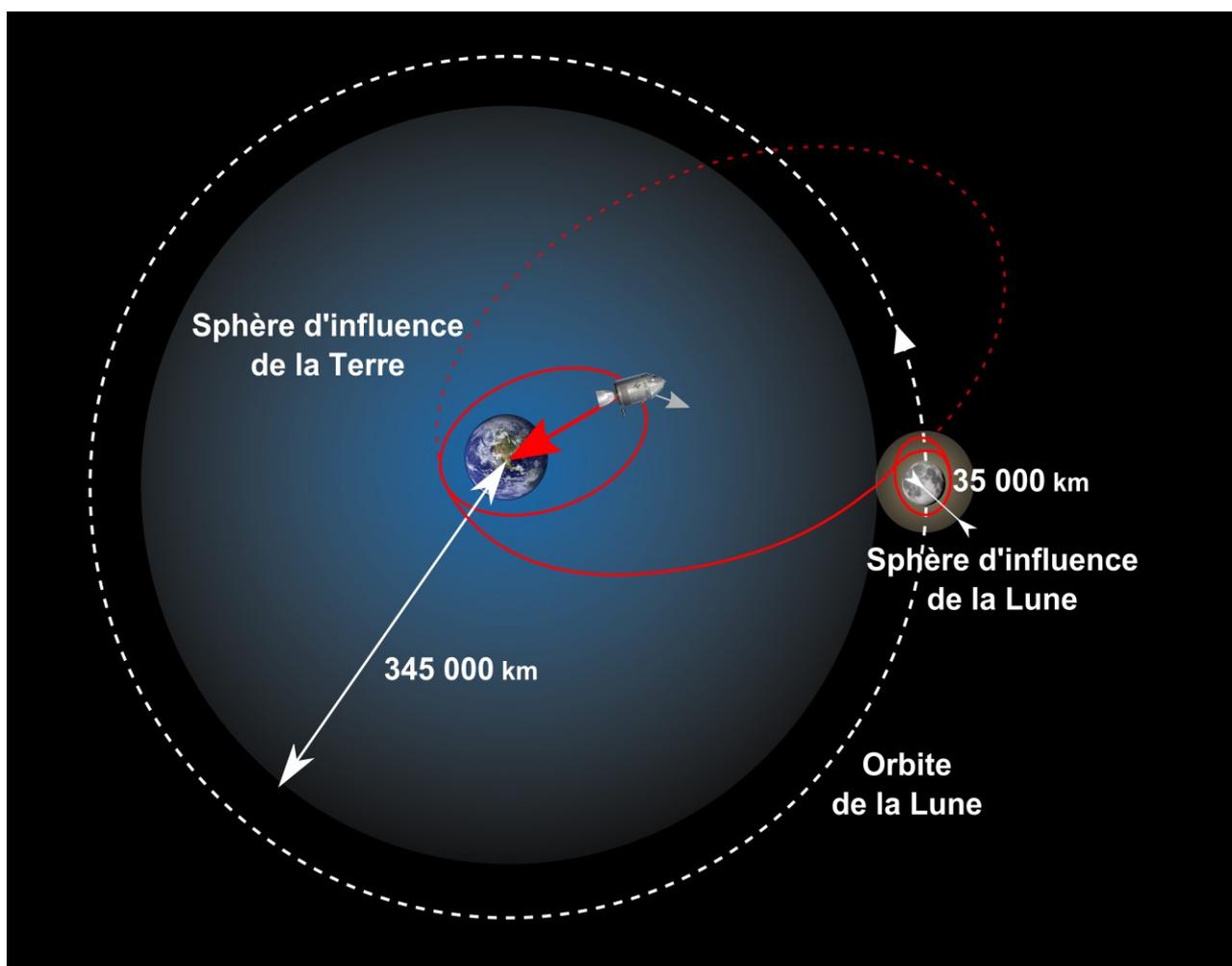


Figure 5 - L'attraction des astres peut être représentée sous la forme de sphères d'influence. À l'intérieur d'une sphère, l'attraction de l'un des astres domine. Un vaisseau en orbite autour de la Terre demeurera sur une trajectoire géocentrique à l'intérieur de la sphère d'influence de la Terre. Mais lorsque le vaisseau franchit la sphère d'influence de la Lune (plus petite car moins massive), celui-là quitte sa trajectoire géocentrique pour orbiter autour de la Lune, devenue alors l'astre dominant. © A. Richard.

la Terre pour entrer dans une orbite autour de la Lune.

