

La conquête spatiale

Généralités

L'aventure spatiale en orbite terrestre

- les premiers satellites
- les premiers vols habités
- les stations spatiales
- les navettes spatiales

Les sondes envoyées vers la Lune

Le programme Apollo

Iconographie Apollo

Annexes 1 à 3



La conquête spatiale

I Généralités

L'**histoire du vol spatial** retrace au cours du temps l'exploration de l'univers et des objets célestes du Système solaire par l'envoi soit d'engins robotisés (satellites, sondes et robots), soit de vaisseaux pilotés par des équipages humains.

L'idée d'envoyer un objet ou un homme dans l'espace est évoquée par des philosophes et des romanciers plusieurs centaines d'années avant que cela ne devienne matériellement possible. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, grâce au développement de moteurs-fusées adéquats, aux progrès de l'avionique et à l'amélioration des matériaux, l'envoi d'engins dans l'espace passe du rêve à la réalité.

Le vol spatial prend son essor à la fin de la Seconde Guerre mondiale grâce aux avancées allemandes dans le domaine des fusées et il donne lieu à plusieurs événements retentissants durant la seconde moitié du XX^e siècle. L'histoire du vol spatial est marquée, à ses débuts, par une forte concurrence entre les États-Unis et l'URSS, pour des motifs de prestige national liés à la guerre froide. Cette concurrence connaît son point d'orgue lors de l'envoi des premiers hommes sur la Lune. Au cours des décennies suivantes, les agences spatiales se concentrent sur la mise en place de moyens pérennes d'exploration, comme la navette spatiale ou les stations spatiales. À la fin du XX^e siècle, seulement cinquante ans après les débuts de la conquête de l'espace, le paysage a déjà beaucoup changé : les luttes idéologiques ont fait place à la collaboration internationale, la station spatiale internationale, et le lancement de satellite s'est largement étendu au secteur privé, grâce à plusieurs entreprises pionnières dont Arianespace. De même, bien que la conquête spatiale soit toujours largement dominée par des agences spatiales nationales ou internationales telles que l'ESA ou la NASA, plusieurs entreprises tentent aujourd'hui de développer des vols spatiaux privés. Le tourisme spatial intéresse également les entreprises à travers le partenariat avec des agences spatiales, mais également par le développement de leur propre flotte de véhicules spatiaux. Abandonnés depuis quarante ans, les projets d'envoi d'hommes, voire de colonisation sur la Lune ou Mars ont été remis à jour, sans toutefois aucune certitude quant à la volonté réelle de les mener à terme.

Puissances spatiales ayant réussi une satellisation

1) Russie

La Russie et plus précisément l'Union Soviétique, devient la première puissance spatiale avec la mise sur orbite de Spoutnik 1 le 04 octobre 1957 à l'aide d'un missile R7 reconverti en lanceur spatial. Avec la chute de l'Empire Soviétique, l'arsenal spatial a été partagé entre la Russie et l'Ukraine. Pour faciliter la compréhension, tous les lanceurs de l'ex-URSS, Russie et Ukraine sont repris sur ce site sous la bannière russe.

2) Etats-Unis

Les Etats-Unis auraient pu être les premiers à envoyer un satellite dans l'espace dès 1956 avec l'aide du lanceur Jupiter développé par l'équipe de l'ingénieur allemand Wernher von Braun. Mais certains responsables politiques ainsi qu'une partie de l'opinion publique, voyaient d'un mauvais oeil l'idée que le premier satellite américain puisse être lancé par d'anciens nazis. Décision a été prise de donner priorité à un lanceur 100% américain, le Vanguard. Le cinglant échec du lanceur le 6 décembre 1957 permet à von Braun de revenir dans la course. Le 31 janvier 1958, il place sur orbite Explorer 1, presque 4 mois après Spoutnik 1.

3) La France

La France devient la troisième puissance spatiale en plaçant sur orbite le satellite Astérix le 26 novembre 1965 à l'aide de sa fusée Diamant lancée depuis la base d'Hamaguir en Algérie.

4) Japon

Le Japon entre dans le club des puissances spatiales en février 1970 avec la mise sur orbite d'Oshumi par un petit lanceur à poudre Lambda, développé par l'ISAS, dépendant de l'Université de Tokyo. Cinq ans plus tard, la Nasda (agence spatiale japonaise) lance sa première fusée à carburants liquides, N-I développée sous licence américaine. Après une profonde crise au début des années 2000, la Nasda et l'ISAS fusionnent pour donner naissance à la JAXA.

5) Chine

Le Japon et la Chine se sont battus pour être à la quatrième place des puissances spatiales, après la Russie en 1957, les Etats-Unis en 1958 et la France en 1965. La première tentative de lancement du satellite China 1 s'est soldée par un échec. Ce n'est qu'en avril 1970, 2 mois après le Japon que la Chine rejoint le club des puissances spatiales ayant placés un satellite par leurs propres moyens.

6) La Grande-Bretagne

Tout comme la France, la Grande-Bretagne avait développé son propre programme spatial. Il était principalement axé autour de son lanceur Black-Arrow qui a propulsé la Grande-Bretagne au rang de puissance spatiale le 28 octobre 1971. La fusée avait décollé de la base de Woomera en Australie et avait placé sur orbite le petit satellite Prospero. Ce fût la seconde tentative de mise sur orbite mais aussi la dernière réalisée par le pays.

7) Europe

Jusqu'à l'avènement d'Ariane en 1979, il existait 2 filiales de lanceurs européens: les lanceurs nationaux et les lanceurs européens. Deux pays vont développer leur propre programme spatial: La France et la Grande-Bretagne. La première réalise le lanceur Diamant qui place sur orbite Astérix le 26 novembre 1965. La France devient la troisième puissance spatiale. La Grande-Bretagne rejoint le club en 1971. Parallèlement aux lanceurs nationaux, la France et la Grande-Bretagne participent au programme Europa, le premier lanceur européen. Sa première tentative de mise sur orbite remonte à 1968 mais s'est soldée par un échec. Trois autres tentatives, tout aussi désastreuses, sonneront le glas du projet européen. Au même moment, la Grande-Bretagne décide d'abandonner ses lanceurs et missiles nationaux, tandis que la France dessine les premiers plans d'un gros lanceur qui sera européenisé en 1972, ce sera Ariane qui réussit son premier lancement le 24 décembre 1979.

8) Inde

L'Inde devient officiellement la 8ème puissance spatiale, après la Russie, les Etats-Unis, la France, le Japon, la Chine, la Grande-Bretagne et l'Europe, en plaçant sur orbite un petit satellite technologique, Rohini, avec son petit lanceur à poudre SLV-3.

9) Israël

Depuis qu'il a réussi à placer sur orbite Ofeq' 1 en septembre 1988, Israël n'a réalisé que 7 tentatives de mise sur orbite au 01 décembre 2011 et en a réussi 5 avec le lanceur à poudre Shavit, dérivé du missile Jericho II.

10) Iran

L'Iran a rejoint le club très fermé des puissances spatiales le 02 février 2009 en plaçant sur orbite le satellite Omid à l'aide du lanceur Safir 2. Bien que ce lancement soit civil, de nombreuses nations craignent que le programme ne soit que la partie visible de l'iceberg et qu'il cache en réalité un programme d'armement longue portée.

11) Corée du Nord

Après plusieurs tentatives infructueuses, la Corée du Nord rejoint le club des puissances spatiales le 12 décembre 2012. Le NORAD confirme la présence du satellite Kwangmyongsong 3B lancé par une fusée Unha 3 depuis le Sohae Satellite Center. L'orbite estimée serait de 494 à 588 km avec une inclinaison de 97,4°.

12) Corée du Sud

Après deux tentatives infructueuses en 2009 et 2010, la Corée du Sud rejoint son voisin nord coréen sur orbite terrestre. Le 30 janvier 2013, la fusée KSLV réussit la mise sur orbite du satellite STSAT 2C. Elle

utilise comme premier étage, un étage développé par les Russes pour leur nouveau lanceur Angara. Quant à la partie haute, elle a été mise au point par l'agence spatiale sud-coréenne, la KARI.

Puissances spatiales ayant tenté une mise sur orbite

Brésil

On peut dire que le Brésil joue de malchance. Depuis qu'il a tenté pour la première fois une mise sur orbite, en novembre 1997, 2 autres tentatives se sont soldées par un échec. La troisième, en août 2003, causera la destruction totale de la base de lancement et la mort de 21 personnes lorsque la fusée explose pendant les préparatifs. L'explosion a provoqué un coup d'arrêt dans le programme des lanceurs, le temps de corriger toutes les anomalies qui ont conduit à 3 échecs sur 3 tentatives.

II L'aventure spatiale en orbite autour de la Terre

A) Les premiers satellites

Le V2, premier missile opérationnel

Soutenus par l'armée allemande, les anciens membres de la VfR conçurent la série des fusées Aggregat, fonctionnant à l'alcool éthylique et à l'oxygène liquide. La première, la A1, explosa sur le champ de tir, les A2 (surnommées 'Max' et 'Moritz') furent lancées avec succès les 19 et 20 décembre 1934 à Borkum. Ces dernières avaient la particularité d'être stabilisées par une masse en rotation qui avait l'effet d'un gyroscope, qui leur permirent d'atteindre 2000 mètres. L'armée fut intéressée par ces résultats et investit dans ces recherches; l'équipe dirigée par von Braun partit à Peenemünde. La guerre se préparant, l'Allemagne souhaita posséder un missile plus massif, et le projet de la A3 commença en 1936. Cette fusée devait être plus puissante avec 1 500 kg de poussée pendant 45 secondes, et pouvoir transporter une ogive de 100 kg sur 260 km. Les essais qui eurent lieu fin 1937 démontrèrent que la technologie utilisée fonctionnait, malgré quelques défauts à corriger. Pourtant, la guerre avait depuis commencé, et les succès des armes conventionnelles de l'armée poussèrent le gouvernement à arrêter ses dépenses pour les nouvelles technologies comme la recherche en astronautique, qui ne semblaient plus être utiles. Sans crédits, le développement de la version suivante, la A4, fut donc très ralenti, alors que le projet était encore plus ambitieux que le précédent : le moteur devait développer 25 tonnes de poussée.

Les deux premiers tirs de la A4 en juin puis août 1942 furent des échecs, les fusées s'écrasant après le décollage à cause de problèmes de guidage. Lors du troisième tir, le 3 octobre 1942, la fusée parcourut 192 km, et l'armée allemande, qui commençait à être en difficulté, s'intéressa à nouveau à cette arme, et la rebaptisa V2. Malgré l'important équipement nécessaire à son tir (une trentaine de véhicules), malgré la durée des opérations de préparation (plusieurs heures), malgré le manque de fiabilité de ses tirs avant fin 1944, le missile V2 fut le premier missile balistique opérationnel, qui plus est à rampe de lancement mobile. Il emportait 750 kg d'explosifs à 100 km de haut, à une vitesse jusqu'à 4 fois celle du son (environ 5 000 km/h). Il a été estimé que les V2 furent produits à environ 6000 exemplaires, dont 3000 furent utilisés pour des lancements offensifs. Pour autant, l'effet des V2 a été jugé plus psychologique que tactique, les dégâts causés par la chute assez aléatoire des missiles restant faibles en comparaison de ceux causés par d'autres armes conventionnelles.



Tir de V2

Le début de la course à l'espace **La fin de la guerre et le pillage des V2**



V2 récupéré par l'armée américaine

Lorsque la fin de la guerre en Europe s'approcha, les États-Unis comme l'URSS comprirent la nécessité de profiter au maximum des technologies allemandes. Des officiers de l'armée US furent envoyés en Allemagne pour récupérer le plus possible de matériel, de plans, de V2 et d'ingénieurs. Les sites les plus précieux comme Peenemünde étaient plutôt proches des lignes russes, mais l'équipe de von Braun les abandonna en février 1945, détruisant les installations quand c'était possible. Pourtant, malgré les ordres donnés par Berlin pour détruire les informations concernant les recherches de l'armée, von Braun, en mars 1945, cacha 14 tonnes de documents concernant les V2. Les Américains, qui arrêterent von Braun et son équipe, arrivèrent à les exfiltrer, purent récupérer quantité de matériel trouvé dans des zones devant revenir à l'URSS, ainsi que les documents cachés quelques mois auparavant. Le 4 mars 1946, lors de l'opération Paperclip, les États-Unis recrutèrent à nouveau des scientifiques et techniciens. L'URSS, en moindre quantité, mit la main sur du matériel et des renseignements, et désigna plusieurs ingénieurs, comme Helmut Gröttrup, comme 'volontaires désignés' pour poursuivre les recherches pour le compte des soviétiques. Les pays européens comme la Grande-Bretagne et la France purent eux aussi récupérer des pièces de V2: la France recruta 123 scientifiques allemands, et disposait de quelques sites de production sur son territoire. La Grande-Bretagne, de son côté, récupéra trente V2 hors service, et en reçut cinq autres, avec des ingénieurs allemands, de la part des États-Unis.

Les premiers essais

À la sortie de la guerre, seuls deux pays étaient en mesure de financer la recherche sur les fusées ; les autres pays européens ou asiatiques étaient économiquement abattus, devaient se concentrer sur leur reconstruction, et n'avaient de toute façon pas pu profiter des technologies prises à l'Allemagne. Les buts des États-Unis et de l'URSS étaient identiques : créer des ICBM, des missiles balistiques capables de transporter les nouvelles bombes nucléaires d'un continent à un autre, la réussite de l'envoi de ces bombes par avion étant très aléatoire. Si cette époque vit le début de la recherche mondiale sur les fusées, le moteur principal de cette recherche resta donc l'espoir d'utiliser les fusées comme atout lors d'une guerre ; en 1950, envoyer un homme dans l'espace n'était pas pris très au sérieux en général. La guerre froide qui commençait fut la principale cause de la course à l'espace. Alors que la guerre n'était pas encore terminée, en URSS, le gouvernement soviétique rassembla ses experts.

Korolev, l'ancien du RNII et futur héros soviétique de la conquête spatiale, fut rappelé très affaibli du goulag où les purges staliniennes l'avaient conduit. Il fut alors envoyé en Allemagne à la fin 1944, sous les ordres du général Lev Gaidukov, dans le but de récupérer des données et des pièces de V2. De retour en URSS, lui et ses collègues, dont Valentin Glouchko, tentèrent de reproduire les V2, avec les fusées R1 (entrées en service en 1950), puis de les améliorer, avec les R2 et les R3 (cette dernière commençait à être très différente des deux premières versions). Ces travaux furent menés sous l'administration du NI-88 (Institut de recherche 88), créé en 1946, dirigé par Trikto, et divisé en plusieurs départements pour chaque spécialité. Korolev y était ingénieur en chef du bureau d'études expérimentales OKB-1,



Glouchko était affecté à l'OKB-456 pour la mise au point de moteurs à carburant liquide. Le NII885 dirigé par Nikolaï Piliouguine était le département aéronautique, et les OKB 52 et OKB 586 dirigés respectivement par Vladimir Tchelomeï et Mikhaïl Yanguel étaient concurrents de l'OKB-1 de Korolev. Comme les bombes atomiques russes étaient plus lourdes que celles des Américains, les Soviétiques eurent besoin de lanceurs plus gros et plus puissants. Les R3 furent donc abandonnées pour le projet de la R7, un gros missile possédant un moteur à quatre tuyères sur son corps central, plus un moteur à quatre tuyères sur chacun des quatre propulseurs. Ce lanceur deviendra le fer de lance de l'URSS dans la conquête spatiale. Pendant l'année 1946, les États-Unis rassemblèrent aussi leurs experts à Fort Bliss, avec les documents, pièces et scientifiques récupérées en Allemagne. Ces hommes et matériels furent utilisés pour reproduire et tester des V2 à White Sands, puis pour tester des évolutions du missile allemand, comme 'Bumper', un V2 amélioré par l'ajout d'un deuxième étage, qui fut lancé avec succès le 24 juillet 1950, et qui fut le premier tir depuis Cap Canaveral. *Fusée R7 « Semyorka » soviétique*

Pour autant, le gouvernement se méfiait des ingénieurs allemands et craignaient l'effet de leur mauvaise réputation auprès du public; le directeur du FBI Hoover, par exemple, tenta de bloquer ces projets. Les programmes de missiles se diversifièrent, chaque branche de l'armée américaine travaillant sur ses propres projets :

- L'US army, lié au Jet Propulsion Lab de Caltech, travailla sur le projet *Hermes-C1*, pour la conception des fusées Redstone; l'équipe comptait entre autres von Braun.
- L'US Navy travailla sur les fusées scientifiques Viking, ainsi que sur les ICBM Titan.
- L'US Air Force travailla sur les ICBM Atlas.

Le 29 juillet 1955, en vue de l'Année géophysique internationale (AGI) de 1957-58 et sous le conseil du National Security Council, les États-Unis annoncèrent le projet d'envoi d'un satellite dans l'espace. Le lendemain, l'URSS fit la même annonce. Mais pour autant, les États-Unis n'ont pas semblé prendre au sérieux leur concurrent.

Le début de l'ère spatiale



Sputnik 1

En 1954, aux États-Unis, naquit le projet Orbiter, consistant en un lancement de satellite au cours de l'AGI. Après de nombreuses hésitations et changements, la fusée Redstone de l'US Army, qui avait volé pour la première fois le 20 août 1953, fut choisie pour la mise en orbite du satellite. Mais les difficultés techniques et les luttes internes firent prendre du retard au projet, et le programme Vanguard de la Navy lui fut finalement préféré : la fusée promise était plus puissante que Redstone, et l'US Navy avait montré son savoir-faire avec ses fusées Viking. Pour autant, le travail sur les fusées Redstone continua. Mais le choix de Vanguard ne fut pas le bon; malgré les réussites des deux premiers tirs, les résultats finaux ne furent pas à la hauteur des espérances : sur douze tirs avec satellite, seuls trois réussirent. Et ces réussites eurent lieu après le lancement du Spoutnik 1 soviétique, plus gros que le plus gros satellite américain lancé : Spoutnik 1 pesait 83 kg, le plus gros satellite américain pesait 22,5 kg. Il semble que cet échec ait été dû à un manque de budget et de rationalisation, car l'US Navy se concentrait surtout sur son deuxième programme concernant les ICBM Titan, qui semblait plus stratégique.

En URSS, Korolev tenta de convaincre le pouvoir de l'utilité de la conquête à l'espace, au-delà des recherches sur les missiles balistiques atomiques des militaires. Toujours responsable de l'OKB-1 qui était devenue indépendante en 1953, il lança le projet de satellite Objet D en août 1955, et la '3^e commission sur le vol spatial', présidé par Mstislav Keldych fut créée. En janvier 1956, à l'occasion d'une visite d'inspection du projet R7 par Krouchtchev, Korolev put promouvoir le travail dirigé par Mikhaïl Tikhonravov sur l'Objet D, ainsi qu'expliquer que la R7, plus puissante que les fusées des États-Unis, était capable de lancer le satellite en cours de développement. Krouchtchev, convaincu de la possibilité de montrer la force de son pays aux États-Unis, donna son appui au projet. L'objet D, avec son poids et ses instruments scientifiques, était pourtant un objectif un peu trop difficile, et finalement un satellite plus petit et au contenu nettement moins avancé fut rapidement conçu : Spoutnik 1. Il y eut des soucis aussi du côté de la fusée R7, qui ne fonctionna pas très bien : le premier tir du 15 mai 1957, ainsi que les quatre suivants, ratèrent. Les derniers essais ayant montré que le problème tenait en la fragilité des étages supérieurs, il fut décidé de tenter tout de même le tir avec le léger satellite Spoutnik, pour le 4 octobre 1957 à 22h28, heure de Moscou. Le tir, le premier sans problème de la R7, fut donc une réussite complète pour les soviétiques. Le monde entier réalisa l'avance de URSS qui ouvrait ainsi l'ère spatiale. Galvanisé par les effets de cette réussite, Krouchtchev demanda qu'un nouveau satellite soit lancé un mois après, pour l'anniversaire de la révolution : ce fut Spoutnik 2, qui emporta la première chienne de l'espace Laïka, le 3 novembre 1957. Ce deuxième tir sembla pendant 40 ans une autre grande réussite; pourtant, il sera découvert que la chienne qui avait officiellement vécu une semaine dans l'espace, était en vérité morte peu après le tir (entre 6 heures et deux jours) à cause d'un dysfonctionnement du système de régulation thermique. Cette désinformation montre que la course à l'espace était devenue autant une course à la propagande qu'une course aux missiles balistiques.



Explorer 1

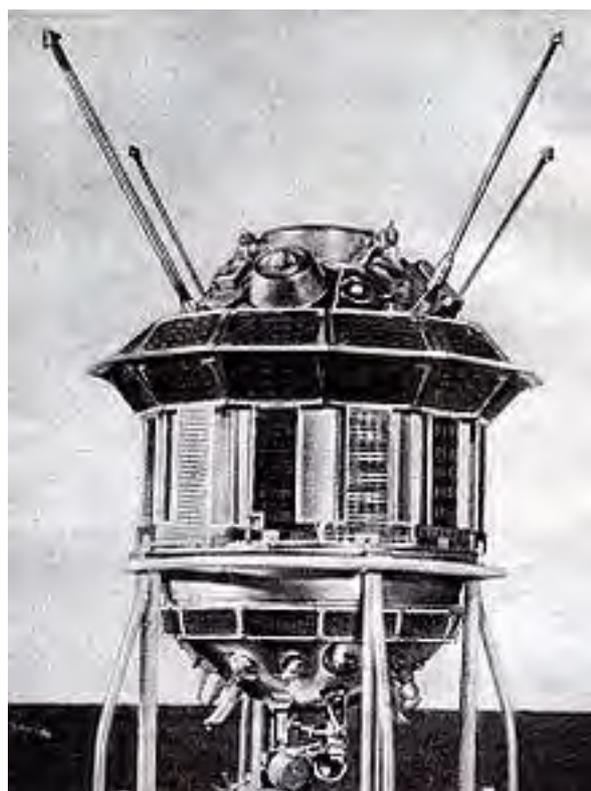
La nouvelle du lancement du premier satellite Spoutnik, ainsi que la réception du signal radio envoyé depuis l'espace fut un choc pour les États-Unis, qui ne croyaient pas l'URSS si sérieuse : James M. Gavin, le directeur de la recherche et du développement de l'armée, parla de « Pearl Harbor technologique ». D'autant plus que le 6 décembre 1957, le tir de Vanguard TV3 à Cap Canaveral, avec *Pamplemousse*, un satellite de seulement 1,8 kg, fut un échec retentissant. La fusée ne s'éleva que de 1,3 mètre avant d'exploser sur le pas de tir, alors que les journalistes du monde entier étaient présents. Un mois avant, le 8 novembre 1957, l'ABMA (*Agence des Missiles Balistiques de l'Armée*), créée en 1956 par l'US Army pour l'équipe de Wernher von Braun, avait repris officiellement son projet Orbiter. Jupiter C, un des fruits des améliorations du missile Redstone et rebaptisé Juno pour l'occasion, fut utilisé pour le premier lancement du satellite américain, appelé Explorer 1, le 31 janvier 1958. Ce satellite Explorer était en fait une petite fusée à moteur à poudre, ce qui lui permettait de se mettre en orbite seule. Elle fut utilisée pour mesurer la ceinture de Van Allen, qui avait été théorisée plusieurs années auparavant. Le programme Vanguard, qui avait continué parallèlement, réussit à lancer le Vanguard-1 le 17 mars 1958. Fin juillet 1958, la NASA fut créée, en remplacement de l'ancienne NACA, et l'équipe de Wernher von Braun y fut intégrée en 1960. La guerre froide, qui était alors dans une période dure, dopa la course à l'espace.

Les premiers programmes de satellites

États-Unis et URSS continuèrent à lancer des satellites, nommés Explorer pour les US, et Spoutnik pour l'URSS. L'utilisation des satellites signa la fin des avions espions, qui devenaient trop vulnérables face aux nouveaux missiles sol-air : en vue de les remplacer, les États-Unis lancèrent le programme des satellites espion 'Corona', officiellement nommés Discoverer, qui eurent des débuts difficiles : les 12 premiers tirs furent des échecs. Enfin, Discoverer n° 13, le 11 août 1960, fut le premier à livrer une capsule de film, bien que ce film ne fut pas impressionné (ce satellite d'essai ne contenait pas de caméra). Ces satellites espions furent lancés jusqu'en 1972 ; il y eut 140 tirs, dont 102 réussirent. La série des Explorer fut une série de satellites et de sondes à but scientifique, dont certains furent lancés jusqu'en 2000 ; il y eut, comme pour les Corona, beaucoup de ratés jusqu'en 1961 (avant 1962, 8 tirs sur 19 furent des échecs). Certains de ces satellites furent pérennes, comme *IMP 8* (ou *IMP-J*, ou Explorer 50) lancé en 1973, dont l'écoute est en 2009 en grande partie arrêtée, mais qui fonctionnait toujours en août 2005, ce qui lui vaut un record d'activité continue de 30 ans. Les sondes Pioneer servirent à l'exploration du Système solaire entre 1958 et 1978. Les premiers tirs furent dirigés vers la Lune (à l'aide de lanceurs Thor et Atlas), puis furent envoyés dans l'espace interplanétaire, vers Jupiter et Vénus. Encore une fois, le programme connut beaucoup d'échecs avant 1960 (8 lancements vers la Lune échouèrent), mais Pioneer 4 réussit à survoler la Lune en mars 1959.



Pioneer 10 en cours de montage.



La sonde Luna 3

Les Soviétiques tirèrent les sondes Luna vers la Lune entre 1958 et 1976. Ils eurent eux aussi des problèmes, les trois premiers lancements furent des échecs. Ensuite, Luna 1, la première de la série à atteindre l'espace, le 2 janvier 1959, rata sa cible. Luna 2 fut un succès, et découvrit les vents solaires. Ce fut surtout Luna 3, lancée le 7 octobre 1959, qui fut la plus grande réussite, car elle rapporta les premiers clichés de la face cachée de la Lune. Parmi les autres sondes, Luna 9 se posa sur le satellite de la Terre en 1966. Vénus, la planète la plus proche de la Terre, fut la cible de sondes américains et soviétiques. Ces derniers lancèrent le programme Venera qui lui était entièrement consacré, de 1961 à 1983; le premier tir, le 4 février 1961 ne permit pas de faire quitter à la sonde l'attraction terrestre, le second tir se passa bien,

mais le système de communication de la sonde tomba en panne. Les sondes suivantes alternèrent échecs et réussites, mais, petit à petit, furent les premières à entrer dans l'atmosphère d'une autre planète, puis les premières à y atterrir, puis les premières à renvoyer des images d'une autre planète. Les satellites lancés ne furent pas limités à l'exploration spatiale, et certains furent les pionniers dans les télécommunications satellitaires. Leur principe était de capter les ondes radios envoyées depuis le sol, et de les réémettre, permettant ainsi des communications longues distances, jusqu'alors gênées par la courbure terrestre. Echo fut un des premiers satellites lancés à cette fin, le 12 août 1960 : ce n'était qu'une grande sphère gonflable de 30 mètres de diamètre, sur la surface de laquelle les ondes radio ricochaient. Puis, le 4 octobre 1960 fut mis en orbite Courier 1B, le premier satellite pouvant capter et réémettre les signaux terrestres. Le satellite Telstar 1, lancé le 10 juillet 1962, permit pour la première fois de retransmettre des émissions de télévision des États-Unis vers l'Europe.

Dans le reste du monde



Fusées françaises, dont Rubis au premier plan et Véronique, en arrière-plan

En Chine

Le programme spatial chinois débuta au milieu des années 1950, avec le retour au pays de Qian Xuesen, jusque-là émigré aux États-Unis, où il avait activement participé au développement du programme américain, en étant entre autres membre fondateur du Jet Propulsion Laboratory. Soupçonné d'être communiste, il avait été arrêté en 1950, puis expulsé des États-Unis en 1955. De retour dans son pays d'origine, il s'attela donc au programme de missiles chinois, en partie aidé par l'Union Soviétique.

En France

La France commença dès la fin des années 1940 à étudier les V2, et lança à partir de mars 1949 le programme des fusées-sondes Véronique, conçues pour étudier la haute atmosphère. Ces fusées furent lancées depuis plusieurs sites, comme Suippes pour le premier tir du 31 juillet 1950, puis Vernon le 5 août, Le Cardonnet, et enfin à Hammaguir en Algérie... La version simplifiée de la fusée, la *R* (pour *réduite*) put atteindre les 1800 mètres d'altitude fin 1951. La version suivante, la *N* (pour *normale*), plus grosse, connut quelques difficultés, mais put atteindre les 70 kilomètres d'altitude le 22 mai 1952. La dernière version, la *NAA* (pour *normale allongée*) atteignit 135 kilomètres d'altitude le 21 février 1954, mais les échecs réguliers des tirs, les problèmes économiques dus à la guerre d'Indochine, sonnèrent le glas du programme.



Fusée Diamant A

Les Français continuèrent pendant les années 1960 à expérimenter les fusées à poudre ou les moteurs à carburant liquide. Pour cela, sous la gouvernance de Charles de Gaulle, la France créa le CNES (*Centre national d'études spatiales*) en mars 1962. Des essais médicaux furent tentés sur un rat (Hector) et un chat (Félicette), les 22 février 1961 et 18 octobre 1963, animaux qui furent récupérés sains et saufs. La France mit au point une série de lanceurs aux noms de pierres précieuses, dont le plus évolué, *Diamant*, fut utilisé pour lancer le satellite A1, surnommé Astérix, le 26 novembre 1965 à 14 h 47 min 41s (heure locale), depuis le pas de tir de Hammaguir en Algérie. Ce satellite, d'un poids de 39 ou 47 kg, était de conception militaire et ne contenait que des appareils destinés à vérifier son orbite, qui se révéla être de 530 km de périégée et de 1 820 km d'apogée. Il y eut pendant une heure ou deux la crainte d'un échec car le largage de la coiffe abîma les antennes du satellite, rendant son signal difficilement captable. La mission fut finalement un succès, qui plaça la France comme le troisième pays, après les États-Unis et l'URSS, à réussir le tir d'une fusée et d'un satellite de sa conception. Le lanceur Diamant fut utilisé pour d'autres mises en orbite de satellites scientifiques ou télécom jusqu'en 1976. Parmi eux, les satellites géodésiques Diapason, Diadème I et II, lancés le 17 février 1966, et les 8 et 15 février 1967. Malgré ces réussites, le lanceur français n'était pas assez puissant pour de lourdes charges ou des orbites géostationnaires, en bonne partie à cause d'un troisième étage pas assez puissant. Aussi, le satellite FR-1 fut lancé par une fusée américaine scout le 6 décembre 1965. À la suite de l'indépendance de l'Algérie, le gouvernement français préféra quitter la base d'Hammaguir et choisit, le 14 avril 1964, le site de Kourou, idéalement placé pour profiter de l'effet de fronde, mais où toutes les infrastructures devaient être construites dans un environnement difficile. Le programme Diamant-B démarra le 30 juin 1967, sous la

direction du CNES. Le but était, malgré un budget limité, d'améliorer la puissance de Diamant-A en lui permettant de placer sur orbite basse une charge de 100 kg. Le premier tir de la nouvelle fusée eut lieu le 10 mars 1970 et mit en orbite les satellites allemands Mika et Wika, initialement prévus pour être lancés par la caduque fusée Europa II (voir section suivante). Malgré la casse d'un des deux satellites à cause des chocs causés par un effet pogo, ce lancement fut la première mise en orbite par les Français d'une charge étrangère. Cinq tirs furent effectués mais les deux derniers furent des échecs. Le programme Diamant-BP4 suivit, essayant à nouveau d'augmenter la charge utile, et la fusée réussit à mettre ses satellites en orbite lors de ses trois uniques tirs du 6 février au 27 septembre 1975.

En Grande-Bretagne

Dès 1954, la Grande-Bretagne commença son programme de missiles balistiques de moyenne portée (2 500 km initialement, puis 4 000 km) nommé Blue Streak. Ce projet fut établi en coopération avec les programmes américains; les moteurs du missile furent des évolutions des Rocketdyne S3, améliorés par la firme Rolls-Royce. Ils étaient lancés depuis le centre de Woomera en Australie. Les tirs furent des réussites, mais les coûts, ainsi que le problème de son efficacité en tant qu'ICBM poussèrent les Britanniques à le remplacer par les missiles américains Skybolt et UGM-27 Polaris. Le programme militaire fut donc stoppé le 13 avril 1960, en conservant l'espoir d'un recyclage en lanceur de satellites.

Au Japon

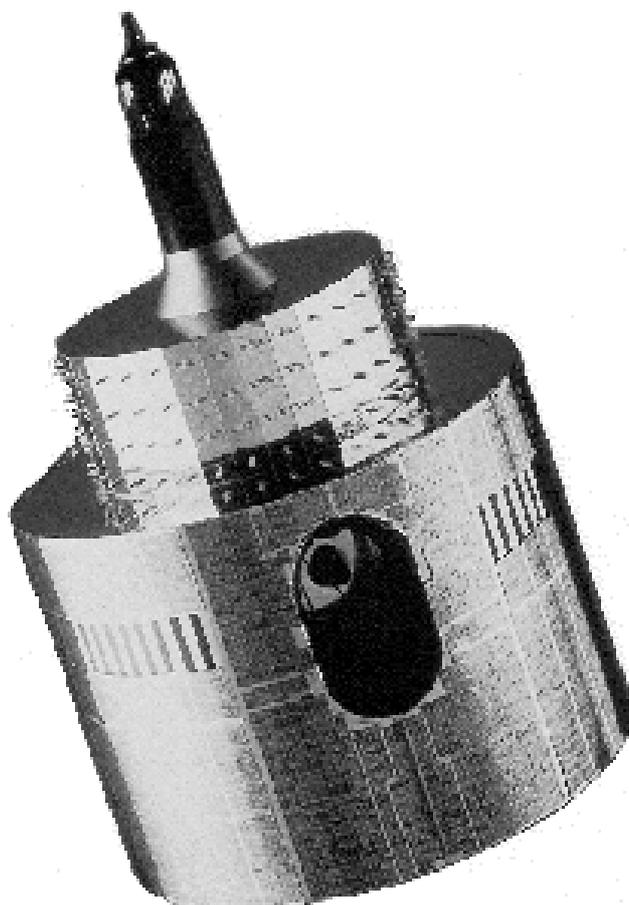
Au sortir de la guerre, l'élément moteur vers l'espace fut le professeur d'université et ingénieur en aéronautique Hideo Itokawa, qui conçut, étudia et lança des petites fusées. Passionné par le sujet, il poussa son pays à créer vers la fin des années 1950 l'Institute of Space and Astronautical Science (*ISAS*).

Dans le reste du monde

Au Canada

Les canadiens furent à l'origine du premier satellite n'étant d'origine ni des États-Unis ni de l'URSS à être envoyé dans l'espace. Alouette 1, dont la mission était l'étude de l'ionosphère, fut lancé le 29 septembre 1962 par un lanceur Thor-Agena américain.

En Europe



Le satellite Meteosat

L'Europe créa deux agences en 1964: l'ESRO (*European Space Research Organization, CERS* en français), regroupant sept pays et devant développer des satellites, et l'ELDO (*European Launcher Development Organisation, CECLES* en français), regroupant 10 pays et devant développer un lanceur. Le lanceur européen Europa-1 était constitué du missile britannique *Blue Streak* pour le premier étage, d'un deuxième étage français *Coralie*, et d'un troisième étages allemands *Astris*. Ce saucissonnage de la fusée, les problèmes de compétence des acteurs et le manque de coordination firent du projet un échec. La fusée Europa-2, qui tentait, sous l'égide de la France, de corriger les erreurs passées, ne fonctionna pas non plus, et le projet fut délaissé en 1972. Par contre, la création de satellites, comme Meteosat, fut plutôt une réussite, mais qui, faute de lanceur, furent mis en orbite par les États-Unis.

Au Japon

L'ISAS créa dans les années 1960 plusieurs petits lanceurs à poudre, les Lambda (*L*) et Mu (*M*), qui permirent de lancer le premier satellite (d'essai) japonais nommé Ōsumi le 11 février 1970.

L'année 1969 vit la création de la National Space Development Agency of Japan (*NASDA*), une autre agence spatiale, en partie en concurrence avec l'ISAS : pour autant, le programme de l'ISAS était axé sur l'exploration de l'espace (par sondes et satellites), alors que la NASDA visait la création de lanceurs, satellites commerciaux, ainsi que des vols habités. Elle lança la série des fusées N, dérivées des lanceurs Delta américains.

Les missions scientifiques

Les télescopes

L'observation du ciel depuis le sol terrestre est perturbée par l'atmosphère, qui fait perdre beaucoup de précision aux images en déviant les rayons lumineux; les télescopes situés dans l'espace sont donc plus efficaces. De nombreux instruments d'observation furent envoyés dans l'espace; il y eut parmi eux la famille des satellites OAO, lancés entre 1966 et 1972, dont le deuxième exemplaire fut le premier observatoire ultraviolet, SAS-1 puis SAS-2, lancés par la NASA les 12 décembre 1970 et 15 novembre 1972, qui furent respectivement les premiers observatoires à rayons X et à rayons gamma, IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*), lancé le 25 janvier 1983, qui fut le premier télescope infrarouge. Hubble, du nom d'Edwin P. Hubble, est un grand télescope spatial observant dans le spectre de lumière visible, conceptualisé par Lyman Spitzer, et qui est le fruit de l'association entre la NASA et l'ESA (qui participa à hauteur de 15 %).



Le télescope spatial Hubble

Il fut mis en orbite par la navette américaine le 25 avril 1990, des missions de maintenance ultérieures étant prévues par le projet (le satellite était conçu pour pouvoir recevoir de nouveaux instruments de détection). Les premières images furent décevantes car un problème de calibrage d'un miroir déformait la prise des images. Heureusement, fin 1993, Hubble put être réparé en orbite par l'équipage d'une navette; ce fut l'occasion d'une sortie extra-véhiculaire d'une durée de 6 à 7 heures, ce qui reste un record en 2009. Le résultat de l'opération fut flagrant, et Hubble commença à fournir des images spectaculaires. La fin de ce télescope, décrit par la NASA comme « ayant révolutionné l'astronomie » et « ayant fourni des images d'une netteté et d'une profondeur sans précédent », est prévue pour les environs de 2015, après une dernière mission de maintenance en mai 2009. D'autres grands télescopes furent envoyés en orbite : Chandra, conçu pour l'observation des rayons X, fut lancé le 23 juillet 1999 par la navette américaine, et Spitzer (en hommage à Lyman Spitzer), conçu pour les infrarouges, fut lancé le 25 août 2003 par une fusée Delta.

Aujourd'hui et le futur : Au-delà de son esprit initial de conquête, le vol spatial est aujourd'hui un secteur commercial, indépendant des programmes gouvernementaux des années 1950-1970. Ainsi, Ariespace, le principal opérateur commercial avec environ 60 % du marché, est privé, et sa fusée Ariane 5 est en concurrence avec les lanceurs américains (Atlas et Delta), russes (Proton), et chinois (Longue Marche).

B) Les premiers vols habités

1) Soviétiques

De 1957 à 1965, l'U.R.S.S. devancera ses adversaires américains en accomplissant la plupart des grandes premières spatiales : après le premier satellite artificiel (Spoutnik-1, 4 octobre 1957), le premier animal dans l'espace (la chienne Laïka à bord de Spoutnik-2, 3 novembre 1957), les premières sondes lunaires (Luna-1 à 3 en 1959), un nouvel exploit va être accompli, celui de l'envoi du premier homme dans l'espace. Le 12 avril 1961, à 9 h 7 min, une fusée Sémiorka surmontée du vaisseau Vostok-1, d'une masse de 4 700 kg et ayant à bord Iouri Alexeïevitch Gagarine, décolle de la base de Baïkonour. Quatorze minutes plus tard, le vaisseau est sur une orbite elliptique de 181 kilomètres de périégée et de 327 kilomètres d'apogée. Gagarine effectue une révolution autour de la Terre et, à 10 h 55 min, 108 minutes après le lancement, il se pose en parachute dans un champ à 25 kilomètres au sud-ouest d'Engels (aujourd'hui Pokrovsk), dans la région de Saratov. Pour la première fois, un homme est allé dans l'espace. Le retentissement de cet événement est mondial, l'image de l'Union soviétique est à son apogée. La voie est ouverte à des missions habitées de plus en plus longues et ambitieuses qui démontreront que l'homme peut vivre dans l'espace. Les États-Unis sont humiliés : il faudra attendre le 5 mai 1961 pour que l'Américain Alan B. Shepard effectue un vol balistique de 15 minutes au-dessus de l'océan Atlantique, un exploit qui n'est cependant pas à la hauteur de celui de Gagarine, et le 20 février 1962 pour que John Glenn devienne le premier Américain à graviter autour de la Terre.

Il est possible, voire fortement probable, que Gagarine ne fut pas le premier homme dans l'espace. Les échecs soviétiques, pour des raisons de propagande politico-stratégiques ont été cachés mais des faits troublants ont transpiré depuis. [Voir document en Annexe 1.](#)



Youri Gagarine, « premier homme dans l'espace »

Mission	Lancement	Modèle	Durée	Equipage	Remarques
Spoutnik 4	15 mai 1960	1P			échec
sans nom	28 juillet 1960	1K			explose au lancement
Spoutnik 5	19 août 1960	1K			test du siège éjectable
Spoutnik 6	1 ^{er} décembre 1960	1K			échec à l'atterrissage
sans nom	22 décembre 1960	1K			échec
Spoutnik 9	9 mars 1961	3KA			succès
Spoutnik 10	25 mars 1961	3KA			succès
Vostok 1	12 avril 1961	3KA	1 h 48 m	Youri Gagarine	1 ^{er} Homme dans l'espace.
Vostok 2	6 août 1961	3KA	1 jour 1 h 18 m	G. Titov	1 ^{re} mission de longue durée.
Vostok 3	11 août 1962	3KA	3 j. 22 h 22 m	A. Nikolayev	1 ^{er} vol simultané.
Vostok 4	12 août 1962	3KA	2 j. 22 h 56 m	P. Popovich	1 ^{er} vol simultané.
Vostok 5	14 juin 1963	3KA	4 j. 23 h 7 m	V. Bykovsky	Vol de longue durée.
Vostok 6	16 juin 1963	3KA	2 j. 22 h 50 m	V. Tereshkova	1 ^{re} femme dans l'espace.

Mise au point et premiers vols des missions Vostok soviétiques

2) Américains

Le programme Mercury

Le programme Mercury est le premier programme spatial américain à avoir envoyé un américain dans l'espace. Il a été lancé en 1958, quelques jours après la création de l'agence spatiale américaine NASA, et s'est achevé en 1963. Les objectifs du programme étaient de placer un homme en orbite autour de la Terre, d'étudier les effets de l'impesanteur sur l'organisme humain et de mettre au point un système de récupération fiable du vaisseau spatial et de son équipage.

Six vols spatiaux habités (et dix-neuf vols sans astronaute) ont eu lieu entre 1959 et 1963 : deux vols suborbitaux lancés par une fusée Mercury-Redstone et quatre vols orbitaux lancés par une fusée Atlas. La mission Mercury 3 (5 mai 1961) avec à son bord Alan Shepard, premier vol spatial habité américain, parcourut une trajectoire balistique culminant à 186 km. Le premier vol orbital eut lieu le 20 février 1962 avec Mercury 6 (équipage John Glenn), qui boucla trois tours autour de la Terre. La sixième mission habitée fut la plus longue : la capsule de Mercury 9 (équipage Gordon Cooper) parcourut 22 orbites en environ 36 heures. Le programme ne connaîtra aucun échec, malgré des défaillances parfois graves de la capsule Mercury.

La capsule Mercury était un vaisseau spatial minimaliste de 1,5 tonne et de forme conique, conçu pour accueillir un seul astronaute et doté de moteurs d'orientation lui permettant des manœuvres limitées une fois placé en orbite ainsi que de rétrofusées pour sa rentrée dans l'atmosphère. À la base du cône était placé un bouclier thermique constitué d'un matériau ablatif qui permettait au vaisseau de résister à la température engendrée par sa rentrée atmosphérique à très grande vitesse dans les couches denses de l'atmosphère. Une tour de sauvetage située au sommet du vaisseau devait permettre d'écarter la capsule Mercury en cas de défaillance de la fusée durant la phase propulsée. La récupération du vaisseau se faisait en pleine mer.

Le programme Mercury fut suivi du programme Gemini qui utilisera un vaisseau spatial beaucoup plus sophistiqué pour la mise au point des techniques de vol spatial et des technologies nécessaires au programme Apollo.



La capsule Mercury est particulièrement compacte. Dans l'ordre de taille croissante figure vaisseau et lanceur des programmes Mercury, Gemini et Apollo



La salle de contrôle des missions Mercury. Ses dimensions sont modestes par rapport à celles du programme Apollo.

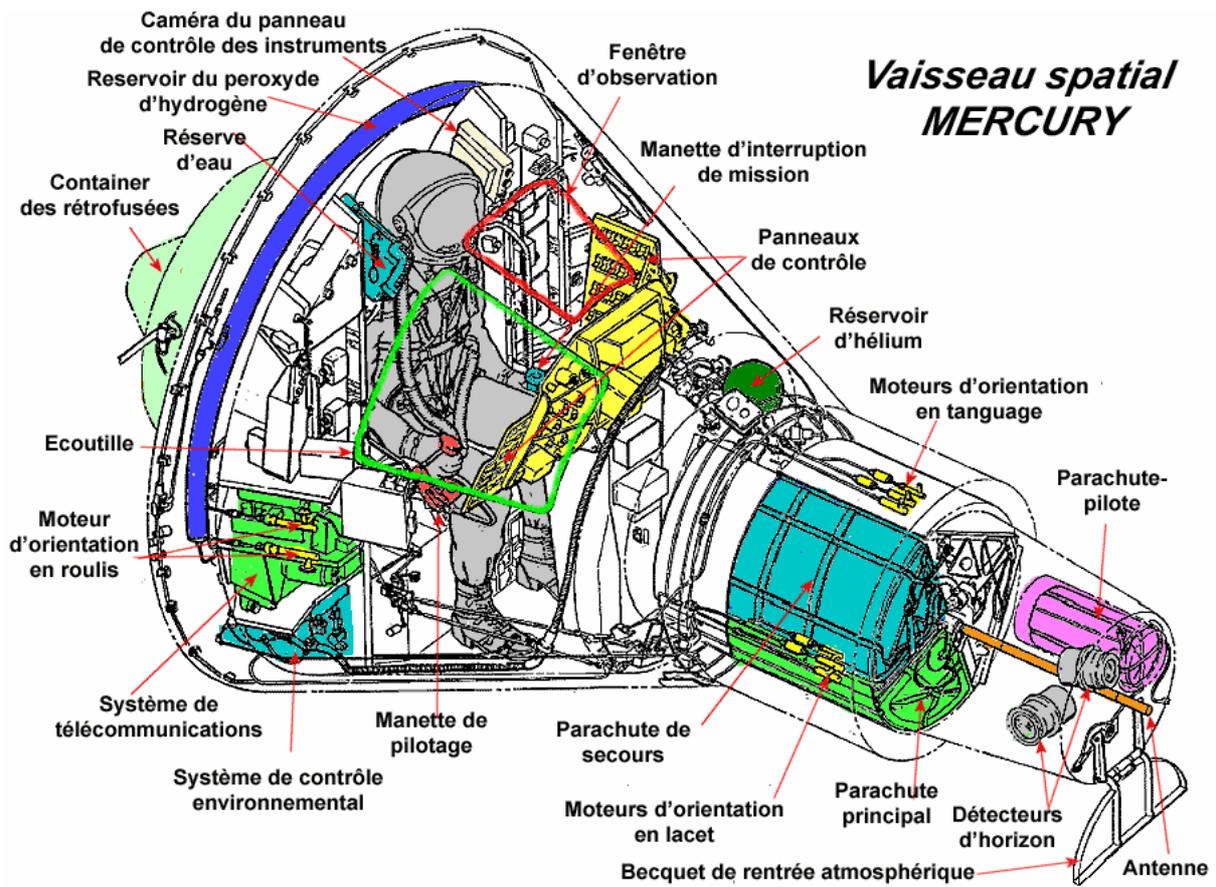
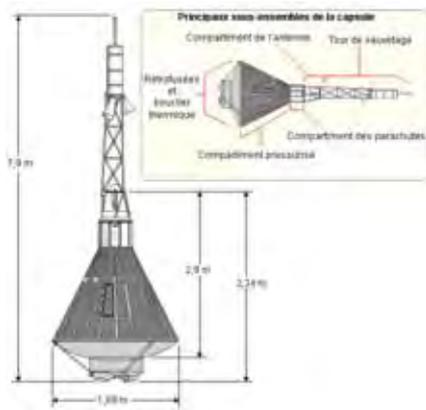


Schéma de la capsule Mercury



Principaux sous-ensembles du vaisseau spatial et de la tour de sauvetage



Les panneaux de contrôle de Mercury 8

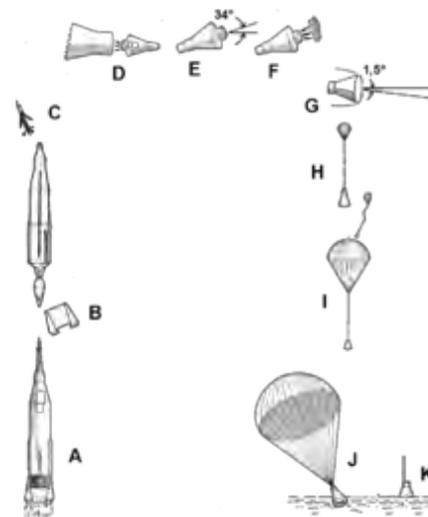


Schéma du déroulement d'une mission Mercury Atlas

Un hublot d'observation est placé sur le flanc du cône face à l'astronaute mais celui-ci utilise également un périscope qui lui permet d'observer la surface de la Terre pour les calculs de navigation. Avant le lancement, l'astronaute s'installe dans sa couchette en pénétrant par l'écotille placée à sa droite. Après l'amerrissage, la procédure prévoit que le vaisseau soit hélitreuillé avec l'astronaute à bord. S'il doit évacuer le vaisseau avant l'arrivée de l'équipe de récupération, l'astronaute doit utiliser une deuxième écotille située au sommet du cône car la première située très bas au-dessus de l'eau est facilement submergée comme l'a démontré la perte de la capsule Mercury 4. Le sommet du cône, qui a une forme cylindrique, contient les parachutes principal et de réserve, le parachute pilote et deux des moteurs d'orientation. Un deuxième compartiment cylindrique situé au-dessus du premier et de diamètre inférieur contient l'antenne utilisée pour les télécommunications, ainsi que des capteurs d'horizon. La structure du vaisseau est constituée d'une double coque construite pour l'essentiel en titane : la coque pressurisée interne et la coque externe chargée d'assurer la protection thermique lors du lancement et surtout durant la rentrée atmosphérique, lorsque le frottement contre les couches denses de l'atmosphère engendre des températures de plusieurs milliers de degrés. Le vaisseau pénètre dans l'atmosphère la base du cône en avant. C'est donc cette partie qui supporte les plus fortes contraintes thermiques. Un bouclier thermique constitué d'un matériau ablatif recouvre cette section de la coque. Un ensemble de trois petites rétrofusées de 450 kg de poussée est attaché par des sangles au-dessus du bouclier; ces fusées sont allumées successivement durant 10 secondes pour ralentir le vaisseau afin de déclencher la rentrée dans l'atmosphère. Compte tenu de son importance pour la réussite de la mission, le système est redondant; la mise à feu d'une seule fusée permet d'effectuer le changement de trajectoire.



Le bouclier thermique et le container des rétrofusées durant des tests



La capsule Mercury en cours d'assemblage. La coque assurant la protection thermique n'a pas encore été mise en place

La tour de sauvetage

En cas de défaillance du lanceur au décollage ou dans les premières phases du vol, le vaisseau devait pouvoir être écarté le plus rapidement possible du lanceur pour lui permettre d'échapper aux conséquences d'une explosion. La tour de sauvetage, conçue par Maxime Faget, est constituée d'un propulseur à propergol solide de 25 tonnes de poussée doté de trois tuyères et monté au sommet d'un échafaudage de poutrelles métalliques lui-même placé au sommet du vaisseau Mercury. Si une situation catastrophique est détectée, le système d'interruption de mission active la tour de sauvetage. Le propulseur à poudre est mis à feu durant 1 seconde et arrache la capsule à la fusée pour l'en éloigner. Un deuxième petit propulseur à poudre situé sous le premier de 400 kg de poussée est utilisé pour détacher la tour de sauvetage, une fois que celle-ci a rempli son office.

Le système pouvait être déclenché manuellement, soit par l'astronaute, soit par les contrôleurs au sol, mais certaines défaillances en vol pouvaient conduire à une catastrophe avant que le système d'interruption puisse être déclenché manuellement. Aussi un réseau de capteurs ausculte en permanence au lancement et durant le vol les paramètres de fonctionnement de la fusée et peut déclencher automatiquement la mise à feu de la tour de sauvetage. Les cas de déclenchement automatique sont les suivants :

- Modification de l'angle de la fusée par rapport à la trajectoire prévue supérieure à une valeur programmée
- Vitesse angulaire dans l'un des trois axes excessive
- Chute de la pression dans la chambre de combustion du moteur-fusée inférieure à un seuil critique
- Perte de l'alimentation électrique du système de contrôle en vol
- Perte générale de l'alimentation électrique (y compris du système d'interruption de mission), pouvant être une indication d'un incident majeur.

Les lanceurs

Articles détaillés : Atlas (fusée), Mercury-Redstone et Little Joe (fusée).

Le missile balistique longue portée Atlas est retenu au début du programme comme lanceur des vols orbitaux du programme car c'est la seule fusée existante capable de placer le vaisseau Mercury en orbite. Au début du programme, l'Atlas est encore en cours de mise au point. Deux autres fusées sont donc utilisées pour les premières missions :

- La fusée rustique Little Joe réalisée en assemblant quatre fusées Castor à propulsion solide et destinée à mettre au point la tour de sauvetage
- La fusée Mercury-Redstone, un missile en production retenu pour sa fiabilité, qui sera utilisé comme lanceur pour les premiers vols suborbitaux.

Déroulement d'une mission Mercury Atlas

Mise en orbite

Les missions Mercury lancées par une fusée Atlas sont les seules qui ont placé la capsule Mercury en orbite. Le lancement démarre avec la mise à feu du moteur-fusée principal de la fusée Atlas et des moteurs des deux boosters. Le lancement met en route l'horloge de bord qui permet le déclenchement séquentiel et automatique de toutes les opérations de la mission (séparation des étages, mise à feu des moteurs avant la rentrée atmosphérique, déploiement des parachutes, etc.). Les moteurs des boosters sont largués au bout de 125 secondes et 20 secondes plus tard la tour de sauvetage est désolidarisée du vaisseau puis ses propulseurs à poudre sont allumés pour l'écarter de la trajectoire de la fusée. La phase propulsée s'arrête 285 secondes après le décollage. Lorsque l'accélération est tombée à moins de 0,2 g des boulons explosifs désolidarisent le lanceur et la capsule Mercury puis trois petites fusées de séparation situées à l'arrière du vaisseau sont brièvement mises à feu pour écarter celui-ci de la fusée.

En orbite

Avec ses moteurs d'orientation le vaisseau effectue alors une rotation de 180 ° : il progresse désormais avec sa pointe tournée vers l'arrière avec une inclinaison négative en tangage de 34 ° (E) : il adopte ainsi la position de mise à feu des rétrofusées au cas où la mission devait être rapidement interrompue. L'astronaute est donc tourné vers l'arrière et il restera dans cette position jusqu'à l'amerrissage. Le vaisseau est désormais placé sur une orbite elliptique aux caractéristiques suivantes (à quelques

kilomètres près selon les missions) : apogée 260 km, périégée 165 km, périodicité 88 minutes (une orbite est bouclée en environ 1 heure 30), inclinaison 32,5 °.

La rentrée atmosphérique

Lorsque la mission en orbite est achevée, la rentrée dans l'atmosphère est déclenchée soit manuellement par l'astronaute ou les contrôleurs au sol, soit automatiquement grâce à l'horloge de bord qui permet au calculateur embarqué de déterminer le moment précis de la mise à feu des rétrofusées afin d'amerrir dans la zone de récupération planifiée. Le déclenchement des rétrofusées doit se faire alors que la capsule est située à 5 500 km de la verticale du lieu d'amerrissage. Le calculateur de bord vérifie avant de mettre à feu les trois rétrofusées que l'orientation de la capsule est correcte; celle-ci doit être orientée « pointe en arrière » avec une inclinaison négative de 34°. Une fois que le vaisseau a été décéléré, les courroies qui maintiennent les rétrofusées contre le bouclier thermique sont cisailées par un dispositif pyrotechnique et le container de fusées est écarté de la capsule grâce un système de ressort. Le vaisseau entame alors sa rentrée atmosphérique avec un angle de rentrée négatif qui est maintenu à 1,5° avec une décélération qui peut culminer à 11 g.

L'amerrissage

Le baromètre de bord informe le calculateur de bord lorsque l'altitude devient inférieure à 6 km. Celui-ci met alors à feu un mortier qui déploie un premier petit parachute de 2 mètres de diamètre chargé de stabiliser la capsule ainsi que des paillettes métalliques qui doivent permettre son repérage par les radars des navires chargés de sa récupération. À 3 km d'altitude le compartiment de l'antenne situé au sommet de la capsule est séparé de celle-ci par un dispositif pyrotechnique et déclenche l'extraction du parachute principal de 20 mètres de diamètre. Si celui-ci ne s'ouvre pas complètement un parachute de réserve de même taille peut être déployé. Quelques secondes plus tard le calculateur de bord déclenche à l'aide d'un système pyrotechnique la séparation du bouclier thermique : celui-ci reste accroché sous la capsule via une jupe caoutchoutée percée d'orifices formant un matelas qui doit permettre d'amortir le choc de l'amerrissage. Après l'amerrissage, les parachutes sont automatiquement largués, une antenne est déployée pour permettre l'émission d'un signal de repérage, une lampe-flash située sur le compartiment à parachute et d'une portée de 40 milles nautiques (de nuit) est allumée.

Les astronautes du programme Mercury

Ce sont dans l'ordre des vols effectués :

- Alan B. Shepard, Jr. : effectue le premier vol habité du programme Mercury 3 (vol suborbital)
- Virgil Grissom : réalise le deuxième vol suborbital (Mercury 4)
- John H. Glenn, Jr. : premier astronaute américain à effectuer un vol orbital (Mercury 6)
- Scott Carpenter : deuxième astronaute américain à effectuer un vol orbital (Mercury 7). Réalise 3 orbites comme son prédécesseur
- Walter M. Schirra, Jr. : reste deux fois plus longtemps en orbite que ses prédécesseurs (Mercury 8), 9 heures
- L. Gordon Cooper, Jr. : réalise un vol de longue durée de 34 heures (Mercury 9), 22 orbites
- Donald K. « Deke » Slayton : interdit de vol après la découverte d'un problème de santé (troubles du rythme cardiaque)

Il s'écoulera deux ans avant que le premier d'entre eux puisse voler. En attendant ce premier vol les astronautes sont soumis à un entraînement physique particulièrement rigoureux : séances en centrifugeuse pour se préparer aux fortes accélérations, dans le MASTIF (une espèce de manège pivotant à grande vitesse dans les trois dimensions) pour pouvoir réagir en cas de dysfonctionnement du système d'orientation de la capsule, longues séances dans des simulateurs de vol reproduisant le déroulement d'une mission.

Le programme Gemini

Gemini est le second programme de vols spatiaux habités lancé par les États-Unis après le programme Mercury. Intercalé entre celui-ci et le programme Apollo, il a pour objectif de permettre à l'aéronautique américaine de maîtriser des techniques de vol spatial que la capsule spatiale Mercury, trop rudimentaire, ne permettait pas de tester : les sorties extravéhiculaires, les manœuvres orbitales (avec en particulier le rendez-vous spatial). Pour remplir cet objectif l'agence spatiale américaine, la NASA, développe le vaisseau spatial Gemini biplace disposant de capacités de manœuvre en orbite importantes et qui, pour la

première fois dans le monde de l'aéronautique, met en œuvre un ordinateur embarqué. Ce vaisseau est lancé par une fusée Titan, missile balistique intercontinental reconverti en lanceur. Entre 1963 à 1966, 10 missions Gemini sont lancées : celles-ci remplissent complètement les objectifs fixés et préparent le triomphe du programme Apollo. Les États-Unis à travers ce programme reviennent au niveau de l'aéronautique soviétique qui jusque là bénéficiait d'une avance importante. Une station spatiale militaire MOL, financée par l'Armée de l'Air, est développée en utilisant la capsule Gemini. Après avoir atteint un stade très avancé (vol inhabité en 1966) le projet est annulé en 1968.



Le vaisseau de la mission Gemini 11 est préparé pour son vol

Alors que la fin du programme spatial américain Mercury se profile, des aspects importants du vol spatial tel que les rendez-vous spatiaux, qui devaient être mis en œuvre dans le cadre du programme Apollo, ne sont toujours pas maîtrisés. La capsule Mercury, monoplace et disposant de très peu d'autonomie, a atteint ses limites. Les dirigeants de la NASA lancent un programme destiné à acquérir ces techniques sans attendre la mise au point du vaisseau très sophistiqué Apollo qui sera utilisé pour les futures missions lunaires. Le programme Gemini devait remplir 3 objectifs :

- maîtriser les techniques de localisation, manœuvre et rendez-vous spatial;
- mettre au point les techniques permettant de travailler dans l'espace au cours de sorties extravéhiculaires;
- étudier les conséquences de l'apesanteur sur la physiologie humaine au cours de vols de longue durée.

Le vaisseau spatial Gemini, qui devait initialement être une simple version améliorée de la capsule Mercury, se transforme au fur et à mesure de son développement en un vaisseau complètement différent de 3,5 tonnes (contre 1 tonne environ pour le vaisseau Mercury), capable de voler avec deux astronautes durant deux semaines. Le vaisseau était lancé par une fusée Titan II, missile de l'armée de l'air américaine reconverti en lanceur. Le programme rencontra des problèmes de mise au point. Le lanceur souffrait d'effet pogo, les piles à combustible utilisées pour la première fois fuyaient et la tentative de mise au point d'une aile volante pour faire atterrir la capsule sur le sol ferme échoua. Tous ces déboires gonflèrent le coût du programme de 350 millions de dollars à 1 milliard de dollars. Toutefois, fin 1963, tout était rentré dans l'ordre et deux vols sans équipage purent avoir lieu en 1964 et début 1965. Le premier vol habité Gemini 3 emporta les astronautes Virgil Grissom et John Young le 23 mars 1965. Au cours de la mission suivante, l'astronaute Edward White réalisa la première sortie dans l'espace américaine. Huit autres missions, émaillées d'incidents sans conséquence, s'échelonnèrent jusqu'en novembre 1966 : elles permirent de mettre au point les techniques de rendez-vous spatial et d'amarrage, de réaliser des vols de longue durée (Gemini 7 resta près de 14 jours en orbite) et d'effectuer de nombreuses autres expériences.

Les missions Gemini



Edward White dans l'espace



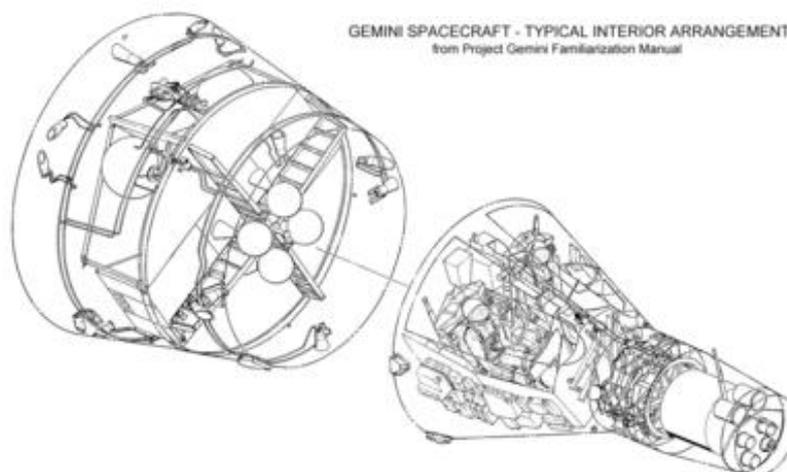
Gemini 7 vue de Gemini 6



En approche de l'étage cible Agena

Capsules	Départ Retour	Equipage	Durée	Orbites	Divers
Gemini 1	8/4/64 - 12/4/64	sans	4 jours	74	premier vol Gemini
Gemini 2	19/01/65	sans	18 mn		
Gemini 3	23/03/65	Grissom/Young	4h 52mn	3	1° vol Gemini habité
Gemini 4	3/6/65 - 7/6/65	McDivitt/White	4j 1h 56mn	62	21 mn sortie dans l'espace
Gemini 5	21/8/65 - 29/8/65	Cooper/Conrad	7j 22h 55 mn	120	
Gemini 7	4/12/65 - 18/12/65	Borman/Lovell	13j 18h 35mn	206	
Gemini 6	15/12/65 - 16/12/65	Schirra/Stafford	1j 1h 51 mn	16	rendez-vous avec Gemini 7
Gemini 8	16/3/66 - 17/3/66	Armstrong/Scott	10h 41 mn	7	1° amarrage ds l'espace
Gemini 9	3/6/66 - 6/6/66	Stafford/Cernan	3j 20 mn	47	2° sortie dans l'espace
Gemini 10	18/7/66 - 21/7/66	Young/Collins	2j 22h 46 mn	43	RV Agena et sortie
Gemini 11	12/9/66 - 15/9/66	Conrad/Gordon	2j 23h 17mn	44	Altitude 1373 km
Gemini 12	11/11/66 - 15/11/66	Lovell/Aldrin	3j 2h 34mn	59	3 sorties +de 5h

Liste des missions Gemini



Éclaté de Gemini 1

C) Les missions longue durée : les « stations » spatiales

Une **station spatiale**, dans le domaine de l'aéronautique, est une installation spatiale en orbite ou déposée sur un astre, ne disposant pas de moyens de propulsion autonomes ou ne disposant que de moyens de propulsion réduits, et destinée à assurer une ou plusieurs missions déterminées avec une certaine permanence. Jusqu'à présent, seules des stations spatiales destinées à être en orbite terrestre basse ont été construites. Elles sont désignées comme « stations orbitales ». Les stations actuelles et les précédentes ont été conçues pour rester en orbite de quelques semaines à plusieurs années. La seule station encore en activité en 2010 est la Station spatiale internationale. Les stations précédentes étaient celles des programmes soviétiques Almaz, Saliout et Mir, ainsi que la station spatiale américaine Skylab.

Particularités

Les stations spatiales se distinguent des autres engins spatiaux, comme la navette spatiale, par le fait qu'elles peuvent rester en orbite de nombreuses années. Elles sont également incapables de retourner sur Terre et ont une capacité de changement de trajectoire qui se limite à éviter des débris spatiaux. Alors que les satellites artificiels sont mis sur orbite en une seule fois, les stations spatiales, en raison de leur taille importante, sont généralement divisées en modules. Ces derniers sont mis sur orbite un par un et assemblés dans l'espace.

Utilités

Les premières stations spatiales (MOL et Almaz) ont été étudiées pour des missions d'espionnage. La dernière station à usage militaire était Saliout 5 du programme Almaz (1976-1977). Les stations spatiales sont actuellement principalement utilisées pour effectuer des expériences en impesanteur, comme :

- la fabrication de matériaux composites
- l'étude des effets de l'impesanteur sur les êtres vivants
- la validation de certains équipements destinés à effectuer des voyages spatiaux

De Soyouz 11 à Saliout 1, tous les records de durée en impesanteur ont été réalisés à bord de stations spatiales. Le record de durée en continu pour une même mission est de 437,7 jours détenu par Valeri Poliakov à bord de la station *Mir* de 1994 à 1995. Jusqu'en 2009, trois astronautes avaient bouclé des missions de plus d'une année, tous à bord de *Mir*.

Historique

Les stations spatiales ont été envisagées au moins depuis 1869 lorsqu'Everett Hale écrivit un article à propos de « navires lunaires » dans le mensuel *Atlantic*.

Plus tard, Constantin Tsiolkovski et Hermann Oberth envisagèrent eux aussi des stations spatiales.

En 1929, Hermann Noordung publie *The Problem of Space Travel*. Ce texte resta populaire pendant près de 30 ans.

En 1951, dans le *Collier's Weekly*, Wernher von Braun publie ses croquis d'une station spatiale en forme de roue.

Types

À l'heure actuelle (2010), il existe deux types de station spatiale : les stations monolithiques et les stations modulaires :

Stations monolithiques

Les stations des programmes Saliout et Skylab ont été « monolithiques », c'est-à-dire destinées à être construites et lancées en une seule pièce, leur équipage les rejoignant plus tard. Ces stations contiennent généralement tous leurs approvisionnements et équipements expérimentaux lors de leur lancement. Lorsque les expériences et l'approvisionnement arrivaient à leur terme, elles étaient considérées comme ayant rempli leur mission et étaient abandonnées.

À partir de Saliout 6 et Saliout 7, on ajouta deux terminaux d'amarrage afin de permettre la visite d'un second équipage amenant avec lui un nouveau véhicule spatial (pour des raisons techniques, les véhicules spatiaux Soyouz ne pouvaient rester plus de quelques mois en orbite en sécurité, même en étant mis hors tension. L'ajout des terminaux permit à un équipage d'utiliser la station en permanence. Skylab fut également équipé de deux terminaux d'arrimage, comme toutes les stations de deuxième génération, mais l'un d'eux ne fut jamais utilisé. La présence d'un second terminal sur les nouvelles stations permit au

véhicule spatial de ravitaillement Progress de s'arrimer à la station pour apporter du ravitaillement nécessaire aux missions de longue durée. Avec TKS, ce concept fut étendu brièvement à Saliout 7 avant d'être abandonné. Le test servit à prouver la faisabilité des stations modulaires. Les stations Saliout suivantes furent une transition entre les stations monolithiques et les stations modulaires.

Stations modulaires

Le second type, Mir et la Station spatiale internationale (ISS), sont les stations modulaires : une unité centrale est d'abord lancée et des modules additionnels, généralement avec un rôle spécifique, lui sont ajoutés plus tard (sur Mir, ils étaient généralement lancés indépendamment alors que pour l'ISS, ils étaient, en majorité, apportés par la navette spatiale). Cette méthode permet une plus grande flexibilité en opérations, ainsi que de se passer d'un lanceur à usage unique très puissant. Ces stations sont également conçues dès le départ pour un approvisionnement extérieur fourni par la logistique, ce qui permet d'allonger leur durée de vie au prix d'un lancement de ravitaillement régulier.

Fiabilité

Ces stations ont quelques problèmes qui limitent leur fiabilité à long terme, tels que le taux de recyclage très bas, un niveau élevé de radiations.... Certains de ces problèmes peuvent causer inconfort et problèmes de santé sur le long terme.

Les futurs habitats spatiaux devront résoudre ces problèmes pour pouvoir être occupés sur le long terme. Certains projets peuvent même accueillir un très grand nombre de personnes, essentiellement des « villes spatiales », où les gens pourront construire leur propre maison. Aucun de ces projets n'a encore vu le jour, car actuellement le coût de fabrication et de mise en service d'une station même petite n'est finançable que par les Etats, lesquels n'ont à ce jour aucun intérêt géostratégique à créer de telles stations résidentielles. Un moyen de diminuer ce coût, serait de construire un grand nombre de fusées (économie d'échelle), d'employer des fusées réutilisables, d'utiliser les ressources in-situ ou encore, d'utiliser un ascenseur spatial.

Structure

Une station spatiale est un système complexe avec beaucoup de sous-systèmes interdépendants :

1. Structure
2. Générateur électrique
3. Contrôle thermique
4. Détermination et contrôle de l'attitude
5. Propulsion et navigation orbitales
6. Automation et robotique
7. Ordinateurs et communications
8. Supports environnementaux et de survie
9. Installations pour l'équipage
10. Transports des équipages et du fret

Stations passées, présentes et futures

(les dates se réfèrent aux périodes pendant lesquelles elles étaient habitées)

- Stations spatiales **Saliout** (URSS, 1971–1986)
 - **Saliout 1** (1971, 1 équipage et un amarrage raté)
 - **DOS-2** (1972, échec du lancement)
 - **Saliout 2/Almaz** (1973, panne 2 jours après le lancement)
 - **Cosmos 557** (1973, brûle lors de sa ré-entrée 11 jours après le lancement)
 - **Saliout 3/Almaz** (1974, 1 équipage et un amarrage raté)
 - **Saliout 4** (1975, 2 équipages et un autre planifié n'acheva pas sa mise en orbite)
 - **Saliout 5/Almaz** (1976–1977, 2 équipages et un amarrage raté)
 - **Saliout 6** (1977–1981, 16 équipages (5 de longue durée, 11 de courte durée et un amarrage raté)
 - **Saliout 7** (1982–1986, 10 équipages (6 de longue durée, 4 de courte durée et un amarrage raté)
- **Skylab** (États-Unis, 1973–1974, 3 équipages)
- **Mir** (URSS/Russie, 1986–2000, 28 équipages de longue durée)

- **Station spatiale internationale (ISS)** (États-Unis, Agence spatiale européenne, Japon, Russie et Canada, 2000-présent, 28 équipages de longue durée à cette date (juillet 2010))
- **Tiangong** (Chine, 2011-)
 - **Tiangong 1**, (2011-, 1 équipage)
 - **Tiangong 2**
 - **Tiangong 3**

Après le désorbitage de Mir en 2001, l'ISS était la seule de ces stations encore en orbite. Elle est continuellement occupée depuis le 30 octobre 2000. Tiangong 1 l'a rejointe le 29 septembre 2011.

1) Soviétiques puis internationales

a) Saliout

Saliout 1 est la première station spatiale au monde et a inauguré le programme Saliout. Pendant 23 jours, des cosmonautes vivront à son bord.

Caractéristiques de Saliout 1

Organisation	Union soviétique
Domaine	Station spatiale orbitale
Masse	18 425 kg
Lancement	19 avril 1971 à 01:40 UTC
Lanceur	Proton
Fin de mission	16 octobre 1971
Durée	175 jours
Orbite	Orbite terrestre basse
Périapside	200 km
Apoapside	222 km
Période	88,5 min
Inclinaison	51,6°
Orbites	2 929

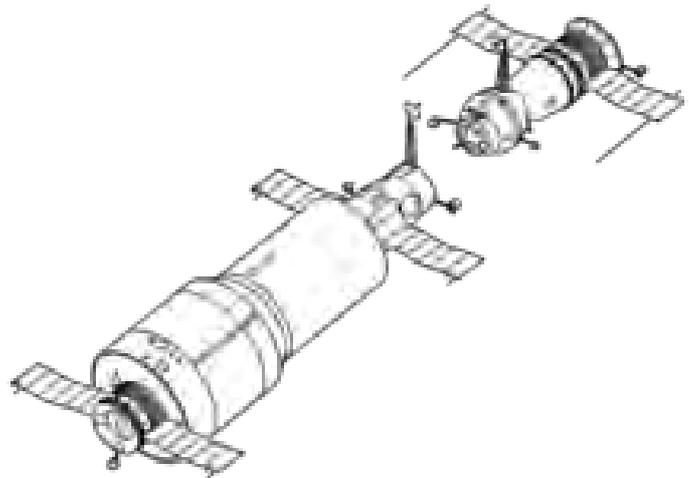


Diagramme de Saliout 1 avec un véhicule Soyouz en approche

Le 19 avril 1971, Saliout 1, la première station spatiale construite par l'homme est placée en orbite par une fusée Proton-K depuis le cosmodrome de Baïkonour. Les dirigeants de l'Union Soviétique après avoir subi une longue série d'échecs peuvent enfin annoncer que leur pays a repris l'initiative dans le domaine spatial. La NASA ne lancera la station Skylab que deux ans plus tard. Un premier équipage est lancé quatre jours plus tard à bord du vaisseau Soyouz 10. Celui-ci parvient à réaliser la manœuvre de rendez-vous et à s'amarrer à la station spatiale sans rencontrer de problème. Mais lorsque les cosmonautes tentent de démonter l'écouille de leur vaisseau pour accéder au tunnel qui relie le vaisseau à la station, ils n'y parviennent pas. Ils doivent renoncer et revenir sur Terre sans avoir pu pénétrer dans la station spatiale. L'enquête réalisée après leur retour démontrera que l'écouille n'a pu être déverrouillée à cause d'une anomalie dans un circuit électrique du système d'amarrage du vaisseau Soyouz. Quelques mois plus tard Soyouz 11 est lancé le 11 juin 1971 avec à son bord Gueorgui Dobrovolski, Viktor Patsaïev et Vladislav Volkov. Le vaisseau rejoint la station, s'amarre à celle-ci et l'équipage parvient cette fois à pénétrer à l'intérieur de Saliout 1. Malgré une certaine appréhension liée à l'insuffisance de leur entraînement, l'équipage parvient à mener ses différentes tâches à bord durant les 12 premiers jours. Le 18 juin un feu électrique se déclare dans la station. L'équipage alarmé demande à être évacué et entame les préparatifs de départ. Finalement le feu est maîtrisé mais l'équipage a été fortement ébranlé par cet épisode. Le contrôle au sol décide d'abrégier le séjour de l'équipage dans l'espace. Le 29 juin, l'équipage quitte la station à bord du vaisseau Soyouz. Les cosmonautes portent une combinaison qui les protège du froid mais pas de la dépressurisation. Soyouz 11 effectue peu après la séquence de manœuvres qui précède la rentrée atmosphérique. Le module orbital et le module de descente du vaisseau se séparent. Mais les boulons pyrotechniques se déclenchent tous en même temps au lieu d'exploser les uns à la suite des autres. La violence de la déflagration descelle deux valves utilisées pour égaliser la pression avec

l'extérieur lorsque la pression atmosphérique est redevenue presque normale donc près du sol. En 30 secondes, l'habitacle est vidé de son atmosphère. L'équipage tente en vain de trouver la fuite et de l'obturer mais perd conscience en moins d'une minute et décède peu après. Le vaisseau atterrit intact mais son équipage ne peut être ranimé. Cette catastrophe, qui vient peu après le décès de Vladimir Mikhaïlovitch Komarov en 1967 à bord de Soyouz 1 et de celui de Youri Gagarine en 1968 lors d'un vol entraînement, frappe le pays. Les astronautes de Soyouz 11 ont droit à des funérailles nationales. Leurs cendres sont scellées dans le mur du Kremlin. En octobre 1971, il devient évident que la mise au point des modifications du vaisseau Soyouz vont nécessiter du temps, un ordre est envoyé à la station Saliout 1 pour qu'elle quitte son orbite et effectue une rentrée atmosphérique au-dessus de l'Océan Pacifique. La station restera en orbite jusqu'au 16 octobre et totalisant 175 jours en orbite et 2 929 révolutions.

Spécification

- Longueur: 15,8 m
- Diamètre maximal : 4,15 m
- Volume habitable : 90 m³
- Poids au lancement : 18 900 kg
- Nombre de panneaux solaires : 4
- Longueur des panneaux solaires : environ 10 m
- Surface des panneaux solaire : 28 m²
- Nombre de ports d'amarrage : 1

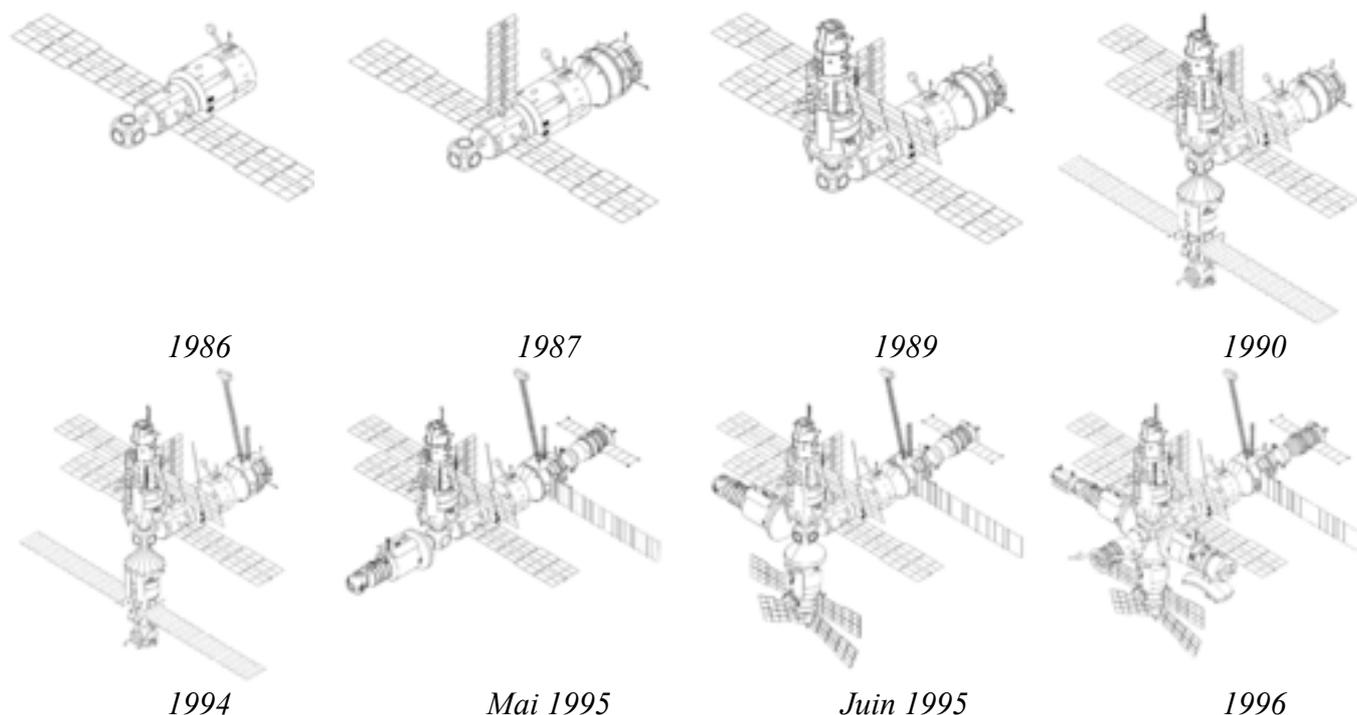
b) Mir

Mir (du russe : Мир signifiant « paix » et « monde ») était une station spatiale russe placée en orbite terrestre basse par l'Union soviétique. Mise en orbite le 19 février 1986 et détruite volontairement le 23 mars 2001, elle fut assemblée en orbite entre 1986 et 1996. *Mir* était la première station spatiale composée de plusieurs modules, possédait une masse supérieure à celle de n'importe quel satellite précédent et détenait le record du plus grand satellite artificiel en orbite autour de la Terre jusqu'à sa désorbitation le 21 mars 2001 (record aujourd'hui détenu par la Station spatiale internationale). *Mir* a servi de laboratoire de recherche en micropesanteur. Des équipages y ont mené des expériences en biologie, biologie humaine, physique, astronomie, météorologie et sur les systèmes spatiaux afin de développer les technologies nécessaires à l'occupation permanente de l'espace. *Mir* fut la première station spatiale permettant l'exploitation spatiale habitée à long terme et était occupée par une série d'équipages effectuant des séjours de longue durée. Le programme Mir détenait le record de la plus longue présence humaine ininterrompue dans l'espace, de 3644 jours, jusqu'au 23 octobre 2010 (quand il a été dépassé par l'ISS), et il détient actuellement le record du plus long vol spatial d'un être humain sans interruption, de 437 jours et 18 heures, effectué par Valeri Polyakov. *Mir* a été occupée pendant un total de douze ans et demi durant ses quinze années d'existence. Elle pouvait accueillir un équipage résident de trois cosmonautes et plus lors de séjours de courte-durée. Après le succès du programme Saliout, *Mir* représentait l'étape suivante du programme de station spatiale de l'Union soviétique. Le premier module de la station, connu sous le nom de module de base ou module central, a été lancé en 1986, et a été suivi par six autres modules, tous lancés par des fusées Proton (à l'exception du module d'amarrage, lancé par la navette spatiale *Atlantis*). Une fois terminée, la station se composait de sept modules pressurisés et de plusieurs autres éléments non pressurisés. L'énergie de la station était fournie par plusieurs panneaux photovoltaïques montés directement sur les modules. La station était maintenue à une orbite comprise entre 296 km et 421 km d'altitude et orbitait à une vitesse moyenne de 27 700 km/h, complétant 15,7 orbites par jour.

Assemblage

L'assemblage orbital de *Mir* a débuté en février 1986 avec le lancement du module central par une fusée Proton-K. Quatre des six modules qui ont été ajoutés par la suite (*Kvant-2* en 1989, *Kristall* en 1990, *Spektr* et *Priroda* en 1996) ont suivi la même séquence pour s'ajouter au complexe *Mir*. Tout d'abord, le module est lancé indépendamment des autres par sa propre fusée Proton-K et rejoint la station automatiquement. Il est ensuite amené vers le port d'amarrage axial du nœud d'amarrage du module central, puis étendra son bras Lyappa pour s'accoupler avec un dispositif de fixation placé sur l'extérieur

du nœud. Le bras déplace ensuite le module vers l'un des quatre ports d'amarrage radiaux et le fait tourner à 90°. Le nœud était équipé de seulement deux points d'ancrage *Konus*, qui étaient cependant nécessaires aux amarrages. Cela signifie que, avant l'arrivée de chaque nouveau module, le nœud devait être dépressurisé pour permettre aux cosmonautes de réaliser une sortie extravéhiculaire afin de déplacer manuellement le cône vers le port suivant.

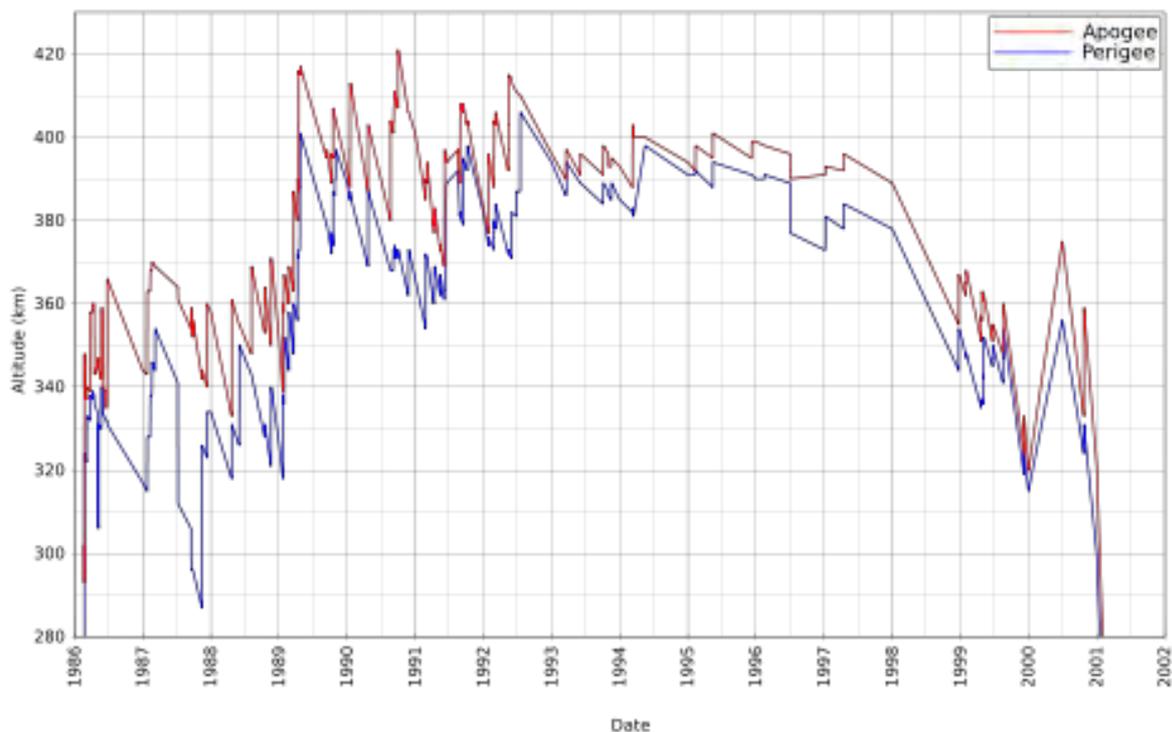


Les deux autres modules d'extension, *Kvant-1* en 1987 et le module d'amarrage en 1995, ont suivi des procédures différentes. *Kvant-1*, n'ayant, à la différence des quatre modules mentionnés ci-dessus, aucun système propulsif, il a été lancé attaché à un remorqueur dérivé du vaisseau spatial TKS. Le remorqueur dirigea le module vers la partie arrière du module central et non pas vers le nœud d'amarrage. Une fois l'amarrage réalisé, le remorqueur se détacha du module désormais fixé et se désorbita. Le module d'amarrage, quant à lui, a été lancé à bord de la navette spatiale américaine *Atlantis* lors de la mission STS-74. Le module fut fixé directement depuis la soute de la navette au port d'amarrage APAS du module *Kristall*^{3,6}. Divers autres composants externes, dont trois armatures métalliques, plusieurs expériences et d'autres éléments non pressurisés ont également été montés à l'extérieur de la station par les cosmonautes, effectuant un total de quatre-vingts sorties dans l'espace au cours de l'histoire de la station. L'assemblage de la station a marqué le début de la troisième génération de stations spatiales, *Mir* étant la première station à comprendre plus d'un vaisseau spatial primaire (ouvrant ainsi une nouvelle ère dans l'architecture spatiale). Les stations dites de première génération telles que Saliout 1 et Skylab ne comprenaient qu'un seul module sans capacité de ravitaillement, tandis que les stations dites de deuxième génération Saliout 6 et Saliout 7 comprenaient une station dotée de deux ports permettant un ravitaillement par vaisseau cargo (comme par exemple Progress). La capacité de *Mir* être étendue avec des modules complémentaires signifiait que chacun de ces modules pourrait être conçu dans un but précis (par exemple, le module *Kvant-1* était dédié aux expériences scientifiques), ce qui élimine le besoin d'installer tout l'équipement de la station dans un seul module.

Comparaison des caractéristiques des stations spatiales					
Caractéristique	Saliout 4	Skylab	Saliout 6	Mir	Station spatiale internationale
Période opérationnelle	12/1974-7/1975	5/1973-2/1974	10/1977 - 5/1981	3/1986-4/2000	10/2000 -
Masse totale	18,5 t.	90 t.	18,5 t.	124 t.	400 t.
Modules pressurisés	1	3	1	7	11/12
Volume pressurisé	100 m ³	320 m ³	100 m ³	350 m ³	400 m ³ utilisables
Équipage permanent	2	3	3	3	6

Ports d'amarrage	1	2	2	5	~10
Énergie électrique	4 kW	10 kW (7 kW eff)	4 kW	42 kW	110 kW
Contrôle d'attitude principal	moteurs chimiques	gyroscopes	moteurs chimiques	gyroscopes	gyroscopes
Ravitaillement	non	non	Progress	Progress	Navette, Progress

Mir était maintenue en orbite circulaire basse, de périapside moyen de 354 km et d'apoapside moyen de 374 km, se déplaçant à une vitesse moyenne de 27 700 km/h et complétant 15.7 orbites par jour. Comme la station perdait constamment de l'altitude en raison d'une légère traînée atmosphérique, il était nécessaire de rétablir son orbite à une altitude suffisante plusieurs fois par an. Cette tâche était généralement effectuée par les vaisseaux de ravitaillement Progress et, durant le programme Shuttle-*Mir*, par les navettes spatiales américaines. Avant l'arrivée du module *Kvant-1*, des moteurs placés sur le module central pouvaient aussi réaliser cette tâche.



Graphique montrant les variations d'altitude de *Mir* entre le 19 février 1986 et le 21 mars 2001

Micropesanteur

À l'altitude orbitale de *Mir*, la force de gravité Terrestre était de 88 % de celle au niveau de la mer. La chute libre constante de la station donnait aux cosmonautes une sensation d'apesanteur, mais l'environnement à bord de la station n'était pas en réalité un environnement de gravité zéro parfaite mais de micropesanteur. Cet état d'apesanteur ressenti n'était donc pas parfait et pouvait être perturbé par cinq effets distincts :

- La traînée résultant de l'atmosphère résiduelle,
- L'accélération vibratoire causée par les systèmes mécaniques et l'équipage à bord,
- Les corrections orbitales effectuées par les roues de réaction (pivotants à 10 000 tr/min et produisant des vibrations de 166,67 Hz) et les propulseurs,
- Les forces de marée. Chaque partie de *Mir* n'étant pas à la même distance de la Terre, elles devaient chacune suivre une orbite différente. Mais comme ces parties faisaient physiquement partie de la même station, cela était impossible et subissaient donc des petites accélérations dues aux forces de marée,
- Les différences de plan orbital entre les différents points à bord de la station.

Coopération internationale

Intercosmos était un programme spatial lancé par l'Union Soviétique en 1969 visant à permettre l'accès à l'espace aux pays du pacte de Varsovie et de leurs alliés (et de certains pays non-alignés comme la France et l'Inde).

Implication européenne

Tout au long de la durée du programme *Mir*, de nombreux cosmonautes européens ont visité la station à l'occasion de divers programmes de coopération spatiale. C'est lors de ces missions que le Royaume-Uni, l'Autriche et la Slovaquie envoyèrent leurs premiers cosmonautes dans l'espace.

- Jean-Loup Chrétien - *Aragatz* (1988)  France
- Helen Sharman - Project Juno (1991)  Royaume-Uni
- Franz Viehböck - *Austromir '91* (1991)  Autriche
- Klaus-Dietrich Flade - *Mir '92* (1992)  Allemagne
- Michel Tognini - *Antarès* (1992)  France
- Jean-Pierre Haigneré - *Altair* (1993)  France
- Ulf Merbold - *Euromir '94* (1994)  Allemagne
- Thomas Reiter - *Euromir '95* (1995)  Allemagne
- Claudie Haigneré - *Cassiopee* (1996)  France
- Reinhold Ewald - *Mir '97* (1997)  Allemagne
- Léopold Eyharts - *Pégase* (1998)  France
- Ivan Bella - *Stefanik* (1999)  Slovaquie

Au cours des 15 années passées en orbite, *Mir* fut visitée par un total de 28 équipages de longue-durée. Chacun d'eux recevait un numéro d'expédition formaté comme suit: EO-X. Ces expéditions variaient en longueur (de 72 jours pour l'équipage de EO-28, aux 437 jours de Valeri Poliakov), mais duraient généralement environ 6 mois. L'équipage de ces expéditions était composé de deux à 3 cosmonautes, qui étaient parfois lancés comme membre d'une expédition, et retournaient sur Terre avec une autre (Poliakov fut lancé avec EO-14 et atterrit avec EO-17). Ces expéditions étaient parfois complétées par des équipages de visite supplémentaires qui séjournèrent à bord de la station durant la période d'une semaine qui séparait le départ d'une expédition et l'arrivée de la suivante. Les systèmes de support de vie de la station étaient capables d'assurer la présence de 6 passagers maximum pendant une courte période. La station fut occupée pendant 4 périodes distinctes: Du 12 mars au 16 juillet 1986 (EO-1), du 5 février 1987 au 27 avril 1989 (EO-2 - EO-4), du 5 septembre 1989 au 28 août 1999 (EO-5 - EO-27) puis du 4 avril 2000 au 16 juin 2000 (EO-28). Avant sa désorbite, *Mir* fut visitée par un total de 104 personnes différentes de 20 pays différents, faisant d'elle l'engin spatial le plus visité de l'histoire (un record aujourd'hui détenu par la Station Spatiale Internationale).



Valeri Poliakov lors de son séjour (437 jours) à bord



Navette spatiale Atlantis amarrée à Mir durant la mission STS-71

a) Américaines puis internationales

a. Skylab

Skylab (abréviation de *Sky Laboratory*, « laboratoire du ciel » en français) est la première station spatiale lancée par l'agence spatiale américaine, la NASA. Elle est développée dans le cadre du *Programme des applications Apollo* mis en place en 1965 pour donner une suite au programme Apollo. Le projet est lancé dans un contexte de réduction budgétaire des dépenses spatiales américaines et l'architecture retenue repose essentiellement sur la réutilisation de composants existants. La station spatiale est un ensemble long de 35 mètres et d'une masse de 90 tonnes dont le module principal est réalisé à partir du troisième étage de la fusée lunaire géante Saturn V. Skylab est mise en orbite le 14 mai 1973. Au cours de son lancement la station perd une partie de son revêtement thermique et de ses panneaux solaires. Le premier équipage qui la rejoint quelques jours plus tard doit d'abord restaurer son habitabilité. Trois équipages y séjournent entre 1973 et 1974 dont le dernier, durant près de 84 jours, établit un nouveau record. Les astronautes réalisent à bord de nombreuses observations scientifiques en particulier l'observation du Soleil grâce à une batterie d'instruments et l'étude de l'adaptation de l'homme à l'espace. À l'issue de ces missions et faute de lanceurs disponibles et de budget, la station est mise en sommeil en attendant la mise au point de la Navette spatiale américaine en cours de développement. Mais le planning de ce projet prend du retard et l'intensité inattendue de l'activité solaire dégrade plus rapidement que prévu l'orbite de la station spatiale qui se désintègre en rentrant dans l'atmosphère le 11 juillet 1979.

Expériences scientifiques

À compter du 9 août les observations du Soleil sont au cœur des activités de l'équipage. Au début de leur séjour, l'activité solaire est faible mais le 9 août une éruption solaire de taille moyenne est signalée par un astronome sur Terre. Le 21 ils sont récompensés par l'observation d'une énorme éruption dont la taille atteint les trois quarts de celle du Soleil. Durant la même période les astronautes ont également un important programme d'observation de la Terre. Les prises d'images effectuées durent 35 minutes par jour mais requièrent contrairement à l'observation du Soleil la participation de tout l'équipage.

Observations de la comète Kohoutek

Alors que la comète Kohoutek s'approche du Soleil avec un passage au plus près programmé le 28 décembre, une campagne d'observations systématiques du phénomène débute à bord de Skylab à compter du 23 novembre. Plusieurs instruments scientifiques prévus pour cette occasion sont pointés vers la comète en utilisant le sas scientifique situé dans l'atelier orbital à l'opposé de la direction du Soleil. L'objectif est notamment de déterminer la composition du noyau et de la queue de la comète. Lorsque la comète se trouve proche du Soleil les télescopes solaires de l'ATM deviennent les principaux moyens d'observation utilisés. Deux membres de l'équipage se relaient à la console de ces instruments pour centrer la visée de ces instruments sur la comète. Deux sorties extravéhiculaires sont réalisées le jour de Noël et quatre jours plus tard. Au cours de celles-ci Carr et Pogue réalisent plusieurs photos de la comète, changent les cassettes de film et débloquent la trappe qui démasque le spectrohéliographe ainsi que la roue porte-filtres du télescope à rayons X.