Ce phénomène peut être représenté par des sphères d'influence (fig. 5). Lorsque le vaisseau se trouve dans la sphère d'influence de la Terre, l'attraction de la planète domine par rapport à celle de la Lune et la trajectoire est géocentrique. À l'intersection des deux sphères, le vaisseau est attiré autant par la Terre que la Lune. Mais lorsqu'il entre dans la sphère d'influence de la Lune, l'attraction du satellite domine et la trajectoire devient sélénocentrique (centrée sur la Lune). Puisque la Terre est près de quatre-vingt-une fois plus massive que la Lune, il peut être estimé que la sphère d'influence de la Terre est neuf fois plus grande que celle de la Lune, et l'attraction du satellite domine lorsque le vaisseau s'est éloigné de près de 350 000

kilomètres. Tout l'enjeu des trajectoires de transfert réside ici : réussir à quitter la sphère d'influence de l'astre d'origine pour pénétrer dans celle de l'astre visé. Cela nécessite donc de prévoir la position des objets d'origine et d'arrivée dans le temps, ainsi que la durée du trajet entre les deux.

Arrivée autour de la Lune

En approchant de la Lune, Apollo 11 doit réaliser une dernière manœuvre importante : freiner. Sans freinage, la vitesse acquise pour atteindre la Lune amènera le vaisseau à faire le tour de la Lune et à repartir, telle une fronde, en direction de la Terre. Cette trajectoire, bien que problématique quand il s'agit de se poser sur la Lune, est cependant très pratique : si par malchance un problème se produit dans le vaisseau durant le trajet Terre-Lune, celui-là

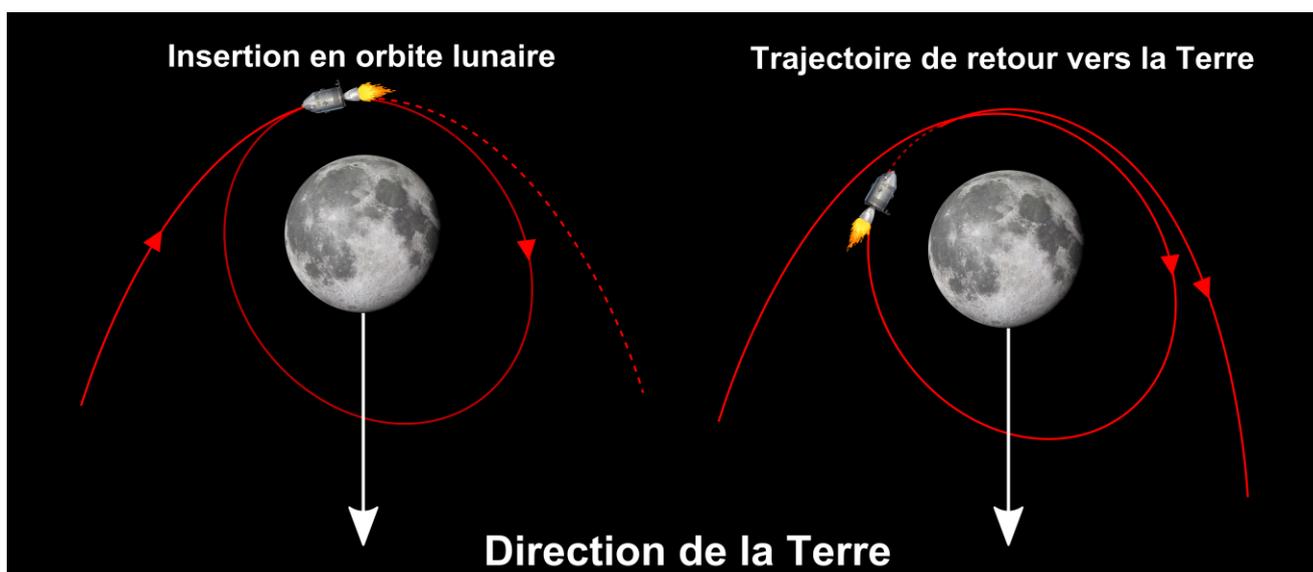


Figure 6 - Scénarios de trajectoire lunaire. À l'arrivée, le vaisseau accélère dans le sens rétrograde pour diminuer sa vitesse d'approche et se satelliser. Pour quitter l'orbite lunaire, à la fin de mission ou en cas de problème, une accélération sur la trajectoire elliptique permet au vaisseau de repartir vers la Terre. © A. Richard

reviendra vers la Terre avec un effort minimal. C'est notamment ces trajectoires dites de *retour libre* qui permettront de ramener l'équipage de la mission Apollo 13 en vie après l'explosion d'un de leurs réservoirs d'oxygène. Pour se satelliser

l'ordinateur de bord après 75 heures de vol, alors qu'Apollo 11 passe derrière la Lune et que toute communication radio avec la Terre est coupée (fig. 6). En cas de problème durant cette injection en orbite lunaire (LOI), trois scénarios différents ont été