Lancement de Skylab par une fusée Saturn V



Vue de Skylab en orbite

Activité des trois équipages (en heures-hommes)				
Activité	Skylab 2	Skylab 3	Skylab 4	Total
Activités médicales	7,5 %, 145,3 h	8,5 %, 312,5 h	6,1 %, 366,7 h	6,9 %, 824,5 h
Observations du Soleil	6 %, 117,2 h	7,8 %, 305,1 h	8,5 %, 519 h	7,9 %, 941,3 h
Étude des ressources de la Terre	3,7 %, 71,4 h	5,7 %, 223,5 h	4,5 %, 274,5 h	4,8 %, 569,4 h
Autres expériences	3,4 %, 65,4 h	6,2 %, 243,6 h	6,7 %, 403 h	6 %, 712 h
Périodes de repos, temps libre	34,7 %, 675,6 h	31,2 %, 1 224,5 h	30,5 %, 1 846,5 h	31,5 %, 3 747,6 h
Repas, lever et coucher	24,5 %, 477,1 h	24,8 %, 975,7 h	23 %, 1 384 h	23,8 %, 2 836,8 h
Entretien de la station	5,3 %, 103,6 h	4 %, 158,4 h	4,9 %, 298,9 h	4,7 %, 560,9 h
Exercices physiques, hygiène	2,9 %, 56,2 h	5,2 %, 202,2 h	6,4 %, 384,5 h	5,4 %, 642,9 h
Sorties extravéhiculaires, autres	12 %, 232,5 h	7,1 %, 279,7 h	9,4 %, 571,4 h	5,4 %, 1 083,6 h
Total	100 %, 1 944,3 h	100 %, 3 925,2 h	100 %, 6 048,5 h	100 %, 11 918 h

Caractéristiques des principaux modules de la station Skylab				
Module	Masse	Volume pressurisé	Longueur	Diamètre
Atelier orbital	38,33 t	270,2 m ³	14,7 m	6,6 m
Module du sas				
Module d'amarrage				
Plateforme ATM	11,2 t	-	4,1 m	-
Total	90,6 t	354 m³	35 m	6,6 m
Vaisseau Apollo				

La station américaine constitue à l'époque le plus grand engin habitable mis en orbite par l'Homme. Long de 35 mètres avec une masse de 90,6 tonnes, le volume habitable est de 354 m³. Skylab est constituée de plusieurs modules :

- L'atelier orbital OWS (Orbital Workshop) est le principal composant de la station spatiale. Il comprend la zone qui héberge l'équipage, les principaux emplacements de stockage des consommables. Les principaux panneaux solaires sont attachés à ce module. Les moteurs chargés de contrôler l'orientation et les réservoirs de stockage des gaz froids qui les alimentent sont stockés.
- Le module du sas AM (Airlock Module) contient le sas, le système de communications, le système de contrôle thermique et le système de contrôle d'énergie.
- Le module d'amarrage multiple MDA (Multiple Docking Adapter) comprend le dispositif d'amarrage utilisé par le vaisseau Apollo, le pupitre qui permet de contrôler les télescopes ATM, les capteurs utilisés pour l'observation de la Terre ainsi qu'un certain nombre d'autres expériences.
- La plate-forme des télescopes ATM (Apollo Telescope Mount)

Pour répondre aux objectifs scientifiques qui constituent la principale raison d'être de Skylab, la station spatiale emporte 90 expériences. On trouve ainsi à l'extérieur de la station 8 télescopes consacrés à l'observation du Soleil, trois caméras pour l'observation de la Terre. À l'intérieur l'atelier orbital dispose d'une chambre permettant de faire de la métallurgie en apesanteur. Par contre, contrairement à la station spatiale soviétique Saliout, Skylab n'emporte aucune expérience relative à la croissance des plantes. Ces recherches, importantes dans la perspective de vols habités interplanétaires, ont été exclues lorsque le financement de la station spatiale a été consenti à condition que les objectifs soient purement tournés vers des applications terrestres.

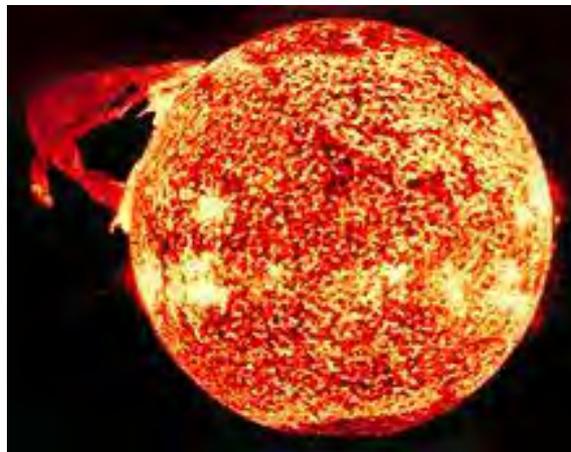
L'observatoire solaire

Skylab constitue un poste d'observation particulièrement adapté à l'observation du Soleil et des phénomènes qui touchent sa surface dans des longueurs d'ondes qui ne peuvent être étudiées depuis le sol car filtrées par l'atmosphère comme l'ultraviolet et les rayons X. Huit instruments situés dans le module ATM sont pointés en permanence vers le Soleil :

- un coronographe à lumière blanche qui permet de photographier la couronne solaire jusqu'à 6 rayons solaires

- un spectrographe couvrant les longueurs d'ondes comprises entre 97 et 394 nanomètres
- un spectromètre-spectrohéliomètre pour les longueurs d'ondes comprises entre 30 et 40 nanomètres
- un spectrohéliographe pour 16-62,5 nm
- deux télescopes rayons X couvrant les longueurs d'ondes comprises entre 0,2 et 6 nm
- deux caméras observant le Soleil dans la longueur de la raie d'émission de l'hydrogène H α (656,3 nm).

Le pupitre situé dans le module ATM permet à l'équipage d'ajuster l'orientation des instruments, de modifier leur contrôle, de visualiser à l'aide d'un écran de télévision les images enregistrées, de contrôler l'état des instruments et de déclencher l'enregistrement des images. Chacun des trois équipages comporte un scientifique dont le rôle est d'identifier les situations intéressantes ainsi que d'optimiser le réglage et le pointage des instruments. Les objectifs de ces observations sont notamment d'étudier les éruptions solaires, le développement et la morphologie des régions actives de la surface du Soleil, l'étude des phénomènes ayant une extension temporelle s'étendant en jours ou en semaines... Les travaux menés par les astronautes de Skylab sont coordonnés avec des observations effectuées depuis le sol et des lancements de fusées-sondes.



Éruption solaire photographiée par un des instruments de l'ATM

Téledétection des ressources terrestres

L'ensemble instrumental EREP (Earth Resources Experiment Package) a pour objectif d'évaluer de nouvelles techniques de télédétection des ressources terrestres et fait suite à l'envoi par la NASA de son premier satellite d'observation des ressources terrestres Landsat 1 (ERTS-1). Cette expérience comprend six instruments :

- Six caméras observant chacune dans une longueur d'ondes donnée en lumière visible et infrarouge. La résolution est de 30 mètres et la largeur de zone couverte est de 161 km.
- Une caméra de terrain fournissant des images à haute résolution du sol. La résolution est de 11 mètres et la fauchée est de 161 km.
- Un spectromètre infrarouge fournissant des données dans les spectres visibles en infrarouge et devant permettre d'évaluer l'atténuation atmosphérique du signal. L'angle de visée peut être modifié par l'astronaute
- Un scanner multispectral enregistrant les signatures spectrales du sol dans 11 bandes spectrales allant du visible à l'infrarouge thermique en passant par le proche infrarouge (0,4 à 12,5 micromètres). La fauchée est de 74 km et la résolution est de 79 mètres.
- Un radiomètre/scattéromètre et altimètre micro-ondes. Cet instrument mesure à la fois le rayonnement radar réfléchi et le rayonnement émis en micro-ondes. Les données restituées doivent fournir des informations sur la couverture neigeuse, l'extension des sols gelés. Il doit permettre d'établir la faisabilité de mesurer différents types de sols et de textures, la chaleur dégagée par les zones urbanisées... La zone couverte au nadir de l'instrument se trouve dans un cercle de 11,1 km de diamètre.
- Un radiomètre en bande L destiné à mesurer les températures de la surface avec une largeur de prises de vue de 111 km.

Deux des astronautes de chacun des équipages ont été formés à la mise en œuvre de ces instruments. Ceux-ci utilisent des consoles installées dans le module ATM pour mettre en marche les instruments, les pointer et modifier les réglages.

Sciences de la vie / Biologie

La capacité de l'homme à survivre dans l'espace sur la durée c'est-à-dire à supporter l'absence de pesanteur et le confinement puis à retrouver ses capacités une fois revenu sur Terre constitue une des principales interrogations auxquelles la station spatiale doit répondre. Jusque là les missions les plus longues, menées dans le cadre du programme Gemini et Apollo, ont duré deux semaines. Dans le cadre de ces missions seules des données biomédicales basiques avaient été collectées tels que la pression sanguine, le rythme respiratoire et la température du corps. Les analyses effectuées après les vols avaient permis de constater une perte de poids et de la masse musculaire, une décalcification des os et, après le retour sur Terre, une réduction de la capacité des vaisseaux sanguins à redistribuer le sang dans les parties du corps qui en ont besoin. Ces effets disparaissaient complètement quelques jours après le retour sur Terre dans un délai non lié à la durée du vol. Le programme Skylab permet de mener des missions sur des durées beaucoup plus longues (initialement 28 et 56 jours portée finalement à 84 jours pour Skylab-4). Les équipements embarqués à bord de la station ainsi que la disponibilité de l'équipage permettent de mener des études en profondeur continues. Les expériences sont les suivantes :

- Étude de la balance minérale du corps par mesure de la nature et de la quantité de nourriture et de liquide absorbé, prise de poids quotidienne, mesure des quantités d'urine et analyse d'échantillon des urines, de sang, et de fèces qui, à cet effet, sont ramenées après déshydratation sur Terre. Plusieurs équipements à bord de la station sont installés dans cet objectif : un système de mesure du poids fonctionnant en apesanteur, un système de collecte des fèces et un autre dédié à la collecte des urines.
- Étude des fonctions endocriniennes et métaboliques.
- Étude de la capacité et de la rapidité avec lesquelles le système cardiovasculaire s'adapte dans un environnement sans gravité. Pour effectuer cette mesure, les astronautes introduisent leur corps dans une machine qui met en dépression la partie inférieure de celui-ci.
- Étude de l'activité du cœur en apesanteur par le biais de réalisations périodiques d'électrocardiogrammes en période de repos ou durant certains exercices
- Études cytogéniques du sang
- Études des dispositifs immunitaire
- Mesure du volume sanguin et de la durée de vie des globules rouges.
- Étude du métabolisme des globules rouges
- Mesure des effets spéciaux hématologiques
- Étude des effets de la pesanteur sur le système vestibulaire
- Étude de l'apesanteur sur le sommeil
- Étude de la mobilité et de la perception du temps dans l'espace
- Mesure de l'activité métabolique
- Observation de l'absence de gravité sur des cultures de cellules humaines
- Détermination des changements induits par l'apesanteur dans le rythme quotidien d'un mammifère (souris à poche) par l'absence de gravité.
- Détermination des changements induits par l'apesanteur dans le rythme quotidien de la mouche du vinaigre de l'état larvaire à l'état adulte

Autres expériences scientifiques

ASTRONOMIE STELLAIRE

L'astronomie stellaire ne représente qu'une part modeste des expériences embarquées mais ses objectifs présentent un grand intérêt. Deux instruments étudient le rayonnement ultraviolet émis par les étoiles, les nébuleuses, la poussière interstellaire et les galaxies. Les images obtenues permettent des évaluations statistiques des populations d'étoiles. Une troisième expérience enregistre le rayonnement X avec un instrument à grande ouverture qui est utilisé pour identifier les parties du ciel émettant ce type de rayonnement.

SCIENCES DES MATERIAUX

L'absence d'apesanteur, une condition pratiquement impossible à reproduire au sol, permet de réaliser des opérations de fusion et de mélange sans les effets contaminants des contenants en supprimant les phénomènes de convection dans les liquides et les matériaux fondus ainsi qu'avec la possibilité d'utiliser les forces magnétique et électrostatique qui sont sur Terre annihilées par la pesanteur. Ce contexte ouvre des perspectives dans la réalisation de nouveaux matériaux et permet d'utiliser des nouveaux processus de fabrication.

EXPERIENCES DE TECHNOLOGIE SPATIALE

L'objectif de ces expériences est d'étudier les capacités de l'homme à exécuter des tâches en apesanteur et d'évaluer différents systèmes et instruments pouvant améliorer la mobilité et les conditions de travail dans ce milieu. Parmi les équipements évalués figurent plusieurs systèmes pour permettre aux astronautes de se déplacer de manière autonome dans le vide au cours de leurs sorties extravéhiculaires. Plusieurs matériaux sont exposés dans le vide pour étudier leur évolution : échantillons de surfaces optiques, revêtements thermiques. La contamination de l'environnement immédiat de la station par ses rejets (jets des moteurs, rejets liquides) est évaluée à l'aide de photographies. La dégradation de l'atmosphère interne de la station est mesurée. Les doses de rayonnement reçues par les astronautes sont mesurées. Enfin les performances des astronautes à travers différentes expériences sont évaluées.

EXPERIENCES D'ETUDIANTS

Skylab embarque 19 expériences proposées par des lycéens dans le cadre d'un projet visant à stimuler l'intérêt des scolaires pour les sciences. L'expérience la plus connue est celle consistant à étudier les toiles tissées par des araignées en apesanteur.

Résultats scientifiques

Les tâches scientifiques des équipages de la station spatiale ont produit une énorme quantité de données avec 103 000 photographies et spectres électromagnétiques du Soleil (ainsi que 68 000 prises d'images de la caméra alpha-H), des dizaines de kilomètres d'enregistrements sur bande magnétique et 46 000 photographies des ressources terrestres et un nombre considérable de mesures médicales (pression sanguine, analyse d'urine, électrocardiogrammes...).

Temps consacré aux expériences scientifiques (en heures-hommes)								
Type d'expérience	Skylab 2		Skylab 3		Skylab 4		Total	
Observation du Soleil	117,2 h	29,9 %	305,1 h	28,2 %	519 h	33,2 %	941,3 h	31 %
Téledétection des ressources de la Terre	71,4 h	18,2 %	223,5 h	20,6 %	274,5 h	17,6 %	569,4 h	18,8 %
Expériences d'étudiants	3,7 h	9 %	10,8 h	1 %	14,8 h	0,9 %	29,3 h	0,9 %
Astrophysique	36,6 h	9,4 %	103,8 h	9,6 %	133,8 h	8,5 %	274,2 h	9 %
Systèmes	12,1 h	3,1 %	117,4 h	10,8 %	83 h	5,3 %	212,5 h	7 %
Science des matériaux	5,9 h	1,5 %	8,4 h	0,8 %	15,4 h	1 %	29,7 h	1 %
Science de la vie	145,3 h	37 %	312,5 h	29 %	366,7 h	23,5 %	824,5 h	27,2 %
Étude de la comète Kohoutek	-	-	-	-	156 h	10 %	156 h	5,1 %
Total	392,2 h	100 %	1 081,5 h	100 %	1 563,2 h	100 %	3 036,9 h	100 %

Observation du Soleil

Les résultats fournis par les instruments utilisés pour étudier le Soleil à bord de Skylab ont permis des progrès considérables dans la connaissance de l'astre. Ceux-ci ont mis en évidence des relations jusqu'à présent cachées entre les différentes couches de l'atmosphère solaire : photosphère, chromosphère... La couronne solaire a pu pour la première fois être complètement observée et non ses seules franges. Les photographies du rayonnement X émanant du Soleil ont permis de révéler les secrets des trous coronaux. Les éruptions solaires ont pu être filmées dès leur apparition grâce à la réactivité des astronautes. L'utilisation simultanée de plusieurs types d'instruments a montré que les caractéristiques de ce phénomène perceptibles en lumière visible ne sont que l'aboutissement de manifestations beaucoup plus importantes dans d'autres longueurs d'ondes et se déroulant à plus grande altitude dans l'atmosphère solaire. Skylab a ainsi permis de découvrir un nouveau domaine de l'activité solaire : les éjections de

masse coronale atteignent des tailles supérieures au Soleil lui-même et envoient un courant de particules au-delà des planètes. Ces manifestations n'avaient jusqu'à présent pas été identifiées.

Résultats médicaux

Le séjour prolongé des équipages de Skylab a été mis à profit pour étudier le comportement du corps humain dans l'espace en l'absence de gravité. Sur les 9 membres des équipages de la station spatiale, cinq ont été victimes du mal de l'espace. L'analyse des cas semble prouver que la survenue du mal de l'espace est très liée aux caractéristiques de chaque individu et est difficilement prévisible. Les médicaments utilisés pour combattre le mal de l'espace ont réduit la gravité sans toutefois empêcher le mal. Tous les astronautes ont vu leur mal de l'espace disparaître au bout d'une semaine et celui-ci n'est plus réapparu durant le reste de la mission. Dans un autre domaine, l'étude de la balance de calcium des équipages a montré que le squelette des astronautes se décalcifiait progressivement. Ces résultats ont confirmé ceux obtenus dans le cadre des missions du programme Gemini. Des radiographies réalisées avant et après les vols ont confirmé la perte de substance osseuse des os supportant le poids du corps. La masse musculaire s'est atrophiée également malgré les exercices pratiqués par les astronautes. La perte de substance osseuse après un séjour de 84 jours n'a pas été jugée dangereuse et des missions de plus longue durée sont donc envisageables. Mais des dommages irréversibles pourraient survenir après un séjour d'une durée d'un an ou plus.

b. ISS : la Station Spatiale Internationale

La **Station spatiale internationale** (en anglais *International Space Station* ou **ISS**) est une station spatiale placée en orbite terrestre basse, occupée en permanence par un équipage international qui se consacre à la recherche scientifique dans l'environnement spatial. Ce programme, lancé et piloté par la NASA, est développé conjointement avec l'agence spatiale fédérale russe (FKA), avec la participation des agences spatiales européenne, japonaise et canadienne. Après de nombreuses études menées par la NASA dans les années 1960 et 1970, le projet est lancé en 1983 par le président des États-Unis Ronald Reagan, mais un coût toujours croissant et un contexte politique peu favorable aux grands programmes spatiaux civils retardent sa réalisation jusqu'en 1998. En 1993, la Russie est invitée, pour des raisons géopolitiques, à devenir un acteur majeur du programme. L'assemblage en orbite débute en 1998, mais l'accident de la navette spatiale Columbia, en 2003, retarde sensiblement son avancement. Les ambitions du programme sont, à plusieurs reprises, revues à la baisse, faute de disposer de budgets suffisants, tant du côté russe qu'américain. Pour placer en orbite les composants de la station, mais également assurer le ravitaillement et rehausser l'orbite régulièrement dégradée par la traînée atmosphérique, plusieurs vaisseaux spatiaux se relaient : les cargos Progress russes, ATV européens, le HTV japonais, tandis que le vaisseau russe Soyouz assure de manière exclusive la relève des équipages depuis l'arrêt de la navette spatiale américaine. Celle-ci a joué un rôle majeur grâce à sa capacité d'emport, et son retrait, intervenu en août 2011 pour des raisons d'obsolescence et de sécurité, crée des contraintes logistiques mal résolues, en l'absence de vaisseaux capables de la remplacer complètement. La construction de la station doit s'achever en 2017. La station spatiale internationale est le plus grand des objets artificiels placés en orbite terrestre. Elle s'étend sur 110 m de longueur, 74 m de largeur et 30 m de hauteur et a une masse d'environ 400 tonnes.

Caractéristiques	
Organisation	NASA, Roscosmos, JAXA, ESA, ...
Domaine	biologie, cosmologie, astronomie, ...
Type de mission	station spatiale
Statut	opérationnelle
Masse	env. 400 tonnes
Lancement	1998-2017
Lanceur	Navette spatiale américaine, Proton
Orbite	Orbite terrestre basse
Périapside	330 km
Apoapside	420 km
Période	90 min
Inclinaison	51.6°



La station spatiale internationale le 30 mai 2011

La station a une architecture hétérogène avec un sous-ensemble russe reprenant les choix architecturaux de la station Mir et un sous-ensemble beaucoup plus important développé selon des standards définis par la NASA. Elle comporte une quinzaine de modules pressurisés, dont quatre consacrés aux expériences scientifiques, représentant un volume d'espace pressurisé d'environ 900 m³ dont 400 m³ habitables. Les panneaux solaires, d'une superficie de 2 500 m², fournissent 110 kW d'électricité. La station se déplace autour de la Terre à une altitude maintenue autour de 350–400 kilomètres. Elle est occupée en permanence depuis 2000, d'abord par trois personnes, puis par six à compter de novembre 2009. Chacun des six astronautes, au cours de son séjour d'une durée de 3 à 6 mois, partage son temps de travail entre les opérations d'assemblage, de maintenance, et les tâches scientifiques. Les travaux scientifiques portent principalement sur la biologie - en particulier l'adaptation de l'homme à l'absence de pesanteur - ainsi que sur la science des matériaux et l'astronomie. La station spatiale internationale a de nombreux détracteurs, qui lui reprochent son coût, estimé à près de 115 milliards de dollars, que ne justifient pas, selon eux, les résultats scientifiques obtenus ou potentiels. Les partisans de la station spatiale mettent en avant l'expérience acquise dans le domaine des séjours longs en orbite et l'importance symbolique d'une présence permanente de l'homme dans l'espace. Elle doit être utilisée au moins jusqu'en 2024 à la suite des orientations retenues pour le programme spatial par le président américain Barack Obama. L'implication financière des partenaires des États-Unis dans le prolongement du programme au-delà de 2020 n'est pas déterminée en 2015.

Le 28 janvier 1986, la navette spatiale Challenger explose en vol. Tous les projets de vols habités de la NASA, dont celui de la station spatiale, sont gelés. En 1987, plusieurs études successives, menées par la NASA et le Conseil de la recherche américain, portent l'estimation du coût de la station à 13 milliards de dollars puis à 24,5 milliards de dollars. Le 16 juillet 1988, le Président Ronald Reagan baptise la station *Freedom* (« Liberté »).



L'astronaute Karen Nyberg observe la Terre par le hublot installé dans le laboratoire Destiny (2007)



Travaux d'assemblage : un astronaute se déhale sur la poutre qui supporte les panneaux solaires

Au cours des années suivantes les études se suivent pour tenter de franchir l'opposition d'un Congrès peu convaincu par le projet, mais la station n'obtient pas le feu vert des décideurs. En 1993, 11,4 milliards de dollars avaient été dépensés en études et pas le moindre composant n'avait été produit. Le Président Bill Clinton, qui vient d'être élu dans un contexte budgétaire national difficile, demande à la NASA en février 1993 de revoir à nouveau sa copie. La nouvelle épure, baptisée Alpha, abandonne un grand nombre de fonctionnalités (régénération de l'environnement, modules servant de liaison, poutre raccourcie, sas simplifié) sans parvenir à respecter le budget butoir fixé par le président.

La Russie entre dans le programme (1993)

Au début des années 1990, la dislocation de l'Union soviétique, puis l'effondrement économique de la Russie, qui a hérité de l'essentiel de l'aéronautique soviétique, modifient le contexte qui avait vu naître le projet Freedom. Les dirigeants américains craignent alors que les compétences des techniciens très qualifiés mais désormais désœuvrés de l'industrie spatiale des pays de la CEI — le budget spatial russe 1993 est égal à 10 % de celui de 1989 — contribuent à la prolifération de missiles balistiques nucléaires dans des pays hostiles. Clinton veut faire de la coopération dans le domaine spatial le symbole de la nouvelle relation qui s'est établie entre les États-Unis et une Russie pacifiée. Fin 1993, après quelques mois de négociation, un accord est conclu, qui fait de la Russie un acteur majeur du programme. L'agence spatiale russe doit fournir quatre modules pressurisés tandis que ses vaisseaux participeront au ravitaillement et à la relève des équipages. La nouvelle mouture de la station spatiale comporte désormais deux sous-ensembles : la partie américaine héritée du projet Freedom et la partie russe qui reprend des éléments Mir-2 successeur prévu de Mir. Un accord de coopération spatiale entre les États-Unis et la Russie avait été signé fin 1992 par les présidents George Bush et Boris Eltsine : des astronautes américains pourraient effectuer des séjours de longue durée dans la station Mir. La NASA, qui met en application l'accord comme une répétition des vols vers la future station spatiale, règle 400 millions de dollars de coût de séjour à l'agence spatiale russe. Plusieurs missions se succèdent entre 1995 et 1998, au cours desquelles onze astronautes américains passent au total 975 jours à bord de la station Mir vieillissante. À neuf reprises, les navettes spatiales américaines ravitaillent la station Mir et assurent la relève des équipages. Le 13 juin 1995 le coût d'exploitation de la station Alpha est réévalué à 93,9 milliards de dollars, dont 50,5 milliards de dollars pour les vols de navettes.



Le module russe Zarya, embryon de la station spatiale

Lancement de la construction (1998)

Finalement en 1998 la construction de la station est décidée au cours d'une réunion qui se tient à Washington. Désormais seize nations y participent : les États-Unis, onze États européens, le Canada, le Japon, le Brésil, la Russie. Pour permettre l'intégration de la Russie dans le programme, la NASA décide que la station sera placée sur une orbite d'inclinaison $51,6^\circ$ permettant aux vaisseaux Soyouz et Progress, aux capacités de manœuvre limitées, de desservir la station spatiale sans changer de plan d'orbite. Les navettes spatiales qui partent du centre spatial Kennedy (inclinaison $28,5^\circ$) doivent par contre changer de plan d'orbite ce qui réduit leur capacité d'emport de 6 tonnes. L'inclinaison élevée présente un avantage pour les travaux relevant de l'observation de la Terre : la superficie de la Terre survolée est augmentée de 75 % par rapport à l'inclinaison optimale pour les navettes et couvre 95 % des zones habitées. La Russie considérant Mir comme la première vraie station spatiale, la dénomination Alpha est progressivement abandonnée fin 2001 pour celle plus consensuelle pour les 16 pays participants d'*International Space Station* (ISS - ou en français « Station spatiale internationale »).

L'assemblage de la station (1998-2017)

L'assemblage en orbite de la station spatiale internationale est un processus long car le lancement des 400 tonnes de la station va nécessiter une quarantaine de vols de la navette spatiale américaine et quelques vols des lanceurs russes qui seront interrompus longuement à deux reprises à la suite de défaillances techniques. En novembre 1998 le lancement du module russe Zarya par une fusée Proton inaugure l'assemblage de la station. Le mois suivant, la navette spatiale américaine lance à son tour le module Unity de la NASA. Mais, quelques mois plus tard, un échec de la fusée Proton, chargé de lancer le module russe Zvezda, gèle les opérations durant un an et demi. Ce module, qui permet l'hébergement du premier équipage permanent, l'expédition 1, est finalement lancé en juillet 2000. La station sera désormais occupée de manière ininterrompue par un équipage mixte américano-russe de trois personnes avec ponctuellement des membres des autres pays participants. Russes et américains prennent le commandement à tour de rôle. L'accident de la navette spatiale Columbia en 2003 cloue les navettes au sol et interrompt de nouveau l'assemblage de la station de février 2003 à juillet 2005. Durant cette période, la station spatiale, qui ne reçoit plus assez de ravitaillement, est placée en mode « survie » avec un équipage ramené à deux personnes, une orbite dégradée et une maintenance différée. Les vols de la navette reprennent en juillet 2005 (mission STS-114) mais en octobre 2005 la NASA annonce qu'elle compte retirer du service la navette spatiale en 2011. La NASA doit achever le montage de la station avec les dix-huit vols disponibles. Cette décision soulève un redoutable problème logistique pour le futur car les moyens de transport restants ne suffiront pas à transporter le tonnage de fret nécessaire. La NASA lance en 2006 le programme COTS qui confie à des entrepreneurs privés le soin d'assurer le ravitaillement manquant. En juillet 2006 l'équipage permanent repasse à trois personnes avec l'arrivée de Thomas Reiter, premier astronaute européen. L'installation des nouveaux modules et d'équipements comme le système de support de vie américain permet à l'équipage permanent de passer à six personnes en juillet 2009 avec l'expédition 20. Au cours des années 2000, les problèmes budgétaires vont entraîner l'abandon de composants importants. La Russie, mal relevée de la crise économique, renonce à un vrai laboratoire spatial (2007) alors que la conception initiale en prévoyait trois, puis deux de ces modules, qui devaient être amarrés au Module d'amarrage universel (UDM) qui lui-même ne sera pas lancé. Elle abandonne également la réalisation d'un module de production d'électricité (le Science Power Platform (SPP)) qui aurait permis de rendre la partie russe autonome sur le plan énergétique. Du côté de la NASA, c'est l'explosion des budgets prévisionnels qui entraîne des arbitrages sévères : le CRV, un véhicule permettant d'évacuer l'équipage en cas de sinistre, trop coûteux (3 milliards de dollars), est abandonné en 2002. Il sera remplacé par des vaisseaux Soyouz amarrés en permanence à la station. La construction du module d'habitation, qui devait fournir un espace réservé à l'équipage, comportant douche, salle de repas et de détente ainsi que compartiments individuels, est arrêtée alors que la coque pressurisée était achevée (2006); un module scientifique construit par le Japon qui devait héberger une centrifugeuse de 2,5 mètres de diamètre, nommé Centrifuge Accommodations Module, équipement jugé pourtant essentiel par la communauté scientifique, est annulé en 2005. Les États-Unis renoncent également au développement du Module de propulsion qui devait permettre de rehausser périodiquement l'orbite de la station. En 2013 la station spatiale comporte 13 modules pressurisés et l'assemblage des composants non pressurisés est achevé : la dernière livraison doit être effectuée par un lanceur russe Proton qui doit délivrer en 2017 le module pressurisé Nauka et le Bras télémanipulateur européen.

Objectifs

Selon la NASA la station spatiale internationale est conçue d'abord comme un laboratoire de recherche affecté à l'étude de son environnement atypique caractérisé par l'absence de pesanteur, le bombardement par des rayonnements absents au sol car interceptés par l'atmosphère, et sa position qui en fait un poste d'observation privilégié de la Terre mais également de l'espace. Par rapport à la navette spatiale américaine, elle présente l'avantage de constituer une plateforme stationnée pour de longues durées. Contrairement aux satellites porteurs d'expériences scientifiques, la présence d'un équipage permanent offre l'avantage de permettre d'effectuer, à la demande, de nombreuses manipulations sur les expériences : surveillance, ajout d'intrants, réparations ou remplacements de composants. Les scientifiques au sol ont, grâce à l'équipage, la possibilité d'accéder facilement aux résultats de leurs expériences, d'en modifier les paramètres ou d'en lancer de nouvelles. Par ailleurs la station spatiale, par sa position en orbite terrestre basse, fournit un endroit relativement sûr pour mettre au point les systèmes spatiaux qui seront

nécessaires pour les missions de longue durée vers la Lune ou sur Mars. Elle permet d'acquérir de l'expérience dans le domaine de la maintenance, de la réparation et du remplacement de systèmes en orbite : toutes ces techniques sont vitales pour la mise en œuvre de vaisseaux qui devront s'éloigner de la Terre et s'affranchir de toute possibilité de dépannage depuis la Terre. Ce type de recherche permet à terme de réduire les risques courus par ces missions et d'optimiser la capacité des vaisseaux interplanétaires. Le rôle de l'équipage porte également sur l'éducation et la coopération internationale. L'équipage de la station spatiale permet à des étudiants sur Terre de participer, y compris par le biais d'expériences développées par eux, à des travaux pratiques. Le programme de la station spatiale lui-même et la coopération internationale qu'il suscite, permet à 13 nations d'apprendre à vivre et travailler ensemble dans l'espace, préparant le terrain pour de futures missions internationales.

Recherche scientifique

La station spatiale fournit une plateforme pour réaliser des expériences qui nécessitent qu'une des conditions inhabituelles rencontrées dans l'espace soit présente. Les domaines de recherche principaux comprennent la biologie, la physique, l'astronomie et la météorologie. Selon les directives adressées par le Congrès à la NASA en 2005, le laboratoire américain Destiny est officiellement considéré comme un laboratoire public national dans le but d'accroître son utilisation par l'ensemble des agences fédérales et du secteur privé. La recherche effectuée à bord de la station spatiale accroît la compréhension des effets du séjour dans l'espace sur le corps humain. Les thèmes de recherche actuels portent sur l'atrophie musculaire, l'ostéoporose et la redistribution des liquides biologiques (sang...) qui constituent certains des problèmes les plus handicapants pour les séjours longs de l'homme dans l'espace. Les données recueillies doivent permettre de déterminer si l'homme peut effectuer des vols de longue durée et à terme coloniser l'espace. Les résultats concernant la perte osseuse et l'atrophie musculaire suggèrent que les astronautes risquent d'être victimes de fractures au moment de l'atterrissage sur une planète après un séjour prolongé dans l'espace. Des études médicales à grande échelle sont menées à bord de la station spatiale par l'Institut de recherche de médecine spatiale américain. Parmi les travaux notables figure l'étude sur un système de diagnostic par ultrasons en microgravité dans le cadre duquel plusieurs astronautes (dont les commandants Leroy Chiao et Gennady Padalka) se sont soumis à des examens par ultrasons en étant guidés par des spécialistes. Le thème de l'étude porte sur les techniques de diagnostic et le traitement des problèmes médicaux dans l'espace. Il n'y a généralement pas de médecins dans la station spatiale et la réalisation de diagnostics peut par conséquent être difficile. Les techniques testées dans le cadre de cette étude ont été mises en œuvre par la suite pour diagnostiquer des accidents du travail ou dans le domaine des sports olympiques; elles ont également été mises en œuvre par des opérateurs sans expérience sur des populations comme celles des étudiants. Il est prévu que ces techniques de diagnostic à distance par ultrasons aient des applications sur Terre dans les situations d'urgence et dans les milieux ruraux où l'accès à un médecin expérimenté est difficile. Des chercheurs étudient les effets de l'absence de gravité sur l'évolution, le développement, la croissance et les processus internes des plantes et des animaux. À partir de certaines des données collectées, la NASA souhaite analyser les effets de la micro-gravité sur la croissance tridimensionnelle des tissus similaires à ceux de l'homme et sur les cristaux de protéines qui se forment dans l'espace. La physique des fluides en microgravité est également étudiée, afin de permettre aux chercheurs de mieux modéliser leur comportement. Étant donné que dans cet environnement tous les fluides peuvent être mélangés, les physiciens tentent de combiner des fluides qui se mélangent mal sur Terre. De plus, en examinant les réactions chimiques qui sont ralenties par la faible gravité et les températures, les scientifiques espèrent effectuer de nouvelles percées dans le domaine de la supraconductivité. La science des matériaux est un secteur important de la recherche effectuée dans la station spatiale : ses objectifs sont d'améliorer les techniques de fabrication utilisées sur Terre. Parmi les autres centres d'intérêt figure l'incidence de la microgravité sur la combustion : efficacité de la combustion et contrôle des émissions et des polluants. Les découvertes dans ce domaine pourraient permettre d'améliorer notre compréhension des mécanismes mis en œuvre pour la production d'énergie et bénéficier en retour à l'économie et à l'environnement. On envisage également d'utiliser la station spatiale pour étudier les aérosols, l'ozone, la vapeur d'eau et les oxydants présents dans l'atmosphère terrestre. En mai 2011 une expérience de physique fondamentale, le spectromètre magnétique Alpha, est installée sur la poutre de la station : cet instrument pourrait apporter des informations précieuses sur la présence ou la

nature de l'antimatière et de la matière noire en analysant les rayons cosmiques qui ne peuvent être observés depuis le sol à cause du filtrage de l'atmosphère terrestre.

Anatomie de la station spatiale

Lorsqu'elle sera achevée, la station spatiale internationale mesurera 108 mètres de longueur sur 74 mètres de large, pour une masse approchant les 400 tonnes. Avec un volume pressurisé d'environ de 900 m³ dont près de 400 m³ habitables elle peut accueillir six astronautes en permanence, qui se succéderont et se relaieront selon les exigences des missions.

La station spatiale est composée d'une part des modules pressurisés dans lesquels les astronautes vivent (laboratoires, modules d'amarrage, modules d'interconnexions, sas, modules polyvalents), d'autre part d'éléments non pressurisés qui assurent différentes fonctions comme la fourniture d'énergie, la régulation thermique, la maintenance (bras robotiques) et le stockage d'expériences scientifiques et de pièces détachées.

Historique de la conception de la station spatiale par la NASA

L'architecture et l'aménagement intérieur de la partie non russe de la station spatiale (~85 % du tonnage) sont l'aboutissement de longues études démarrées au début des années 1970 qui ont abouti au cours des années 1980.

La configuration Tour à énergie

En 1982-1983 un groupe de travail de la NASA chargé de réfléchir au développement d'une station spatiale, le Concept Development Group (CDG), met au point le concept de « Tour à énergie » (*Power tower*) : une poutre verticale de près de 100 mètres de haut supporte à son sommet une poutre perpendiculaire de 75 mètres de long sur laquelle sont répartis les panneaux solaires. Tous les autres composants sont attachés à l'extrémité inférieure de la poutre et l'ensemble est stabilisé par gradient de gravité ce qui permet de réduire le besoin de carburant pour contrôler l'orientation de la station. La partie pressurisée, est constituée de quatre modules - deux laboratoires, un habitat et un module de commandement - partageant la même architecture : un cylindre doté d'un port d'amarrage à chaque extrémité et de quatre autres ports à sa périphérie permettant de multiples arrangements. Pour l'aménagement intérieur, deux configurations sont étudiées : un cloisonnement du cylindre en tranches à la manière de Skylab et un aménagement longitudinal avec un plancher parallèle à la paroi du cylindre. Le cloisonnement vertical génère des espaces confinés et peut créer des problèmes de désorientation mais utilise mieux l'espace et fournit un bon accès au système de support de vie.

La configuration Catamaran

En 1985 la NASA entame, avec la participation de plusieurs industriels, la phase B de son étude destinée à détailler les concepts déjà définis. Une étude plus fine des besoins scientifiques - microgravité, observatoires céleste et terrestre - aboutit à la disqualification du concept de « Tour à énergie » mal adapté. Une nouvelle architecture dite Catamaran (*Dual Keel*) est mise au point : deux poutres verticales parallèles supportent à leurs extrémités les télescopes spatiaux. Elles sont jointes en leur centre par une longue poutre horizontale qui supporte en son milieu les modules pressurisés et à ses extrémités les panneaux solaires.



Configuration « Tour à énergie »



Configuration « Catamaran »

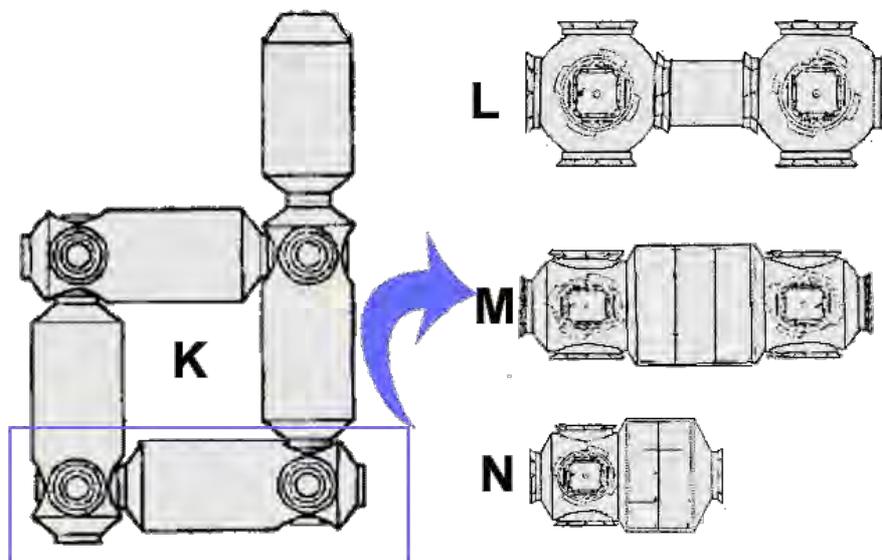
Aménagement intérieur

Parallèlement un groupe créé en 1983 au centre spatial Johnson se penche plus particulièrement sur l'aménagement intérieur. Il s'agit à la fois de favoriser la productivité de l'équipage par une optimisation de l'ergonomie et de permettre la mise à niveau de la station et sa maintenance tout au long de sa durée de vie estimée à l'époque à 30 ans. Pour parvenir à ce résultat les équipements intérieurs doivent être modulaires; la taille de chaque « meuble » doit être à la fois standardisée et suffisamment réduite pour pouvoir passer par les écoutilles. Il est établi que la taille minimale compatible avec la dimension des équipements usuels est celle d'un réfrigérateur. Par ailleurs la disposition retenue doit permettre d'accéder facilement à la coque pressurisée en cas de perforation. Plusieurs scénarios d'aménagement sont évalués : équipements rassemblés autour de l'axe du module laissant un espace habitable entre ce noyau et la coque. Mais pour une coque de 4,5 mètres de diamètre, cette configuration laissait beaucoup moins d'espace vital que celle consistant à rejeter les équipements le long de la coque. Cette dernière disposition est donc retenue pour la suite de l'étude et à son tour déclinée en plusieurs versions : une disposition avec les équipements placés aux quatre angles laissant un volume libre en forme de croix est éliminée car laissant peu de place pour les équipements; on écarte également un aménagement qui superpose deux formats d'équipement de chaque côté de l'espace laissé libre avec des gaines techniques courant au niveau du plancher et du plafond. La solution finalement retenue consiste à placer des équipements au format parfaitement identique sur les quatre côtés de l'espace central. Les espaces libres de forme triangulaire situés entre les équipements et la coque sont utilisés pour faire passer les gaines techniques.

Du module universel au module spécialisé

Pour réduire les coûts, la NASA était partie du principe que tous les modules de la station seraient identiques (configuration **K** sur le schéma ci-dessous); l'ajout d'équipements intérieurs spécialisés devait permettre de répondre aux besoins couverts spécifiquement par chaque module. Mais les études plus détaillées montrèrent que, compte tenu du nombre réduit de modules à produire, le gain financier espéré ne compensait pas le surcroît de complexité et de masse d'un module « universel ». En particulier un tiers du volume de chaque module devait être consacré aux six ports d'amarrage radiaux et axiaux particulièrement volumineux et lourds compte tenu de leur gabarit généreux. Aussi fut-il décidé que le module commun ne prendrait pas en charge les fonctions de sas et de nœuds qui donneraient lieu au développement de modules spécialisés. Dans cette nouvelle configuration le module commun, nettement allégé car ne comportant plus que deux ouvertures aux extrémités du cylindre, pouvait être allongé ce qui permettait de réduire le nombre de modules nécessaires; les modules, qui dans les configurations de l'époque assuraient des liaisons perpendiculaires pour des raisons de sécurité (configuration « en carré »),

pouvaient être abandonnés au profit de simples tunnels pratiquement dépourvus d'équipements intérieurs et donc très légers (L). Finalement il fut décidé d'allonger les modules de type nœud pour qu'ils prennent en charge également la fonction des modules de liaison (configuration M puis N). Le concept de module de liaison fut abandonné par la suite.

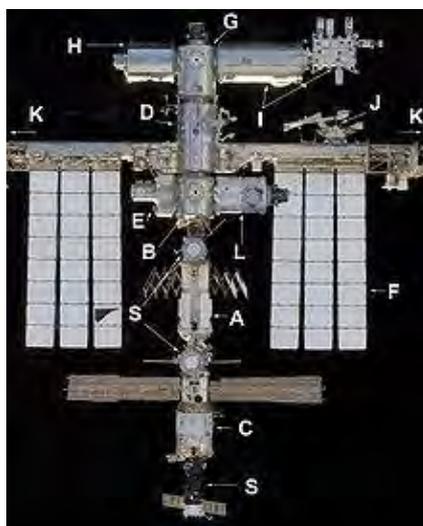


Genèse des modules de type nœud

La coupole d'observation

Pour pouvoir travailler, il était nécessaire que l'équipage dispose d'une vue sur l'extérieur : manœuvres d'amarrage et désamarrage des vaisseaux chargés du ravitaillement et de la relève, intervention à distance sur la partie extérieure de la station grâce aux bras robotisés, surveillance et maintenance. La réponse à ce besoin opposa d'une part les partisans d'une vue « virtuelle » reconstituée sur les écrans d'un poste de travail à partir d'images obtenues grâce à des caméras et d'autre part ceux qui, au nom de la sécurité, exigeaient de disposer de hublots dans chaque module permettant d'avoir une vue directe sur les composants de la station. Les détracteurs de cette dernière solution soulignèrent que la présence de hublots fragilisait et alourdissait la structure sans pour autant fournir une vue directe sur toutes les parties de la station. La création de coupoles d'observation donnant une vision à 180° fut décidée à l'issue de ces débats.

Le sous-ensemble russe



Vue du dessous : modules russes Zarya (A) et Zvezda(C), nœuds Unity (B), Harmony (G) et Tranquility (L), laboratoires Destiny (D), Columbus (H) et Kibo (I), sas Quest (E), bras Canadarm2 (J) sur la poutre, radiateurs (F), vers les panneaux solaires (K), 3 × vaisseaux Soyouz ou Progress (S).

La station spatiale internationale comprend :

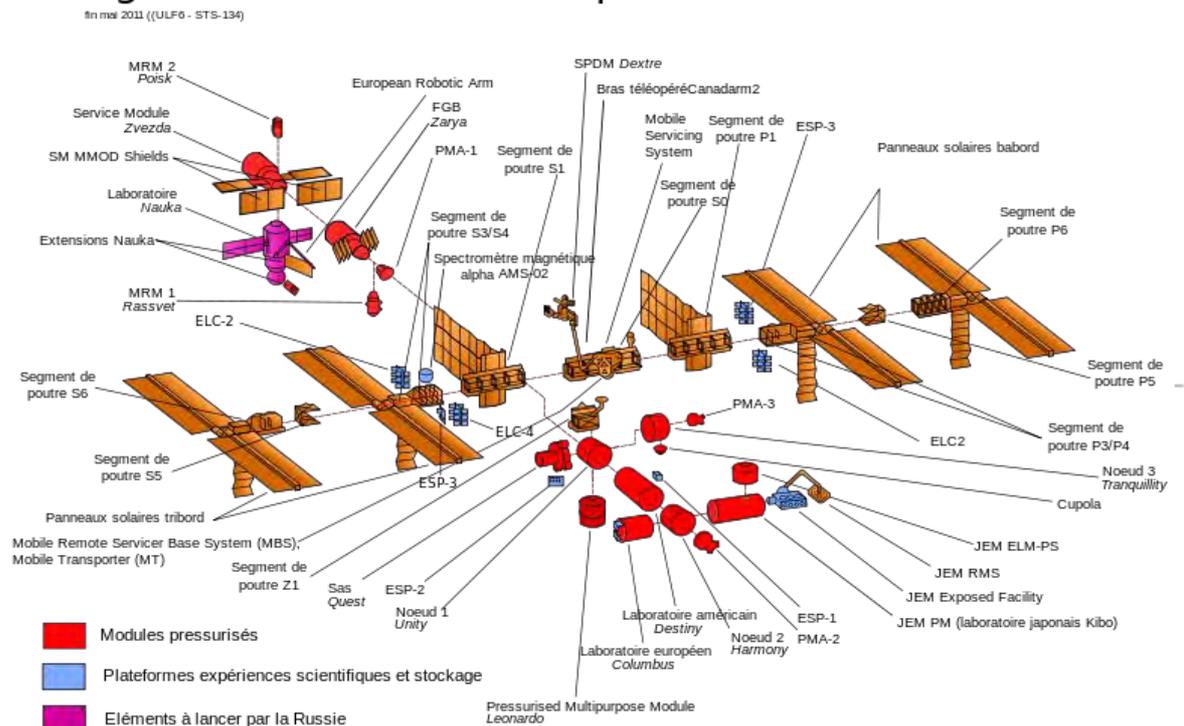
- d'une part, les modules et composants développés en appliquant les concepts architecturaux mis au point par la NASA, regroupés dans un sous-ensemble baptisé par l'agence spatiale américaine segment américain (USOS) qui inclut également des modules construits et financés par les agences spatiales japonaise et européenne;
- d'autre part, les modules et composants russes constituant un deuxième sous-ensemble (environ 25 % de la masse) baptisé segment russe (ROS). Les modules russes forment un ensemble bien distinct, relié au reste de la station uniquement par le module de la NASA de type nœud Unity.

La partie russe de la station applique l'architecture des modules développés pour la station Mir. Leur conception plus classique est très différente de ce qui a été développé par la NASA. Les nœuds sont intégrés dans des modules qui ne se cantonnent pas à cette spécialité. Les aménagements ne sont généralement pas amovibles. La place accordée aux équipements scientifiques est beaucoup plus réduite. Deux membres de l'équipage disposent de petites cabines.

Configuration finale

À l'issue de la phase de conception, la configuration de la station spatiale retenue comporte quatre modules laboratoires, un module d'habitation, deux coupoles d'observation, deux sas et un module logistique (pour le stockage) construit par les européens. Les arbitrages budgétaires qui affectent le projet entraînent par la suite la suppression de deux nœuds, d'une coupole du module affecté à la centrifugeuse et de celui à la logistique. Les modules pressurisés, qui sont de forme cylindrique, sont pourvus d'une ouverture à chaque extrémité. La station est composée d'une colonne vertébrale formée par une enfilade de cinq modules (de Zvezda à Harmony), connectés bout à bout, longue de près de 50 mètres. Les autres modules viennent se greffer sur cet axe : certains modules sont connectés sur la gauche ou la droite du corps principal (Colombus, Quest, Tranquility et Kibo) tandis que d'autres sont connectés au-dessus ou au-dessous (Pirs, Poisk, poutre S0, Rassvet, Nauka, Leonardo). De la conception initiale subsiste également une longue poutre, fournie par la NASA et perpendiculaire à l'axe principal des modules pressurisés. Cette poutre porte principalement les panneaux solaires et les radiateurs du système de régulation thermique. Elle est rattachée à l'enfilade de modules à peu près en son milieu au niveau du module Unity. La grande longueur de la poutre permet aux panneaux solaires placés à ses deux extrémités, de s'orienter à tout moment de manière optimale (ils disposent de deux axes de liberté), sans être gênés par les modules pressurisés.

Configuration de la station spatiale internationale



Les composants de la station spatiale fin mai 2011.

Les modules pressurisés

La structure des modules est réalisée en alliage d'aluminium, qui présente l'avantage d'être léger, résistant à la corrosion et d'être un bon conducteur électrique ce qui facilite la mise à la terre des équipements. La structure principale des modules pressurisés dont le rôle est de préserver l'intégrité du module, est composée d'une part d'une coque de forme cylindrique, dans laquelle sont percées des ouvertures occupées par des hublots ou des écoutilles, d'autre part de longerons qui permettent à la fois de résister à la pression et de jouer le rôle de support pour les équipements intérieurs. Sur cette structure primaire sont fixés des éléments de structures secondaires : à l'intérieur les baies de rangements, les écoutilles ou les rideaux de hublot, à l'extérieur les poignées permettant aux astronautes de progresser durant les sorties extravéhiculaires et les protections anti-météorites qui recouvrent la surface des modules. Pour les modules non russes, celle-ci est constituée d'une feuille d'aluminium de 1,27 millimètre d'épaisseur maintenue à une distance de 10 cm de la coque. Grâce à cette protection la probabilité qu'un débris traverse la coque est de 7,5 % pour les modules non russes et de 5 % pour les modules russes qui disposent d'un système différent.

Aménagements intérieurs

En l'absence de gravité, la notion de plancher/plafond (verticale locale dans le jargon de la NASA) a été définie de manière arbitraire : le plancher est le côté des modules tourné en permanence vers la Terre (nadir), le plafond étant à l'opposé (zénith). Le marquage, la disposition des appareils prennent en compte cette orientation : lorsqu'ils s'activent les membres de l'équipage prennent donc des positions verticales similaires. L'axe principal des modules (de Zvezda à Tranquility) est aligné sur la trajectoire de la station spatiale : les laboratoires Columbus et Kibo sont situés à l'avant et donc plus exposés à une collision avec un débris spatial tandis que les modules russes se situent à l'arrière. La troisième dimension est indiquée, comme sur un navire, par les appellations bâbord (à gauche pour une personne tournée vers l'avant) et tribord (Kibo est à bâbord et Columbus à tribord). Les modules non russes ont la forme de cylindres aux extrémités légèrement coniques dont le diamètre a été fixé par celui de la soute de la navette spatiale (5 mètres). À chaque extrémité d'un module, de part et d'autre de l'ouverture axiale, se trouvent des aménagements non amovibles (systèmes de sécurité, appareillages électriques) dissimulés derrière des cloisons. Le reste de l'espace tire les conséquences de l'absence de gravité : les quatre côtés (plancher, plafond et parois latérales), reçoivent le même type d'aménagement amovible constitué d'armoires (rack) au format standardisé ISPR hautes de 2 mètres pour 1,05 m de largeur et 85,4 cm de profondeur et dont l'arrière épouse la forme incurvée de la coque. Pratiquement jointifs (une rampe lumineuse occupe chaque angle) ce mobilier dégage en son centre un espace habitable le long de l'axe du module ayant une section carrée d'un peu plus de 2 mètres de côté. Les gaines de courant et fluides circulent dans l'espace de forme triangulaire laissé libre entre la coque et les armoires. Des barres formant poignée sont disposées à intervalle régulier pour permettre à l'équipage de se déplacer ou de se maintenir sur place. Les baies standardisées peuvent être occupées par différents types d'aménagements :

- Équipement scientifique;
- Armoire de rangement;
- Équipement de support de vie (eau, température, air);
- Toilette, mini cabine personnelle.

Le choix de l'amovibilité des aménagements permet de faire évoluer ou remplacer la plus grande partie des équipements au cours de la longue vie de la station spatiale. Ce choix permet également à la navette de lancer les modules, ce qu'elle n'aurait pu faire si ceux-ci avaient déjà reçu tous leurs aménagements car ils auraient été trop lourds. Mais cette conception n'a pas permis de fournir l'espace ordonné espéré : l'espace habitable de la station spatiale, en particulier celui des laboratoires, est envahi par un fouillis de câbles et d'équipements ajoutés).

Liaisons entre modules et systèmes d'amarrage des vaisseaux

La connexion entre les modules et l'amarrage des vaisseaux spatiaux aux modules met en œuvre plusieurs types de liaisons du fait de l'origine hétérogène du matériel mis en œuvre :

- Le système d'amarrage sonde-cône est un système très ancien développé par les Russes. Il est dissymétrique c'est-à-dire qu'une des deux parties arrimées porte la sonde (vaisseaux russes Soyouz, Progress, européen ATV) tandis que l'autre partie porte la pièce en forme de cône (majorité des ports

d'amarrage des modules russes de la station). L'ouverture circulaire d'un diamètre intérieur de 80 cm ne facilite pas le transfert du fret : les équipements encombrants comme les armoires américaines au format ISPR qui équipent la partie non russe, ne peuvent transiter par ce type d'écouille et cette contrainte impose une géométrie longiligne aux équipements amovibles russes les plus volumineux.

- L'APAS est un système mis au point pour permettre la liaison entre les composants russes et américains. Il est hybride, c'est-à-dire que les composants de part et d'autre sont identiques. L'APAS est installé sur la navette spatiale et sur le module Zarya pour sa jonction avec la partie américaine. Le diamètre intérieur de l'ouverture est de même dimension que le système russe (ouverture circulaire de 80 cm de diamètre) et souffre donc des mêmes limitations que celui-ci.
- Le CBM est un mécanisme d'amarrage mis au point pour la Station spatiale internationale. Il est mis en œuvre sur tous les modules non russes de la station. C'est également un système dissymétrique : la partie active (*Active Common Berthing Mechanism* ou *ACBM*) est constituée par un anneau sur lequel se situent quatre verrous qui assurent un premier assemblage et 16 boulons qui rigidifient l'ensemble. La partie passive (*Passive Common Berthing Mechanism* ou *PCBM*) reçoit les mécanismes d'accrochage. Les trois modules pressurisés, de type nœud, comportent sur leur partie axiale un port d'amarrage actif et un passif; chaque nœud dispose par ailleurs de quatre autres ports tous actifs. Ce système d'amarrage est également celui du vaisseau cargo japonais HTV et dans le futur des vaisseaux de ravitaillement Cygnus et Drago. L'ouverture qui a une forme carrée de 127 cm de côté est d'une taille particulièrement généreuse permettant de faire passer les racks ISPR qui sont les plus gros équipements amovibles. C'est un atout essentiel pour la maintenance de la partie non russe de la station. Le maintien de l'étanchéité a constitué un challenge technique à la conception, car compte tenu de sa forme carrée et de sa taille, il s'exerce une poussée de 20 tonnes non uniforme sur l'écouille, lorsque le port n'est pas connecté à un autre module. Le système permet également la connexion automatique des liaisons électriques, des télécommunications et des canalisations porteuses de fluides.

Pour pouvoir mettre en relation des modules ou vaisseaux porteurs du système d'amarrage APAS d'une part et CBM d'autre part, des adaptateurs pressurisés en forme de cône coudé ont été mis en place (Pressurized Mating Adapters ou PMA). Ils ménagent un corridor pressurisé entre les deux parties, comportent un chauffage et permettent d'établir une liaison électrique et télécom. Le PMA-1 est utilisé pour relier le module russe Zarya au module Unity faisant la jonction entre la partie russe et la partie internationale de la station. Le PMA-2 installé aujourd'hui sur le module Harmony est le point d'amarrage habituel de navette spatiale. PMA-3, installé sur le nœud Tranquility fournit une alternative pour l'amarrage de la navette.

Les modules russes Zvezda et Zarya

Zarya (*soleil levant*) est le premier module de la station internationale placé en orbite. Il s'agit d'une nouvelle déclinaison du vaisseau TKS utilisé à plusieurs reprises par l'aéronautique russe. Il sert actuellement de lieu de stockage et permet grâce à ses moteurs (32 moteurs de 13 kg de poussée) de réorienter la station lorsque les corrections à apporter dépassent la capacité des gyroscopes électriques installés dans la partie américaine de la station. Des réservoirs situés à l'extérieur permettent de stocker 6 tonnes de carburant qui sont utilisés par les moteurs du module Zvezda pour rehausser l'orbite de la station. Zarya est d'une part reliée au module Zvezda d'autre part au nœud Unity. Un troisième port permet de recevoir un vaisseau Soyouz ou Progress mais est, depuis 2010, relié en permanence au compartiment d'amarrage Rassvet. Zarya possède ses propres panneaux solaires et ses batteries. Il pèse 19,3 tonnes et est long de 12,55 mètres pour un diamètre de 4,1 mètres. Zvezda (« étoile ») également appelé « module de service » a durant les premières années été le centre de la station spatiale. On y trouve des équipements vitaux qui resteront longtemps uniques dans la station spatiale tels que les systèmes de support de vie Elektron et Vozdukh, les systèmes de contrôle de vol et de navigation et une toilette. Il reste aujourd'hui le centre de commandement de la partie russe de la station. Zvezda est une évolution du module central de la station Mir : le module comporte comme celle-ci trois parties : un compartiment de travail, une chambre de transfert qui donne sur un point d'amarrage à l'arrière et un compartiment de « transfert » situé à l'avant avec trois ports d'amarrage. Les occupants du module résident et travaillent dans le compartiment de travail qui comprend notamment deux petites cabines d'équipage, une toilette, un tapis roulant et un cycloergomètre. Le module Zvezda est long de 13,1 mètres pour un diamètre maximum de 4,15 mètres et un poids de 18 tonnes. Il possède deux panneaux solaires d'une envergure de

29,7 mètres. Le port d'amarrage situé à l'arrière peut recevoir un vaisseau Soyouz ou Progress tandis que les trois ports situés à l'avant sont reliés de manière définitive au module Zarya ainsi qu'aux modules d'accostage Pirs et Poisk. Zvezda dispose de moteurs-fusées qui sont utilisés pour rehausser l'altitude de la station.

Les modules de type nœud

La partie non russe de la station comporte trois modules de type nœud qui peuvent assurer l'interconnexion entre six modules. Unity (nœud 1) est chronologiquement le second module à avoir été assemblé à la station spatiale internationale, et le premier construit par les États-Unis. C'est un cylindre d'aluminium de 11,6 tonnes, 5,47 m de long et de 4,57 m de diamètre. Il est plus court que les deux autres modules et ne comporte que quatre emplacements pour des racks au format ISPR contre huit pour les autres modules. Il assure la jonction avec la partie russe de la station via un PMA. Harmony (nœud 2) pèse 14,3 tonnes pour une longueur de 7,2 mètres et un diamètre de 4,4 mètres. Il assure la connexion entre le laboratoire européen Columbus, le module américain Destiny et le module japonais Kibo. Sur les huit baies disponibles, quatre sont occupées par des racks d'avionique tandis que les autres servent de lieu de rangement. Tranquility (nœud 3) a les mêmes dimensions que Harmony et contient comme celui-ci huit racks dont deux occupés par l'avionique du module. Les principaux équipements touchent au système de support de vie américain avec deux racks recyclant les eaux usées, un rack pour la génération d'oxygène à partir de l'eau et un rack pour le système de régénération de l'atmosphère qui enlève les contaminants et contrôle ses constituants. Tranquility comporte également un compartiment toilettes pour l'équipage. Tranquility tient lieu également de salle de sport puisqu'on y trouve deux appareils destinés à l'exercice physique dont un tapis roulant. Le module dispose d'une coupole d'observation Cupola installée sur un des ports d'amarrage radiaux. Celle-ci est une baie vitrée de forme convexe et circulaire, composée de sept hublots : un hublot central zénithal de forme circulaire entouré de six autres plus petits et trapézoïdaux. L'ensemble, installé sous le module Unity côté Terre, fournit une vue panoramique à la fois sur la planète et sur une partie du champ d'intervention du bras manipulateur Canadarm2 utilisé pour la maintenance de la station. Sur les six ouvertures du nœud seules trois d'entre elles sont utilisées.

Les modules laboratoires

Les modules laboratoires sont consacrés à la recherche. À cet effet leurs quatre faces internes comportent des emplacements au format standardisé qui peuvent recevoir des expériences et qui disposent d'interfaces informatiques, vidéos, d'une alimentation électrique ainsi que de canalisations pouvant distribuer gaz ou fluides. Certaines de ces baies sont néanmoins occupées par des équipements relevant du support vie servant de stockage en l'absence de module réservé à la logistique et à l'habitat. Le laboratoire américain Destiny est le deuxième module américain installé et le premier laboratoire. Il est conçu pour accueillir les charges utiles et les expériences devant s'accommoder d'une atmosphère terrestre. Sa capacité est de vingt-quatre baies, dont treize sont spécialement conçues pour recevoir des expériences nécessitant un interfaçage complet avec la station et ses ressources. Cet élément a été mis en orbite le 7 février 2001. Le laboratoire européen Columbus est le plus petit des laboratoires de recherche avec dix baies disponibles pour la science. C'est le lieu de travail privilégié des astronautes et chercheurs européens. Ce module pressurisé est raccordé en permanence à la station. Ses utilisations sont multiples, et portent entre autres sur la science des matériaux, la physique des fluides, les sciences de la vie, la physique fondamentale et de nombreuses autres technologies. Il renferme aussi la plupart des charges utiles pressurisées européennes. Le laboratoire JEM ou *Kibō* est le module fourni par l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) : il comporte dix baies à bord, dont cinq seront occupées par du matériel japonais et cinq autres par du matériel de la NASA. Tous les emplacements sont aux standards internationaux en ce qui concerne les branchements énergétiques et l'approvisionnement en divers gaz ou liquides. Le JEM comporte un prolongement pressurisé, l'ELM PS, qui fournit des emplacements supplémentaires pour certaines expériences réclamant, entre autres, une atmosphère ou une pression atmosphérique différentes. Ce module complémentaire est fixé perpendiculairement au JEM. Le laboratoire russe Nauka ou MLM (Module laboratoire multi-usages) doit être installé début 2017. Ce sera le dernier élément qui rejoindra la station spatiale. Il est construit à partir de la doublure de Zarya. À côté d'installations pour les équipements scientifiques, il comporte des ports d'amarrages, des installations de support de vie pour l'équipage et doit également servir de lieu de stockage.

Les compartiments d'amarrage russes

Le compartiment d'amarrage Pirs est un module assez court (moins de 5 mètres de long) qui sert à la fois de port d'amarrage pour les vaisseaux russes et de sas pour les sorties extra-véhiculaires russes. Assemblé à la station en 2001, sa durée de vie théorique est de 5 ans. Arrivé en fin de vie, il est prévu qu'il soit largué et détruit avant l'installation du module Nauka début 2017. Il est remplacé par un module Poisk, aux caractéristiques similaires, installé en novembre 2009 pour remplacer à terme Pirs dont il partage les caractéristiques. Le compartiment d'amarrage Rassvet dont l'installation a eu lieu en 2010, doit servir de port d'amarrage pour les vaisseaux Soyouz et Progress. Il joue également le rôle de module de stockage. Sa présence a été rendue nécessaire pour permettre l'accostage des vaisseaux qui ne peuvent plus s'amarrer directement à Zarya depuis la mise en place du module Tranquility.

Le sas américain Quest

Le module américain Quest, qui est fixé au nœud Unity, permet aux astronautes d'effectuer les sorties extravéhiculaires. Il joue le même rôle que le Pirs de la partie russe de la station mais, contrairement à celui-ci, il est compatible à la fois avec les combinaisons russes et américaines. Il comporte deux parties : la plus large permet aux astronautes de s'équiper de leurs combinaisons spatiales et d'effectuer la longue préparation pour débarrasser leur organisme de l'azote. La deuxième partie, plus étroite, est le sas proprement dit similaire à celui de la navette spatiale qui permet, après avoir chassé l'atmosphère, d'accéder à l'extérieur. Attachés au module se trouvent deux grands réservoirs d'oxygène et deux réservoirs d'azote dont le contenu est utilisé à la fois par Quest et par la partie américaine de la station. Le module Quest pèse 6,1 tonnes à vide, est long de 5,5 mètres pour un diamètre maximum de 4 mètres.



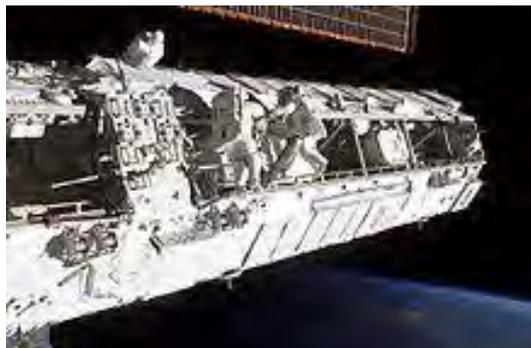
Le sas Quest en cours d'installation

Le Module Logistique Multi-Usages Leonardo

Le Module Logistique Multi-Usages Leonardo est un des trois modules (Leonardo, Raffaello et Donatello) pressurisés construits par l'Italie utilisés pour transporter dans la soute de la navette spatiale américaine le fret qui ne peut être exposé au vide. Il est prévu que Leonardo, l'un des trois modules, après avoir reçu une protection contre les micro-météorites, reste attaché en permanence par sas d'amarrage de type CBM à la station après le retrait des navettes spatiales mi 2011. Le module servira de zone de stockage.

Les parties non pressurisées

La poutre



Deux astronautes travaillent sur la poutre

La poutre est la structure la plus imposante de la station avec une longueur de 108,5 mètres. Son rôle principal est de porter les panneaux solaires qui fournissent l'énergie à la station et les radiateurs qui assurent la régulation thermique des modules pressurisés. Sa dimension permet aux panneaux solaires de s'orienter sans être gênés par les modules pressurisés et les panneaux qui y sont rattachés. Elle est constituée de onze segments qui ont été assemblés en orbite. La poutre est perpendiculaire au tronc central de la partie pressurisée de la station. Elle est constituée d'une partie centrale fixe (segments de poutre S0, P0 et P1) solidement fixée en son milieu au sommet du laboratoire américain Destiny et de deux extrémités (bâbord et tribord) qui portent les panneaux solaires et qui pivotent autour de l'axe de manière à toujours aligner les cellules photovoltaïques face au Soleil. Les panneaux solaires peuvent eux-mêmes pivoter par paire. La poutre sert également de support à trois plateformes externes qui permettent d'entreposer des pièces de rechange ainsi qu'à quatre plateformes, les EXPRESS Logistics Carrier, sur lesquelles se trouvent des expériences scientifiques qui n'ont pas besoin d'être installées dans un environnement pressurisé ou qui sont volontairement exposées au vide. Une expérience scientifique particulière, le spectromètre magnétique Alpha, dispose d'un emplacement spécifique sur la poutre. Enfin le bras télémanipulateur Canadarm 2 est généralement installé sur un chariot mobile qui peut coulisser à petite vitesse le long des trois segments non rotatifs de la poutre permettant ainsi d'accroître son rayon d'action d'environ 40 mètres. Le module non pressurisé Z1 fixé au port d'amarrage zénithal d'Unity sert de support aux quatre gyroscopes de la station ainsi qu'aux principales antennes de télécommunications.

Les bras et robots télémanipulateurs

La station dispose de plusieurs bras contrôlés à distance qui permettent l'assemblage de la station et sa maintenance. Compte tenu de la taille de la station, de l'origine multinationale de ses composants et de la diversité des besoins, plusieurs bras ont été installés. Le bras Canadarm 2 est le plus important des systèmes de ce type présents dans la station et constitue la principale contribution du Canada. C'est une version plus puissante du bras Canadarm installé sur la navette spatiale américaine. Long de près de 17,6 mètres il dispose de 7 degrés de liberté et est capable de déplacer des charges de 116 tonnes. Il est généralement fixé sur un chariot - le Mobile Remote Servicer MRS - qui se déplace le long de la poutre mais l'embase présente à ses deux extrémités peut être également attachée à un des points d'accrochage répartis sur la station : les Power Data Grapple PDGF lui fournissent énergie électrique et des liaisons vidéo et informatiques. Il peut changer de point d'accrochage en se déplaçant comme une chenille : cette mobilité combinée à sa grande longueur lui permet d'atteindre une grande partie des installations.



L'astronaute Steve Robinson au bout du bras Canadarm 2.

Mis en place en 2006, il a depuis été particulièrement sollicité pour la mise en place des principaux éléments de la station. Il a reçu en 2008 une extension, le (Dextre (SPDM)), beaucoup plus précise (15 degrés de liberté), permettant des manipulations exigeant une grande dextérité lorsque la masse ne dépasse pas 600 kg. Dextre peut soit prolonger le bras Canadarm 2 soit fonctionner de manière autonome en s'ancrant sur un des points d'accrochage de la station. Le bras Canadarm2 peut être contrôlé depuis deux postes de travail mobiles situés dans la station. Un de ces postes est situé dans la Cupola, qui fournit une vue directe sur une grande partie de la station à l'opérateur. Ce dernier peut également travailler en utilisant les images restituées par des caméras installées sur le bras ainsi que les données fournies par des capteurs. Les deux bras télémanipulateurs russes Strela sont installés sur le module Pirs. L'un d'entre eux permet d'intervenir sur le module Zarya tandis que l'autre permet d'atteindre Zvezda. Le Bras télémanipulateur européen (ERA en anglais) a une longueur de onze mètres pour une masse de 630 kg et

est capable de déplacer des charges pesant jusqu'à huit tonnes. Il dispose de 7 degrés de liberté. Il doit être amené en février 2017 par un lanceur Proton avec le module russe Nauka. L'ERA prendra alors en charge les interventions sur les modules russes. Les deux extrémités du bras peuvent se fixer sur les points d'attache dispersés à la surface de la station ou sur le chariot mobile comme le bras Canadarm 2. Les deux extrémités ont les mêmes capacités et peuvent donc tour à tour servir de point d'ancrage ce qui permet au bras de se déplacer à la surface de la station sans intervention humaine. Les cosmonautes peuvent le contrôler depuis l'intérieur de la station spatiale mais également depuis l'extérieur. Le bras, qui est équipé de caméras vidéo, permet d'attraper des objets munis du système d'accrochage adéquat ou utiliser un outil multi-tâches. L'opérateur utilise un poste de travail mobile. Il existe également un bras associé à la palette japonaise (JEM-RMS) située à l'extérieur du laboratoire Kibo qui héberge les expériences pouvant être exposées dans le vide. Cet outil est composé d'un premier bras de 10 mètres disposant de 6 degrés de liberté et d'un petit bras. Il est commandé depuis un poste de contrôle installé dans le module Kibo. L'opérateur dispose de deux hublots fournissant une vue directe sur la palette. Depuis février 2011, un système de manipulation à distance de forme anthropomorphique, Robonaut 2, est à bord de la station pour des tests opérationnels. Par rapport aux bras existants, il dispose de 43 degrés de liberté et permet au téléopérateur de le manipuler à l'aide de gants et un casque par le biais d'un système de réalité virtuelle.

Les équipements de recherche scientifique

Les équipements de recherche scientifique sont installés à la fois dans la partie pressurisée de la station et sur des palettes exposées au vide. En 2012 toutes les structures destinées à héberger des équipements de recherche ont été mises en orbite hormis le module Nauka qui doit l'être en 2017. Parmi les équipements scientifiques installés on peut distinguer les équipements multi-usages (réfrigérateurs, express racks...), les mini laboratoires consacrés à la biologie, à la physiologie humaine, aux sciences des matériaux et enfin les expériences d'observation de la Terre et d'étude de l'Espace. Fin 2009 environ un tiers des emplacements destinés à recevoir des expériences étaient vides. Toutes ces expériences sont pilotées à la fois par l'équipage permanent de la station spatiale et depuis les centres de contrôle des pays participants situés sur Terre. Ces derniers peuvent généralement recevoir les données recueillies par des capteurs et déclencher des séquences d'opérations si elles ne nécessitent pas de manipulations.

Les équipements multi-usages

Les Express racks

Les Express racks sont des équipements permettant d'accueillir dans des tiroirs amovibles plusieurs expériences (jusqu'à huit). Il y a sept Express racks répartis dans les laboratoires de la station. Certaines expériences ont vocation à rester en permanence tandis que d'autres séjournent un temps limité. Chaque Express rack occupe une baie au format standard ISPR.

Les réfrigérateurs

Le *Minus Eighty degrees Celsius Laboratory Freezer for the ISS* (MELFI) réalisé par l'ESA a une capacité de 175 litres et permet de conserver des échantillons biologiques à -80 °C, -26 °C ou +4 °C. *General Laboratory Active Cryogenic ISS Equipment Refrigerator* (GLACIER) est un réfrigérateur de 11,35 litres dont la température est maintenue à -165 °C. *Microgravity Experiment Research Locker/Incubator* (MERLIN) peut être utilisé comme réfrigérateur, congélateur ou incubateur avec une température qui peut être fixée entre -20 °C et +48,5 °C. (capacité 4,17 litres).

Les boîtes à gants

Deux boîtes à gants sont disponibles l'une fixe de grande dimension (MSG), l'autre (PGB) plus petite et portable.

Les équipements de recherche biologique

Les équipements de recherche biologique comprennent notamment :

- Des serres (comme ABRS de la NASA, Biolab de l'ESA, LADA de Roscosmos, ECMS) dont l'environnement (lumière, composition de l'atmosphère, température) peut être contrôlé. Des végétaux y sont cultivés ou des organismes vivants de petite taille y sont élevés (insectes, araignées). L'objectif est d'étudier l'influence de l'apesanteur et des radiations sur la croissance et la reproduction. Certaines expériences comprennent une centrifugeuse pour moduler la gravité,

- Un aquarium (Aquatic Habitat de JAXA) permettant l'étude de petits poissons (Oryzias latipes et poisson zèbre).
- Des incubateurs (CGBA et BSTC de la NASA, Kriogem-3M de Roscosmos, Saibo de JAXA) permettant d'étudier la croissance des cellules,
- Des expériences destinées à étudier la croissance osseuse (EBCS de CSA, MDS),
- Expose, une expérience de l'ESA permettant de soumettre des échantillons aux conditions régnant dans l'espace.

Les équipements de recherche sur la physiologie humaine

Les équipements de recherche biologique comprennent notamment :

- Human Research Facility (HRF-1 and HRF-2) de la NASA et European Physiology Modules (en) (qui comprend Cardiolab du CNES) de l'ESA sont un ensemble d'instruments permettant de mesurer l'effet des séjours de longue durée dans l'espace. MARES et PEMS se concentrent sur l'incidence de la microgravité sur les muscles,
- Étude de la fonction pulmonaire (PFS),
- Mesures de la distribution des radiations (mannequin Matryoshka, EVARM de CSA) et de leur effet (ALTEA de la NASA incidence sur la vue et l'activité cérébrale)
- Les équipements d'entretien physique les plus récents (tapis roulant Colbert, cycloergomètre CIVIS, ARED) sont équipés de capteurs qui fournissent un certain nombre de paramètres physiologiques aux équipes au sol,
- L'adaptation de l'homme à l'absence de gravité est également étudiée à travers les expériences HPA (adaptation des mouvements impliquant les mains et les bras) et ELITE-S2 (vision et activité cérébrale associée).

Les équipements de recherche sur la physique et la science des matériaux

Les équipements de recherche sur la physique et la science des matériaux comprennent notamment :

- Combustion Integrated Rack (CIR) de la NASA permet d'étudier les phénomènes de combustion.
- Fluid Science Laboratory (FSL) de l'ESA, Fluids Integrated Rack (FIR) de la NASA et DECLIC du CNES sont des équipements permettant d'étudier le comportement des fluides.
- GHF de JAXA est un four électrique permettant de générer des cristaux de grande qualité.
- Materials Science Research Rack (MSRR-1) est un mini laboratoire permettant l'étude de matériaux tels que des polymères, cristaux, céramiques, alliages et semi-conducteurs.
- SpaceDrums de la NASA permet d'opérer (combustion) sur des matériaux solides et fluides maintenus en suspension grâce à l'émission d'ultrasons.
- Ryutai de JAXA est un rack rassemblant plusieurs expériences sur les fluides.
- SHS de Roscosmos est un four à très haute température (3 000 °K).
- MISSE de la NASA permet de tester la résistance de composants à l'exposition dans l'espace : électronique, optique, capteurs, équipements de communication, composants structurels et revêtements.

L'observation de la Terre et l'étude de l'Espace

Certains équipements de recherche sont installés à l'extérieur des modules pressurisés. Plusieurs points d'attache, disposant d'une alimentation électrique et de liaisons informatiques, sont disponibles à différents endroits de la station :

- quatre palettes, les *ExPRESS Logistics Carriers*, peuvent soit recevoir des expériences scientifiques exposées dans le vide spatial soit servir de lieu de stockage pour des pièces détachées. Elles sont installées au-dessus et au-dessous de la poutre pour permettre l'exposition des expériences au choix face à la Terre ou face à l'espace. Les équipements scientifiques sont alimentés en énergie et reliés par des liaisons à haut et à bas débit aux données scientifiques.
- l'*Experiment logistic module – Exposed section* (ELM ES) est une palette prolongeant à l'extérieur le laboratoire japonais et destinée à recevoir les expériences scientifiques japonaises. Un sas permet de faire passer des expériences depuis l'intérieur du laboratoire Kibo et un bras manipulateur télécommandé permet de mettre en place ou retirer des équipements sans avoir à effectuer de sorties extravéhiculaires;

- quatre points d'ancrages extérieurs pouvant recevoir des expériences scientifiques sont disponibles à l'extérieur du laboratoire de recherche européen Columbus (*Columbus External Payload Facility* ou CEPF);
- quelques expériences disposent de support et de liaisons électriques et informatiques à l'extérieur du module russe Zvezda;
- sur la poutre un emplacement spécifique est réservé au spectromètre magnétique Alpha.

Les équipements d'observation de la Terre et d'étude de l'Espace comprennent en 2009 :

- le *Window Observational Research Facility* (WORF), un hublot de grande taille situé dans le laboratoire Unity et équipé d'un verre de qualité optique. Il peut recevoir différents instruments pour l'observation de la surface terrestre et est utilisé notamment pour l'étude des continents ou des phénomènes atmosphériques;
- Solar de l'ESA, mesurant avec un triple spectromètre l'irradiance du Soleil;
- EuTEF de l'ESA, mesurant à l'aide de 9 instruments et échantillons l'incidence de l'environnement spatial et des radiations;
- MAXI, de l'agence spatiale japonaise JAXA, étudiant les sources de rayons X;
- SMILES de JAXA, étudiant les traces de gaz dans la stratosphère;
- SEDA-AP de JAXA, mesurant les caractéristiques de l'environnement autour de la station spatiale;
- le spectromètre magnétique Alpha, installé en mai 2011, un spectromètre magnétique mesurant avec grande précision les flux de rayons cosmiques de haute énergie chargés électriquement qui ne peuvent être observés qu'indirectement depuis la surface de la Terre. Cet équipement lourd (plus de 6 tonnes) installé directement sur la poutre doit fournir des informations sur la matière noire et l'antimatière présentes dans l'univers.

Énergie

L'énergie est vitale pour le fonctionnement de la station spatiale et la survie de ses occupants : par ailleurs elle conditionne souvent la réalisation des expériences scientifiques. Pour la partie non russe de la station, l'énergie provient des panneaux solaires installés sur la poutre de la station. Sur celle-ci, huit panneaux solaires doubles (Solar Array Wing ou « SAW ») sont installés de part et d'autre des éléments de poutre P3/P4, S3/S4, P5/P6 et S5/S6. Un « SAW » comporte deux panneaux composés chacun de 16 400 cellules photovoltaïques maintenus en position par un mât formant un ensemble long de 34 mètres, large de 12 mètres et pouvant produire jusqu'à 32,8 kW de courant continu. Le courant est régulé à 160 Volts, puis converti à une tension de 120 Volts (pour faire face aux baisses d'alimentation), avant d'être convoyé jusqu'aux différents équipements utilisateurs. Les équipements de régulation du courant sont refroidis à l'aide d'un circuit dans lequel circule un fluide caloporteur (de l'ammoniac), qui évacue la chaleur grâce à un ensemble de radiateurs attachés à chaque élément de poutre porteur de panneaux solaires. Chacun de ces quatre radiateurs photovoltaïques (PVR), comportant sept éléments d'une surface totale de 13 mètres sur 3,4 mètres et pesant 0,8 tonnes, permet d'évacuer jusqu'à 9 kW d'énergie. Généralement, les panneaux solaires sont orientés de manière à maximiser l'énergie solaire. Deux types de joints tournants motorisés (alpha et beta) permettent d'orienter les panneaux avec deux degrés de liberté. Si les impératifs de fourniture d'énergie ne sont pas prioritaires, les panneaux peuvent être orientés de manière à réduire la traînée. C'est la disposition généralement adoptée lorsque la station se trouve à l'ombre de la Terre (configuration « Night Glider mode »). Il peut toutefois arriver que la station déploie volontairement ce « frein aérodynamique » pour abaisser son orbite et permettre à un vaisseau lourdement chargé de l'atteindre plus facilement. Durant les éclipses, lorsque la Terre intercepte le flux lumineux, qui se produisent en moyenne durant un tiers d'une révolution de la station autour de la Terre, les panneaux solaires ne sont plus éclairés et la station utilise l'énergie stockée dans un ensemble de batteries nickel-hydrogène qui sont rechargées durant les périodes de « jour ».

Panneaux solaires et radiateurs

La partie russe de la station est alimentée par 4 panneaux solaires installés sur les modules Zarya et Zvezda. Il était prévu que la Russie installe le Science Power Platform (SPP), un ensemble de panneaux solaires de taille conséquente permettant à la partie russe de la station d'être autonome sur le plan énergétique, mais le module qui devait les porter a été abandonné ainsi que le laboratoire spatial associé,

pour des raisons budgétaires. Il est finalement prévu que les modules russes utilisent l'énergie électrique produite par les panneaux solaires installés sur la poutre avec une tension ramenée à 28 volts.



*Aperçu de deux des panneaux solaires doubles.
L'astronaute Steve Bowen, de la mission STS-126,
qui travaille sur la poutre, donne l'échelle.*



*Les modules russes Rassvet et Pirs et un vaisseau
Progress*

Contrôle thermique

L'activité humaine et les expériences scientifiques génèrent à l'intérieur des modules pressurisés un excédent de chaleur qui doit être évacué. À l'extérieur, les équipements et les modules doivent être protégés des contrastes thermiques générés par l'exposition directe ou l'absence d'exposition au Soleil, qui engendrent des écarts de température compris entre -126 °C et 149 °C . Le système de contrôle thermique a pour rôle de maintenir dans une fourchette de température acceptable les différents composants de la station. Cet objectif est accompli par plusieurs types de moyens, soit passifs, soit actifs. Le moyen passif le plus courant est l'utilisation de revêtements isolants multicouches constitués de feuilles d'aluminium et de kapton séparées par des plots en polyester, qui réduisent sinon annulent le transfert thermique. Par ailleurs, des peintures ou des dépôts de couches superficielles choisies permettent de modifier l'émissivité ou au contraire la réceptivité thermique. Lorsque les solutions précédentes ne suffisent pas à faire face aux grands gradients de température, des résistances thermiques sont ajoutées. Enfin on peut avoir recours à un liquide caloporteur pour transporter sur de courtes distances la chaleur qui est évacuée par changement d'état du liquide (passage en phase gazeuse) et l'utilisation de radiateurs. À l'intérieur des modules pressurisés, les méthodes passives sont remplacées par un système actif. Dans la partie non russe de la station, la chaleur est évacuée par un circuit dans lequel circule de l'eau qui est mise au contact des équipements générateurs de chaleur. Un échangeur transfère les calories collectées à un deuxième circuit situé à l'extérieur dans lequel circule de l'ammoniac plus efficace que l'eau dans ce rôle mais trop dangereux pour être utilisé à l'intérieur des modules : ce circuit amène la chaleur jusqu'à deux ensembles de radiateurs (Heat rejection system HRS) installés respectivement sur les segments S1 et P1 de la poutre. Chaque radiateur peut évacuer 35 kW et est composé de 24 panneaux formant un ensemble de 22 mètres sur 10 mètres, et pesant 3,7 tonnes. La partie russe de la station utilise pratiquement le même système et dispose de ses propres radiateurs. Les systèmes russes et américains ne sont pas interconnectés.

Télécommunications

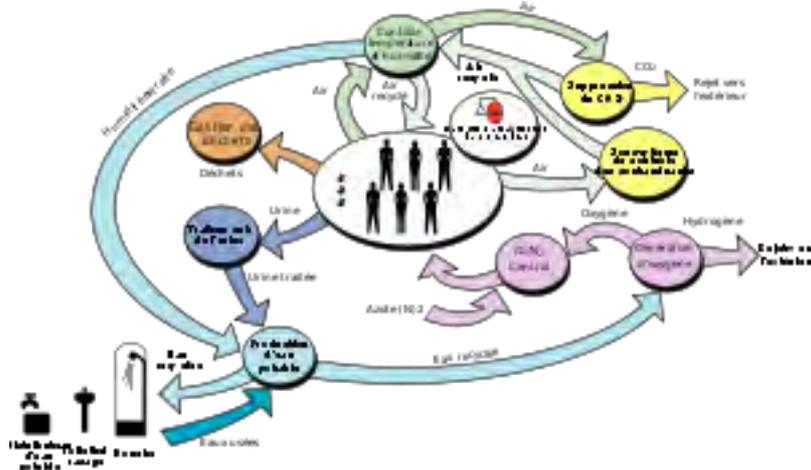
Les communications radio sont essentielles pour les opérations de la station spatiale : elles permettent les échanges des données télémétriques et scientifiques entre la station et les centres de contrôle de mission répartis autour du globe. Elles sont également utilisées durant les manœuvres de rendez-vous et d'accostage ainsi que pour les échanges entre les membres de l'équipage, les contrôleurs de vol et avec les membres de la famille. Pour assurer ces liaisons, la station spatiale dispose de plusieurs systèmes de télécommunications. Le premier système installé chronologiquement est l'équipement russe VHF *Regul* qui permet, entre autres, les transmissions de données télémétriques entre la partie russe de la station et le centre de contrôle de mission installé à Moscou (TsUP) via un réseau de stations de réception terrestres et

les constellations de satellites de télécommunications Loutch et Molnia. Les transmissions passent par l'antenne Lira installée sur le module Zvezda. À l'intérieur de la partie russe de la station, les échanges radios sont assurés par un système analogique utilisant une liaison en cuivre. La partie non russe de la station spatiale a recours à deux systèmes de communication radio distincts dont les antennes sont montées sur le segment central Z1 de la poutre : une liaison en bande S utilisée pour les communications en audio et une liaison en bande Ku utilisée à la fois pour l'audio, la vidéo et les données. Ces communications sont relayées par le réseau de satellites de télécommunications géostationnaires TDRS permettant une liaison quasiment continue avec le centre de contrôle de mission de la NASA (MCC-H) à Houston. Ce système de télécommunication peut être également utilisé pour transmettre des données au centre de contrôle de Moscou par le biais d'une liaison téléphonique permanente entre le centre de contrôle de Houston et celui de Moscou. Les données échangées avec le bras téléopéré Canadarm 2, les laboratoires Columbus et Kibō sont routées également via les réseaux en bande S et Ku; s'ils sont mis en place, le futur système European Data Relay Satellite et son équivalent japonais pourront être également utilisés. À l'intérieur de la station les communications sont assurées par un réseau sans fil numérique interne. Un système radio en UHF est utilisé durant les sorties extravéhiculaires : les Russes peuvent ainsi communiquer soit avec la partie russe de la station soit avec le centre de contrôle au sol sur Terre à condition qu'une station terrestre soit à portée (mais dans ce dernier cas avec parfois des interférences créées par la radio du contrôle du trafic aérien au sol) tandis que les autres astronautes sont en liaison avec la partie non russe de la station. Les liaisons UHF sont également utilisées durant les manœuvres d'accostage et de séparation avec la station par les vaisseaux Soyouz, Progress, HTV, ATV et la navette spatiale (celle-ci utilise toutefois également les bandes S et Ku via le réseau TDRSS) pour recevoir des instructions des centres de contrôle de mission sur Terre et de l'équipage de la station spatiale. Les vaisseaux qui fonctionnent en mode automatique comme l'HTV et l'ATV disposent par ailleurs de leur propre système de communications : l'ATV utilise un laser installé sur le vaisseau et un jeu de miroirs installés sur le module Zvezda, désigné sous l'appellation Proximity Communications Equipment pour accoster la station tandis que l'HTV utilise pour son approche un système basé sur le réseau GPS.

Système de support de vie

Le système de support de vie de la station spatiale est chargé du maintien d'un environnement viable pour l'équipage à l'intérieur des modules pressurisés. Dans l'espace entièrement clos et isolé de la station, cela implique principalement de remplacer périodiquement l'oxygène consommé par les astronautes, d'éliminer le dioxyde de carbone expiré, de filtrer les micro-organismes, particules et gaz organiques, de mettre à disposition l'eau nécessaire aux différents usages, de contrôler et maintenir la température, la pression et la composition de l'atmosphère dans une fourchette fixe et enfin de surveiller l'apparition d'incendie et éventuellement de le combattre. Pour limiter la masse des consommables (eau et oxygène) transportés par les vaisseaux cargo, la station est équipée de systèmes permettant de recycler l'eau et de régénérer l'atmosphère de la station. Ceci permet de réduire la masse des consommables à placer en orbite annuellement de 6,7 tonnes pour un équipage permanent de 6 personnes. Jusqu'en 2008 cette fonction était uniquement prise en charge par le système Elektron installé dans le module russe Zvezda tandis que le dioxyde de carbone était éliminé grâce au système Vozdukh à bord du même module. Cet équipement a été par la suite renforcé par le système américain ECLSS installé dans trois racks du module Tranquility et composé du système OGS pour la régénération de l'atmosphère et WRS (Water Recovery System) qui collecte toutes les eaux usées, eaux de toilette, urine, vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère de la cabine. L'urine est distillée dans un premier sous-ensemble (UPA) puis le Water Processor Assembly (WPA) traite les autres eaux usées et le produit de l'UPA. Après avoir séparé les gaz et les particules solides, WPA élimine les déchets organiques et les micro-organismes grâce à un ensemble de filtres et à un réacteur catalytique à haute température puis génère de l'eau potable. Cette installation a permis de faire passer l'équipage permanent à six personnes. La consommation en eau par homme est estimée à 3,5 litres par jour : sur ce volume, WRS permet d'économiser 1,3 litre en recyclant l'urine et autres eaux usées, tandis qu'Elektron en récupère 1,5 en condensant l'humidité de la cabine. Les deux systèmes produisent de l'oxygène par électrolyse de l'eau; le système américain peut potentiellement combiner l'hydrogène produit par l'électrolyse avec le CO₂ expiré par l'équipage en générant de l'eau et du méthane ce dernier étant expulsé à l'extérieur. Il existe un système de secours reposant sur des réserves d'oxygène stockées en bouteilles et des générateurs d'oxygène à partir de produits solides. D'autres sous-produits du

métabolisme humain comme le méthane produit par le système intestinal et l'ammoniaque contenu dans la sueur sont éliminés par des filtres à cartouche de charbon activé. L'atmosphère à bord de la station est maintenu à une pression similaire à celle de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer soit 101,3 kPa. L'utilisation d'une composition analogue à celle de l'atmosphère terrestre est plus confortable pour l'équipage et bien plus sûre qu'une atmosphère d'oxygène pure.



Les échanges entre les différents composants du système de support de vie de la station spatiale

La vie à bord de la station

Les équipages : composition et relève

L'équipage est composé d'un commandant, assurant un rôle de coordinateur, et d'ingénieurs de bord. À chaque changement majeur de sa composition, l'équipage se voit affecter un nouveau numéro d'expédition. Depuis que l'équipage permanent est passé à 6 personnes en mai 2009, chaque astronaute séjourne en moyenne 6 mois et l'équipage est renouvelé par moitié tous les 3 mois entraînant un changement de numéro d'expédition. L'expédition 1, qui est la première à occuper la station à compter du 2 novembre 2000, était composée de deux cosmonautes russes dirigés par l'astronaute de la NASA William M. Shepherd. L'expédition 21 a été confiée pour la première fois à un représentant d'un autre pays : Frank De Winne de l'agence spatiale européenne. Début 2010 en incluant l'expédition 22, 58 personnes avaient fait partie de l'équipage permanent de la station, dont 8 ont participé à 2 expéditions. Les professions d'origine sont scientifiques : 23 ingénieurs, 4 médecins, 6 chercheurs, 19 pilotes militaires, 6 pilotes d'essais et 6 autres militaires. Tous ont fait des études supérieures poussées : les militaires ont souvent également des diplômes et des expériences relevant du métier d'ingénieur. L'âge moyen lors du séjour de 45 ans et demi découle des critères de recrutement (personnes fortement diplômées et ayant fait leurs preuves dans le cadre professionnel) mais également de la durée de l'entraînement qui s'étale sur plusieurs années et des aléas du programme. La durée moyenne d'un séjour à bord de la station est d'environ cinq mois et demi. On compte parmi les participants 30 Américains, 27 Russes, 3 Européens, 2 Japonais et 1 Canadien. La proportion de cosmonautes russes dans les équipages devait passer, à compter de 2010, à 50 % conformément aux quotas fixés. Cinq femmes, toutes américaines ont fait partie d'un équipage, dont Peggy Whitson, qui y a séjourné à deux reprises, la deuxième fois en tant que commandant de la station spatiale. Par ailleurs huit touristes payants (fin 2009), non décomptés dans le nombre de participants, ont séjourné jusqu'à 16 jours dans l'ISS en utilisant le quota des places réservées à l'agence spatiale russe.

L'emploi du temps de l'équipage

L'heure légale à bord de la station est, de manière arbitraire, l'heure UTC (Paris est à UTC+1 en hiver). Lorsque la station reçoit la visite de la navette spatiale, l'équipage de la station se cale généralement sur la référence horaire de la navette (Mission Elapsed Time ou MET), qui est fixée en fonction de l'heure de lancement de celle-ci. Une journée typique à bord de la station démarre à 6 heures. Une inspection de la station est effectuée puis l'équipage prend son petit déjeuner. Une conférence a lieu avec le centre de contrôle pour organiser la journée avant d'entamer le travail à 8 h 10. Une séance d'exercice physique est planifiée au cours de la matinée de travail. Cette dernière s'achève à 13 h 5. Après une pause déjeuner d'une heure, le travail reprend avec un nouvel exercice physique intercalé au cours de l'après-midi. La

journee de travail s'achève à 19 h 30. Le dîner et une réunion de l'équipage suit. Enfin la période allouée au repos démarre à 21 h 30. En général, l'équipage travaille dix heures par jour en semaine et cinq heures le samedi, le reste du temps étant consacré aux activités de détente.

Les phases de repos

La station comporte des compartiments destinés au repos : deux dans la partie russe, deux dans le module Harmony, un dans le module Kibo. Les compartiments américains sont amovibles et s'installent dans un emplacement de rack tandis que les Russes disposent de mini-cabines avec des cloisons en dur. Dans les deux cas, l'occupant y dort dans un sac de couchage accroché à la paroi; il peut y écouter de la musique, utiliser un ordinateur et y stocker quelques effets personnels. Les visiteurs, qui n'ont pas d'emplacement réservé pour dormir, accrochent leur sac de couchage sur une cloison libre (on peut dormir en flottant dans la cabine mais généralement les astronautes évitent de le faire car ils peuvent heurter et endommager durant leur sommeil un équipement fragile). Toutes les 24 heures se succèdent 16 périodes d'obscurité et de jour, aussi, durant la période définie comme étant la nuit, des rideaux obturent les hublots. Par ailleurs il est nécessaire que dans les compartiments affectés au repos l'air soit bien ventilé, car en impesanteur l'air chaud ne monte pas et l'astronaute peut se réveiller à cause d'une sensation d'asphyxie car sa tête se retrouve entourée d'une bulle de dioxyde de carbone exhalée durant son sommeil.

L'hygiène

Depuis que le projet de module d'habitation américain a été abandonné, il n'est plus prévu que la station spatiale dispose de douche. Les membres de l'équipage se lavent en utilisant un robinet, des lingettes humides avec du savon présenté dans un conditionnement similaire à celui des tubes dentifrice. L'équipage dispose de shampoing ne nécessitant pas de rinçage et de pâte à dentifrice qui peut être avalée. Il y a deux toilettes dans la station, situées respectivement dans les modules Zvezda et Destiny. Les toilettes utilisent un système de succion généré par un ventilateur semblable à celui mis en œuvre dans la navette spatiale américaine. Les astronautes doivent s'attacher à la cuvette des toilettes, qui est équipée avec un système assurant l'étanchéité durant l'opération. La succion générée par le ventilateur permet d'évacuer les déchets qui sont conditionnés dans des sacs stockés dans un container en aluminium. Lorsqu'un container est plein, il est transféré dans le vaisseau cargo Progress qui l'évacue. Les urines sont collectées à l'aide d'un tuyau, au bout duquel se trouve connecté un embout personnalisé adapté à l'anatomie de l'utilisateur, ce qui permet aux hommes comme aux femmes d'utiliser le même système.



Regarder la Terre défilier est un des loisirs préférés des astronautes comme ici Tracy Caldwell Dyson dans la coupole de Tranquility



N Stott installe son compartiment de repos dans le laboratoire Kibo... côté plancher

Les repas

Il s'écoule de un à deux mois entre deux ravitaillements et il n'existe pas à bord de réfrigérateurs destinés à la conservation des aliments. La nourriture est donc essentiellement constituée de plats lyophilisés et de conserves auxquels s'ajoutent quelques légumes et fruits frais dans les jours qui suivent l'arrivée d'un vaisseau ravitailleur. Les boissons (sodas...) sont fournies sous forme de poudre déshydratée. Les liquides et les soupes sont conditionnés dans des sachets hermétiques et consommés au moyen d'une paille, tandis que la nourriture solide est consommée en utilisant, comme à terre, une fourchette et un couteau. Les menus, qui reviennent selon un cycle de 15 jours, sont choisis par chaque astronaute

plusieurs mois avant son départ pour la station avec l'aide de diététiciens qui veillent à l'équilibre des repas. Des ajustements sont effectués pour tenir compte des conditions qui règnent dans la station : diminution de la proportion de fer qui est moins bien assimilé car le volume de globules rouges diminue, réduction de la quantité de sodium et augmentation de la dose de vitamine D pour favoriser la croissance osseuse. La nourriture épicée a généralement la préférence des astronautes car, en l'absence de gravité, les senteurs ne montent plus jusqu'aux muqueuses du nez et le sens du goût disparaît en grande partie. Le ravitaillement est fourni à parts égales par les Russes et les Américains, avec quelques apports des autres partenaires, et transporté par les vaisseaux ravitailleurs disponibles. Les sachets de nourriture destinés à chaque astronaute sont identifiés par une étiquette d'une couleur donnée. L'équipage dispose dans deux des modules (Destiny et Zvezda) de fours permettant de réchauffer les plats et d'un distributeur d'eau qui délivre au choix de l'eau chaude ou froide. La majorité des repas rassemble l'ensemble de l'équipage autour d'une des deux tables installées dans les modules Zvezda et Unity. La moindre miette qui s'échappe dans la cabine doit être collectée pour éviter qu'elle ne vienne s'accumuler et obturer les filtres à air ou d'autres équipements délicats.