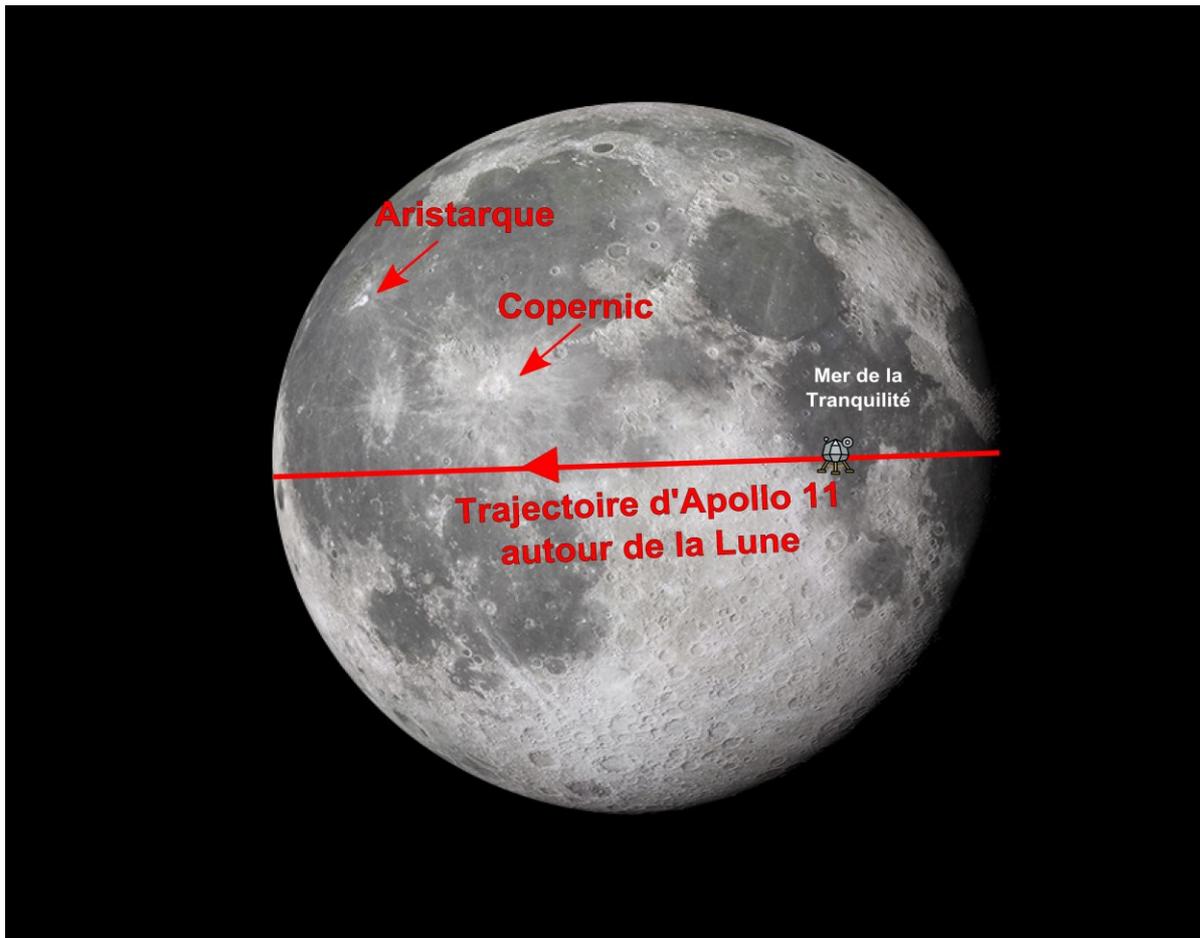


Figure 7 - Partie de la Lune survolée par Apollo 11. Le symbole du LEM représente le site d'alunissage de la mission. Les cratères Aristarque et Copernic sont indiqués sur la face visible de la Lune. © NASA / A. Richard.

autour de la Lune, la vitesse du vaisseau doit donc diminuer. Pour freiner dans le vide de l'espace, il faut paradoxalement accélérer... dans le sens inverse ! L'équipage d'Apollo 11 retourne donc le vaisseau afin de rallumer les moteurs, accélère à contre-sens pendant six minutes et réussit ainsi à réduire la vitesse. Cette manœuvre est effectuée par

envisagés par la NASA pour permettre un retour vers la Terre. Rien n'est laissé au hasard... Après l'injection en orbite lunaire et un premier tour de Lune sur une trajectoire elliptique, le vaisseau rallume les moteurs durant 17 secondes pour circulariser l'orbite à environ 120 kilomètres de la surface de la Lune.