Santé

Le mal de l'espace qui est assimilable au mal des transports au niveau des causes (perte d'orientation) comme des symptômes (nausée), affecte certains astronautes mais disparaît généralement au bout de quelques jours. Le séjour prolongé de 6 à 7 mois en impesanteur a des conséquences physiologiques bien plus importantes. Les plus graves sont l'atrophie musculaire et la décalcification du squelette due à l'absence de stimulation par le poids corporel des mécanismes de renouvellement de la masse osseuse. On constate également une redistribution des fluides corporels entraînant entre autres une congestion faciale (le sang monte à la tête), un ralentissement du rythme cardiaque, une diminution de la production des globules rouges, un affaiblissement du système immunitaire, une perte de poids, une perturbation du sommeil et des flatulences. Cette deuxième catégorie d'effets disparaît toutefois rapidement une fois l'astronaute revenu sur Terre. Pour réduire les conséquences néfastes de l'impesanteur, la station est équipée de deux tapis roulants (TVIS et T2/COLBERT), deux cycloergomètres (CEVIS et VELO) et une machine de musculation (aRED) sur lesquels chaque astronaute doit pratiquer des exercices durant au minimum deux heures par jour. Les astronautes utilisent des tendeurs pour se maintenir en place. Ces exercices intensifs ne permettent pas de combattre totalement la perte de densité osseuse et l'atrophie musculaire chiffrées respectivement à 7 % et 10 % pour les parties les plus touchées, selon une étude récente sur un échantillon de 15 astronautes ayant séjourné environ 6 mois dans la station. L'équipage est exposé à un niveau plus élevé de radiation qu'au sol car l'atmosphère terrestre ne bloque plus les rayons cosmiques. Les astronautes reçoivent en moyenne chacun 1 millisievert de radiation par jour, soit la quantité reçue par une personne sur Terre au cours d'une année du fait du rayonnement naturel. Il en résulte une probabilité plus forte que l'astronaute développe un cancer dans le futur (le taux de mortalité par cancer est de 2,48 fois plus élevé chez les astronautes mais l'échantillon est trop faible pour savoir si ce chiffre est représentatif). Un niveau de radiation élevé crée des dommages dans les chromosomes des lymphocytes. Or ces cellules jouent un rôle central dans le système immunitaire et donc tout dommage occasionné à celles-ci réduit l'immunité des astronautes. Au bout d'un certain temps, la faiblesse des défenses immunitaires peut conduire à la propagation d'infections au sein de l'équipage, dont la diffusion est par ailleurs favorisée par le milieu confiné dans lequel ceux-ci vivent. Les radiations favorisent également l'apparition de cataractes. Des boucliers anti-radiations et des médicaments pourraient réduire ces risques à un niveau acceptable, mais les données disponibles sont peu nombreuses. Aujourd'hui tout séjour de longue durée dans la station entraîne un risque croissant. Malgré des protections anti-radiations renforcées par rapport aux stations précédentes comme Mir, le niveau de radiation à l'intérieur de la station spatiale n'a pu être réduit de manière significative, et on pense que de nouvelles avancées technologiques seront nécessaires avant que l'homme puisse effectuer des vols de longue durée dans le système solaire.

Les opérations

Ravitaillement et mise en orbite des composants de la station spatiale

La construction de la station a mobilisé de 1998 à 2011 de nombreux vaisseaux chargés de placer en orbite les 400 tonnes de la station. La station doit être également régulièrement ravitaillée en consommables (eau, nourriture, gaz, carburant), rechanges (par exemple les batteries dont la durée de vie

théorique est de 6,5 ans) et en pièces détachées pour les réparations : ce fret représente un tonnage annuel d'environ 16 tonnes pour un équipage permanent de 6 personnes selon les calculs de la NASA. Par ailleurs certains équipements, représentant un fret plus réduit, doivent être ramenés sur Terre pour que la station spatiale puisse fonctionner : résultats des expériences scientifiques, scaphandres à réviser, etc. Enfin, les vaisseaux servent également à évacuer les déchets produits par la station.

Les vaisseaux utilisés

La navette spatiale, en service jusque début 2011, est au cœur du dispositif d'assemblage et de ravitaillement de la station spatiale. Les principaux partenaires participent également à ces opérations avec leurs propres vaisseaux. Ceux-ci présentent des capacités très variables en masse, volume et type de cargaison. Les principaux paramètres sont :

- la charge utile totale en tonnes;
- le volume et le tonnage en soute pressurisée pour le fret à destination de l'intérieur la station spatiale;
- le volume et le tonnage en soute non pressurisée pour les pièces destinées à l'assemblage à l'extérieur de la station. Le transfert d'objets de l'intérieur de la station vers l'extérieur via les sas aux faibles dimensions est limité aux toutes petites pièces : il est donc nécessaire que les pièces détachées à installer à l'extérieur de la station arrivent dans une soute accessible depuis l'extérieur;
- la taille de l'écouille de la soute pressurisée qui conditionne le transport de pièces encombrantes : circulaire de type russe ou APAS d'une superficie de 0,5 m² utilisée sur les cargos ATV et Progress ou de format carré (CBM) propre aux ports de la station de 1,61 m² (partie non russe) mise en œuvre par le cargo japonais et la navette spatiale. Seul le port CBM permet de faire passer les équipements internes de la partie non russe de la station;
- la capacité de transport de liquides (eau), carburant (pour les moteurs-fusées) et de gaz (oxygène, azote, air, etc);
- la capacité de remorquage qui est utilisée pour rehausser l'orbite de la station et qui dépend de la puissance des moteurs et de la quantité de carburant destinée à la propulsion.

La navette spatiale américaine



La navette spatiale amarrée au module Destiny

La navette spatiale est le plus polyvalent des vaisseaux participant au programme car elle peut transporter tout à la fois du fret pressurisé, du fret non pressurisé dans une soute particulièrement volumineuse, ramener du fret sur Terre ou contribuer à la relève des équipages. Elle est de plus équipée d'un bras piloté depuis la cabine de la navette qui lui permet d'extraire les charges utiles qu'elle transporte. Sa capacité de transport, bien que pratiquement divisée par deux par le choix d'une orbite favorable aux lanceurs russes, est particulièrement importante (16,4 tonnes). Enfin sa baie de grande taille (4,6 m par 18,3 m, pour un volume de 300 m³) lui permet de placer en orbite les composants de la station les plus encombrants. La

navette s'arrime à la station spatiale via l'un des deux adaptateurs pressurisés (PMA) qui assurent la compatibilité entre le diamètre de l'écouille de son sas et les ports de la station. La navette spatiale transporte le fret à destination de l'intérieur de la station grâce à un container pressurisé placé dans sa baie cargo : le Module Logistique Multi-Usages (MPLM) italien, construit sur le modèle du Colombus européen, comporte seize emplacements de racks et dispose d'une écouille de grande taille au format des ports de la station. Lorsque la navette est parvenue à la station, le container pressurisé est amarré à un port CBM de la station à l'aide du bras Canadarm de la navette. La navette spatiale peut également transporter le Spacehab, un module pressurisé qui reste dans la soute, et qui peut, entre autres, servir au ravitaillement de l'ISS. Mais il ne fut plus utilisé depuis août 2007 et la mission STS-118.



Un cargo Progress sur le point de s'amarrer à la station

Le cargo russe Progress

Le cargo russe Progress peut transporter 3,2 tonnes de ravitaillement dont 1,8 tonne de carburant pour la station. Il dispose d'une capacité de remorquage de la station significative. Le cargo s'amarre automatiquement à la station grâce au système Kurs qui utilise des impulsions radar pour calculer les corrections de sa trajectoire et s'amarrer.

Le vaisseau russe Soyouz

Le vaisseau russe Soyouz, qui permet de transporter trois personnes, sert uniquement à relever l'équipage. Après le retrait de la navette spatiale, c'est le seul vaisseau jouant ce rôle jusqu'à ce que le vaisseau spatial américain chargé de remplacer la navette spatiale américaine soit au point (véhicule commercial ou Orion selon le sort du programme Constellation). Deux vaisseaux Soyouz sont amarrés en permanence à la station pour permettre l'évacuation de celle-ci en cas d'urgence. Le Soyouz a une capacité très limitée (quelques dizaines de kg) d'emport de fret aller et retour.

Le véhicule automatique de transfert européen

L'ATV est un vaisseau cargo automatique développé par l'Agence spatiale européenne pour ravitailler la station spatiale. Il est lancé par une Ariane 5 ES ATV et se présente sous la forme d'un cylindre de 4,85 mètres de diamètre sur 10 mètres de longueur. Il peut transporter jusqu'à 7,7 tonnes de fret dont 4 700 kg de carburant pour le remorquage, 860 kg de carburant pompés dans les réservoirs de la station spatiale, 4 500 kg de fret dans une soute pressurisée, 100 kg d'air ou oxygène et 800 kg d'eau. L'ATV dispose de quatre gros moteurs de propulsion qui lui permettent de rehausser à la demande l'altitude de la station durant son temps d'amarrage (6 mois). Il est conçu pour s'amarrer automatiquement au module Zvezda. Son écouille de modèle russe ne lui permet pas de transporter le fret encombrant. Il n'a pas de capacité de transport de fret non pressurisé. Il est prévu de lancer un ATV tous les quinze mois.

Le H-II Transfer Vehicle japonais

Le vaisseau cargo japonais HTV, développé par le Japon dans le cadre de sa participation à la station spatiale, peut transporter 4,5 tonnes de fret dans sa soute pressurisée et 1,5 tonne dans un espace non pressurisé. Disposant d'une écouille de grand diamètre qui permet une connexion directe aux ports de la partie non russe de la station spatiale, il peut, contrairement à l'ATV, transporter les pièces les plus volumineuses qui équipent l'intérieur de la station spatiale internationale (format rack). Pour opérer sa

jonction avec la station spatiale le vaisseau cargo HTV, qui a été lancé par le lanceur japonais H-IIB, approche en mode automatique de la station spatiale en utilisant un GPS différentiel puis parvenu à 500 mètres un laser dont le rayon lumineux se réfléchit sur une mire installée sur la station. Arrivé à 10 mètres de la station le bras téléopéré Canadarm agrippe le vaisseau et réalise la jonction. L'HTV a été lancé pour la première fois en septembre 2009. Six autres missions sont aujourd'hui planifiées.



Le vaisseau cargo japonais HTV vient d'être « capturé » par le bras robotique Canadarm2 manipulé depuis l'intérieur de la station spatiale

Les vaisseaux COTS Cygnus et SpaceX Dragon

Pour ravitailler la station spatiale après le retrait de la navette spatiale et s'affranchir au maximum des vaisseaux russes, la NASA a lancé le programme COTS qui confie à des acteurs privés le développement et le lancement de vaisseaux-cargos. Deux vaisseaux, de capacité pratiquement d'environ (2 tonnes), ont été retenus en 2006 et 2008 et entrent en service en 2012 et 2014 :

- le Cygnus de la société Orbital Sciences placé en orbite par une fusée Antares : 8 véhicules ont été commandés chargés de transporter 20 tonnes de fret pressurisé pour un montant de 1,9 milliard de dollars
- le Dragon de la société SpaceX lancé par la fusée Falcon 9 : 12 missions commandés chargés de transporter 20 tonnes pour un montant de 1,6 milliard de dollars. Contrairement à Cygnus, ce vaisseau peut transporter du fret externe. Le vaisseau Dragon est le seul vaisseau cargo qui dispose d'une capacité à ramener du fret sur Terre depuis le retrait de la navette.

Les deux vaisseaux ont une écoutille aux normes de la partie non russe de la station spatiale. Comme le vaisseau cargo japonais, ils ne disposent pas de dispositif d'amarrage automatique : une fois parvenus à proximité de la station spatiale ils sont amarrés à l'aide du bras Canadarm commandé par l'équipage de la station spatiale.



ATV



SpaceX Dragon



Cygnus

Les opérations de ravitaillement

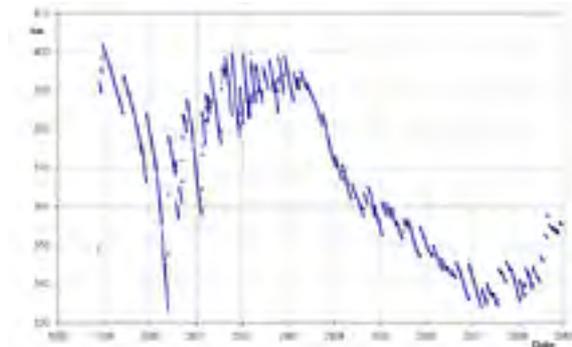
Depuis le début de sa construction en 1998 jusqu'à fin 2011 la station spatiale a été ravitaillée par 35 vaisseaux cargo Progress, 3 ATV européens (2008, 2011 et 2012) et 2 HTV japonais (2009 et 2011). La relève des équipages par 20 vaisseaux Soyouz et 31 vols de la navette spatiale américaine a par ailleurs placé en orbite des composants de la station ou amené du ravitaillement ou des pièces détachées. Deux lanceurs Proton ont lancé des modules russes. Enfin deux Soyouz sont immobilisés en permanence pour permettre à l'équipage d'évacuer la station en cas d'urgence. 2010 est une année un peu particulière car elle est à la fois la première année complète avec un équipage de 6 permanents et la dernière année où les opérations d'assemblage battent leur plein : il est prévu de lancer 5 navettes (celle-ci sera retirée du service à l'issue de ces missions), 4 Soyouz, 1 ATV, 1 HTV et 3 ou 4 Progress.

Les opérations de maintien en orbite

Maintien de l'altitude

La station spatiale est placée sur une orbite basse légèrement elliptique avec une inclinaison de 51.6° qu'elle parcourt en environ une heure et demie. L'altitude, comprise théoriquement entre 370 km et 460 km (en pratique entre 330 et 410 km de 1998 à 2009), est un compromis entre deux contraintes :

- À une altitude plus basse l'atmosphère plus dense freine de manière importante la station; une quantité de carburant supplémentaire doit être dépensée pour élever l'orbite de la station afin d'éviter que celle-ci n'entre dans les couches plus denses de l'atmosphère, ce qui entraînerait sa destruction. À l'altitude retenue, l'altitude de la station diminue de 50 à 100 mètres par jour du fait de la traînée générée par l'atmosphère ténue qui subsiste au niveau de l'orbite. La vitesse d'abaissement de l'orbite dépend en partie de l'orientation des panneaux solaires qui par leur surface peuvent jouer un rôle majeur dans le freinage aérodynamique.
- Une altitude plus importante implique que les vaisseaux chargés du ravitaillement et de la relève des équipages dépensent du carburant supplémentaire pour rejoindre la station puis, par la suite, effectuer leur rentrée dans l'atmosphère.



Les changements de l'altitude moyenne de la station entre 1998 et 2009



La station spatiale survole les latitudes comprises entre les $51,4^\circ$ sud et $51,4^\circ$ nord (ici la trace au sol le 14 avril 2013)

Le relèvement de l'altitude peut être réalisé à l'aide des moteurs du module russe Zvezda mais ce sont les différents vaisseaux qui accostent la station, qui effectuent l'essentiel de ce travail : le vaisseau Soyouz et la navette spatiale ont une capacité limitée dans ce domaine contrairement aux cargos Progress, HTV et surtout ATV qui disposent de réserves de carburant importantes pour cette tâche (4,7 tonnes de carburant pour l'ATV). Jusqu'à présent les corrections d'orbite ont été essentiellement effectuées par le cargo Progress. Ces manœuvres consomment environ 7 tonnes de carburant par an. Les trois cargos comportent des réservoirs et des canalisations qui permettent également de refaire le plein des réservoirs de carburant de la station. Il est prévu que soit installé sur la poutre de la station dans les années qui viennent un prototype de moteur Vasimr qui prendra en charge une partie du travail effectué par les cargos tout en consommant beaucoup moins de carburant.

Maintien de l'orientation

L'orientation de la station spatiale est choisie en fonction de différents critères liés à la production d'énergie, aux besoins de manœuvres des vaisseaux et aux risques de collision avec des débris. Elle doit être régulièrement corrigée car elle est modifiée notamment par le freinage atmosphérique, les irrégularités du champ de gravité terrestre, les déplacements à l'intérieur de la station et la poussée des vaisseaux qui s'amarrent. Les corrections, lorsqu'elles sont faibles, sont généralement prises en charge par quatre gyroscopes à deux degrés de liberté qui fournissent ensemble 4 760 Nms et qui sont installés dans le segment S0 de la poutre, non loin du centre de gravité de la station. Lorsque la force exercée par les gyroscopes n'est pas suffisante, par exemple lorsque ceux-ci sont saturés ou que l'orientation des panneaux solaires crée une traînée importante, les corrections sont réalisées à l'aide des moteurs du module de service Zarya. Le plan de l'orbite de la station a une incidence sur le contrôle thermique de la station et la production d'énergie. Le plan de l'orbite est défini par l'angle que fait celui-ci avec la droite joignant le Soleil à la Terre, dit angle bêta (β). Si cet angle est de 90° , la station est constamment exposée au Soleil et ses panneaux solaires peuvent fonctionner en permanence. En diminuant l'angle bêta, la station séjourne, durant une fraction de plus en plus longue de son orbite, à l'ombre de la Terre. La contrepartie d'une période d'ensoleillement longue est un échauffement plus important des modules pressurisés. Jusqu'à ce que tous les panneaux solaires soient installés, un angle bêta important a été retenu, pour permettre la production de suffisamment d'électricité. Lorsque l'angle est supérieur à 60° la navette spatiale ne peut accoster, car son contrôle thermique n'a pas la capacité de faire face au flux thermique généré. L'orientation de la station peut être également modifiée pour maximiser l'énergie électrique produite. La station est conçue pour avancer selon l'axe défini par l'alignement des principaux modules pressurisés (axe X), les laboratoires constituant l'« avant » et les modules russes l'arrière. La poutre (axe Y), perpendiculaire à cet axe, est maintenue parallèle au sol. Mais lorsque l'angle bêta est grand, cette orientation change et l'incidence des photons sur les panneaux solaires n'est pas optimale (les rayons solaires ne frappent pas à la verticale les panneaux). Aussi, jusqu'à récemment, l'axe x est généralement basculé de 90° , pointant perpendiculairement au plan d'orbite dans une configuration dite XPOP (X-axis Perpendicular to the Orbital Plane). Cette orientation peut être maintenue pratiquement sans correction des moteurs d'orientation. Dans la configuration YVV, l'axe Y se confond avec l'axe de progression, ce qui permet de produire encore plus d'énergie, mais requiert beaucoup de carburant pour maintenir l'orientation. Cette configuration n'est utilisée que quelques jours par an.

Assemblage et maintenance de la station

Les opérations d'assemblage



Après jonction entre les modules Unity et Quest, on raccorde les différentes liaisons et canalisations.

Les opérations d'assemblage de la station sont en grande partie réalisées par les équipages de la navette spatiale qui placent en orbite les nouveaux composants. Le déplacement des modules et des gros composants situés à l'extérieur de la station est réalisé à l'aide des bras Canadarm et Canadarm2 mais l'assemblage est parachevé au cours de chaque mission de la navette par 3 à 5 sorties extravéhiculaires durant lesquelles sont effectués les travaux les plus délicats : interventions sur les liaisons électrique et thermique extérieures, boulonnages des composants, retrait ou mise en place de revêtements de protection et de mains courantes, etc. Les astronautes de la navette préparent ces sorties au sol durant près d'un an en s'entraînant sur des maquettes à l'échelle 1 immergées dans une piscine ce qui permet de reproduire en partie l'absence de gravité. Les interventions à l'extérieur, qui peuvent durer plus de 7 heures, sont réduites au maximum : elles sont en effet dangereuses, physiquement épuisantes car la combinaison spatiale portée par l'astronaute est rigidifiée par la pression et imposent un long protocole de préparation physique. Sur les 22 sorties extravéhiculaires effectuées en 2009, seules 3 ont été réalisées par l'équipage permanent dont 2 pour préparer l'amarrage d'un nouveau module russe. Les sorties sont effectuées, selon les intervenants et l'objectif, en utilisant le sas de la navette spatiale, celui du module Quest ou le sas russe. Pour des raisons de sécurité les sorties s'effectuent toujours à 2 personnes ce qui correspond à la capacité maximum des sas.

Les modules de la partie non russe de la station sont placés en orbite avec le minimum d'équipements pour limiter leur poids. La mise en place des équipements internes est réalisée par la suite au fur et à mesure de leur arrivée. Ce travail est réalisé essentiellement par l'équipage permanent.

Les opérations de maintenance et d'entretien

Les opérations de maintenance occupent une partie importante du temps de l'équipage permanent de la station spatiale. La station contient des composants qui nécessitent d'être remplacés périodiquement - filtres, lampes - ou doivent être entretenus. Des défaillances se produisent régulièrement, un phénomène normal compte tenu du nombre de composants. Certains composants jouant un rôle critique se sont révélés particulièrement fragiles comme le système de support de vie (ECLSS) ou les gyroscopes victimes de deux défaillances bien avant leur fin de vie théorique dont l'une a mise à l'épreuve la résistance mécanique de la poutre de la station.



Sortie extra-véhiculaire pour travailler sur le module japonais Kibo



Nicholas Patrick enlevant les blocs d'isolants et de protection entourant les fenêtres de la coupole du module « Tranquility »

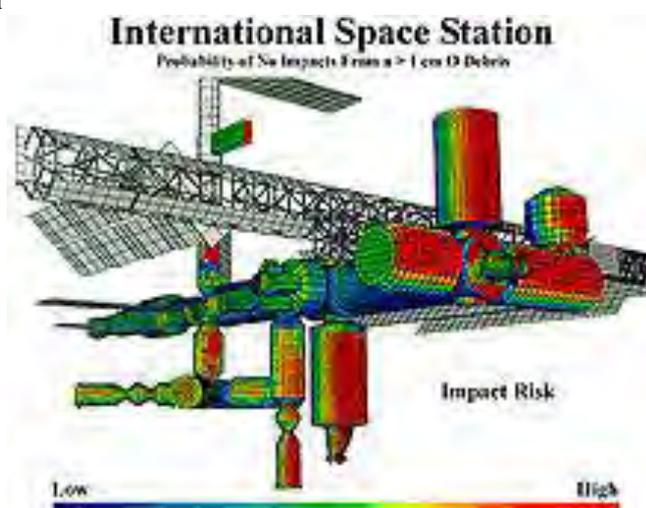


James F. Reilly s'extrait du sas Quest pour entamer une sortie extravéhiculaire

Le rôle du support au sol

La station spatiale internationale ne peut fonctionner sans un support au sol important : il faut entraîner les équipages, planifier les ravitaillements, concevoir, tester et préparer les composants à mettre en orbite, lancer les vaisseaux qui assurent le ravitaillement et la relève des équipages, surveiller les paramètres de fonctionnement de la station, assister l'équipage pour certaines opérations complexes, maintenir le réseau de communications par lesquels transitent données télémétriques et scientifiques, rediriger ces dernières vers les utilisateurs finaux et enfin coordonner tous les acteurs. Ces tâches concernent tous les partenaires et impliquent donc un grand nombre d'organisations spatiales à des degrés divers. Le centre spatial Johnson de la NASA est responsable du programme tout entier et est le centre de contrôle pour les activités dans la partie non russe de la station spatiale. La conception et le développement des composants de la station et l'entraînement de l'équipage sont également de son ressort. Le centre de vol spatial Marshall de la NASA est le centre de contrôle au sol primaire pour les expériences scientifiques et conçoit la majorité des composants développés aux États-Unis dont le système de support de vie américain ECLSS. Pour le segment russe ces missions sont prises en charge par le centre de contrôle de l'agence spatiale Roscosmos (TSUP) située à Koroliov (contrôle de mission), la Cité des étoiles (entraînement des cosmonautes) et le constructeur GKNPZ Krounitchev (conception de la station). Les vaisseaux chargés du transport jusqu'à la station sont lancés et suivis par les différents centres nationaux : la navette spatiale américaine et sa charge utile sont préparées et lancées depuis le centre spatial Kennedy. Les vaisseaux russes Progress et Soyouz, ainsi que les modules russes sont tirés depuis la Baïkonour. Le vaisseau cargo japonais est lancé depuis la base de lancement de Tanegashima tandis que les expériences scientifiques japonaises sont suivies par le centre spatial de Tsubuka. Le vaisseau cargo européen ATV est lancé depuis le Kourou et son contrôle est effectué depuis le centre du CNES de Toulouse. Les activités scientifiques du module européen Columbus sont coordonnées par l'agence spatiale allemande (DLR).

Les risques et leur gestion



Parties les plus exposées à un risque de collision avec un débris spatial (en rouge)

La survie de la station et de son équipage dépend du bon fonctionnement d'un grand nombre de systèmes complexes et du maintien de l'intégrité de la structure pressurisée. L'équipage est loin de tout secours et est plongé dans un environnement hostile : vide spatial, débris spatiaux, températures extrêmes. La prévention des risques est donc un objectif majeur. Celui-ci est intégré dans la conception de la station, les procédures appliquées au quotidien et l'entraînement de l'équipage. Les principaux risques sont :

- la perforation de la partie pressurisée de la station par un débris spatial ou une micrométéorite. Cet événement constitue le risque le plus élevé;
- la collision avec un vaisseau ravitailleur entraînant une dépressurisation (incident survenu dans la station Mir);
- une panne complète d'un système critique (support vie, énergie, régulation thermique, informatique, etc.);
- un incendie, incident qui s'est produit dans la station Mir;
- une décompression durant une sortie extra-véhiculaire (perforation de la combinaison spatiale par une micrométéorite, etc.).

La menace des débris spatiaux et des micrométéorites

La station spatiale est placée sur une orbite où circule également, à des vitesses relatives qui peuvent dépasser 20 km par seconde, une grande variété de débris spatiaux : étages de fusée, satellites hors service, débris d'engins explosés, restes de moteurs à propulsion solide, écailles de peinture, liquide réfrigérant du générateur nucléaire des satellites RORSAT, petites aiguilles et autres objets. Ces débris, ainsi que les micrométéorites constituent une menace pour la station car ils peuvent percer la coque des modules pressurisés ou endommager les autres parties vitales de la station. Les experts américains évaluent la probabilité de pénétration de la partie pressurisée par un débris à 29 % sur une période de 15 ans; la probabilité d'abandon de la station est de 8 % et celui de la perte de la station, avec éventuellement perte de l'équipage, de 5 %. Ces chiffres partent de l'hypothèse que les protections anti-débris des vaisseaux Progress et Soyouz sont améliorées : si ce n'est pas le cas la probabilité de perforation passe à 46 %. Ces chiffres sont jugés pessimistes par les Russes qui se reposent sur l'expérience accumulée avec la station Mir.



Deux vaisseaux Soyouz sont en permanence amarrés à la station pour pouvoir évacuer l'équipage

La trajectoire des débris de plus de 10 cm est surveillée depuis le sol et l'équipage est averti lorsque l'un d'entre eux est susceptible de passer à proximité de la station. Cela permet à l'équipage de modifier l'orbite de la station (Débris Avoidance Manœuvre DAM) en utilisant les propulseurs des modules russes pour s'écarter de la trajectoire du débris. Si celui-ci est identifié trop tard pour permettre la réalisation d'une manœuvre, l'équipage a pour consigne de fermer toutes les écoutilles à l'intérieur de la station et de s'installer dans les vaisseaux Soyouz qui permettent, si nécessaire, de rejoindre le sol. Cette évacuation partielle a déjà eu lieu à deux reprises le 13 mars 2009 et le 28 juin 2011. Les débris d'une taille inférieure à 10 cm, trop nombreux et trop petits, ne peuvent être surveillés depuis le sol. L'équipage s'entraîne donc régulièrement à faire face à une dépressurisation : la station est équipée de détecteurs de perte de pression qui permettent de calculer à quel moment l'atmosphère deviendra irrespirable. L'équipage peut ralentir les pertes en coupant le système de ventilation et tenter de détecter et obturer la fuite. Si la brèche dans la

coque a une superficie de quelques cm², l'équipage dispose théoriquement d'un délai de plusieurs heures avant que la situation devienne intenable. Si la réparation se révèle impossible, l'équipage doit se replier vers les modules intacts en fermant les écoutilles internes ou évacuer la station à bord des vaisseaux Soyouz. Depuis le passage à 6 occupants permanents en mai 2009, deux vaisseaux Soyouz triplaces sont amarrés en permanence aux modules russes en prévision d'un événement de ce type. Les débris constituent également une menace durant les sorties extravéhiculaires des astronautes, car ils peuvent perforer les combinaisons spatiales et entraîner une dépressurisation mortelle (l'astronaute dispose d'environ 15 secondes pour réagir avant de perdre conscience).



La probabilité d'une perforation de la tenue spatiale est toutefois, selon les experts américains, très faible compte tenu de la distribution des débris et des protections incorporées dans les combinaisons spatiales : 6 % après 2 700 heures d'activités extravéhiculaires d'une équipe de deux personnes. L'astronaute peut également perforer sa combinaison en y faisant un accroc (survenu une fois mais sans conséquence) ou partir à la dérive. Pour combattre ce dernier risque, les procédures concernant l'accrochage sont très strictes et en ultime recours l'astronaute emporte un dispositif propulsif, le SAFER, fournissant un delta-v cumulé de 3 m/s.

Mark Lee teste le système SAFER au cours de la mission STS-64

Les autres risques

De nombreux capteurs permettent aux contrôleurs au sol, qui assurent une surveillance permanente ainsi qu'aux systèmes de contrôle automatique de la station de détecter des changements pouvant affecter de manière grave le fonctionnement de la station : modification de la composition de l'atmosphère (augmentation du taux de CO₂, présence de gaz toxiques), début d'incendie... L'équipage est averti et des contre-mesures sont mises en œuvre éventuellement automatiquement. Les fonctions critiques de la station doivent être normalement assurées même en cas de double défaillance, contrainte prise en compte par la présence de redondances : il y a ainsi deux systèmes permettant de renouveler l'oxygène auxquels s'ajoute un système de secours basé sur des bouteilles d'oxygène et des cartouches chimiques. Les systèmes les plus vulnérables sont le circuit de régulation thermique et l'alimentation électrique du fait de la présence de composants critiques uniques. La station peut néanmoins continuer à fonctionner en cas de panne de ces systèmes mais en mode dégradé. Pour pouvoir remettre en marche les systèmes défaillants l'équipage dispose à l'intérieur et à l'extérieur de la station d'un certain nombre de pièces de rechange pré-positionnées (en particulier pour les composants critiques), de kits de réparation et de boîtes à outils. Les vols de la navette spatiale en 2010 sont en partie utilisés pour constituer un stock de pièces de rechange important car leur transport deviendra plus difficile après le retrait définitif de la navette.

Les modalités de la coopération internationale

Le programme de la station internationale est un programme développé en coopération par plusieurs pays. Sa construction et sa gestion sont régies par des accords de coopération internationaux établis à trois niveaux :

- L'Accord intergouvernemental de la station spatiale internationale (IGA en anglais International Space Station Intergovernmental Agreement) signé le 29 janvier 1998 par les 15 pays impliqués dans le projet : les États-Unis, le Canada, le Japon, la Russie, et les 10 membres de l'Agence spatiale européenne (Belgique, Danemark, France, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Norvège, Espagne, Suède et Suisse). Il fixe le cadre juridique dans lequel la station est construite et utilisée.
- Quatre Memoranda of Understandings (MoU) signés entre la NASA et les agences européenne ESA, russe Roscosmos, canadienne CSA et japonaise JAXA. Ils décrivent de manière détaillée les rôles et responsabilités des agences dans la construction et l'utilisation de la station. C'est dans le cadre de cet accord qu'est définie l'organisation permettant l'utilisation de la station.

- Différents accords bilatéraux entre les agences spatiales ont été rédigés pour implémenter les MoU. Ces accords se traduisent par des règles et des tâches à réaliser.

Les droits d'utilisation de la station spatiale par chaque pays ou entité sont déterminés par l'investissement effectué. Toutefois la partie russe de la station est uniquement utilisée par la Russie qui, par ailleurs, fournit 2 à 3 des membres de l'équipage permanent de 6 personnes. Au sein de la partie non russe de la station, chaque partenaire détient le droit d'utilisation de la charge utile (laboratoire, expériences) qu'il a fournie. Les pays qui ont fourni des éléments de support comme le Canada (bras Canadarm2) reçoivent en échange des droits d'utilisation de certains éléments. Chaque utilisateur peut céder une partie de ses droits à un autre participant ou à une agence non impliquée dans la construction de la station. L'objectif de ces règles est que les biens et les services puissent être échangés grâce à des opérations de troc sans mouvements de fonds. C'est ainsi que l'Agence spatiale européenne a construit les modules Harmony et Tranquility en échange de la mise en orbite du module Columbus par la navette spatiale américaine. Les taux d'échange sont fixés par les parties au cas par cas dans le respect du cadre fixé par les accords généraux. L'agence spatiale européenne détient 8,3 % des droits d'utilisation de la station (partie non russe), ce qui lui permet d'envoyer un astronaute environ 3 à 4 mois par an avec un équipage permanent de 6 personnes. Dans le cadre d'un accord de troc avec la NASA, elle a cédé 51 % des droits d'utilisation de son laboratoire Columbus en échange des services de transport de la navette spatiale. La NASA dispose de 76,6 % des droits d'utilisation, l'agence japonaise de 12,8 % et l'agence canadienne de 2,3 %.

Bilan intermédiaire (2009) : apports et critiques de la station spatiale internationale

Un article, paru dans le magazine scientifique Scientific American en 1996, passait en revue les domaines de la recherche (sciences des matériaux, biologie, astronomie...) pour lesquels les conditions régnant dans la station spatiale pouvaient susciter un intérêt spontané de la part de chercheurs du secteur privé : il concluait négativement pour différentes raisons : coût, impesanteur perturbée par le fonctionnement et la masse de la station, conditions reproductibles dans des laboratoires existants sur terre. Seules des recherches subventionnées ou portant sur l'adaptation de l'homme dans l'espace, n'intéressant que les agences spatiales dans la perspective de missions lunaires ou martiennes, pouvaient y trouver un débouché spontané. Certains dirigeants de la NASA reconnaissaient à l'époque que l'objectif principal de la station spatiale n'était pas la recherche scientifique mais la mise au point des techniques nécessaires aux missions habitées vers Mars et la Lune. Fin 2009, le potentiel de recherche de la station spatiale est sous-exploité. Les problèmes rencontrés par la navette ont freiné l'assemblage de la station. Les laboratoires japonais et européen ont été ainsi mis en place en 2008, soit 10 ans après le lancement du premier module; certains racks contenant les expériences scientifiques sont encore en attente d'un transport en 2011 car la mise en orbite des composants de la station et la livraison des consommables et des pièces de rechange a la priorité par rapport au transport du fret scientifique. L'équipage permanent, limité à 3 astronautes jusqu'à 2009, était accaparé par les tâches de maintenance et d'assemblage de la station, et disposait d'un nombre d'heures limité à consacrer à la science. Cette situation devrait nettement s'améliorer avec l'équipage porté à 6 personnes, mais la NASA annonce que les astronautes américains ne pourront consacrer que 36 heures par semaine en tout à la mise en œuvre des expériences scientifiques, soit moins de 30 % de leur temps de travail. Par ailleurs les problèmes de maintenance continuent à accaparer les astronautes : le système de support de vie qui permet le recyclage partiel des consommables et doit permettre de limiter le volume de fret qui doit être monté à la station, est régulièrement victime de défaillances fin 2009.

Exploitation future et fin de vie

Des problèmes de logistique

La station spatiale a été conçue pour fonctionner avec l'assistance logistique de la navette spatiale : celle-ci a transporté jusqu'en 2011 la majeure partie du fret et est à cette date le seul moyen de transport capable de réaliser le retour de fret sur Terre. Elle seule permet de placer en orbite les pièces détachées les plus encombrantes. Le retrait de la navette, annoncé en 2004 et effectif milieu 2011, représente donc une menace pour le fonctionnement de la station. La NASA a calculé que, avec les moyens de transport existants, il manquerait 40 tonnes de ravitaillement à la station pour qu'elle puisse fonctionner normalement sur la période 2010-2015. Ce chiffre n'inclut pas la demande de l'Agence spatiale européenne qui a besoin de lancer 1,8 tonne d'équipement de recherche aujourd'hui cloué au sol. Pour remplacer la navette, la NASA a donc lancé le programme COTS qui confie aux sociétés SpaceX et

Orbital Sciences Corporation, sélectionnées par un appel d'offres respectivement en 2006 et 2008, le transport des 40 tonnes manquantes. Ces deux sociétés développent à la fois un lanceur et un vaisseau cargo. Le calendrier initial très serré, pour répondre aux besoins logistiques de la station spatiale, prévoyait des vols commerciaux en 2011 après trois vols de démonstration. Il a subi des glissements de près de deux ans : un premier vol de démonstration est réalisé fin 2010 pour SpaceX et le premier tir du lanceur d'Orbital est attendu fin 2011 (situation début 2011) ce qui ne laisse aucune marge au cas où des problèmes de mise au point surgiraient malgré l'ajout du vol STS-135 de la navette spatiale destiné à assurer un dernier ravitaillement massif en juin 2011. Par ailleurs, la NASA a décidé de ne plus utiliser les cargos Progress à compter de fin 2011. Un report supplémentaire dans la date de disponibilité opérationnelle des cargos du programme COTS contraindrait à réduire l'activité de la station spatiale en la plaçant en mode « survie » avec un équipage limité à 2 personnes comme cela s'était produit après l'accident de la navette spatiale Columbia.

La relève de l'équipage non russe dépend depuis fin 2009 des Soyouz ce qui constitue une contrainte mal vécue par les responsables américains. La NASA souhaite confier le lancement et le retour sur Terre de ses équipages à des partenaires privés d'une manière analogue à ce qui est fait pour le fret : l'appel d'offres de la première phase du programme Commercial Crew Development (CCDev) a été remporté par les sociétés Sierra Nevada Corporation avec son vaisseau Dream Chaser et par Boeing associé à Bigelow Aerospace avec leur capsule CST-100. L'objectif est de fournir un vaisseau opérationnel en 2014.

Utilisation partielle du potentiel de recherche

La NASA ne prévoit d'utiliser pour son propre compte qu'une partie des installations de recherche qui sont allouées aux États-Unis soit 9 racks ISPR sur 19, 25 tiroirs sur les 59 présents dans les 8 racks ExPRESS et un peu plus de la moitié des 21 emplacements situés à l'extérieur des modules pressurisés. L'Agence spatiale européenne prévoit par contre d'utiliser 100 % des emplacements dont elle dispose et est demandeuse d'espaces supplémentaires. Les emplacements alloués à la NASA sont mis à la disposition des autres laboratoires privés et publics américains mais le coût de transport des expériences constitue un frein décisif : les chiffres de 44 000 \$ le kg et de 250 000 \$ pour une expérience tenant dans une boîte à chaussures avancés à titre indicatif par la NASA et un laboratoire utilisateur pourraient encore augmenter après le retrait de la navette spatiale. Les subventions qui permettraient de compenser ce coût sont réduites : pour la NASA elles sont passées de 700 M\$ en 2002 à 150 M\$ en 2010 reflétant les changements d'objectifs intervenus durant cette période. Toutefois le budget obtenu par le président Obama en 2010 prévoit une forte dotation financière dans ce domaine. La taille de l'équipage constitue un autre facteur limitatif pour l'utilisation du potentiel de recherche de la station spatiale. L'équipage permanent est passé à 6 personnes en novembre 2009, et, en application de l'accord passé avec l'agence spatiale russe, seules trois personnes sont allouées aux travaux dans la partie non russe soit environ 150 heures travaillées par semaine. Sur ce temps la NASA indique que 35 heures peuvent être consacrées chaque semaine aux expériences scientifiques. La NASA demande que les expériences embarquées sollicitent le moins possible l'équipage, interdisant tout travail de recherche nécessitant plus de 75 heures d'intervention cumulées sur 6 mois.

Fin du programme

Selon le planning défini en 2004 sous le président George W. Bush, la station devait être abandonnée début 2016 pour concentrer les ressources financières de la NASA sur le programme Constellation et le retour de l'homme sur la Lune. Toutefois, cette position a été contestée au sein de la NASA et le prolongement jusqu'à 2020 a été recommandé par la commission Augustine chargée de revoir la stratégie de la NASA dans le domaine des vols habités. Dans son rapport final d'octobre 2009, celle-ci présente les arguments suivants : l'utilisation de la station ne fait que démarrer et limiter son utilisation à 5 ans semble un faible retour sur un investissement qui a été initié il y a 25 ans. La décision d'abandonner la station en 2016 risque, par ailleurs, de froisser les partenaires internationaux des États-Unis qui, compte tenu du glissement du calendrier, n'auront pas pu exploiter tout le potentiel de leurs laboratoires : un programme international sous la conduite des États-Unis pourrait être difficile à mettre en place dans le futur. Le prolongement de la durée de vie a toutefois un coût estimé à 13,7 milliards de dollars qui ne figurait pas dans le budget de la NASA fin 2009. Le président américain Obama a entériné cette position en proposant le 1^{er} février 2010 au Congrès d'allouer un budget pour financer la prolongation. Un financement pour dix

années supplémentaires est encore annoncé en janvier 2014, repoussant la fin théorique du programme à 2024. En mai 2014, la Russie annonce qu'elle se désengagera de la station spatiale internationale en 2020, en riposte aux sanctions économiques prises par les États-Unis dans le cadre de la crise ukrainienne de 2013-2014.

Obsolescence des modules

Les plans initiaux prévoyaient que la station ait une durée de vie totale de 30 ans. Pour des raisons budgétaires, les différents éléments ont été généralement conçus pour une durée opérationnelle de 15 ans. La date limite d'utilisation théorique commence donc dès 2013 pour les modules les plus anciens. Au-delà de cette date les incidents pourraient théoriquement commencer à se multiplier.

Désorbitation

À partir du moment où il aura été décidé d'abandonner la station, il sera nécessaire de réaliser son démantèlement et de contrôler sa rentrée atmosphérique pour que les débris parvenant au sol soient de taille limitée et tombent dans des zones inhabitées. La désorbitation de la station relève de la responsabilité de la NASA. Bien que le module Zvezda dispose d'un système de propulsion capable de maintenir la position de la station spatiale, ses moteurs ne sont pas suffisamment puissants pour déclencher la rentrée atmosphérique de celle-ci du fait de sa masse, qui dépasse les 400 tonnes. Par ailleurs, la Russie envisage aujourd'hui de conserver la partie russe de la station en orbite. Différents scénarios sont donc étudiés pour désorbiter de manière contrôlée la station, dont celui de lancer un module affecté à cette tâche comme le vaisseau cargo européen ATV dont les moteurs disposent d'une poussée et d'une quantité de carburant suffisante. Mais quel que soit le scénario retenu, le coût du démantèlement et de la désorbitation devrait être supérieur à 2 milliards de dollars.

c. Autres : la station spatiale chinoise Tiangong

Tiangong 1 (littéralement « Palais céleste 1 ») est le premier exemplaire d'une station spatiale développée par l'agence spatiale chinoise CNSA. Placée en orbite basse sans équipage le 29 septembre 2011, elle doit recevoir la visite de plusieurs vaisseaux de type Shenzhou au cours de son séjour dans l'espace, limité à deux ans. Tiangong 1 doit permettre de valider la technique du rendez-vous spatial automatique, mettre au point les composants d'une station spatiale et expérimenter le séjour d'un équipage. Tiangong 1 est une station de petite taille (8,5 tonnes), comparée à ses homologues russe Mir, américaine Skylab, et internationale ISS. Sa taille réduite ainsi que l'absence d'un deuxième système d'amarrage n'autorise que des missions habitées de courte durée. Trois missions Shenzhou doivent lui rendre visite sur la période 2011-2013, dont la première sans équipage s'est déroulée avec succès en novembre 2011 et la seconde, menée par trois taïkonautes dont une femme, à bord de Shenzhou-9, utilisant un amarrage manuel, s'est également déroulée avec succès en juin 2012. Selon les informations fournies par l'agence spatiale chinoise, deux autres exemplaires de ce modèle de station, Tiangong 2 et Tiangong 3, modifiés pour permettre des séjours plus longs, doivent être lancés au cours de cette décennie. La série Tiangong doit être suivie, à l'horizon 2020, par une station spatiale beaucoup plus ambitieuse, comprenant trois modules de plus de 20 tonnes, dont le lancement est conditionné par la mise au point du nouveau lanceur lourd chinois Longue Marche 5.

Caractéristiques techniques

La station spatiale Tiangong 1 a la forme d'un cylindre d'une longueur de 10,4 mètres et d'un diamètre maximal de 2,8 mètres divisé en deux composants : le module de service de diamètre réduit est dédié à la production d'énergie et à la propulsion et le module orbital, pressurisé, est à la fois lieu de vie et de travail. Cette architecture s'inspire de celle de la première station spatiale russe Saliout mais à une échelle réduite car le lanceur chinois le plus puissant (Longue Marche 2F) ne permet de lancer que les 8,4 tonnes de la station soit la moitié de la première station soviétique Saliout (18,5 tonnes).

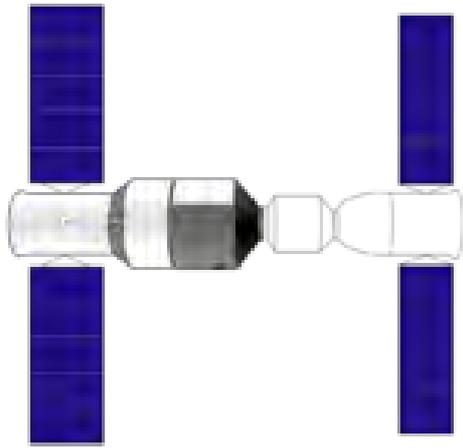


Schéma de Tiangong 1 (à gauche dans le schéma) amarré au vaisseau Shenzhou

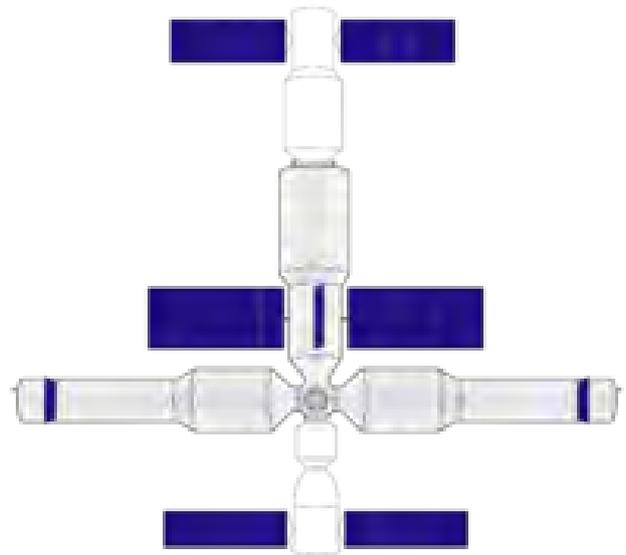


Diagramme hypothétique de la future station spatiale Tiangong 3

Sur ces 8,4 tonnes, le module de service représente 3,5 tonnes. Ce dernier dérive du module de service du vaisseau Shenzhou. Il comprend les réservoirs de carburant, d'oxygène et d'eau qui permettent à un équipage de trois personnes de séjourner durant 15 jours. Ce module comprend également les quatre moteurs-fusées de 419 Newton de poussée qui permettent d'effectuer les corrections de trajectoire ainsi que 36 petits propulseurs utilisés pour le contrôle d'attitude. Deux panneaux solaires fixés sur le module de service fournissent l'énergie à la station; l'envergure de la station passe à 17 mètres après le déploiement de ces panneaux. Le module orbital est par contre un nouveau développement. Il est doté d'un unique port d'amarrage de type APAS inspiré du système russe et situé à son extrémité dans le prolongement de l'axe du cylindre. L'espace habitable est d'environ 15 m³. L'absence d'un deuxième système d'amarrage ne permet pas le ravitaillement par un vaisseau cargo ou le relais d'un équipage par un autre. La station dispose d'un système de support vie qui permet le séjour d'un équipage mais l'absence de système de recyclage de l'oxygène et de l'eau ainsi que l'impossibilité de faire accoster un vaisseau de ravitaillement limite la durée des séjours. La charge utile de la station comprend une caméra infrarouge de 600 mm de diamètre qui doit être utilisée pour l'observation de la Terre.

Historique du développement

Dès le début des années 1970, les autorités chinoises jettent les grandes lignes d'un programme spatial habité incluant le lancement d'une station spatiale. Mais ce n'est qu'en 1992, après la disparition des obstacles politiques et économiques que le programme spatial habité chinois, baptisé Projet 921, peut se concrétiser. La première phase du programme consiste à mettre au point les vols habités à bord du vaisseau spatial Shenzhou. Après une série de sept vols sans échec, la deuxième phase du programme dédiée au développement d'une station spatiale est lancée.

Le site officiel du bureau d'études chargé de la conception des vols habités donne en 2008 une très brève description de Tiangong 1 ainsi que de Tiangong 2 et Tiangong 3, deux laboratoires spatiaux qui doivent succéder à Tiangong 1 avant 2015. Une maquette de la station spatiale est dévoilée au cours du programme de célébration du Nouvel An chinois, le 25 janvier 2009, sur la chaîne de télévision CCTV.



Orbites de Tiandong-1 en juin 2013

Déroulement de la mission de Tiangong 1

Tiangong 1 est lancée le 29 septembre 2011, sans équipage à bord, par une fusée Longue Marche 2F depuis le Centre spatial de Jiuquan situé dans le désert de Gobi au nord-est de la Chine; cette base est utilisée pour tous les vols du programme spatial habité chinois. La station est placée par son lanceur sur une orbite basse de 335×353 km avec une inclinaison de $42,8^\circ$. Sa durée de vie opérationnelle est de deux ans. Un premier test de rendez-vous spatial et d'amarrage a lieu le 2 novembre à 17h38 GMT avec le vaisseau Shenzhou 8 lancé sans équipage deux jours plus tôt; l'amarrage est piloté depuis le sol. Un nouveau vol lancé le 16 juin 2012, cette fois ci habité, Shenzhou 9, emporte trois taïkonauts dont une femme. L'équipage a réussi à amarrer manuellement le vaisseau à la station, en plus de mettre en œuvre un système d'amarrage automatique. Le 4 février 2013 l'orbite de Tiangong 1 a été remontée à 348×370 kilomètres pour contrebalancer la dérive naturelle due à la traînée atmosphérique, de telle façon que l'orbite revienne à une orbite nominale à 314 kilomètres approximativement autour de la fin juillet pour l'arrivée de Shenzhou 10.

La suite du programme Tiangong

Selon les informations fournies par l'agence spatiale chinoise, deux autres exemplaires de ce modèle de station, Tiangong 2 et Tiangong 3, modifiés pour permettre des séjours prolongés et ravitaillés par cargo spatial, doivent être lancés au cours des années suivantes. Tiangong 3 doit, en particulier, disposer d'un deuxième système d'amarrage qui lui permettra d'être ravitaillé par un vaisseau cargo; ce dernier sera, selon les plans chinois, une version dérivée du module Tiangong. Tiangong 3 plus lourd (13 tonnes) doit être placé en orbite par un lanceur Longue Marche 7 en cours de développement. La série Tiangong doit être suivie à l'horizon 2020 par une véritable station spatiale de 60 tonnes comprenant trois modules de plus de 20 tonnes dont le lancement est conditionné par la mise au point du nouveau lanceur lourd chinois Longue Marche 5.

D) La navette spatiale américaine



Lancement de la navette Discovery pour la mission STS-120

Premier vol	12 avril 1981
Retrait	juillet 2011
Dernier atterrissage	21 juillet 2011
Nombre de vols	135
Charge utile (orbite basse)	24 500 kg
Charge utile (station spatiale)	16 400 kg
Orbite	185–643 km
Équipage	de 2 à 8 personnes
Masse au lancement	2 046 tonnes
Poussée au lancement	3 016 tonnes

La **navette spatiale américaine** (en anglais *Space shuttle* ou *Space Transportation System*, STS) est une navette spatiale conçue et utilisée par l'agence spatiale américaine (NASA) dont le vol inaugural remonte au 12 avril 1981 et qui a été retirée du service en juillet 2011 après avoir effectué 135 vols. Elle est composée de trois sous-ensembles : l'orbiteur, qui est le seul composant à se placer en orbite, transporte le fret et les astronautes, le réservoir externe et deux propulseurs d'appoint. Le terme navette spatiale est un raccourci souvent utilisé pour désigner le seul orbiteur. L'orbiteur et les propulseurs d'appoint sont réutilisables. L'orbiteur, qui constitue l'élément le plus complexe, a été construit à cinq exemplaires dont deux, Challenger et Columbia, ont été détruits, entraînant la perte de leur équipage. La navette spatiale, qui pèse plus de 2 000 tonnes, décolle verticalement comme une fusée. Au cours de son ascension elle se sépare successivement de ses propulseurs d'appoint puis de son réservoir externe. À l'issue de la mission l'orbiteur revient seul sur Terre. Il effectue une rentrée atmosphérique au cours de laquelle il ralentit fortement en dissipant une grande quantité de chaleur, puis entame une phase de vol non propulsé à la manière d'un planeur avant d'atterrir sur une piste de grande longueur. L'orbiteur ainsi que les propulseurs d'appoint sont remis en état puis réutilisés. La navette spatiale peut placer en orbite basse 7 astronautes et 24,5 tonnes de charge utile. C'est un engin spatial d'une polyvalence inégalée : elle dispose d'une grande soute, d'un bras permettant le maniement de lourdes charges dans l'espace et d'un sas utilisé pour les sorties extra-véhiculaires ou l'amarrage à une station spatiale. Son autonomie en vol est d'environ deux semaines. En concevant au début des années 1970 un engin spatial réutilisable, la NASA espère pouvoir abaisser fortement les coûts du lancement spatial qui a jusque-là recours à des fusées perdues après usage. Mais les compromis techniques retenus à la conception pour des raisons financières et surtout la complexité inhérente au concept induisent des coûts de développement et d'exploitation (500 millions de dollars par lancement) très élevés. Lorsque sa carrière opérationnelle débute en 1982, tous les lancements de satellites américains sont pris en charge par la flotte des 4 navettes spatiales. Grâce à un dumping important sur les prix la navette occupe même une place dominante sur le marché des lancements commerciaux. Mais il apparaît rapidement que la navette ne sera jamais un moyen de lancement concurrentiel par rapport aux fusées car la cadence des lancements espérée ne peut être tenue. Après la destruction de la navette spatiale Challenger début 1986 qui entraîne la perte de son équipage, l'utilisation de la navette est limitée au lancement des satellites non commerciaux et aux expériences scientifiques en orbite. À compter de la fin des années 1990 sa mission principale est la desserte de la station spatiale Mir puis de la station spatiale internationale. Un deuxième accident en 2003, accompagné une fois de plus de la perte de l'équipage, accélère la décision de retirer la flotte des navettes dont le dernier vol a eu lieu en juillet 2011. La navette spatiale a effectué 135 vols à cette date.

Premières études



Le Silberpfeil

Du Silberpfeil au X-15

La première évocation d'une fusée ailée capable de quitter la basse atmosphère est le fait de l'ingénieur austro-allemand Eugen Sänger en 1933. Celui-ci développe son concept à la fin de la Seconde Guerre mondiale et décrit une fusée ailée, le Silberpfeil (*l'oiseau d'argent*), capable d'aller bombarder les États-Unis à l'issue d'un vol suborbital après avoir rebondi plusieurs fois sur les couches atmosphériques denses grâce à un rapport portance/trainée élevé. Après-guerre l'Armée de l'Air américaine fait travailler North American Aviation sur un projet de missile ailé, le Navaho. Celui-ci effectue quelques vols mais est

abandonné en 1957 au profit des missiles balistiques (sans aile) Atlas, Titan et Thor qui relèvent d'une solution technique beaucoup plus efficace. À l'époque le centre de recherche aéronautique américain, la NACA qui deviendra plus tard la NASA, s'implique fortement dans les recherches sur les avions propulsés par fusée. Le Bell X-1 franchit le mur du son en 1947. En étudiant la conception d'engins beaucoup plus rapides et volant à haute altitude, les ingénieurs identifient rapidement les deux principales difficultés auxquelles un tel avion va être confronté : l'instabilité en vol atmosphérique et la dissipation de la chaleur au cours de la rentrée atmosphérique. Ce dernier point les conduit à imaginer différents types de bouclier thermique. La construction de l'avion-fusée X-15 est lancée en 1954 pour permettre de tester ces solutions. L'engin expérimental permet d'atteindre au cours des années 1960 un nouveau record de vitesse (Mach 6,8) et d'altitude (108 km). Le X-15 permet d'expérimenter une grande partie des phases de vol rencontrées par la navette spatiale en particulier la rentrée atmosphérique avec la transition entre utilisation des moteurs-fusées et celles des gouvernes aérodynamiques.

Les corps portants (1957-1970)

Pour réduire les contraintes thermiques et mécaniques subies par un avion volant à très grande vitesse, une des solutions est de supprimer les ailes et de générer la portance à l'aide du corps de l'engin qui est élargi à cet effet. Les avions de ce type, désigné par le terme de corps portant (lifting body), sont étudiés à compter de 1957 par la NASA. Plusieurs démonstrateurs (M1, M2) vont prouver leur capacité à effectuer une rentrée atmosphérique, s'écarter de leur trajectoire grâce à leur portance et à planer; par la suite d'autres engins (M2, HL-10, X-24) parfois motorisés sont chargés de valider jusqu'en 1970 leur capacité à se poser avec un pilote à bord. Les formes très lourdes du corps portant, qui lui valent le qualificatif de brique ou de baignoire volante, rendent toutefois cet exercice difficile et périlleux pour les pilotes. À la même époque l'Armée de l'Air américaine commande en 1957 un prototype d'avion spatial le Dyna-Soar mono-pilote s'apparentant à un corps portant doté d'embryons d'aile delta. Lancé par une fusée, le Dyna Soar devait être capable de se poser comme un avion. Le projet bien avancé est arrêté pour des raisons budgétaires en 1963 car l'Armée de l'Air n'a pu le justifier par une mission clairement identifiée.

Alors que la NASA réfléchit à la suite à donner au programme Apollo dont la phase de développement est achevée, l'agence spatiale lance le 30 octobre 1968 une consultation exploratoire (phase A) pour le développement d'un système de lancement capable de revenir sur Terre (Integral launch and reentry vehicle ILRV) : celui-ci doit pouvoir placer en orbite basse une charge utile comprise entre 2,3 et 23 tonnes, ramener sur Terre au moins 1 tonne de fret, avoir une capacité de déport latéral de 833 km et la baie cargo doit avoir un volume de 85 m³. En février 1969, sur la base de leurs premiers travaux, quatre sociétés - North American Rockwell, Lockheed, General Dynamics et McDonnell Douglas - sont sélectionnées pour répondre à cette pré-étude. Deux motoristes, Rocketdyne et Pratt & Whitney, sont de leur côté sélectionnés pour concevoir les moteurs de 270 tonnes de poussée (dans le vide) qui doivent être communs aux deux étages de la navette. Ces moteurs ont une poussée modulable entre 73 et 100 % et utilisent une tuyère déployable avec un ratio de détente de 58 à basse altitude et de 120 dans le vide. Les différents centres de recherche de la NASA ont des avis divergents sur la manière de concevoir la navette. Maxime Faget, représentant le centre de vol spatial Marshall est en faveur d'une navette de petite taille dotée d'ailes droites disposant de peu de capacité de déport mais théoriquement plus légère et meilleur planeur aux vitesses subsoniques : c'est le Shuttle DC-3 dont une maquette au 1/10^e sera larguée d'avion en mai 1970 pour valider l'aérodynamisme à basse vitesse. Les centres de Langley et de Dryden appuient la solution du corps portant et plus particulièrement du H-10 qu'elles ont contribué à développer. Une navette de ce type dispose d'une capacité de déport intermédiaire entre l'aile droite et l'aile delta tout en étant théoriquement moins lourde que cette dernière. L'armée de l'Air et les laboratoires Draper sont en faveur d'une aile delta qui fournit une capacité de déport maximale. Les travaux issus de la phase A achevés en juin 1970 permettent à la NASA d'éliminer le concept du corps portant dont la forme n'est pas compatible avec l'emport des réservoirs et des équipements et le recours à une voilure à géométrie variable également étudiée qui aboutit à une navette trop lourde. Dans les esquisses produites par les quatre sociétés, la navette comporte deux composants distincts tous deux réutilisables. Le premier étage piloté revient se poser en utilisant des turboréacteurs classiques. Le deuxième étage continue de se propulser pour se placer en orbite puis effectue une rentrée atmosphérique une fois la mission accomplie avec un angle de cabrage très élevé avant de se poser comme un avion.



Les corps portants X-24A, M2-F3 et HL-10

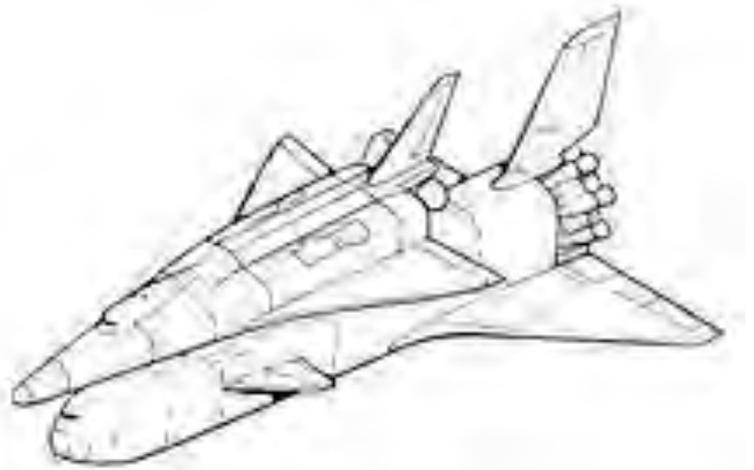


Prototype du Dyna Soar

Le projet de navette en phase exploratoire (1968-1979)



Les premières esquisses de la navette spatiale



Navette entièrement réutilisable dessinée en 1969 par North American

Le lancement du projet (1969-1972)

Le programme Apollo est sur le point d'aboutir avec le premier atterrissage sur la Lune, les ingénieurs et beaucoup de décideurs de la NASA sont persuadés que le succès de leur projet phare va convaincre les responsables politiques de pérenniser la part de budget consacrée à l'espace et plus particulièrement au vol habité. Après avoir réalisé en quelques années des progrès qui auraient semblé inespérés en 1960, ils considèrent que le vol humain vers Mars et l'installation de colonies sur la Lune sont désormais à portée de l'agence spatiale. Mais les décideurs politiques n'ont plus ni les moyens ni la volonté de financer un programme ambitieux. La navette spatiale, telle qu'elle sera construite, est le résultat d'un compromis entre le désir de la NASA de disposer d'un engin innovant et les ressources limitées que les dirigeants politiques du pays vont accepter de lui accorder.

Quelle suite donner au programme Apollo ? (1969)

Début 1969, la NASA étudie la suite à donner au programme Apollo. Plusieurs propositions sont élaborées en interne dans l'euphorie de la réussite du programme lunaire : station spatiale, base lunaire, expédition vers Mars, navette spatiale. Le comité « Space Task Group » est créé en février 1969 à la demande du président américain Richard Nixon pour élaborer les futurs programmes spatiaux habités de la NASA. À l'issue de ses réflexions le groupe de travail, présidé par le vice-président Spiro Agnew, propose trois scénarios dont le budget annuel s'échelonne entre 5 et 10 milliards de dollars, soit un

montant égal ou supérieur au budget annuel du programme Apollo à son plus haut. La proposition la moins ambitieuse prévoit le développement simultané d'une navette spatiale et d'une station spatiale. Le président Nixon ne retient aucun des scénarios proposés qu'il juge tous trop coûteux. La NASA décide alors de concentrer ses demandes budgétaires sur le projet de navette spatiale car la disponibilité de celle-ci est un prérequis pour l'exploitation d'une station spatiale. Les dirigeants de la NASA estiment également que la navette peut permettre de remplacer les 10 types de lanceur américains existants - en comptant ceux mis en œuvre par l'Armée - pour placer en orbite ses satellites. Mais la fin de la guerre froide et l'effondrement du programme spatial soviétique ont privé le programme spatial habité américain, aux yeux des dirigeants politiques américains, d'une grande partie de ses justifications. Le président Nixon, qui est confronté à une situation budgétaire très tendue, ne désire pas lancer de projet de prestige de l'envergure du programme Apollo car cette fois aucune retombée politique n'est attendue. Le président place donc le projet de la NASA sous le contrôle du Budget fédéral (BoB qui deviendra l'OMB Office of Management and Budget à partir de 1970) qui va exiger de l'agence spatiale des justifications précises. Une fois la configuration de la navette spatiale figée, l'OMB mène une véritable guerre de tranchée avec la NASA jusqu'au feu vert budgétaire en 1972, exigeant éléments financiers, justifications et comparaison avec des solutions techniques alternatives. James C. Fletcher, directeur de la NASA, dira « qu'il n'en voulait pas au responsable de l'OMB de maintenir le budget au minimum, ce qui était une partie de son travail, mais qu'il lui reprochait d'essayer de concevoir la navette à sa place ». Pour combattre le scepticisme de l'OMB vis-à-vis des éléments fournis par la NASA, celle-ci commande en juin 1970 un rapport à une société indépendante, Mathematica. Les conclusions de celle-ci sont très favorables au projet parce qu'elles font l'hypothèse de cadences de lancement de la navette élevées : le coût du kilogramme placé en orbite est ainsi abaissé à un tarif compétitif par rapport à celui d'un tir par un lanceur classique. Le rapport sera utilisé par la NASA notamment auprès du Sénat américain pour défendre la rentabilité de son projet.

La phase B de la conception (1970-1971)

À l'issue de la phase A, la NASA rédige en juin 1970 un nouveau cahier des charges pour une phase de conception plus approfondie, dite phase B. Celui-ci spécifie que la navette doit comporter deux étages qui décollent verticalement et atterrissent à l'horizontale. L'engin doit pouvoir placer sur une orbite de 500 km une charge utile de 6,8 tonnes au départ de la base de lancement de Cap Canaveral pour une inclinaison de 55°. La charge utile est portée à 11,5 tonnes quelques mois plus tard, pour se rapprocher des demandes de l'armée qui veut pouvoir placer 30 tonnes en orbite basse. On demande aux compétiteurs de concevoir deux engins différents : L'un avec une capacité de déport de 370 km, correspondant aux besoins de la NASA, l'autre avec une capacité de déport de 2 784 km, plus proche des attentes de l'Armée de l'Air. La deuxième version devra, d'après les calculs, dissiper 5 à 7 fois plus d'énergie thermique que l'autre version. Les navettes doivent pouvoir effectuer une deuxième tentative d'atterrissage en cas d'approche ratée ce qui impose la présence de turboréacteurs. Elles doivent pouvoir être remises en état en deux semaines entre deux vols et permettre une fréquence comprise entre 25 et 70 vols par an. Chaque navette emporte un équipage de deux astronautes. Deux équipes sont retenues pour la phase B, qui est lancée en juillet 1970 : McDonnell Douglas, associé à Martin Marietta, et North American Rockwell, associé à General Dynamics. Une version préliminaire de l'étude est fournie par les compétiteurs début décembre 1970 à la NASA, qui effectue ses premières remarques; le dossier final est rendu par les constructeurs en mars 1971. Les orbiteurs des deux propositions ont des caractéristiques très proches car la NASA a fourni un cahier des charges très contraignant. Par contre il y a de grandes divergences dans la conception du premier étage. Un des points communs est le recours à l'aluminium pour la réalisation de la structure, car l'Armée de l'Air a exclu l'utilisation du titane, plus performant mais dont l'approvisionnement est jugé trop incertain.

L'abandon du projet de navette complètement réutilisable (1971)

James C. Fletcher prend en avril 1971 la tête de la NASA et décide de promouvoir auprès du Sénat le dossier de la navette spatiale, qui est bloqué. Il constate que le seul moyen d'obtenir un accord sur le sujet est d'intégrer dans le cahier des charges de la navette les besoins très spécifiques des militaires afin d'obtenir l'appui de ceux-ci. Des tentatives de coopération internationale sont également lancées avec des succès modestes : l'Europe (surtout l'Allemagne) s'engage à construire le laboratoire spatial Spacelab qui sera embarqué dans la baie cargo de l'orbiteur et le Canada à construire le bras Canadarm utilisé pour

manipuler les charges en orbite. En mai 1971, le Bureau du Budget (OMB) annonce que la NASA devra se contenter pour les années à venir d'un budget total annuel de 3,2 milliards de dollars ce qui compte tenu des autres projets spatiaux en cours réduit à 1 milliard de dollars par an l'enveloppe qui peut être consacrée à la navette. Avec cette contrainte financière, la NASA est obligée de renoncer à son projet de navette entièrement réutilisable dont le coût de développement annuel culminerait à 2 milliards de dollars par an. En automne, une configuration dotée d'une aile delta est retenue pour prendre en compte les exigences des militaires. La NASA avait commandé en décembre 1970 aux sociétés Boeing et Gruman une étude pour comparer des navettes ayant recours à un réservoir d'hydrogène externe et interne : les conclusions sont très favorables au réservoir externe moins coûteux et plus sûr. Pour tenir compte des nouvelles contraintes financières la NASA décide en juin 1971 d'opter pour un réservoir externe non réutilisable. Elle demande en septembre 1971 aux sociétés à l'origine du rapport ainsi qu'à celles qui avaient participé à la phase B d'étudier une navette incluant cette spécification. Pour réduire encore les coûts, la NASA lance début novembre 1971 une dernière étude portant cette fois sur le premier étage à laquelle concourent Grumman/Boeing, Lockheed, McDonnell-Douglas/Martin Marietta, et North American Rockwell. Les industriels doivent étudier trois possibilités : l'utilisation d'un étage de Saturn I-C, le recours à un étage propulsé par un nouveau moteur à ergols liquides ou l'utilisation de propulseurs d'appoint à propergol solide. À l'issue de cette étude la NASA choisit d'utiliser des propulseurs d'appoint à propergol solide qui permettent d'économiser 500 millions de dollars sur le coût de développement par rapport à des propulseurs à ergols liquides mais qui augmentent le coût d'exploitation qui est presque le double de la solution alternative : 500 dollars par kilogramme de charge utile contre 275 dollars par kilogramme. Fin 1971 la NASA impose un dernier changement : les moteurs du premier et du deuxième étage (les moteurs de la navette) devront être allumés au sol.

La décision du lancement (1972)

Le président Richard Nixon ne veut pas être celui qui a arrêté les missions habitées américaines auxquelles se rattachent encore malgré tout une part de prestige. Par ailleurs, si l'opinion publique et la communauté scientifique s'accordent sur la nécessité de réduire le budget spatial consacré aux vols habités, le président n'est pas insensible au lobbying de l'industrie et aux considérations électorales. Le retrait des États-Unis du Vietnam qui entraîne un effondrement des commandes militaires, la basse conjoncture cyclique que traverse l'industrie aéronautique civile et la décreue du programme Apollo se conjuguent pour entraîner une récession comme le secteur aérospatial américain n'en avait jamais connu : la moitié des ingénieurs et des salariés travaillant dans le domaine sont licenciés. Or la Californie qui concentre une grande partie des emplois de l'astronautique avec 370 000 personnes en 1970 est un enjeu important pour les élections à venir.

Estimation par la NASA des coûts de la navette en fonction de sa capacité (décembre 1971)					
Scénario	1	2	2A	3	4
Diamètre et longueur de la baie cargo	3,1 × 9,1 m	3,7 × 12,2 m	4,3 × 13,7 m	4,3 × 15,2 m	4,6 × 18,3 m
Masse charge utile maximum	13,6 t	13,6 t	20,4 t	29,5 t	29,5 t
Coût de développement (Milliards de \$)	4,7	4,9	5	5,2	5,5
Coût d'une mission (Millions de \$)	6,6	7	7,5	7,6	7,7
Coût du lancement de 1 kg (Milliers de \$)	485	492	368	254	260

La NASA défend son projet de navette spatiale en mettant en avant la réduction du prix du kilogramme de charge utile placé en orbite, par rapport aux lanceurs non réutilisables. Fin 1971, l'agence spatiale transmet à la présidence l'évaluation des coûts de développement et d'exploitation de la navette pour des capacités allant de 14 à 30 tonnes; la préférence de l'agence va à la version la plus lourde qui est, selon elle, la seule à répondre aux besoins de l'Armée de l'Air et à permettre l'assemblage d'une station spatiale. Finalement le président Nixon donne son feu vert pour la version la plus ambitieuse de la navette le 5 janvier 1972. Mais le développement de celle-ci devra s'inscrire par la suite dans un cadre budgétaire spatial civil en décroissance constante : les sommes allouées à la NASA passent progressivement de 1,7 % du budget total de l'état fédéral en 1970 à 0,7 % en 1986, son point le plus bas. Pour parvenir à

financer le développement de la navette la NASA doit renoncer au lancement d'une deuxième station Skylab qui avait été projeté. Les missions habitées américaines sont interrompues jusqu'au premier vol de la navette qui n'interviendra qu'en 1981.

La sélection des constructeurs

Un appel d'offres est lancé en mars 1972 par la NASA pour la conception et la construction de l'orbiteur. Les deux propositions qui arrivent en tête sont, d'une part, celle de North American Rockwell, constructeur du module de commande et de service Apollo implanté en Californie, d'autre part, celle de Grumman constructeur du module lunaire Apollo implanté dans l'État de New York. Pour le comité de sélection de la NASA, la proposition du premier se distingue par son coût plus faible, le poids réduit de l'orbiteur, un bon dispositif de gestion de projet tandis que celle de Grumman est la plus pertinente et détaillée sur le plan technique. North American Rockwell renommé Rockwell en 1973 est finalement retenu le 26 juillet 1972 pour un montant de 2,6 milliards de dollars : pour ce prix la société doit construire 2 orbiteurs opérationnels et un modèle de test ainsi que jouer le rôle d'intégrateur pour l'ensemble de la navette. Deux orbiteurs supplémentaires sont commandés par la suite. L'orbiteur retenu peut placer 29,5 tonnes en orbite basse, dispose d'une soute de 18,3x4,57 mètres et peut se poser à 2 350 km de part et d'autre de sa trajectoire orbitale. Il doit être construit à Palmdale en Californie. En 1973, la société Thiokol est retenue pour la construction des propulseurs d'appoint et Martin Marietta pour celle du réservoir externe de la navette qui doit être construit dans l'usine de Michoud détenue par la NASA. Rocketdyne est choisi fin mars 1972 pour la construction des moteurs principaux (SSME) de l'orbiteur.

Développement (1972-1981)

Durant les deux premières années qui suivent la signature du contrat de nombreux changements sont apportés aux caractéristiques de la navette essentiellement pour réduire les coûts de développement. L'aile en double delta est introduite à ce stade car elle améliore les capacités de vol à basse vitesse; de plus elle permet, par des interventions limitées sur le dessin de sa partie avant, de compenser des problèmes de position de centre de gravité qui pourraient apparaître à un stade avancé du développement. L'une des modifications les plus importantes est l'abandon des turboréacteurs qui devaient propulser l'orbiteur avant l'atterrissage. Pour pouvoir déplacer la navette, désormais non motorisée, entre deux sites, la NASA fait l'acquisition en 1974 d'un Boeing 747 d'occasion qui est aménagé pour pouvoir transporter sur son dos le véhicule spatial. Le premier test du moteur de l'orbiteur, le SSME, a lieu le 17 octobre 1975. Le réservoir externe est progressivement allégé au fur et à mesure de son développement ce qui permet un gain de poids de 4,5 tonnes. La construction de la première navette, Enterprise est achevée en mars 1976 mais celle-ci ne sera pas utilisée en phase d'exploitation car trop lourde. Le premier vol captif sur le dos d'un Boeing 747 aménagé a lieu le 18 février 1977. D'autres vols captifs, sans puis avec équipage, ont lieu en 1977. Le premier vol non propulsé de la navette a lieu le 12 août 1977 : la navette est larguée du dos du 747 et effectue un vol plané de 5 minutes avant de se poser sur une piste de la base Edwards. Progressivement la durée des vols s'allonge pour permettre de tester complètement la phase d'approche et d'atterrissage. La livraison des SSME opérationnels est repoussée de 2 ans (1981 au lieu de 1979) à la suite de différents incidents qui nécessitent de modifier la conception des moteurs. En février 1980 le septième et dernier test de qualification des propulseurs d'appoint est effectué.



Enterprise quitte son Boeing porteur pour son quatrième vol libre



Deuxième vol libre d'Enterprise

Le premier vol de la navette spatiale a lieu le 12 avril 1981 : la navette Columbia affectée à la mission STS-1 est pilotée par John W. Young qui tient lieu de commandant de bord et Robert L. Crippen pilote. La navette boucle 37 orbites en un peu plus de 2 jours avant de se poser sans encombre. Le vol se déroule de manière nominale malgré la perte de 16 tuiles du bouclier thermique. Trois autres vols, destinés à tester tous les composants de la navette et son comportement en vol, ont lieu en 1981 et 1982 avant le premier vol opérationnel. Le coût de développement de la navette, chiffré initialement en 1971 à 5,15 milliards de dollars, est finalement de 6,744 milliards de dollars (\$ 1971), soit un dépassement relativement faible pour ce type de projet. Cette somme représente un quart du coût du programme Apollo.

La navette en phase opérationnelle : La navette à la conquête du marché des lancements commerciaux (1982-1985). Le 11 novembre 1982 la navette Columbia entame la phase opérationnelle du programme avec la mission STS-5. Celle-ci place en orbite deux satellites de télécommunications privés. À l'époque la navette dispose par décret d'un monopole sur le marché américain des lancements des satellites publics, civils et militaires, ainsi que des satellites privés. La NASA espère pouvoir atteindre une cadence d'un lancement par semaine. Pour attirer des clients à l'international, les prix des lancements sont largement sous-évalués dans l'espoir de créer une clientèle captive. La NASA pratique également des rabais pour les lancements des satellites militaires américains. Neuf opérateurs de télécommunications internationaux acceptent d'emblée l'offre de la NASA. Au cours des trois premières années d'exploitation, 24 satellites commerciaux sont ainsi lancés. Le nombre maximum de satellites de télécommunications placé en orbite au cours d'une seule mission est limité à trois bien que l'orbiteur puisse théoriquement en emporter cinq; mais la NASA ne maîtrisant pas parfaitement les conséquences d'une telle charge en cas d'atterrissage d'urgence préfère limiter le nombre de satellites embarqués. La navette place également en orbite le premier satellite de télécommunications de la série TDRS qui doit remplacer les stations au sol de la NASA. Deux sondes spatiales sont également lancées durant ces premières années d'exploitation, le laboratoire spatial Spacelab est amené en orbite à quatre reprises et deux satellites militaires sont placés en orbite. Le public suit avec intérêt les premiers vols de cet engin spatial aux caractéristiques nouvelles. Sur le plan commercial la navette remporte également un grand succès apparent puisque durant cette période la moitié des satellites sont lancés pour le compte d'autres pays. Mais les rabais consentis masquent une réalité financière particulièrement noire. Dès 1985 il devient clair que la NASA aura du mal à effectuer plus d'un lancement par mois : c'est 5 fois moins que la cadence espérée qui conditionnait le prix de chaque lancement. De plus le coût opérationnel va en s'accroissant car les opérations de maintenance s'avèrent beaucoup plus lourdes que prévues. La NASA n'a pas la possibilité de répercuter ces surcoûts sur les tarifs pratiqués car ceux-ci sont figés contractuellement jusqu'en 1988.

L'accident de la navette Challenger et ses conséquences (1986)

Le 28 janvier 1986 la navette Challenger est détruite en tuant son équipage 73 secondes après son décollage à la suite de la rupture du joint entre deux segments d'un des deux propulseurs d'appoint à poudre (*booster*). C'est la vingt cinquième mission du programme et la dixième de l'orbiteur Challenger. L'enquête de la Commission Rogers met en cause la mauvaise gestion du programme par la NASA : le problème à l'origine de l'accident était récurrent et identifié mais avait été sous-estimé, faute de dialogue et par aveuglement du management. Le rapport révèle également que le risque couru par les équipages est beaucoup plus important que prévu au décollage et dans la phase de retour à Terre. D'importants travaux sont entrepris en particulier sur les boosters mais également sur les moteurs de l'orbiteur pour réduire celui-ci. Le calendrier de lancement, très optimiste est également critiqué par la Commission Rogers comme un facteur ayant pu contribuer à l'accident.

La NASA a tenté par la suite d'adopter un rythme plus réaliste pour la fréquence de ses vols. Une nouvelle navette, Endeavour, est commandée pour remplacer Challenger. La loi qui imposait le lancement par la navette de tous les satellites américains est radicalement modifiée : désormais seuls seront confiés à la navette les engins nécessitant la présence d'un équipage ou utilisant les capacités spécifiques de la navette. La commission préconise que les États-Unis disposent d'une alternative à la navette. Mais les lanceurs classiques américains, dont la production a été arrêtée du fait du monopole de la navette, ne sont pas prêts à prendre en charge les satellites commerciaux et la situation va contribuer au succès du lanceur européen Ariane. L'accident de la navette met fin à la carrière de lanceur commercial de la navette spatiale.



Désintégration de l'orbiteur Challenger et de son réservoir externe

La carrière de la navette après Challenger (1988-2003)

Après trente-deux mois d'interruption, la première mission depuis l'accident, la mission STS-26 est lancée le 29 septembre 1988. À la suite de l'accident de Challenger le Département de la Défense a renoncé à l'utilisation de la navette spatiale mais six satellites dont le lancement était déjà programmé vont être lancés par celle-ci. Une base de lancement de la navette dédiée aux besoins militaires construite à grand frais (2 milliards de dollars) à Vandenberg était sur le point d'être inaugurée au moment de l'accident de Challenger : elle ne sera jamais utilisée. Malgré la nouvelle doctrine d'emploi de la navette, plusieurs satellites (TDRS, satellite de télécommunications) et sondes (Galiléo et Ulysses) sont lancés par celle-ci car leur conception ne leur permet pas une mise en orbite par des lanceurs classiques. Dans le cas des sondes spatiales le lancement est particulièrement complexe : en effet celles-ci après avoir été larguées par la navette devaient être propulsées par un étage cryogénique Centaur modifié pour pouvoir être transporté par la navette. Mais dans le nouveau contexte qui suit l'accident de Challenger, il n'est plus question de transporter un étage de fusée contenant des ergols cryogéniques dans la soute de la navette. Des expédients complexes doivent être trouvés pour permettre malgré tout de lancer les sondes.

L'accident de la navette Columbia et la décision de retrait des navettes spatiales (2003-2010)

Le 1^{er} février 2003 l'orbiteur Columbia, dont le bouclier thermique a été endommagé par le choc à grande vitesse durant le décollage d'un morceau de mousse de protection thermique du réservoir externe, est détruit durant la rentrée atmosphérique entraînant la perte de son équipage. Une fois de plus la gestion des missions par la NASA est remise en cause : l'anomalie qui a conduit à la catastrophe est connue et n'a jamais été traitée sur le fond. De plus le calendrier très serré de l'assemblage de la station spatiale internationale qui résulte de la réduction de budget imposé à la NASA depuis 2001 a conduit à une pression très forte sur l'ensemble du personnel de la NASA poussant à sous-estimer les risques encourus. Lorsque les vols reprennent en juillet 2005 après 18 mois d'interruption plusieurs mesures ont été décidées pour limiter le risque. À chaque mission une inspection détaillée du bouclier thermique est effectuée par l'équipage de l'orbiteur et de la station spatiale lorsqu'il est en orbite. Pour chaque mission une deuxième navette est prête à être lancée pour effectuer une mission de secours consistant à ramener l'équipage en orbite au cas où serait découverte une brèche dans le bouclier thermique. Le 15 janvier 2004, le président des États-Unis George W. Bush rend public les objectifs à long terme assignés au programme spatial américain dans le domaine de l'exploration du système solaire et des missions habitées : ceux-ci sont formalisés dans le programme Vision for Space Exploration. La définition de cette stratégie est dictée par 2 motivations :

- La NASA doit remplacer la flotte des navettes spatiales, vieilles de près de trois décennies, qui ont, à deux reprises, explosé en vol en tuant leur équipage et dont le coût d'exploitation ponctionne le budget de l'agence. Mais la station spatiale internationale doit être desservie en hommes et en matériel dans la phase actuelle de construction et lorsqu'elle sera pleinement opérationnelle.
- Le président veut renouer avec le succès du programme Apollo en fixant des objectifs ambitieux à long terme et en engageant immédiatement les moyens de les atteindre. Il souhaite remettre l'exploration spatiale par l'homme au premier plan.

Les dernières missions

Reprenant la démarche du président Kennedy, le président Bush demande à la NASA d'élaborer un programme qui permette de réaliser des séjours de longue durée sur la Lune d'ici 2020. Ce sera le programme Constellation. Par ailleurs, les vols des navettes spatiales doivent s'arrêter en 2011, date à laquelle l'assemblage de la station spatiale internationale doit être achevé. Le budget économisé par l'arrêt de la navette doit permettre de financer le nouveau projet. Le transport du fret et des astronautes est confié à des lanceurs classiques. Malgré le retard pris par la mise au point des moyens de remplacement et l'annulation du programme Constellation, cette décision est confirmée en 2010 par le président Barack Obama nouvellement élu. La navette Atlantis a accompli le dernier vol de la flotte en juillet 2011 pour ravitailler la station spatiale internationale (mission STS-135). Les trois navettes spatiales encore en opération, désormais sans emploi, ont été cédées gratuitement par la NASA à différents musées situés aux États-Unis. Discovery, qui effectue sa dernière mission STS-133 en atterrissant au Centre spatial Kennedy le 9 mars 2011, doit ensuite être exposée au National Air and Space Museum à Washington. En avril 2011 le responsable de la NASA Charles Bolden annonce que la navette Atlantis sera exposée au Kennedy Space Center Visitor Complex qui jouxte le centre spatial d'où se sont envolées toutes les navettes et où sont déjà présentés les principaux lanceurs américains. La navette Endeavour (dernier vol dans le cadre de la mission STS-134 en mai 2011) est cédée au California Science Center de Los Angeles. Le prototype Enterprise est exposé au Intrepid Sea-Air-Space Museum de New York.

Caractéristiques générales

La navette spatiale comporte trois composants distincts :

- L'orbiteur doté d'ailes et d'un empennage qui lui permet de revenir au sol comme un planeur et recouvert d'un bouclier thermique lui permettant de résister aux températures rencontrées durant la rentrée atmosphérique. Son rôle est de transporter l'équipage et la charge utile en orbite puis de revenir sur le sol avec son équipage et éventuellement avec un fret au retour. C'est l'élément central de la navette spatiale et on y trouve les trois moteurs SSME permettant de placer la navette en orbite.
- Le réservoir externe contient l'oxygène et l'hydrogène stocké sous forme liquide consommé par les moteurs SSME de l'orbiteur.
- Les deux propulseurs d'appoint à propergol solide fournissent l'essentiel de la poussée durant les deux premières minutes du vol avant d'être largués.

L'orbiteur : Spécifications de l'orbiteur (pour Endeavour, OV-105) :

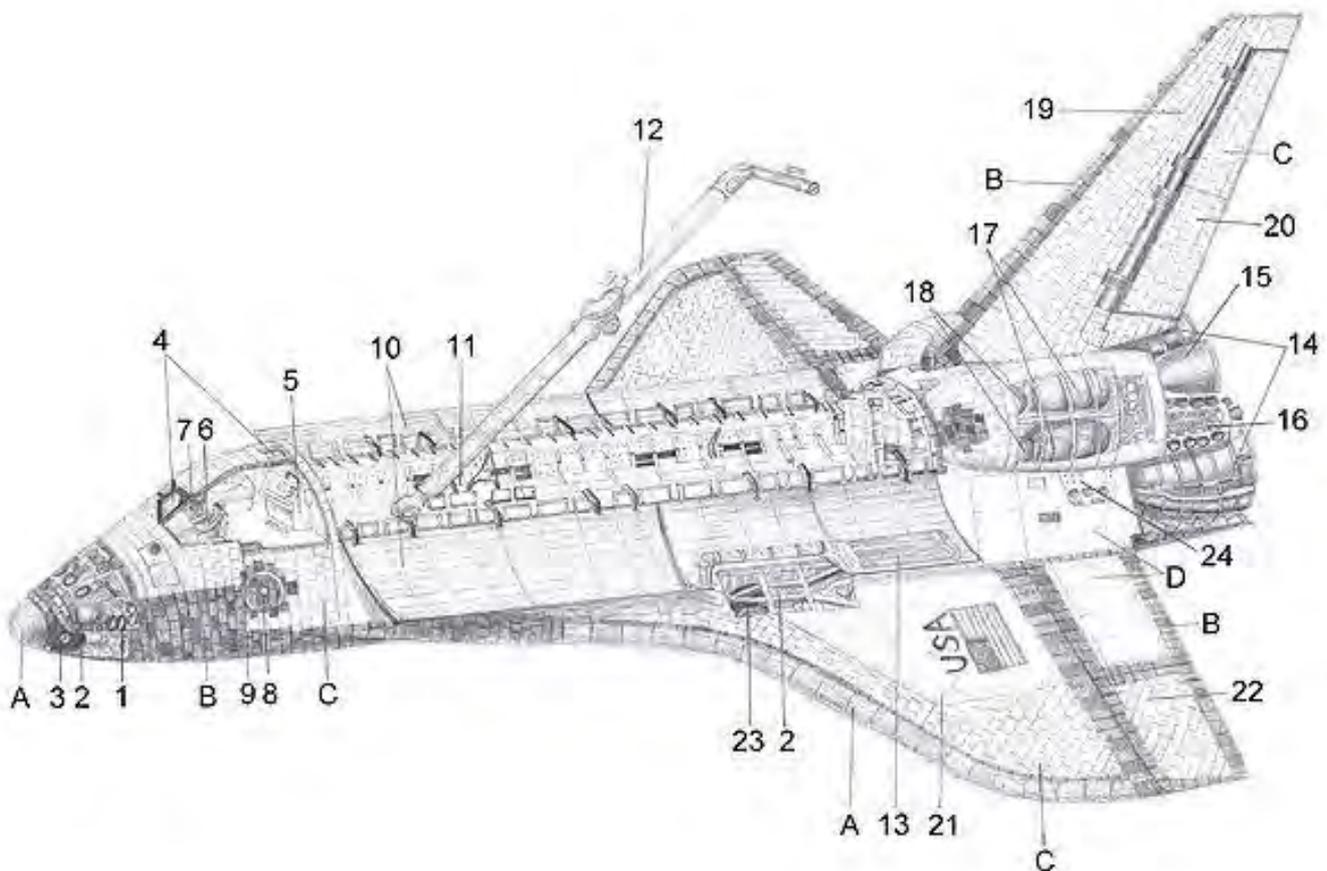
- Longueur : 37,24 m
- Envergure : 23,79 m
- Hauteur : 17,25 m
- Masse à vide : 68 586,6 kg
- Masse totale au décollage : 109 000 kg
- Masse maximum à l'atterrissage : 104 000 kg
- Moteurs-fusées principaux : Trois Rocketdyne Block 2 A SSME, exerçant chacun une poussée au niveau de la mer de 1,75 MN
- Charge utile maximum : 25 000 kg (~ 30 t pour d'autres navettes)
- Habitacle pressurisé : 71 m³
- Dimensions de la soute : 4,6 m par 18,3 m, pour un volume de 300 m³
- Bouclier thermique : Quelques 24 000 tuiles isolantes en carbone composite ou en silice
- Altitude opérationnelle : 185 à 1 000 km
- Vitesse typique : 7 800 m/s, 28 000 km/h (vitesse de satellisation)
- Portée transversale (déport latéral possible de part et d'autre de sa trajectoire de rentrée pour aller se poser) : 2 000 km
- Équipage : Sept (commandant, pilote, deux spécialistes de mission, et trois spécialistes de la charge utile), deux au minimum.

Superstructure

L'orbiteur est construit selon les mêmes principes qu'un avion, à partir de tôles d'alliage d'aluminium rivetées sur une superstructure constituée de longerons. Le fuselage comporte quatre sous-ensembles : le

fuselage avant, la baie cargo, les ailes et le fuselage arrière. La partie avant du fuselage reprend les formes d'un avion. La pointe contient le train d'atterrissage avant, une partie des moteurs d'orientation utilisés en orbite et des instruments utilisés pour le guidage lorsque la navette est dans l'espace. La cabine dans laquelle séjournent les astronautes est une structure pressurisée indépendante, qui est accrochée à la superstructure de l'orbiteur en seulement 4 points, afin de limiter les échanges thermiques.

Le fuselage intermédiaire contient la baie cargo et relie la partie avant de l'orbiteur, la partie arrière et les ailes. C'est une structure en U, ouverte à chaque extrémité, longue de 18 mètres, large de 5,2 mètres et haute de 4 mètres pesant 13,5 tonnes. Sur ses flancs viennent se loger les deux trains d'atterrissage centraux. Deux portes, réalisées en graphite-epoxy plus léger que l'aluminium, viennent fermer la baie cargo et servent de support au système de radiateurs qui évacue la chaleur excédentaire de la navette lorsque celle-ci est en orbite. Les portes sont de construction tellement légères qu'au sol elles ne supportent pas leur propre poids. Leur fermeture est essentielle avant la rentrée atmosphérique, car dans cette position elles contribuent à la rigidité de la navette.



1 et 16 moteurs de correction d'orientation (RCS) - 2 Portes du train d'atterrissage avant - 3 Train d'atterrissage avant - 4 Hublots - 5 Station du bras télémanipulateur - 6 Commandant - 7 Pilote - 8 Écoutille - 9 Passage vers le pont intermédiaire - 10 Portes de la baie cargo - 11 Baie cargo - 12 Bras télémanipulateur - 13 Radiateurs - 14 Moteurs principaux (SSME) - 15 Moteurs de manœuvre orbitale (OMS) - 17 Réservoirs d'hydrogène et d'oxygène liquide - 18 Réservoirs d'hélium - 19 Dérive - 20 Gouverne de direction - 21 Ailes - 22 Élevon - 23 Train d'atterrissage principal - 24 Connecteurs liaisons au sol

Ensembles de propulsion

L'orbiteur comprend trois ensembles de propulsion distincts. La propulsion principale est constituée de trois moteurs-fusées cryotechniques SSME (*Space Shuttle Main Engine*), qui sont utilisés uniquement pour placer la navette en orbite et puisent leur carburant dans le réservoir externe, contrairement aux autres ensembles de propulsion. Les deux moteurs du système de manœuvre orbitale (OMS) complètent l'action des SSME après l'extinction de ceux-ci, puis sont utilisés pour les changements d'orbite au cours de la mission, puis pour déclencher la rentrée atmosphérique. Les petits moteurs de contrôle d'orientation

(RCS) permettent d'orienter la navette dans l'espace et d'effectuer des corrections orbitales de faible amplitude.

La propulsion principale : les SSME

Les trois moteurs-fusées dits SSME (*Space Shuttle Main Engines*), situés à l'arrière de l'orbiteur, sont chargés avec les propulseurs d'appoint à poudre de produire la poussée qui permet de placer la navette en orbite. Ces moteurs-fusées à ergols liquides et combustion étagée sont non seulement réutilisables mais ont des performances qui dépassent toutes les productions équivalentes passées et actuelles : pour obtenir une impulsion spécifique très élevée, les ergols sont introduits dans la chambre de combustion avec une pression de 423 bars. Chaque moteur produit ainsi 179 tonnes de poussée au niveau de la mer et 221 tonnes dans le vide lorsque le moteur est à 104 % de sa puissance nominale. La poussée est modulable entre 67 et 104 % de la poussée nominale. Le moteur est monté sur cardan et l'axe de la poussée peut être orienté de $\pm 10.5^\circ$ en tangage et de $\pm 8.5^\circ$ en lacet. Chaque moteur brûle environ 423 kg d'oxygène liquide (LOX) et 70 kg d'hydrogène liquide (LH2) par seconde lorsque le moteur est à pleine puissance. L'impulsion spécifique est de 453 secondes dans le vide et de 363 secondes au niveau de la mer (vitesses d'éjection de 4 440 m/s et de 3 560 m/s respectivement). La tuyère, qui a un rapport de détente fixe de 69, est refroidie par de l'hydrogène gazeux qui circule dans 1 080 conduits de refroidissement. Chaque moteur est long de 4,24 mètres, a un diamètre maximal de 2,38 m; le moteur pèse à vide 3,4 tonnes et un peu moins de 5 tonnes en incluant les systèmes auxiliaires et la tuyauterie. Pour répondre à une situation exceptionnelle, le moteur peut être poussé à 109 % de sa puissance nominale. Les SSME sont conçus pour pouvoir cumuler un temps de fonctionnement de 27 000 secondes, équivalent à 55 lancements avec à chaque fois 8 minutes de fonctionnement continu, mais on estime que leur durée de vie opérationnelle est plutôt de 15 000 secondes de fonctionnement et 30 lancements. Ces moteurs puisent leur carburant dans le réservoir externe et ne jouent plus aucun rôle dans la suite de la mission, une fois le réservoir externe largué à la fin de la phase ascensionnelle. Si la poussée cumulée a été insuffisante pour placer l'orbiteur en orbite, les deux moteurs du système de manœuvre orbitale peuvent éventuellement prendre le relais.

Le système de manœuvre orbitale (OMS)

Les deux moteurs du système de manœuvre orbitale (*Orbital Maneuvering System OMS*) sont utilisés d'une part pour placer la navette sur l'orbite visée à l'issue de la phase ascensionnelle et d'autre part, en fin de mission, pour amorcer la rentrée atmosphérique en réduisant la vitesse de l'orbiteur. Durant le séjour dans l'espace, ils permettent également d'effectuer de petites corrections d'orbite. Chaque moteur est placé dans une nacelle amovible, dans laquelle se trouve également les deux réservoirs contenant les ergols utilisés, deux réservoirs d'hélium pour mettre sous pression carburant et comburant, ainsi qu'une partie des moteurs de contrôle d'orientation de l'orbiteur. Les deux nacelles sont situées à l'arrière de l'orbiteur, de part et d'autre de la dérive et au-dessus des SSME. Ces moteurs-fusée brûlent du peroxyde d'azote et du méthylhydrazine. Ces ergols ont l'avantage de pouvoir être stockés facilement aux températures rencontrées et d'être hypergoliques, c'est-à-dire de pouvoir s'enflammer spontanément lorsqu'ils sont mis en contact l'un avec l'autre. Le système de pressurisation, qui utilise de l'hélium sous pression, est simple et donc fiable, ce qui est essentiel pour garantir un retour de l'orbiteur sur Terre. Avec une impulsion spécifique dans le vide de 313 secondes, ils sont nettement moins performants que les SSME mais bien adaptés à leur rôle, qui nécessite qu'ils soient allumés puis éteints à de nombreuses reprises, éventuellement pour des durées très courtes (2 secondes) au cours d'une même mission. La poussée de 2,7 tonnes peut être orientée de $\pm 8^\circ$ en tangage et de $\pm 7^\circ$ en lacet. Les deux moteurs, qui disposent d'environ 10,4 tonnes d'ergols dans chaque nacelle, peuvent fournir un delta-v total d'environ 300 m/s, dont environ la moitié est utilisée pour placer la navette en orbite.

Les moteurs de contrôle d'orientation (RCS)

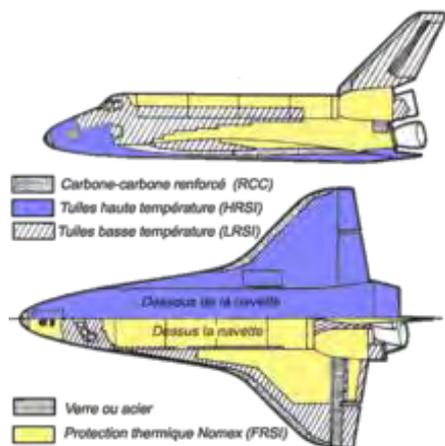
Les moteurs de contrôle d'orientation ou d'attitude (*Reaction Control System - RCS*) sont utilisés pour modifier l'orientation de la navette lorsque l'atmosphère est trop ténue pour que les empennages de l'orbiteur puissent être efficaces. On a également recours à eux en orbite lorsque la vitesse de l'orbiteur doit être corrigée d'une valeur inférieure à 2 m/s. Les moteurs sont répartis entre les deux nacelles OMS et l'avant de l'orbiteur. Il existe deux types de moteurs. Les plus puissants ont une poussée de 395 kg, avec une impulsion spécifique de 289 secondes. Les moteurs vernier, avec une impulsion spécifique de 228

secondes, sont utilisés pour les corrections très fines : d'une poussée de 11 kg, ils peuvent fournir une impulsion d'une durée comprise entre 0,08 et 125 secondes. Sur l'avant de l'orbiteur se trouvent 2 moteurs-verniers et 14 moteurs plus puissants, tandis que dans chaque nacelle OMS on trouve deux moteurs-verniers et 12 moteurs de 395 kg de poussée. Tous ces moteurs utilisent les mêmes ergols que les moteurs de manœuvre orbitale, mais avec des réservoirs qui leur sont propres, répartis entre les trois emplacements.