La trajectoire d'Apollo 11 passe désormais au-dessus de l'équateur de la Lune. À chaque révolution autour du satellite, l'équipage survole le site d'alunissage prévu dans la mer de la Tranquillité, repérant les cratères et reliefs environnants (fig. 7). Au cours de ces premières orbites lunaires, l'équipage prépare également le LEM pour la descente et l'alunissage.

Au cours de leur treizième orbite lunaire, Armstrong et Aldrin embarquent dans le LEM, tandis que Collins pilote le CSM en orbite. Après 100 heures et 12 minutes de vol, le module lunaire (nom de code : Eagle) se détache du module de commande (nom de code : Columbia). La séparation a lieu derrière la Lune ; et après rétablissement du signal avec la Terre, Houston communique désormais avec les deux vaisseaux évoluant autour de la Lune de façon indépendante. Aldrin, pilote du module de commande, et Armstrong, commandant de la mission, entament leur descente vers la Lune à bord d'Eagle.

À 50 kilomètres de la surface, le module lunaire est penché sur le côté, de telle façon que la surface lunaire est visible pour les membres d'équipage par les fenêtres situées au sommet du module. Ainsi, ils peuvent suivre la vitesse à laquelle défilent les cratères et repères au sol, et calculer leur altitude. La descente est gérée par l'ordinateur de bord, qui règle la vitesse et

l'orientation du vaisseau en continu. En observant la surface, Armstrong sait au bout des trois premières minutes de descente qu'Eagle se posera près de 5 kilomètres plus loin que le site d'alunissage initialement prévu, en raison d'une trop grande vitesse. Après 5 minutes de descente et à une altitude de 12 kilomètres, le module est orienté les pieds vers le sol lunaire pour permettre au radar de déterminer précisément l'altitude de vol. Grâce aux données radar, l'ordinateur de bord contrôle précisément la descente à la manière d'un hélicoptère. Une minute plus tard, une alarme se déclenche dans le cockpit. Les deux astronautes l'annoncent à Houston ; l'ordre est donné de l'ignorer. Les alarmes reviendront à plusieurs reprises durant la descente, mais la manœuvre continue malgré tout. À 200 mètres de la surface, Armstrong prend le contrôle manuel du module. Le lieu d'alunissage vers lequel l'ordinateur de bord dirige le module est couvert de rochers de grande taille (jusqu'à 2 ou 3 mètres), rendant la manœuvre très périlleuse. Armstrong décide alors de le faire voler en rase-motte plus loin et, puisant dans les dernières ressources de carburant, parvient à poser le module lunaire à l'ouest de la cible. Douze minutes après le début de la descente, Eagle touche le sol lunaire. Apollo 11 est sur la Lune.

Sept heures après l'alunissage, Armstrong franchit le sas et descend l'échelle menant à la surface. Après un périple de 109 heures pour amener Apollo 11 jusqu'à la surface lunaire, il devient le premier être humain à fouler le sol d'un corps extraterrestre sous les yeux de 600 millions de téléspectateurs sur Terre. Cinquante ans plus tard, l'exploration spatiale a permis de nombreuses avancées tant scientifiques que

technologiques. À l'heure où l'exploration humaine de Mars est envisagée, l'histoire d'Apollo 11 et de son équipage reste gravée dans l'histoire de l'humanité pour la postérité. Un premier pas pour l'Homme...

Par Andy Richard, médiateur scientifique en astronomie - Palais de la Découverte (Paris)

Contact : andy.richard@universcience.fr

Sources :

Lunar Flight Study Series - NASA

(<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?N=0&Ntk=All&Ntt=lunar%20flight%20study%20series&Nx=mode%20matchallpartial>)

Dynamical Systems, the Three-Body Problem and Space Mission Design - Wang Sang Koon, Martin W. Lo, Jerrold E. Marsden, Shane D. Ross - 2011

(http://www.cds.caltech.edu/~koon/book/KoLoMaRo_DMissionBook_2011-04-25.pdf)

Apollo 11 Lunar Surface Journal - NASA

(<https://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/a11.html>)