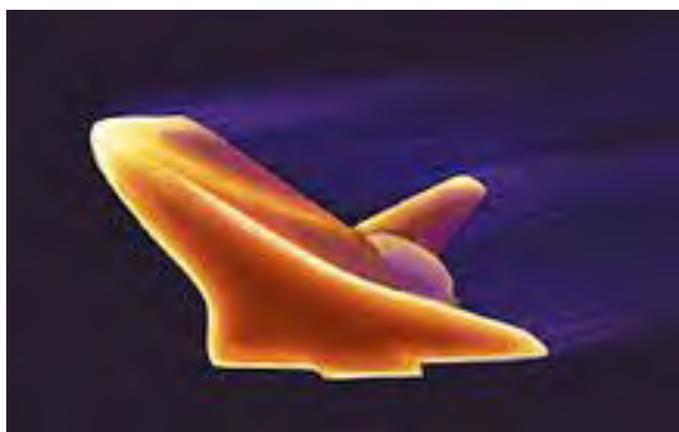
La protection thermique

La navette, qui se déplace à plus de 7 km/s, est durant la rentrée atmosphérique ralentie progressivement par les forces de friction engendrées par l'atmosphère qui se densifie : l'énergie cinétique accumulée durant le lancement est transformée en énergie thermique. Durant cette phase les parties extérieures de la navette sont portées à des températures qui montent jusqu'à 1 650 °C au niveau des parties les plus exposées c'est-à-dire la pointe avant et les bords d'attaque des ailes. Pour ne pas endommager la structure en aluminium, qui doit être maintenue en dessous de 180 °C, une protection thermique recouvre complètement la navette. Sur les vaisseaux spatiaux comme les capsules Soyouz ou Apollo, cette protection thermique est constituée d'un matériau ablatif, qui élimine la chaleur en se décomposant couche après couche. Pour un engin réutilisable, cette solution ne peut être retenue. Le choix s'est porté sur un matériau isolant, qui renvoie la majeure partie de la chaleur.

Le bouclier thermique de la navette est en grande partie constitué de tuiles en céramique collées sur la structure en aluminium. Le matériau utilisé, mis au point au cours des années 1960 par la société Lockheed, a été retenu car il est à la fois un excellent isolant thermique et est d'une grande légèreté (densité de 0,144 pour les tuiles HRSI-9), car constitué à 90 % d'air. Mais le coefficient de dilatation thermique de ce revêtement est très faible : Pour que le revêtement ne se brise pas lorsque la superstructure en aluminium se contracte ou se dilate, il a fallu le diviser en tuiles carrées, d'une taille moyenne de 15 cm de côté, séparées par des interstices de 0,3 mm qui donnent suffisamment de jeu. Les tuiles sont un matériau relativement rigide qui peut casser du fait des déformations subies par la structure de la navette durant la traversée des couches denses de l'atmosphère : Pour éviter une rupture, une couche de feutre est interposée entre chaque tuile et la coque en aluminium.



Répartition des différents types de tuiles



Simulation des contraintes thermiques subies par la navette durant la rentrée atmosphérique : Les parties les plus brillantes sont les plus chaudes

Selon l'emplacement, la température et les contraintes mécaniques sont très différentes. La taille, l'épaisseur et la densité des tuiles peuvent varier pour s'adapter à la forme de la coque et à la contrainte thermique locale. Chaque tuile est unique et porte un numéro indélébile qui la situe sur la coque. Différents types de matériaux sont utilisés en fonction de la température à laquelle ils sont exposés, certains datant de l'époque de la construction des navettes, et d'autres ayant été mis au point après et qui sont utilisés ponctuellement lorsque les tuiles d'origine doivent être remplacées :

- Les parties de la navette qui subissent des températures inférieures à 370 °C sont couvertes de FRSI (*Felt Reusable Surface Insulation*), un revêtement à base de Nomex. Les pièces en FRSI ont en général une taille de 0,8 × 1,2 mètre et une épaisseur comprise entre 0,4 et 1 cm.

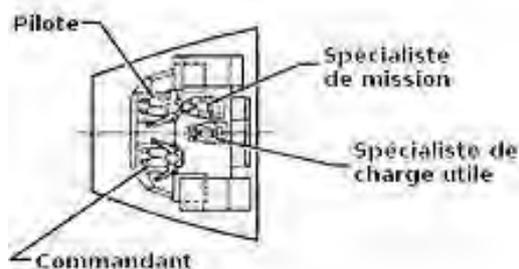
- Une partie des parois de l'habitacle, ainsi que la surface supérieure des ailes situées juste après le bord d'attaque, et qui subissent des températures comprises entre 370 °C et 650 °C, sont protégés à l'origine par des tuiles en céramique blanches de type LRSI (*Low Temperature Reusable Surface Isolation*). Leur épaisseur est comprise entre 1,3 et 7 cm et leur densité est de 0,144. De conception plus récente, les tuiles AFRSI (*Advanced Flexible Reusable Surface Insulation*), de couleur blanche, remplacent les tuiles LRSI : Elles sont moins coûteuses à produire, moins lourdes et sont plus faciles à mettre en place.
- Le dessous de la navette et le bord d'attaque de la dérive, qui subissent des températures comprises entre 650 °C et 1 260 °C, sont protégés à l'origine par des tuiles en céramique noires de type HRSI (*High Temperature Reusable Surface Isolation*). Leur épaisseur est comprise entre 1,3 et 13 cm et leur densité peut être égale à 0,144 ou 0,35. Deux autres types de tuiles comparables furent mises au point ultérieurement : les tuiles de type FRCI (*Fibrous Refractory Composite Insulation*), utilisées pour remplacer les tuiles HRSI lorsqu'elles sont endommagées car elles sont plus résistantes, et qui ont une densité de 0,19 et une épaisseur comprise entre 2,5 et 13 cm; et les tuiles de type TUFII (*Toughened uni-pice fibrous insulation*), qui sont utilisées à la place des tuiles HRSI là où leur résistance aux dommages présente un avantage, en particulier près des SSME.
- Le nez de la navette et le bord d'attaque des ailes sont les parties les plus exposées : Elles subissent des températures supérieures à 1 260 °C. Elles ne sont pas recouvertes d'un matériau isolant mais de pièces en RCC (*Reinforced carbon carbon*; carbone carbone renforcé) qui supportent ces températures extrêmes. L'utilisation de ce matériau n'a pu être généralisée car il est beaucoup plus lourd que les tuiles en céramique. Contrairement à celles-ci, les pièces en RCC jouent un rôle structural et doivent être séparées de la structure par une couche d'isolant, car le carbone est un bon conducteur thermique. L'épaisseur des pièces en RCC est comprise entre 0,64 et 1,27 cm. Le nez est recouvert par une pièce d'un seul tenant, tandis que les bords d'attaque sont recouverts par plusieurs tuiles. L'origine de l'accident de la navette spatiale Columbia est liée à la perforation d'une de ces tuiles par un morceau de mousse isolante détachée du réservoir externe lors du lancement, et qui a provoqué la destruction de la navette durant la rentrée atmosphérique.

Chaque navette, du fait de sa date d'entrée en service ainsi que des opérations de maintenance effectuées, a une protection thermique qui diffère légèrement. En 1999 la protection thermique de la navette Atlantis était constituée de 501 tuiles de type HRSI-22(densité de 22 pouces par pied carré soit 0 35), 19 725 de type HRSI-9 , 2 945 de type FRCI-12, 322 de type TUFII-8, 77 de type LRSI-12, 725 de type LRSI-9, 2 277 de type revêtement AFRSI et 977 de type revêtement FRSI. Environ 20 tuiles sont endommagées à chaque vol et 70 doivent être remplacées pour différentes raisons.

Les quartiers de l'équipage

La navette spatiale peut accueillir jusqu'à 8 astronautes répartis sur 2 ponts : Le pont de vol (*flight deck*) et le niveau intermédiaire (*mid-deck*). À ces deux niveaux s'ajoutent une soute (*lower-deck*). 72 m² sont ainsi disponibles, contre 8,5 m² sur un vaisseau russe Soyouz, capable de transporter 3 cosmonautes.

Le poste de pilotage de vol



Configuration de lancement du poste de pilotage



Vue sur l'avant du cockpit

Le poste de pilotage peut accueillir 4 personnes. En configuration de lancement, le commandant et le pilote s'installent en face du tableau de bord respectivement à gauche et à droite. Derrière le pilote s'installent deux spécialistes de mission. En orbite, les sièges sont démontés; seul le commandant garde sa place. À l'arrière de la cabine se trouve un poste de travail, équipé d'étriers au sol, permettant à

l'astronaute de se maintenir en position fixe tout en travaillant; ce poste est utilisé pour commander les mouvements du bras robotisé de la navette, qui manipule les charges utiles situées dans la soute de la navette. L'opérateur dispose de plusieurs hublots donnant sur la soute. Sur le côté, deux postes latéraux sont dédiés au contrôle des charges utiles et de la navette. À l'avant, la zone située au-dessus du pare-brise regroupe les différents moyens de propulsion; il permet de sélectionner les ordinateurs GPC (*General Purpose Computer*). À gauche, le commandant a accès aux systèmes de contrôle thermique, de pressurisation et de conditionnement de l'air, de détection d'incendie et d'allumage des extincteurs. Face au pilote et au commandant sont placés deux indicateurs, l'ADI (*Altitude Direction Indicator* : Indicateur de direction et d'altitude) et le HSI (*Horizontal Situation Indicator* : Indication de situation horizontale) qui donnent des informations sur le pilotage, la vitesse, l'accélération et la position dans l'espace, mais également des commandes relatives au train d'atterrissage, entre autres. Sur sa droite, le commandant contrôle les circuits hydrauliques et l'alimentation électrique. Au centre, plusieurs écrans fournissent aux pilotes des informations sur le remplissage du réservoir externe et le temps écoulé depuis le décollage. Entre les deux sièges, le « pylône central » comprend un clavier et des chronomètres, la sélection des antennes et des liaisons radio, ainsi que des indicateurs sur le fonctionnement du contrôle d'attitude (RCS). Face aux pilotes, un manche RHC (*Rotation Hand Controller*) permet d'utiliser les moteurs pour mettre en rotation la navette sur 3 axes. Un second manche, le THC (*Translator Hand Controller*), situé sur la gauche du RHC, permet les mouvements de translation. Au plafond, les astronautes disposent d'un large panneau avec de nombreux interrupteurs coupe-circuit. Au sol, des pédales de palonnier permettent aux pilotes, comme dans un avion, de braquer la gouverne de direction de queue et de freiner la navette à l'atterrissage.

Le pont intermédiaire

Le pont intermédiaire sous le poste de pilotage constitue le lieu de vie de l'équipage. Trois sièges y sont installés lors du décollage et de l'atterrissage pour les spécialistes de charge utile. On y accède soit par une écoutille latérale donnant sur l'extérieur soit par les deux trappes situées au plafond et communiquant avec le niveau supérieur. À droite de l'écoutille se trouvent les toilettes; sur la gauche, un coin cuisine permet à l'équipage de préparer ses repas. En face sont installés à l'horizontale des compartiments de repos individuels pouvant être refermés ou ouverts comme des placards, sur lesquels les astronautes ont l'habitude d'accrocher le fanion de leur université. L'équipage dispose d'un tapis roulant, afin de maintenir sa condition physique en impesanteur.

Le sas

L'orbiteur dispose d'un sas qui permet à des membres de l'équipage d'intervenir à l'extérieur lorsque la navette est en orbite. Lorsque les orbiteurs ont été construits le sas empiétait sur le pont intermédiaire afin de laisser la baie cargo entièrement libre pour une charge utile. Le sas comportait à l'époque deux écoutilles, d'un diamètre de 91 cm dont l'une donne dans la partie pressurisée de l'orbiteur et l'autre sur la soute cargo pour permettre aux astronautes d'intervenir sur les charges utiles au cours de sorties extravéhiculaires. À la suite de la décision des États-Unis de participer au programme de la station spatiale russe Mir et d'envoyer les navettes afin d'assurer la relève des équipages, le sas est modifié pour permettre à l'orbiteur de s'amarrer à la station spatiale. Il est désormais placé dans la soute cargo. Le sas se présente sous la forme d'un cylindre vertical en sandwich d'aluminium. À l'intérieur la hauteur totale est de 2,11 mètres et le diamètre de 1,6 mètre, soit un volume un peu supérieur à 5 m³ qui permet à deux astronautes équipés d'une combinaison spatiale d'effectuer une sortie. Les deux écoutilles d'origines sont conservées mais une troisième écoutille est ajoutée au sommet du cylindre; celui-ci est par ailleurs coiffé d'un système d'amarrage périphérique androgyne mis au point par les ingénieurs russes pour permettre à l'orbiteur de s'amarrer à la station spatiale, ce qui offre la possibilité aux astronautes de passer en bras de chemise dans la station. Cette méthode d'amarrage est également celle utilisée pour la Station spatiale internationale. Atlantis est le premier orbiteur équipé à compter de 1992; les autres orbiteurs reçoivent à partir de 1998 une version légèrement différente, sauf Columbia qui conservera son installation d'origine jusqu'à sa destruction en 2003. Le système médical des navettes spatiales (SOMS, *Shuttle Orbiter Medical System*) permet aux astronautes de se soigner en cas de maladie ou de petites blessures. Il est composé d'une boîte bleue (MBK, *Medication and Bandage Kit*) contenant des médicaments (suppositoires, aspirines), des pansements ainsi qu'une boîte bleue à bandes rouges (EMK, *Emergency Medical Kit*) contenant un kit de premiers secours et des instruments médicaux; ces deux boîtes sont

stockées sur le *mid-deck* (le niveau intermédiaire). Les informations collectées par le SOMS sont envoyées au centre de contrôle de mission à Houston, où des médecins peuvent conseiller les astronautes, ou demander l'annulation de la mission.

L'informatique embarquée

L'informatique des navettes spatiales est composée de 200 calculateurs assignés à chaque système. Les calculateurs sont reliés à 5 ordinateurs IBM AP-101, programmés par Rockwell et IBM en Fortran. D'une mémoire de 3 833 856 bits (soit 468 Ko), ils peuvent interroger une base de données contenant le programme de vol, stockée sur une bande magnétique de 34 Mbit. Ce programme de vol est actualisé au fur et à mesure de l'avancement de la mission en 9 groupes : Par exemple le premier correspond à la phase de vol propulsé. Tant que la navette est sur son pas de tir, elle est en partie contrôlée par le *Launch Processing System* (LPS). Pendant les phases « critiques » (lancement, atterrissage), les 5 ordinateurs fonctionnent en parallèle en effectuant les mêmes calculs : Ils reçoivent les mêmes informations et sont synchronisés 440 fois par seconde. Pour pallier les erreurs de logiciel, les décisions sont prises à la majorité lorsqu'il y a divergence dans les résultats obtenus.

L'alimentation électrique

Les navettes spatiales sont alimentées en énergie électrique par 3 piles à combustible. 2 832 kg d'oxygène sont répartis dans huit réservoirs de 95,3 cm de diamètre et 1 584 kg d'hydrogène dans quatre réservoirs de 115,6 cm de diamètre. Ces 3 piles fournissent une tension de 28 V pour une intensité variant entre 61 A et 436 A. Il faut près d'un quart d'heure pour allumer une pile, aussi, deux sont toujours actives pour éviter une coupure; elles alimentent continuellement un convertisseur produisant de l'électricité sous une tension de 115 V. Les piles à combustible produisent de l'eau qui, une fois filtrée, peut être consommée par les astronautes. Les piles à combustible sont un élément à la fois sensible et critique de l'orbiteur. À plusieurs reprises une mission a dû être abrégée à la suite d'une défaillance de l'un de ces éléments.

Les systèmes hydrauliques

Le système hydraulique des navettes spatiales est utilisé pour orienter les tuyères des moteurs SSME et déployer le train d'atterrissage. L'énergie est fournie par des groupes auxiliaires de puissance (APU, *Auxiliary Power Units*), au nombre de 3 et positionnés à l'arrière de l'orbiteur. Ils pèsent près de 39 kg chacun et fournissent une puissance de 138 ch, grâce à une turbine alimentée par les gaz libérés lors de la décomposition catalytique de l'hydrazine à 930 °C; cette turbine entraîne une pompe d'un débit de 4 litres par seconde. Un réservoir de 134 kg contient l'hydrazine pressurisée à 27 bars par de l'hélium.

Le réservoir externe



Réservoir externe de la navette spatiale américaine

Le réservoir externe (*External Tank* abrégé en ET) contient l'hydrogène et l'oxygène stockés sous forme liquide utilisés par les moteurs SSME de l'orbiteur. Le réservoir a la forme d'un cylindre long de 46,9 mètres et d'un diamètre de 8,4 mètres qui se termine par une pointe conique pour des raisons aérodynamiques. Il contient 543 000 litres (environ 631 t) d'oxygène liquide et 1,465 million litres (environ 108 t) d'hydrogène liquide. Le réservoir, qui est construit par Lockheed dans l'usine de Michoud en Louisiane, est réalisé en alliage lithium-aluminium qui combine résistance et légèreté. Le réservoir d'hydrogène occupe les 2/3 inférieurs du cylindre tandis que le réservoir d'oxygène est situé au sommet. Le réservoir d'oxygène qui pèse 5,4 tonnes à vide comporte des anti-ballotants et des dispositifs anti-

tourbillons destinés à limiter les mouvements du liquide et à prévenir l'arrêt des moteurs avant l'épuisement total de l'ergol. Un événement situé au sommet du réservoir permet de libérer l'oxygène gazeux en cas de surpression. Entre les deux réservoirs se trouve une zone de liaison car les fonds des deux réservoirs qui sont de forme hémisphérique ne sont pas jointifs. Le réservoir d'hydrogène ne comporte que des dispositifs anti-tourbillons car les mouvements de l'hydrogène liquide très peu dense ont peu d'influence sur le comportement de la navette. Il dispose comme le réservoir d'oxygène d'un événement pour réduire si nécessaire la pression engendrée par l'évaporation constante de l'hydrogène. Le réservoir externe est attaché à la navette par trois points : l'un est situé au sommet du réservoir d'hydrogène, les deux autres sont situés au bas de ce réservoir au même niveau. Les propulseurs d'appoint sont attachés par deux fixations au réservoir externe, l'une située au niveau de la zone de liaison entre les réservoirs, l'autre située sur le réservoir d'hydrogène. Une canalisation de 43 cm de diamètre transporte l'oxygène liquide sous pression avec un débit de 1,3 tonne par seconde (pour un SSME à 104 % de puissance) et court à l'extérieur du réservoir d'hydrogène pour alimenter les moteurs de la navette. L'hydrogène est transféré par une canalisation de même diamètre avec un débit de 211 kilogrammes par seconde. Le réservoir est recouvert d'une épaisse couche d'isolant qui limite le réchauffement des ergols qui doivent être maintenus à des températures très basses (-253 °C pour l'hydrogène). Le matériau utilisé a été modifié à plusieurs reprises pour réduire la masse du revêtement ou satisfaire des contraintes environnementales. Des problèmes d'adhérence récurrents sont à l'origine du deuxième accident de la navette. Le réservoir externe a subi depuis la sortie des premiers exemplaires plusieurs modifications : sa masse à vide initiale de 35 tonnes a été abaissée une première fois à 30 tonnes pour la mission STS-6 essentiellement en amincissant la structure. En 1998 l'aluminium-lithium a remplacé l'aluminium ce qui permet d'atteindre une masse à vide 26 tonnes. Avec le plein d'ergols il pèse 760 tonnes.

Les propulseurs d'appoint (boosters)

Les deux propulseurs d'appoint (*Solid Rocket Booster* ou SRB) de la navette fournissent plus de 71,4 % de la poussée totale des moteurs de la navette durant les deux premières minutes du vol avant d'être largués lorsque celle-ci a atteint une altitude de 46 km. Par ailleurs avant le décollage, les 2 000 tonnes de la navette reposent entièrement sur les propulseurs. Chaque propulseur à poudre est composé principalement d'une enveloppe cylindrique en acier longue de 45,6 mètres de long (avec la tuyère) et d'un diamètre de 3,71 mètres, d'un cône avant dans lequel se trouvent les parachutes et d'une tuyère orientable. Le propergol, moulé dans l'enveloppe, se présente sous la forme d'un bloc de poudre de 469 tonnes qui contient, intimement mélangés, le comburant (du perchlorate d'ammonium), le carburant (de la poudre d'aluminium) ainsi que d'autres composants sous forme de trace. Le bloc est percé d'un canal longitudinal qui sert de chambre de combustion. Lorsque le propulseur est allumé la surface interne du bloc de poudre côté canal se met à brûler et produit des gaz chauds qui sont expulsés à grand vitesse par la tuyère en générant une poussée de 1 246 tonnes. Pour pouvoir couler le propergol, le cylindre est divisé en 5 segments qui sont solidarités une fois qu'ils ont reçu leur charge de propergol. La géométrie du canal au centre du bloc poudre est définie pour fournir une poussée maximale au décollage qui tombe à 70 % 55 secondes plus tard puis reste par la suite à peu près constante. À cet effet la section du canal du segment avant (haut) a la forme d'une étoile à 11 branches, tandis que le canal des quatre autres segments a la forme d'un double cône tronqué. Une fois allumé le propulseur à poudre fonctionne jusqu'à épuisement du propergol et ne peut être éteint contrairement aux moteurs de l'orbiteur. La masse à vide est de 63 tonnes. Les segments s'emboîtent entre eux et sont solidarités par 177 chevilles répartis sur la circonférence. Pour pouvoir résister aux très fortes pressions et températures trois joints assurent l'étanchéité entre les segments. En 1986 la défaillance de ces joints créa une ouverture à travers laquelle une flamme vint perforer le réservoir externe entraînant la destruction de la navette Challenger et la mort de son équipage. Depuis les joints et la manière dont les segments sont solidarités ont été revus. La tuyère peut être inclinée de 7° par rapport à l'axe du propulseur pour orienter la poussée et corriger la trajectoire de la navette. La force motrice utilisée pour orienter les tuyères est fournie par deux systèmes hydrauliques redondants dont la source d'énergie est un moteur consommant de l'hydrazine. L'extrémité supérieure de propulseur, en forme de cône, contient un parachute extracteur et trois parachutes principaux de 40 mètres de diamètre qui sont déployés après le largage des propulseurs pour permettre leur récupération par les bateaux de la NASA. Huit petits propulseurs à poudre répartis en deux groupes de 4 sont utilisés pour écarter le propulseur d'appoint de la navette après la séparation.

Le déroulement d'une mission : Préparation

L'orbiteur après avoir subi une révision dans l'un des trois bâtiments dédiés à sa maintenance (les *Orbiter Processing Facility* OPF) au Centre Spatial Kennedy en Floride, y reçoit une partie de la charge utile de la mission à venir; les consommables sont également chargés. L'orbiteur est pesé et son centre de gravité est déterminé pour une prise en compte dans les paramètres de vol. L'orbiteur est ensuite déplacé jusqu'à l'immense bâtiment d'assemblage construit pour les fusées Saturn V du programme Apollo et dont deux baies sont dédiées à la préparation en parallèle des navettes. Deux autres baies sont utilisées pour garer les orbiteurs et stocker du matériel. Le réservoir externe et les deux propulseurs d'appoint sont installés en position verticale sur la table de lancement mobile (*Mobile launcher platform* ou MLP) qui va être utilisée pour déplacer la navette jusqu'à l'aire de lancement et servira de support au moment du tir. L'orbiteur est hissé à la verticale à près de 100 mètres de hauteur à l'aide de deux ponts roulants de 200 tonnes puis abaissé pour être boulonné au réservoir externe. Des plateformes mobiles sont alors mises en place pour permettre de travailler sur la navette. Les liaisons mécaniques et électriques entre les trois composants de la navette sont vérifiés et testés. Les liaisons avec les installations au sol sont également contrôlées. L'ensemble de ces vérifications prend théoriquement 6 jours.



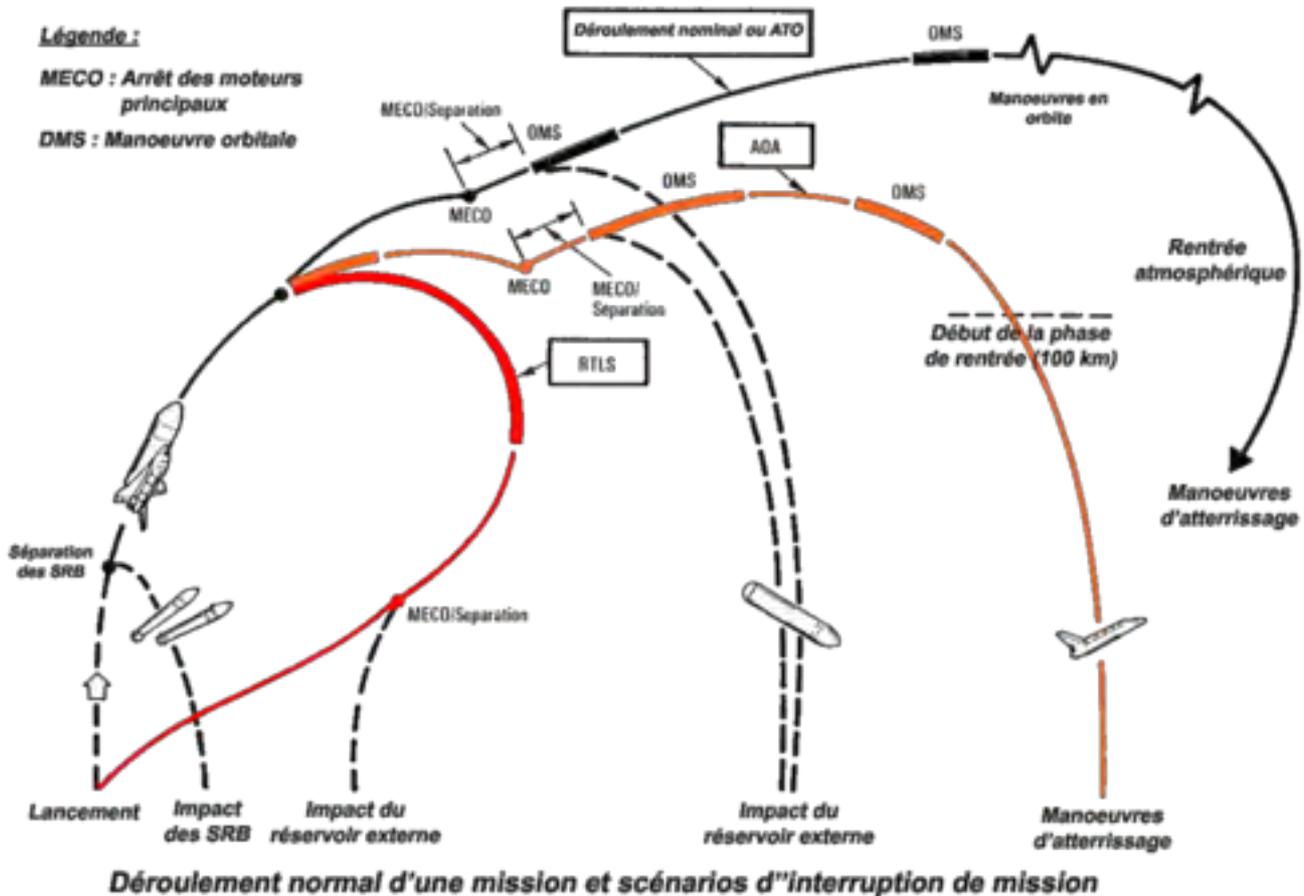
La navette Atlantis dans le VAB



La navette Atlantis est transportée sur le véhicule à chenilles jusqu'au pas de tir

Le véhicule sur chenilles chargé de transporter la navette jusqu'au lieu du lancement est alors glissé sous la plateforme de lancement mobile puis l'ensemble franchit les portes du VAB et se met en route à petite vitesse (moins de 2 km/h) jusqu'à l'un des deux pas de tir aménagés pour la navette. Le véhicule, qui est également un héritage du programme Apollo, est équipé d'un système de vérins qui maintient la navette à la verticale lorsque l'ensemble doit gravir la rampe de 5 % qui mène au pas de tir. La destination est atteinte au bout de 6 heures; la plateforme mobile est alors abaissée sur des trépieds et le véhicule sur chenilles est retiré. Chacun des deux pas de tir (39A et 39B) comporte une structure qui permet d'achever la préparation de la navette : celle-ci est composée d'une tour métallique fixe (*Fixed service structure* ou FSS) et d'une partie mobile (*Rotating service structure*) qui y est attachée et pivote de 120° pour venir se plaquer contre la baie cargo de l'orbiteur. La partie fixe comporte des lignes d'alimentation en ergols et fluides divers ainsi qu'une passerelle qui permet à l'équipage de pénétrer dans la navette. La partie mobile comporte 5 niveaux de plateforme qui permettent de travailler sur la baie cargo dans un environnement contrôlé. Elle permet également d'accéder aux nacelles des moteurs. La charge utile d'une navette comprend souvent un grand nombre de composants, dont certains sont destinés à rester en orbite comme les composants de la station spatiale internationale ou le ravitaillement de son équipage permanent, et d'autres qui reviennent à Terre comme les conteneurs ou structures destinées à transporter le fret. Tous les éléments de la charge utile sont vérifiés, conditionnés et installés au centre spatial Kennedy. Une partie est installée lorsque l'orbiteur est à l'horizontale dans l'OPF, le reste l'est sur le pas de tir. Le chargement des carburants est préparé. Les portes de la baie cargo sont refermées. La dernière tâche est une répétition du lancement qui est effectuée avec les astronautes installés dans l'orbiteur et équipés de leur combinaison spatiale. Le compte à rebours commence 47 heures avant le lancement par une vérification générale des systèmes et des logiciels de vol par les opérateurs installés dans l'une des salles de lancement. À T-11 heures (T = instant du décollage) la structure mobile (RSS) est écartée, l'aire de lancement est évacuée et le chargement de l'hydrogène et de l'oxygène liquide dans le réservoir externe commence.

Lancement



Trois heures avant le lancement les astronautes s'installent dans la navette spatiale. Entre T-3 minutes et T-2 minutes (T = instant du décollage) les réservoirs d'hydrogène et d'oxygène sont mis sous pression puis les SSME sont mis à la température des ergols. Si aucun problème n'est détecté durant le compte à rebours, les SSME sont allumés à T-3 secondes. Sous la poussée des moteurs, les boosters qui solidarisent la navette avec la plateforme ploient légèrement et la navette s'incline de 2 mètres au niveau du poste de pilotage avant de revenir à la verticale. Si après allumage l'un des moteurs SSME n'a pas atteint 90 % de sa puissance nominale, le lancement est interrompu. Lorsque le fonctionnement des moteurs-fusées est normal les propulseurs à poudre sont allumés au moment précis où la navette est revenue à la verticale (instant T). La navette spatiale s'élève en prenant rapidement de la vitesse (accélération d'1,5 g) car le rapport poussée / masse totale (3 000 tonnes pour 2 000 tonnes) est d'1.5, contrairement par exemple à la fusée Saturn V. Dès que la vitesse a dépassé 39 m/s, au bout d'environ 7 secondes, la navette prend une orientation correspondant au plan orbital visé (57° par exemple pour une mission vers la station spatiale internationale). La navette effectue un tonneau pour présenter le ventre de l'orbiteur vers le ciel : dans cette position les moteurs peuvent maintenir une incidence négative en limitant la pression aérodynamique sur les ailes de l'orbiteur. La poussée des SSME est réduite jusqu'à 67 % au fur et à mesure que la pression aérodynamique s'accroît. La pression aérodynamique maximale Max Q, est atteinte 60 secondes après le décollage. À T+65 secondes la poussée des SSME est progressivement augmentée jusqu'à atteindre 104 % de la poussée nominale. Environ 120 secondes après le décollage, les deux propulseurs d'appoint sont largués : les liaisons sont coupées par des charges pyrotechniques et huit petits moteurs-fusées écartent les boosters du réservoir externe. L'équipage qui était jusque-là soumis à de fortes vibrations de basse fréquence et d'amplitude de l'ordre de 1 à 2 cm, est dans un silence total tandis que l'accélération retombe à 1 g. Chaque propulseur d'appoint continue à monter durant 75 secondes sur sa lancée jusqu'à atteindre son apogée puis retombe, refaisant remonter l'accélération à 3 g puisque la poussée reste constante mais la masse diminue; parvenu à une altitude de 48 km, 225 secondes après la séparation, la pointe supérieure est éjectée puis un parachute pilote se déploie pour stabiliser le propulseur et enfin trois parachutes principaux s'ouvrent réduisant la vitesse à 25 mètres par seconde au moment de l'amerrissage. Celui-ci se produit dans l'Océan Atlantique à environ 261 km de la base de

lancement. Les propulseurs sont récupérés par deux navires de la NASA et remis en condition pour un vol suivant. L'orbiteur continue à prendre de la vitesse en utilisant uniquement les SSME. Désormais l'orbiteur a traversé la partie la plus dense de l'atmosphère. Il effectue un nouveau tonneau environ 6 minutes après le décollage pour présenter ses antennes de télécommunications vers le zénith ce qui permet à l'équipage de communiquer avec le centre de contrôle par l'intermédiaire des satellites TDRS en orbite géostationnaire. Sa vitesse est alors de 3,7 km/s.

Sept minutes après le décollage, la poussée des SSME est réduite pour ne pas dépasser 3 g d'accélération. Huit minutes et 20 secondes après le décollage les SSME sont arrêtés (MECO : Main engine Cutoff) : l'arrêt est normalement déclenché par l'arrivée à un point préfixé de la trajectoire mais ce point peut ne pas avoir été atteint auquel cas c'est l'épuisement des ergols qui déclenche l'arrêt des moteurs. Le réservoir externe est largué : les moteurs de correction orbitale sont utilisés pour écarter la navette de la trajectoire du réservoir. La navette a alors une vitesse de 7,6 km/s mais sa vitesse est encore trop faible par rapport à sa basse altitude pour lui permettre de rester en orbite. Le réservoir d'ailleurs suit une trajectoire balistique et effectue bientôt une rentrée atmosphérique durant laquelle il est détruit. Ses débris tombent dans le sud de l'océan Pacifique lorsque la navette effectue une mission à destination de la station spatiale internationale (inclinaison de 57°).



Les installations fixes sur le pas de tir

La navette utilise ses moteurs de correction orbitale (OMS) pour ne pas subir le même sort et se placer sur l'orbite visée. Celle-ci est comprise, selon les missions, entre 250 et 650 km. La navette peut effectuer une ou deux corrections selon sa mission pour se placer en orbite : la première effectuée typiquement 2 minutes après l'extinction des moteurs principaux, permet à la navette de gagner son apogée cible, la seconde circularise l'orbite. Si la deuxième manœuvre n'est pas effectuée, la trajectoire est dite avec « insertion directe ».

Scénarios d'interruption de la mission durant le lancement

Lorsque la navette est au sol, le lancement peut être interrompu tant que les propulseurs d'appoint n'ont pas été mis à feu. Si les SSME sont allumés puis éteints après la détection d'une défaillance, le problème le plus grave est la présence potentielle d'hydrogène gazeux à l'extérieur des tuyères des moteurs, qui peut brûler sans que la flamme soit visible. Des caméras spéciales permettent de détecter ce type de situation. Il existe quatre procédures différentes d'évacuation des astronautes pour couvrir tous les cas de figure. Les astronautes sont entraînés à évacuer la navette et à descendre rapidement à l'aide d'une nacelle jusqu'à un blockhaus situé à proximité. Une fois les propulseurs d'appoint allumés, le décollage ne peut plus être interrompu. Si à la suite d'un dysfonctionnement, la trajectoire de la navette sort de l'enveloppe de vol normale et menace une zone d'habitation, des charges explosives placées dans les propulseurs d'appoint et le réservoir externe dont le déclenchement est confié à l'armée de l'Air américaine permettent de faire exploser ceux-ci avant qu'ils ne touchent le sol. Dans tous les cas, la séparation de l'orbiteur sera tentée avant d'enclencher les explosifs.



La navette en position de lancement

À partir du moment où les propulseurs d'appoint ont été largués (T+120 secondes T=lancement), il existe plusieurs scénarios d'interruption de mission :

Retour au site de lancement (Return to launch site ou RTLS) :

En cas de perte partielle de propulsion entre le moment où les propulseurs d'appoint sont largués et T+260 secondes, le scénario d'abandon consiste à regagner la piste d'atterrissage du centre de lancement Kennedy. La navette poursuit sa trajectoire initiale avec les moteurs qui sont encore opérationnels puis réalise un demi-tour et effectue un vol propulsé avec une assiette négative de manière à se rapprocher du terrain d'atterrissage. L'objectif est de vider le réservoir extérieur et d'être positionné au point idéal permettant d'atteindre la piste en vol plané.

Interruption avec vol transatlantique (*Transoceanic Abort Landing TAL*) :

Ce scénario s'applique au-delà de T+260 secondes et si le carburant restant ne permet pas d'atteindre une orbite minimale. Il ne reste pas assez de carburant pour effectuer un demi-tour et revenir au point de départ. Dans ce cas de figure la navette effectue un vol suborbital, qui permet à l'orbiteur d'aller se poser sur une piste située de l'autre côté de l'Atlantique environ 45 minutes après son lancement. Pour une mission avec une inclinaison de 57° à destination de la station spatiale internationale deux aéroports situés en Europe ont été sélectionnés : la base aérienne américaine de Moron près de Séville en Espagne et la base aérienne d'Istres dans le sud de la France. Sur ces deux bases, des équipements destinés à guider la navette à son atterrissage sont installés en permanence et des équipes de la NASA sont prépositionnées environ 8 jours avant chaque lancement.



Décollage (STS-114)

Interruption avec une orbite bouclée (*Abort Once Around AOA*) :

Ce scénario s'applique lorsque l'orbiteur est capable d'atteindre une orbite mais ne pourra s'y maintenir par la suite, car celle-ci est trop basse. Dans ce cas de figure, la navette boucle une orbite complète puis entame la rentrée atmosphérique en appliquant la procédure normale.

Interruption avec mise en orbite (*Abort to Orbit ATO*) :

Ce scénario s'applique au cas où l'orbiteur perd une partie de sa propulsion mais qu'il a suffisamment de vitesse pour se mettre sur une orbite viable, mais qui n'est pas celle visée. L'orbiteur peut toutefois utiliser ses moteurs de correction d'orbite pour atteindre la bonne orbite. Selon le cas de figure la mission est poursuivie ou du fait de marges d'ergols insuffisantes, elle est interrompue et la rentrée atmosphérique est déclenchée normalement au cours d'une orbite suivante.

Abandon de l'orbiteur (*Contingency abort CA*) :

Si plus d'un SSME est en panne ou qu'un autre composant jouant un rôle essentiel a une défaillance, la navette ne peut choisir une nouvelle trajectoire lui permettant de se poser sur une piste, ni se mettre en orbite : un plan de secours (*Emergency abort*) est mis en œuvre et l'équipage doit évacuer l'orbiteur. Pour les quatre premières missions de la navette, les deux pilotes disposaient d'un siège éjectable utilisable en dessous de mach 2,7 et de 24 km, mais ceux-ci ont été retirés par la suite, et de toute façon les autres membres de l'équipage n'auraient pu disposer du même équipement. La décision d'évacuer doit être prise alors que l'orbiteur est à 20 km d'altitude. Le pilote automatique est branché et un programme de navigation dédié est activé. L'évacuation se fait par l'écouille d'entrée située au niveau du pont intermédiaire. L'évacuation n'est possible que si la vitesse de l'orbiteur est inférieure à 426 km/h et l'altitude inférieure 10 km. Un système pyrotechnique est mis à feu pour faire sauter l'écouille et une perche télescopique de 3 mètres de long s'incurvant fortement vers le bas est déployée. Chaque membre de l'équipage, équipé de son parachute, accroche à son équipement une ligne qui coulisse sur la perche terminée par un mousqueton avant de sauter dans le vide. La perche doit le guider au début de son saut et lui permettre d'éviter d'être happé par l'aile de l'orbiteur. Il a été calculé qu'un équipage de 8 personnes pouvait être évacué en 90 secondes à raison de 12 secondes par astronaute, l'orbiteur se trouvant à 3 km d'altitude à la fin de l'évacuation. À cinq reprises (STS-41-D, STS-51-F, STS-55, STS-51, STS-68), le lancement d'une mission a dû être interrompu à la suite de la détection d'une défaillance d'un moteur quelques secondes avant le décollage, alors que les moteurs de la navette avaient été allumés. La seule procédure d'abandon en vol durant toute la carrière de la navette a été déclenchée par la mission STS-51-F à la suite de l'arrêt du moteur central de l'orbiteur après 5 minutes 45 s de vol : la navette a suivi la procédure relativement bénigne d'interruption avec mise en orbite (*Abort to Orbit*) et la mission put finalement être accomplie.

Le retour sur Terre

Pour son retour sur la terre, l'équipage de l'orbiteur privilégie un atterrissage au centre spatial Kennedy où se trouvent la base de lancement et les installations de maintenance. Pour pouvoir se poser un certain nombre de conditions météorologiques doivent être réunies : la couverture nuageuse sous 2 500 mètres doit être inférieure à 50 %, la visibilité doit être supérieure à 8 km, les vents traversiers sur une des deux pistes doivent être inférieurs à 28 km/h si l'orbiteur atterrit de jour et 14 km/h si l'atterrissage a lieu de nuit. Il ne doit pas y avoir d'orage ou de pluie dans un rayon de 50 km autour du lieu d'atterrissage. Si ces conditions ne sont pas réunies le séjour en orbite peut être prolongé, selon la mission, de un à quelques jours. Si les conditions météorologiques défavorables persistent, l'atterrissage a lieu à la base aérienne d'Edwards en Californie où la météorologie est souvent plus clémente et le nombre de pistes de grande taille fournissent plus d'options.

Mais cette solution nécessite de rapatrier ensuite l'orbiteur à l'aide d'un des deux Boeing 747 porteurs de la NASA ce qui engendre un certain risque, un surcoût important et de plus accroît le délai de remise en condition de l'orbiteur. Les premiers atterrissages s'effectuaient à Edwards. Le premier atterrissage à Kennedy, qui a été effectué dans le cadre de la mission STS-41B en 1984, s'est traduit par un pneu éclaté et des freins endommagés. Les atterrissages n'ont repris à Kennedy qu'en 1991 après des travaux d'aménagement de la piste (allongement, reprise du revêtement) et des modifications au niveau du train d'atterrissage, des pneus et des freins des orbiteurs. Un parachute destiné à réduire la distance d'arrêt a été installé dans la queue des navettes. Depuis les atterrissages au centre spatial Kennedy sont la règle. Pour

déclencher le retour sur Terre, la navette doit réduire sa vitesse en utilisant ses moteurs-fusées : cette réduction entraîne à son tour la diminution de son altitude jusqu'à ce que la navette pénètre les couches plus denses de l'atmosphère qui vont à leur tour freiner la navette et lui faire entamer la rentrée atmosphérique. L'énorme quantité d'énergie cinétique accumulée par l'orbiteur durant sa mise en orbite est dissipée sous forme de chaleur pendant cette phase. Le moment du déclenchement est fixé de manière à ce que la trajectoire amène la navette avec la bonne vitesse jusqu'à la piste d'atterrissage choisie.



La navette spatiale Discovery transportée par un Boeing 747 Shuttle Carrier Aircraft.

La manœuvre qui déclenche la rentrée atmosphérique de la navette est réalisée à un point de l'orbite qui se trouve à l'opposé de la piste d'atterrissage. L'orbiteur va progressivement ralentir jusqu'à atteindre le point où la pression atmosphérique combinée à sa vitesse permettent à ses gouvernes de le diriger. Désormais l'orbiteur, qui ne dispose d'aucun système de propulsion, se comporte comme un planeur que le pilote doit ramener, dans le cas normal, sur la piste d'atterrissage située au centre spatial Kennedy. Pour amorcer ce processus l'orbiteur est orienté de manière à ce que ses moteurs de correction orbitale soient tournés vers l'avant puis ceux-ci sont allumés de manière à réduire la vitesse de 60 à 150 mètres par seconde selon l'orbite de départ. L'orbiteur est ensuite replacé le nez tourné vers l'avant dans une position cabrée avec une assiette négative d'environ 40° . Cet angle est maintenu entre 37 et 43 degrés en utilisant si nécessaire les moteurs de contrôle d'orientation arrière car les gouvernes, en particulier celles de profondeur, n'ont aucune efficacité dans l'atmosphère ténue. Au delà de 43° l'échauffement serait trop important et le bouclier thermique ne pourrait pas résister. Le pilote adopte des angles de roulis plus ou moins accentués : le pilote peut ainsi à la fois ajuster la longueur de la trajectoire restante en ralentissant (en effectuant des S) ou accélérant (route rectiligne) et déporter la trajectoire vers la droite ou la gauche lorsque la piste ne se trouve pas dans le prolongement de l'orbite. Grâce à ses ailes, l'orbiteur peut ainsi se poser sur une piste située à 1 800 km sur la droite ou la gauche d'une trajectoire rectiligne. Lorsque la pression aérodynamique dépasse 10 kg.m^{-2} la gouverne de profondeur peut être utilisée et à Mach 5 c'est au tour de la gouverne de direction. À Mach 1, les moteurs de contrôle d'orientation sont désactivés. La pente de la descente est diminuée progressivement jusqu'à ce qu'elle soit ramenée à 1.4° lorsque l'orbiteur est parvenu à l'altitude de 25 km. La navette a alors une vitesse de 3 148 km/h et se trouve à 128 km de son point d'atterrissage. L'orbiteur entame une phase (Terminal Area Energy Management TEAM) durant laquelle il va réduire, si c'est nécessaire, sa vitesse en décrivant des S d'un rayon d'environ 5,5 km tout en suivant une trajectoire dont l'axe est tangent à l'un des deux côtés de la piste d'atterrissage. L'orbiteur franchit le mur du son alors qu'il se trouve à une altitude de 15 km et est éloigné de 56 km de la piste d'atterrissage. À environ 10 km de la piste, l'orbiteur entame la descente finale en utilisant l'autopilote avec une pente d'environ 20° (trois fois plus accentuée que celle d'un avion commercial) et en ayant recours aux aérofreins pour contrôler sa vitesse. À 500 mètres d'altitude l'orbiteur redresse pour réduire la pente à 1.5° et le train d'atterrissage est sorti à une altitude de 100 mètres. La piste d'atterrissage de Kennedy a une longueur de 4,5 km et une largeur de 91 mètres.

L'orbiteur touche la piste avec son train d'atterrissage principal en position fortement cabrée sa vitesse est de 472 km/h, l'avant commence à s'abaisser lorsque la vitesse tombe sous 343 km/h. Un parachute de 12 mètres de diamètre est alors déployé sur l'arrière de l'empennage pour réduire la distance parcourue avant son arrêt complet. Le train d'atterrissage avant touche à son tour le sol lorsque la vitesse est tombée sous 296 km/h et le parachute est largué lorsque la vitesse est inférieure à 56 km/h. Environ 25 véhicules spécialisés et 150 spécialistes sont présents pour prendre en charge l'orbiteur et son équipage immédiatement après son atterrissage. Lorsque l'orbiteur s'immobilise, des équipes au sol en combinaison étanche vérifient l'absence d'ergols toxiques utilisés par les moteurs-fusées, d'hydrogène ou d'ammoniac à l'extérieur de l'orbiteur. Si ce n'est pas le cas un ventilateur est utilisé pour dissiper les gaz et éviter une explosion éventuelle.



Atlantis a déployé son parachute pour réduire la distance d'arrêt



Atterrissage de nuit de l'orbiteur Endeavour

Des conduites amenant de l'air conditionné sont branchées à l'arrière de l'orbiteur à la fois pour refroidir les parties de la navette qui ont été fortement échauffées durant la rentrée atmosphérique et pour purger la navette de tout gaz toxique. Ces opérations durent moins d'une heure, puis un véhicule vient se placer contre l'écouille qui est ouverte pour laisser passer l'équipage; celui-ci après un court examen médical est évacué pour laisser la place à une équipe chargée de préparer l'orbiteur pour les opérations suivantes. Si l'orbiteur a atterri au centre spatial Kennedy, il est tiré vers un des trois bâtiments de maintenance (*Orbiter Processing Facility* OPF) qui lui est dédié : là les opérations de maintenance sont effectuées. Si l'orbiteur a atterri à la base aérienne d'Edwards il est dirigé vers la grue pour être installé sur le Boeing 747 équipé pour le ramener jusqu'au centre spatial Kennedy.

Les opérations de maintenance

L'orbiteur est tiré vers un des trois bâtiments dédiés (les *Orbiter Processing Facility* OPF) situés au centre spatial Kennedy où se déroulent les opérations de maintenance courantes. L'orbiteur y est placé en position surélevée et plusieurs plateformes mobiles sont mises en position pour permettre d'accéder aux différentes parties de la navette. Après ouverture des portes de la baie cargo, la charge utile de la mission qui vient de s'achever est retirée. Différents circuits et réservoirs sont purgés : circuits moteurs, système de support de vie, climatisation, pile à combustible, réservoirs d'eau. Les moteurs SSME sont démontés pour révision dans un bâtiment dédié (*Main Engine Processing Facility*). Si nécessaire les nacelles des moteurs OMS et le bloc des moteurs d'orientation avant sont démontés pour être révisés. Le bouclier thermique est examiné tuile par tuile et celles qui sont abîmées ou qui donnent des signes de faiblesse sont remplacées. Les incidents détectés au cours de la mission écoulée sont traités. Le train d'atterrissage, certains composants de la structure et d'autres systèmes sont également inspectés. Des mises à niveau, si elles n'immobilisent pas trop longtemps l'orbiteur, peuvent être réalisées durant cette phase. Les opérations de maintenance et de configuration pour la mission suivante réalisées dans l'OPF durent normalement moins de 100 jours.

Les mises à niveau

Des opérations de maintenance et de mise à niveau lourdes sont réalisées périodiquement avec pour objectifs majeurs de limiter les risques tout en limitant leurs coûts. En 2000, les mises à niveau en cours avaient pour objectif de réduire le risque de perte de la navette durant la phase ascensionnelle de 50 %,

durant le séjour en orbite et le retour au sol de 30 % et enfin d'améliorer les informations mises à disposition de l'équipage dans les situations critiques. Ces améliorations devaient à l'époque ramener le risque de perte de la navette de 1/248 à 1/483. Ce risque estimé à 1/78 en 1988 pour le vol STS-26 avait été abaissé à 1/248 essentiellement en intervenant sur les SSME. Ces opérations sont réalisées au cours de périodes de révision (*Orbiter maintenance down period OMDP*) d'une durée de 14 mois programmées tous les 8 vols soit environ tous les 3 ans; elles ont lieu à l'usine Boeing (ex Lockheed) de Palmdale en Californie.

Parmi les modifications effectuées durant ces grandes révisions figurent :

- le renforcement des trains d'atterrissage pour permettre à la navette d'atterrir au centre spatial Kennedy.
- l'installation du sas et du système d'amarrage dans la baie cargo pour que la navette puisse s'amarrer à la station spatiale Mir.
- la mise en place d'une planche de bord moderne utilisant des écrans à la place des indicateurs à aiguille dans la cabine de pilotage.
- L'augmentation de la puissance maximale des moteurs SSME qui est passée après plusieurs modifications à 109 % de la puissance d'origine (mais 104 % utilisable seulement en régime normal).



L'orbiteur Atlantis dans un des trois bâtiments de maintenance

Les différents types de missions de la navette spatiale

La navette spatiale est, par sa conception, un véhicule d'une grande souplesse. C'est le seul qui puisse ramener plusieurs tonnes de matériel sur Terre après un séjour dans l'espace. Sa soute cargo, très vaste, permet de placer en orbite des composants de la station spatiale qu'aucune fusée existante ne peut lancer. Ces caractéristiques uniques ainsi que l'existence de contrats avec d'autres pays partenaires constituent une des raisons de la poursuite du programme de la navette spatiale malgré son coût très élevé. Toutefois le domaine d'intervention de la navette spatiale s'est considérablement réduit, lorsqu'il est devenu évident que les promesses d'économie ne seraient pas tenues.

Le lancement de satellites

Au début de la phase opérationnelle du programme de la navette spatiale, la principale mission de celle-ci est de mettre en orbite les satellites. La NASA espère ainsi abaisser les coûts de lancement grâce au caractère réutilisable de la navette. Au cours de la première mission STS-5 qui succède aux vols de qualification, Columbia largue sur l'orbite basse les satellites de télécommunications Anik C-3 et SBS-C qui gagnent ensuite l'orbite géostationnaire grâce à leur propre moteur. Les trois missions suivantes seront également dédiées au lancement de satellites.

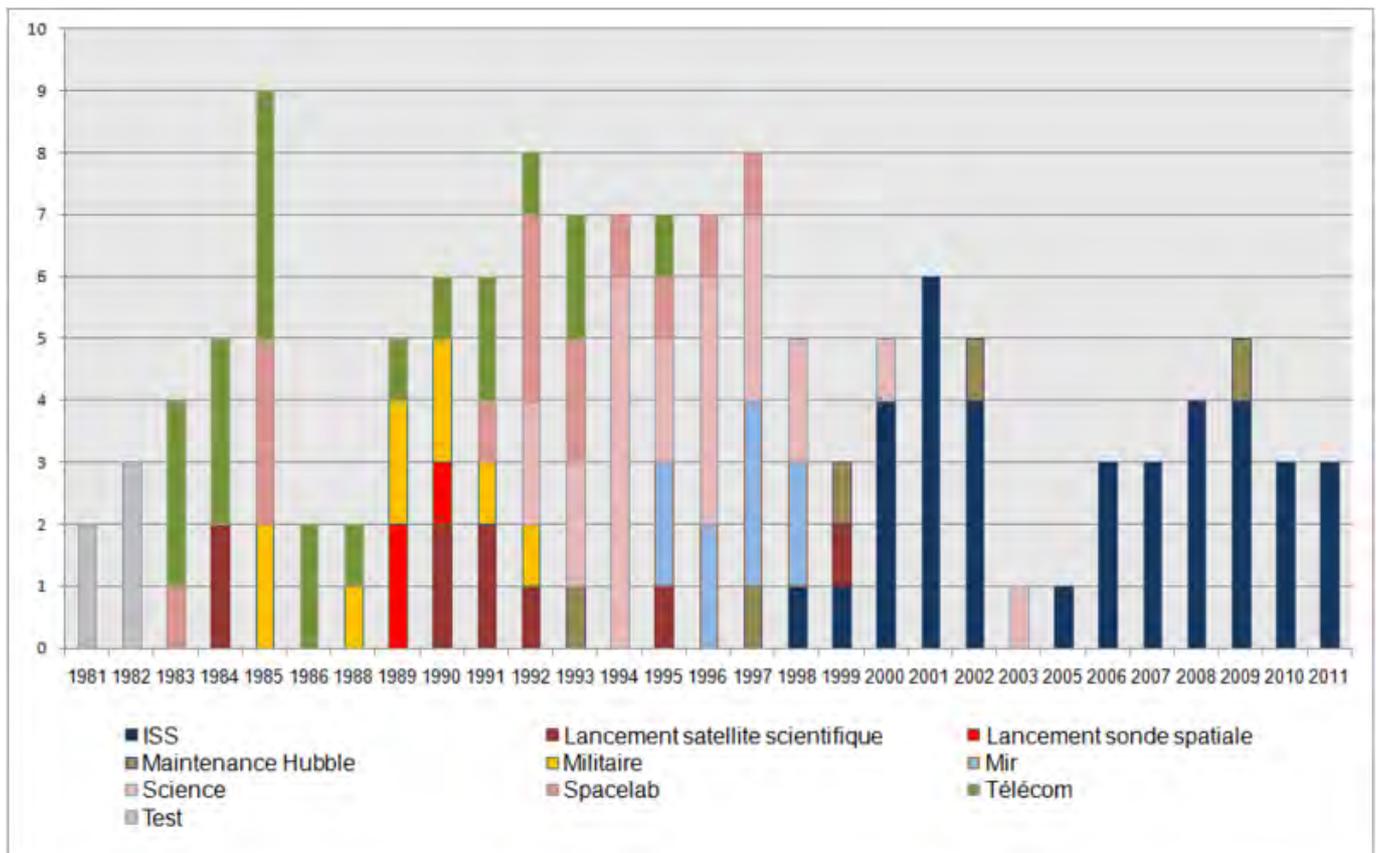


Lancement du satellite SBS-C au cours de la mission STS-5



Travail sur le télescope spatial Hubble au cours de la mission STS-103

La navette spatiale est le seul engin spatial capable de ramener des satellites sur Terre. La première mission de ce type est effectuée au cours de la mission STS-51-A : deux satellites restés en panne en orbite basse alors qu'ils devaient gagner l'orbite géostationnaire, sont capturés puis ramenés sur Terre dans la soute cargo de la navette. La navette peut également réparer un satellite en panne à condition qu'il soit sur une orbite que la navette puisse atteindre.



Nombre de missions par type et par année

Ainsi au cours de la mission STS-49 l'étage d'apogée du satellite Intelsat IV est remplacé. Le cas le plus connu est celui du télescope spatial Hubble : cinq missions de la navette spatiale ont réalisé des travaux de maintenance permettant à chaque fois de prolonger la durée de vie du satellite. La première mission permet de sauver le télescope spatial incapable de fonctionner à la suite d'une erreur de conception. La dernière mission STS-125 a eu lieu en 2009. Depuis la catastrophe de Challenger en 1986, la navette ne place plus en orbite les satellites commerciaux. Seuls les satellites militaires, scientifiques ou

gouvernementaux sont pris en charge. Le lancement de ces derniers très coûteux a été lui-même confié progressivement à des lanceurs classiques et la dernière mission de la navette à avoir lancé un satellite est le vol STS-93 qui place en orbite le télescope spatial Chandra au cours de l'été 1999.

Le laboratoire spatial

La recherche dans le domaine de la microgravité est un autre thème important des missions de la navette. Celle-ci fournit une plateforme flexible qui permet d'effectuer des expériences de tout type. La soute peut accueillir des expériences exposées dans le vide ou bien un module pressurisé dans lequel l'équipage peut réaliser des travaux de recherche « en bras de chemise ». Le premier laboratoire de ce type est Spacelab, un laboratoire spatial développé par l'Agence spatiale européenne, dont le vol inaugural a eu lieu au cours de la mission STS-9 en novembre 1983. Spacelab a participé à 22 missions de la navette; la dernière mission est STS-90 en 1998. Le successeur de Spacelab est Spacehab. Beaucoup plus flexible, ce laboratoire spatial peut également être utilisé pour transporter du fret pour la station spatiale internationale comme ce fut le cas au cours de la mission STS-105. La dernière mission consacrée uniquement à la recherche est la mission STS-107 de la navette Columbia qui explosera au cours de la rentrée atmosphérique. Le dernier vol de Spacehab en tant que module logistique est réalisé dans le cadre la mission STS-118. Parmi les autres missions scientifiques marquantes figure STS-7 qui emportait dans la soute cargo des plateformes dédiées à la recherche. Celles-ci après avoir été larguées dans l'espace au début du vol furent récupérées par le bras Canadarm en fin de vol. Par la suite plusieurs autres plateformes scientifiques sont placées dans l'espace par la navette pour des durées de plusieurs mois ou plusieurs années avant d'être récupérées par une mission ultérieure pour l'analyse des résultats. Même les missions de la navette qui ne sont pas dédiées à la recherche emportent des expériences scientifiques. Il y a souvent dans la baie cargo des expériences scientifiques embarquées qui s'exécutent automatiquement. L'équipage réalise également des expériences sur le pont intermédiaire de la navette au cours du séjour en orbite. C'est le cas en particulier des missions à destination de la station spatiale internationale.

La desserte des stations spatiales

Grâce à sa grande flexibilité la navette est l'instrument idéal pour assembler une station spatiale et la ravitailler. La Station spatiale internationale est ainsi très dépendante des vols de la navette. De nombreux composants de la station sont d'une taille qui ne permet pas leur lancement par d'autres fusées. D'autre part le bras Canadarm de la navette permet d'assembler directement les nouveaux modules à la station. Les modules non russes ne disposent ni d'une propulsion autonome ni de système de contrôle d'orientation et ne peuvent donc s'amarrer eux-mêmes à la station. La navette permet également d'assurer la relève de l'équipage permanent de la station : elle peut théoriquement transporter 5 passagers par vol. Du fait du rôle critique joué par la navette dans l'assemblage de la station, l'interdiction de vol de la flotte des navettes à la suite de la catastrophe de Columbia en février 2003 a entraîné le report de l'assemblage de la station de plusieurs années. Plusieurs expériences scientifiques qui devaient être installées dans la station ont dû même être annulées. Dans les années 1990 la navette a effectué plusieurs vols vers la station russe Mir. Entre 1995 et 1998 la navette s'est amarrée à neuf reprises à la station. Il s'agissait à l'époque de la première collaboration entre les deux puissances spatiales depuis le projet Apollo-Soyouz en 1975.

La flotte des orbiteurs

La NASA a construit cinq orbiteurs opérationnels. Chaque orbiteur présente des caractéristiques différentes :

- Columbia est le premier orbiteur mis en service opérationnel. Il effectue 28 vols entre 1981 et 2003 avant d'être détruit durant son retour dans l'atmosphère le 1^{er} février 2003. Columbia pèse 3,6 tonnes de plus que les orbiteurs suivants : les ailes et le fuselage sont plus lourds; Columbia est équipé d'une instrumentation utilisée pour contrôler le comportement de la navette durant ses premiers vols et elle conserve le sas interne plus lourd qui, sur les autres orbiteurs, a été abandonné pour un sas externe rendu nécessaire pour la desserte des stations spatiales.
- Challenger (1982) est le deuxième orbiteur construit. Il vole pour la première fois en 1983 dans le cadre de la mission STS-6 avant d'être détruit durant le lancement de son dixième vol STS-51-L le 28 janvier 1986.

- Discovery effectue son premier vol en 1984 dans le cadre de la mission STS-41-D et aura accompli 39 missions. Son dernier lancement s'est déroulé le 24 février 2011. C'est l'orbiteur qui a effectué le plus grand nombre de missions.
- Atlantis effectue son premier vol en 1985 dans le cadre de la mission STS-51-J et a accompli 32 vols. Son dernier lancement a eu lieu le 8 juillet 2011.
- Endeavour effectue son premier vol en 1992 dans le cadre de la mission STS-49. Elle est construite après la destruction de Challenger et aura effectué 25 vols. Son dernier vol s'est achevé le 1^{er} juin 2011 (STS-134).

Deux autres exemplaires ont été construits pour la mise au point de la navette :

- Enterprise ou OV-101 (*Orbital Vehicle-101*) livrée à la NASA en 1977 est utilisée d'abord pour valider le transport de la navette sur le dos du Boeing 747 porteur. Cinq vols sans équipage et trois vols avec équipage sont effectués en 1977. La même année, la navette est lâchée à cinq reprises depuis le dos du 747 en vol et atterrit par ses propres moyens après un vol plané. Au cours des années suivantes, Enterprise est utilisée pour des tests de vibration et valider les procédures d'assemblage avant le lancement de la navette au centre spatial Kennedy. En 1985, la navette, qui n'a pas été équipée pour effectuer des missions en orbite, est remise au Musée National de l'Air et de l'Espace à Washington, D.C. pour y être exposée.
- Pathfinder construite en 1977 par le centre spatial Marshall est une maquette en acier dont le poids, la taille et la forme sont similaires à un orbiteur. Elle est utilisée pour valider les manutentions et le gabarit des bâtiments et des routes empruntées.

Le sort des navettes spatiales après l'arrêt du programme

Les quatre orbiteurs opérationnels ayant survécu jusqu'à l'arrêt du programme sont désormais exposés dans différents musées aux États-Unis :

- Discovery est exposée au National Air and Space Museum de Washington, D.C.
- Atlantis est présentée dans la partie muséale du Centre spatial Kennedy en Floride.
- Endeavour est exposée au California Science Center de Los Angeles
- Fin 2011, Enterprise qui était exposée jusque là au Musée National de l'Air et de l'Espace à Washington, D.C. est cédée au Intrepid Sea-Air-Space Museum de New York.

Par ailleurs, les deux laboratoires spatiaux Spacelab embarqués dans la soute cargo au cours de nombreuses missions de la navette spatiales sont visibles respectivement à l'aéroport de Brême en Allemagne et au National Air and Space Museum à Washington.

Bilan

La navette spatiale américaine n'a pas révolutionné le transport spatial en abaissant comme prévu par ses concepteurs les coûts de lancement en orbite. On estimait en 2008, alors que le programme de la navette était en voie d'achèvement, que chaque vol de la navette spatiale américaine revenait à 1,5 milliard de dollars en intégrant les coûts de développement : un prix non concurrentiel par rapport à celui d'un lanceur classique. La souplesse opérationnelle n'est pas non plus au rendez-vous : la cadence de lancement atteint 5 % de celle prévue initialement. La navette spatiale devait abaisser le risque couru par les astronautes au même niveau que celui des passagers des avions. C'est en se basant sur cette hypothèse que la navette a été conçue sans système de sauvetage contrairement aux lanceurs classiques. Mais la navette est un engin beaucoup plus complexe qu'un lanceur classique et donc plus susceptible de connaître une défaillance même avec des procédures de contrôle très lourdes. La décision de retrait de la navette découle en grande partie de ce constat. Il est acquis que les engins qui remplaceront la navette dans ses différents rôles seront des vaisseaux spatiaux « classiques » comme la capsule Apollo : la navette spatiale américaine est aujourd'hui généralement considérée comme une impasse dans le domaine du vol spatial habité.

III Les sondes envoyées vers ou sur la Lune

De nombreuses sondes (une bonne cinquantaine) ont été envoyées vers la Lune entre 1958 et 1968, uniquement par l'URSS et les USA. La plupart furent des échecs. Certaines sondes devaient impacter la Lune, d'autres se mettre en orbite autour de notre satellite, d'autre enfin essayer de se poser en douceur, voir d'essayer de ramener des échantillons de sol lunaire sur Terre.

Les seuls premiers succès notables sont :

la première sonde à s'écraser (délibérément) sur la Lune : URSS, Luna 2 en septembre 1959

la première sonde en orbite lunaire et les premières images de la face cachée de la Lune : URSS, Luna 3 en octobre 1959

le premier atterrissage en douceur et les premières photos prises depuis la surface de la Lune : URSS, Luna 9 en janvier 1966

le deuxième atterrissage en douceur et d'autres photos prises depuis la surface de la Lune : USA, Surveyor 1 en mai 1966

la première sonde habitée à tourner autour de la Lune : USA, Apollo 8 en décembre 1968

Le programme Apollo (USA) a été la consécration la plus extraordinaire de l'exploration lunaire par des hommes :

Apollo 11 en juillet 1969, les deux premiers hommes sur la Lune, Armstrong et Aldrin...

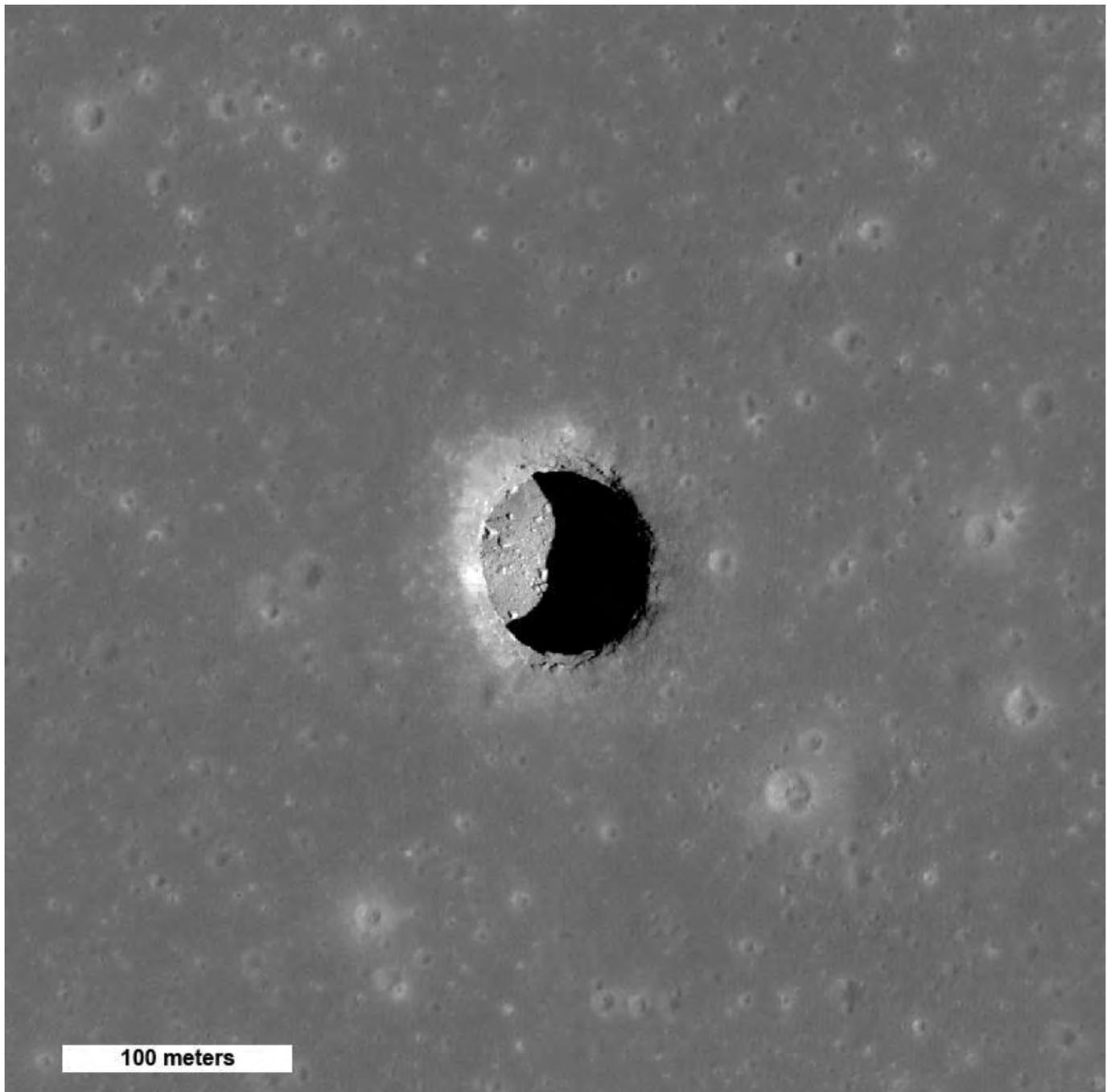
Jusqu'à Apollo 17, dernière mission du programme en décembre 1972 avec les derniers (11° et 12°) hommes sur la Lune. Jamais depuis, d'autres hommes ne sont retournés marcher sur la surface de notre satellite. Ces 12 hommes ont également ramené une grosse quantité (près de 350 kg en tout) de prélèvements de sol lunaire.

Depuis 1990, les sondes envoyées avec des objectifs scientifiques variés ont eu une bien meilleure proportion de succès grâce à une maîtrise technique très améliorée. De nouveaux pays sont arrivés récemment dans l'exploration lunaire : Japon, Europe, Chine et Inde. Les USA ont continué à envoyer régulièrement des sondes lors des 25 dernières années. La Russie n'en n'a plus envoyé à ce jour (dernière sonde de l'URSS : Luna 24 en août 1976).

A) La sonde américaine LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter).

C'est un vaisseau spatial qui est en orbite permanente autour de la Lune.

- **Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)** est une sonde spatiale de type orbiteur de la NASA lancée en 2009 dont l'objectif est d'étudier la Lune depuis son orbite. LRO fait partie du programme Lunar Precursor Robotic dont l'objectif est d'effectuer des reconnaissances approfondies de notre satellite notamment pour préparer les missions habitées du programme Constellation d'exploration lunaire annulé le 11 octobre 2010 par le président Obama.
- LRO, dont la masse totale est de 1 916 kg, embarque sept instruments scientifiques notamment des caméras en lumière visible, un radiomètre infrarouge, un spectromètre ultraviolet et différents instruments destinés à détecter la présence d'eau. LRO est placée sur une orbite particulièrement basse de 50 km autour de la Lune qui lui permet d'effectuer des observations extrêmement détaillées de la surface. Le système de télécommunication est dimensionné pour transférer le très grand volume de données qui en découle. Les objectifs de la sonde sont de dresser une carte à haute résolution de la Lune, tenter de détecter la présence d'eau au niveau des régions polaires, définir un système géodésique complet et évaluer l'intensité du rayonnement ionisant d'origine cosmique.
- LRO est lancée le 18 juin 2009 par un lanceur Atlas V depuis la base de lancement de Cap Canaveral, avec une deuxième sonde lunaire Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) ayant une mission complémentaire. Les instruments de la sonde permettent de dresser une carte topographique (avec le relief) et une carte bidimensionnelle de la Lune d'une précision inégalée. La mission, d'une durée initiale d'un an, est prolongée à plusieurs reprises.

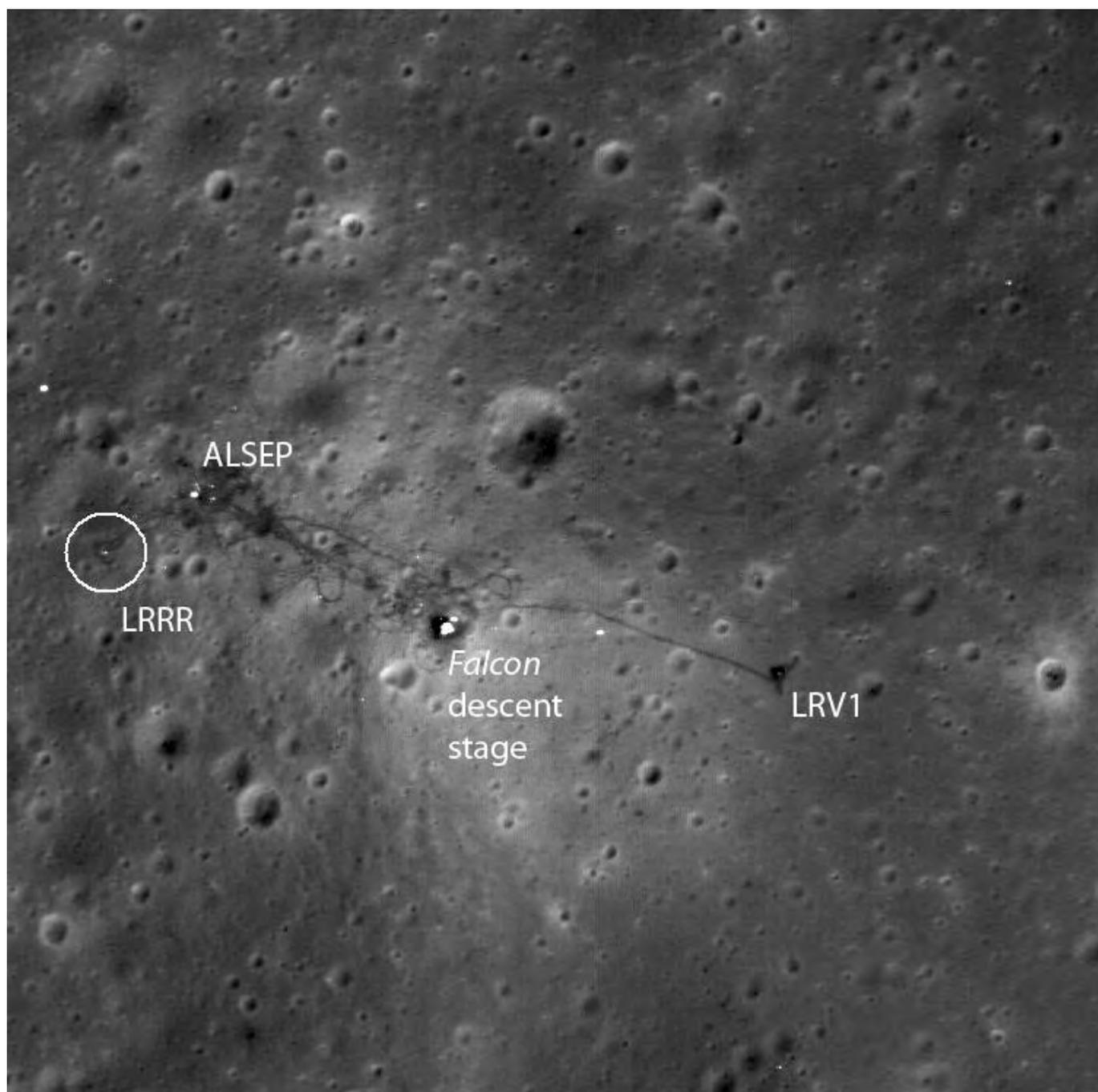


*Un "puits" lunaire, formation assez rare et très intéressante à aller un jour explorer.
LRO en a dévoilé plusieurs... Crédits NASA*

C'est là qu'elle va utiliser la majorité de ses ergols, sans toutefois complètement vider ses réservoirs. Il lui en faudra tout au long de sa vie opérationnelle, car son orbite « finale » à 50 kilomètres au-dessus de la surface lunaire (et même 30 km au-dessus du Pôle Sud à partir de 2015, sur une trajectoire un peu optimisée) lui demande de petits ajustements réguliers. Cette orbite très basse est cependant très avantageuse pour photographier l'ensemble de la Lune à très haute résolution. La campagne scientifique démarre après deux mois de tests réussis.

Un an plus tard, la mission officielle s'achève, et c'est un superbe succès ! La cartographie de la Lune a énormément progressé, avec notamment les trois « produits » de l'altimètre LOLA comprenant les reliefs lunaires, les pentes moyennes observées et la rugosité de la surface, avec une résolution inégalée alors. Sur le plan photographique, ce sont plus de 70 téraoctets de données transférées vers la Terre, avec des formations aux pôles qui n'avaient jamais pu être détaillées avant 2010. C'est notamment le cas de reliefs d'impacts sur la face cachée de la Lune, mais aussi de cratères qui ne sont au mieux que partiellement illuminés au pôle Sud. Le radiomètre infrarouge y mesure une température record de -248°C ! Mais ce n'est pas parce que la mission est remplie qu'il faut tout éteindre.

LRO se porte à merveille, et les équipes de la NASA lui octroient extension sur extension de mission : elle est toujours active aujourd'hui, et ne devrait cesser d'émettre (avant de s'écraser à la surface) que vers 2026-28.



Le site d'atterrissage d'Apollo 15 sur la Lune, photographié par LRO, avec quelques annotations pour s'y retrouver. Crédits NASA

Apollo plein la vue, même si c'est un détail

Malgré des milliers de clichés saisissants, LRO est le plus souvent citée aujourd'hui comme celle qui a permis de redécouvrir les sites d'atterrissage des missions Apollo. Non qu'ils fussent perdus, mais entre 1972 et 2009, les différents orbiteurs étaient mal équipés pour observer des détails aussi fins que ceux qui apparaissent sur les clichés de l'appareil LROC. Tous les sites ont été photographiés, et l'on y observe (au grand dam des conspirationnistes qui se voient obligés d'aller toujours plus loin dans le farfrelu pour l'expliquer) les différents éléments des missions Apollo 11, 12, 14, 15, 16 et 17, avec le bas des modules lunaires restés sur place, et pour les trois dernières, les traces et les restes des jeeps lunaires, figées pour l'éternité après leurs exploits. Plus fin encore (et moins clair,) on discerne quelques drapeaux toujours en place. D'autres n'ont pas tenu : celui d'Apollo 11 par exemple, était trop près du LEM et a sans doute été renversé lors du départ.

Quoi qu'il en soit, ces photos sont d'extraordinaires souvenirs de la « course à la Lune ». Et aussi un douloureux rappel pendant les années Obama, puisque si LRO est en orbite, tout le reste du programme Constellation a été annulé. Tout, ou presque. Car ce que l'on appelle [Artemis](#) aujourd'hui et qui utilise la capsule Orion, en est un assez proche descendant.

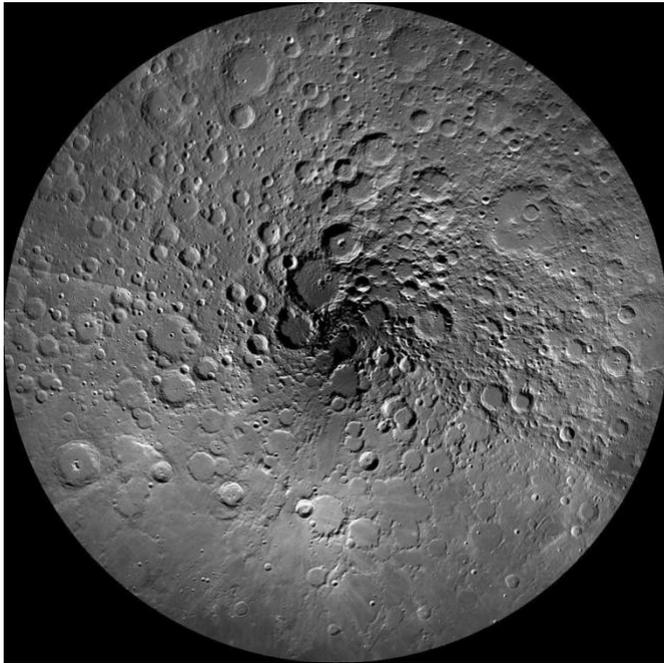


Photo du pôle nord réalisée à partir de 983 photos de LROC prises lorsque le pôle bénéficie de l'exposition la plus favorable au Soleil. Elle doit permettre d'identifier les zones en permanence à l'ombre.

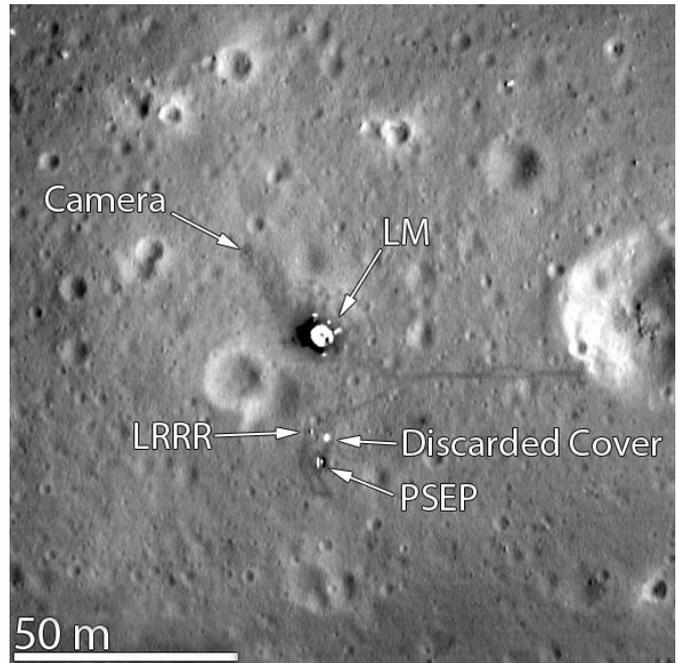


Image du site d'alunissage d'Apollo 11 prise par la sonde Lunar Reconnaissance Orbiter le 15 juillet 2009.

En plus de détecter l'arrivée de nouveaux véhicules sur la Lune ces dernières années (qu'ils soient réussis comme les modules Chang'E ou ratés comme Beresheet et Chandrayaan-2), LRO est toujours un précieux soutien pour les missions lunaires. Et la NASA compte bien dessus jusqu'à ce que son potentiel soit épuisé ! La mission CAPSTONE comptera par exemple sur LRO pour se repérer, puis les différents alunisseurs des missions publiques-privées CLPS auront aussi besoin de documenter leur arrivée : les équipes ne risquent pas de s'ennuyer. Il est même question de remplacer LRO d'ici la fin de la décennie, pour un véhicule plus petit mais avec une optique encore plus performante. D'ici là peut-être, l'orbiteur pourra prendre quelques humains en photo...

B) Les sondes chinoises sur la Lune

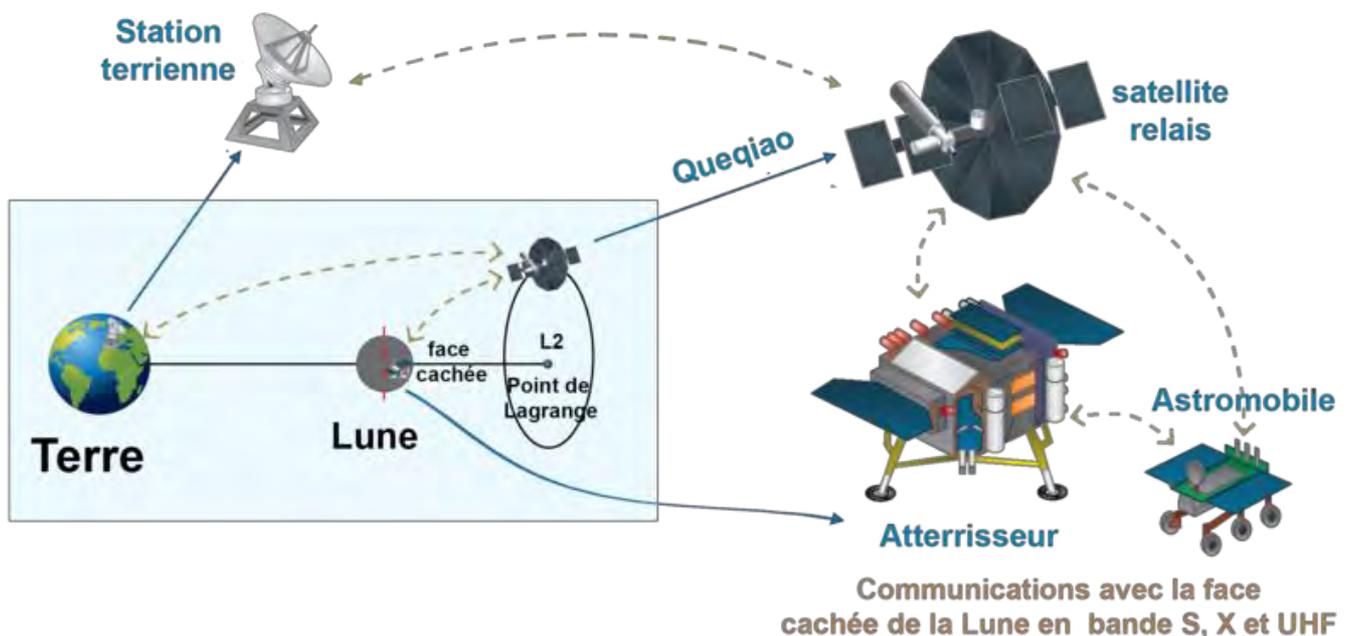
1) Chang'e 3 : (en chinois : 嫦娥三号 ; pinyin : *cháng'e sān hào*) est la troisième mission du programme *Chang'e* développé dans les années 2000 par l'administration spatiale nationale chinoise (CNSA) et qui vise l'exploration de la Lune par des engins automatiques.

Le 14 décembre 2013, *Chang'e 3* a déposé un astromobile (rover) baptisé *Yutu* (lapin de jade) au nord-ouest de la Mer des Pluies. L'événement réunissait plusieurs premières dans le programme spatial chinois : atterrissage en douceur sur un autre corps céleste, premier robot mobile et mise en œuvre d'un générateur thermoélectrique à radioisotope. L'atterrisseur comme le rover emportaient plusieurs instruments scientifiques pour analyser le sol lunaire, notamment un télescope fonctionnant dans l'ultraviolet. La mission était prévue durer trois mois pour le rover, un an pour l'atterrisseur. Mais, un peu plus d'un mois après l'atterrissage, *Yutu* a cessé d'émettre pour des raisons inexplicées ou non révélées par l'agence spatiale chinoise, après avoir parcouru une distance de 114 mètres.

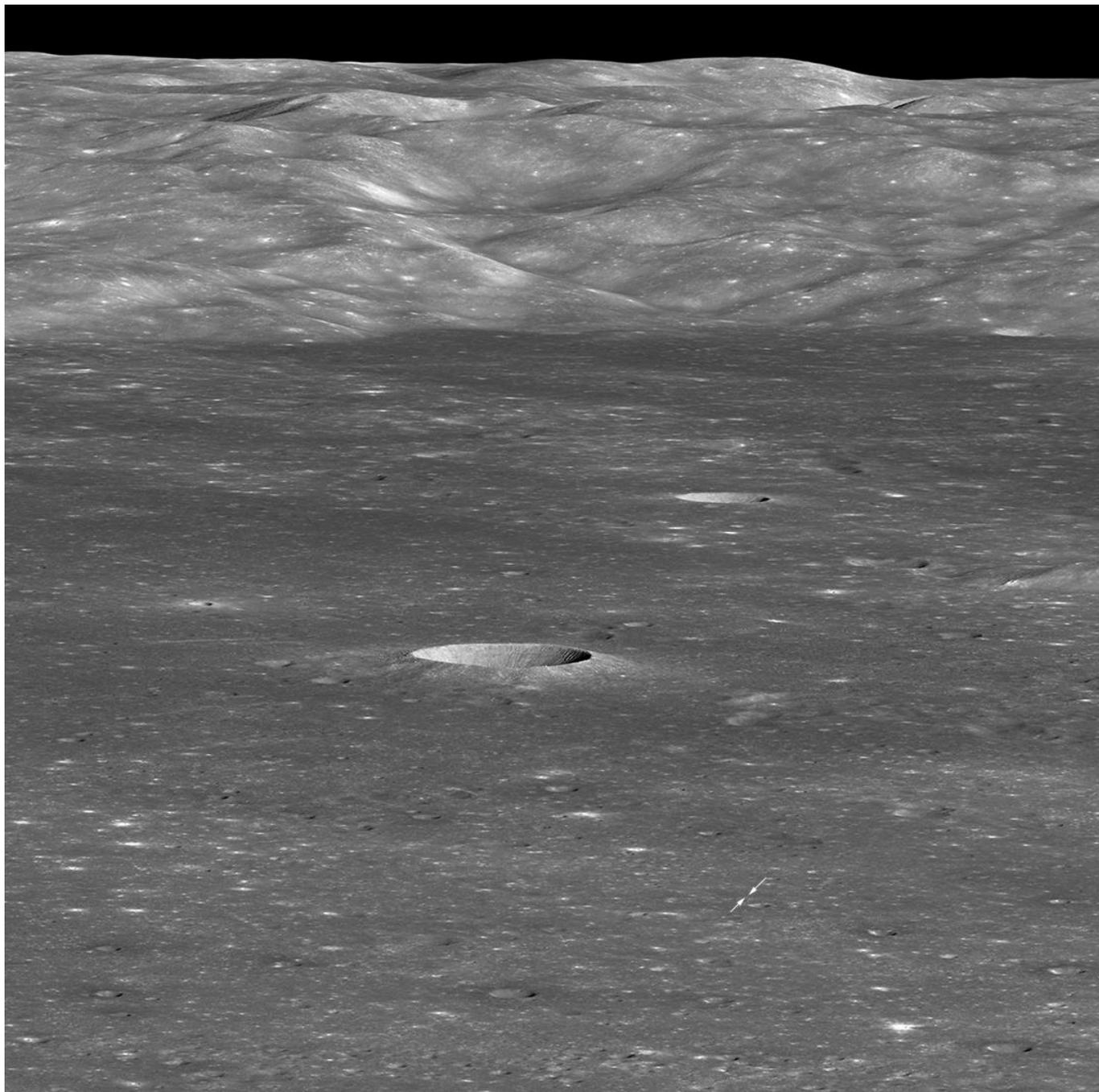
2) **Chang'e 4** : (du chinois : 嫦娥四号 ; pinyin : *cháng'e sì hào*, de *Chang'e*, déesse de la Lune dans la mythologie chinoise) est une sonde spatiale lunaire chinoise dont le lancement a eu lieu le 7 décembre 2018. L'engin est une réplique de la sonde lunaire Chang'e 3, lancée en 2013. C'est le 8^e engin spatial chinois lancé vers la Lune et le deuxième à s'y poser. Chang'e 4 comprend un atterrisseur et un rover. Les deux engins spatiaux emportent plusieurs instruments dont des caméras, un spectromètre infrarouge pour mesurer la composition du sol à proximité du rover et un radar détectant la structure superficielle du sous-sol ainsi qu'un spectromètre radio pour analyser les éruptions solaires. La mission primaire doit durer 90 jours.

La sonde spatiale s'est placée en orbite lunaire le 13 décembre. L'atterrisseur s'est posé sur la face cachée de la Lune le 3 janvier 2019 dans le cratère Von Kármán. Il s'agit du premier atterrissage d'un engin spatial sur cette face de la Lune. Un satellite de télécommunications, baptisé Queqiao a été placé au point de Lagrange L₂ du système Terre-Lune pour jouer le rôle de relais, la Lune faisant obstacle aux communications entre Chang'e 4 et la Terre.

Peu après l'atterrissage a été déposé le rover Yutu 2.



Panorama du site d'atterrissage



Localisation du lieu d'atterrissage de Chang'e 4 par le satellite américain LRO le 30 janvier 2019 (indiqué ici par deux flèches blanches), en bas à droite.

Voir liste complète des missions lunaires en Annexe 2.

IV Le programme Apollo : l'homme sur la Lune

Le **programme Apollo** est le programme spatial de la NASA mené durant la période 1961 – 1975 qui a permis aux États-Unis d'envoyer pour la première fois des hommes sur la Lune. Il fut lancé par John F. Kennedy le 25 mai 1961, essentiellement pour reconquérir le prestige américain mis à mal par les succès de l'aéronautique soviétique, à une époque où la guerre froide entre les deux superpuissances battait son plein. Le programme avait pour objectif de poser un homme sur la Lune avant la fin de la décennie. Le 21 juillet 1969, cet objectif était atteint par deux des trois membres d'équipage de la mission Apollo 11, Neil Armstrong et Buzz Aldrin. Cinq autres missions se sont posées par la suite sur d'autres sites lunaires et y ont séjourné jusqu'à trois jours. Ces expéditions ont permis de rapporter 382 kilogrammes de roche lunaire et de mettre en place plusieurs batteries d'instruments scientifiques. Les astronautes ont effectué des observations *in situ* au cours d'excursions sur le sol lunaire d'une durée pouvant atteindre 8 heures, assistés à partir d'Apollo 15 par un véhicule tout-terrain, le rover lunaire. Aucun vol orbital américain n'avait encore été réalisé en mai 1961. Pour remplir l'objectif fixé par le président, la NASA lança plusieurs programmes destinés à préparer les futures expéditions lunaires : le programme Gemini pour mettre au point les techniques de vol spatial et des programmes de reconnaissance (programme Surveyor, Ranger...) pour, entre autres, cartographier les zones d'atterrissage et déterminer la consistance du sol lunaire. Pour atteindre la Lune, les responsables finirent par se rallier à la méthode audacieuse du rendez-vous en orbite lunaire, qui nécessitait de disposer de deux vaisseaux spatiaux dont le module lunaire destiné à l'atterrissage sur la Lune. La fusée géante de 3 000 tonnes Saturn V, capable de placer en orbite basse 118 tonnes, fut développée pour lancer les véhicules de l'expédition lunaire. Le programme drainera un budget considérable (159 milliards de dollars US actuels) et mobilisera jusqu'à 400 000 personnes. Deux accidents graves sont survenus au cours du projet : l'incendie au sol du vaisseau spatial Apollo 1 dont l'équipage périt brûlé et qui entraîna un report de près de deux ans du calendrier et l'explosion d'un réservoir à oxygène du vaisseau spatial Apollo 13 dont l'équipage survécut en utilisant le module lunaire comme vaisseau de secours. Les missions lunaires ont permis d'avoir une meilleure connaissance de notre satellite naturel. Le programme Apollo a favorisé la diffusion d'innovations dans le domaine des sciences des matériaux et a contribué à l'essor de l'informatique ainsi que des méthodes de gestion de projet et de test. Les photos de la Terre, monde multicolore isolé dans un espace hostile, ainsi que celles de la Lune, monde gris et mort, ont favorisé une prise de conscience mondiale sur le caractère exceptionnel et fragile de notre planète. Le programme est à l'origine d'une scission dans la communauté scientifique et parmi les décideurs entre partisans d'une exploration robotique jugée plus efficace et ceux pour qui l'exploration humaine a une forte valeur symbolique, qui justifie son surcoût.

Le contexte : la guerre froide

Durant les années 1950, la guerre froide bat son plein entre les États-Unis et l'Union soviétique, les deux superpuissances de l'époque. Celle-ci se traduit par des affrontements militaires indirects (guerre de Corée), et une course aux armements qui porte notamment sur le développement de missiles intercontinentaux porteurs de têtes militaires nucléaires capables d'atteindre le territoire national de l'adversaire. Les deux pays développent ces fusées en s'appuyant largement sur les travaux et l'expertise de savants et techniciens allemands qui ont mis au point le premier engin de ce type lors de la Seconde Guerre mondiale, la fusée V2. L'Union soviétique prend une certaine avance en réussissant en 1956 le premier tir d'un missile intercontinental, la R-7 Semiorok, ancêtre direct de la fusée Soyouz. Cette fusée de 280 tonnes est particulièrement puissante car elle doit emporter une bombe A pesant 5 tonnes. Les missiles américains à longue portée développés plus tardivement, car conçus pour lancer des bombes H techniquement plus avancées donc beaucoup plus légères (1,5 tonne), sont de taille plus réduite et sont encore en phase de mise au point à la fin des années 1950.

La course à l'espace

En juillet 1955, les États-Unis et l'URSS annoncent, chacun de leur côté, qu'ils lanceront un satellite artificiel dans le cadre des travaux scientifiques prévus pour l'Année géophysique internationale (juillet 1957—décembre 1958). Début 1956, le concepteur de la Semiorok, Sergueï Korolev, réussit à convaincre les dirigeants soviétiques d'utiliser son missile comme lanceur spatial. À la surprise générale, le 4 octobre 1957, l'Union soviétique est la première à placer en orbite le satellite Spoutnik 1. L'opinion internationale est fascinée par cet événement qui semble présager le début d'une nouvelle ère technique et scientifique.

C'est un choc pour les responsables et l'opinion publique américains, jusqu'alors persuadés de leur supériorité technique. Les dirigeants soviétiques, d'abord surpris par l'impact de ce lancement, ne tardent pas à comprendre le prestige international que le régime peut retirer des succès de sa politique spatiale; ils décident de se lancer dans un programme ambitieux. À la même époque, le programme Vanguard, pendant américain du programme spatial russe lancé tardivement et trop ambitieux, enchaîne les échecs. L'équipe de Wernher von Braun parvient finalement à lancer le premier satellite américain, Explorer 1, le 1^{er} février 1958 grâce au lanceur Juno I improvisé à partir d'un missile balistique Redstone. Mais la petite taille de la charge utile comparée à celle de Spoutnik semble confirmer l'avance soviétique. Bien que réticent à investir massivement dans le spatial civil, le président américain Dwight D. Eisenhower décide le 29 juillet 1958 de la création d'une agence spatiale civile, la NASA, qui doit permettre de fédérer les efforts américains pour mieux contrer les réussites soviétiques : la course à l'espace est lancée. La même année voit le début du programme Mercury qui doit permettre la mise en orbite des premières missions habitées américaines. Mais les Soviétiques, qui disposent d'une avance importante et d'une fusée fiable pouvant emporter une grosse charge utile, continuent au cours des années suivantes de multiplier les premières : premier être vivant placé en orbite avec la chienne Laïka (Spoutnik 2), premier satellite à échapper à l'attraction terrestre (Luna 1), premier satellite à s'écraser sur la Lune (Luna 2), première photo de la face cachée de la Lune (Luna 3), premier être vivant à revenir vivant après un séjour dans l'espace (les chiens Belka et Strelka de Spoutnik 5), premier survol de Vénus (Venera 1).

Le lancement du programme Apollo



Le président Kennedy annonce le lancement du programme devant le Congrès américain, le 25 mai 1961

Lorsqu'il arrive au pouvoir en janvier 1961, le président américain John F. Kennedy est, comme son prédécesseur, peu enclin à donner des moyens importants au programme spatial civil. Mais le lancement du premier homme dans l'espace par les Soviétiques (Youri Gagarine, 12 avril 1961) le convainc de la nécessité de disposer d'un programme spatial ambitieux pour récupérer le prestige international perdu. L'échec du débarquement de la baie des Cochons (avril 1961) destiné à renverser le régime de Fidel Castro installé à Cuba, qui écorne un peu plus l'image des États-Unis auprès des autres nations, contribue également sans doute à son changement de position.

John Kennedy demande à son vice-président Lyndon B. Johnson de lui désigner un objectif qui permettrait aux États-Unis de reprendre le leadership à l'Union soviétique. Parmi les pistes évoquées figurent la création d'un laboratoire spatial dans l'espace et un simple survol lunaire. Le vice-président, qui est un ardent supporter du programme spatial, lui répond que la recherche et l'industrie américaine ont la capacité d'envoyer une mission habitée sur la Lune et lui recommande de retenir cet objectif. Le 25 mai 1961, le président annonce devant le Congrès des États-Unis le lancement d'un programme qui doit amener des astronautes américains sur le sol lunaire « avant la fin de la décennie ». Il confirme sa décision dans un autre discours resté célèbre, « *we choose to go to the Moon* », le 12 septembre 1962. La proposition du président reçoit un soutien enthousiaste des élus de tous les horizons politiques ainsi que de l'opinion publique, traumatisés par les succès de l'aéronautique soviétique. Le premier budget du

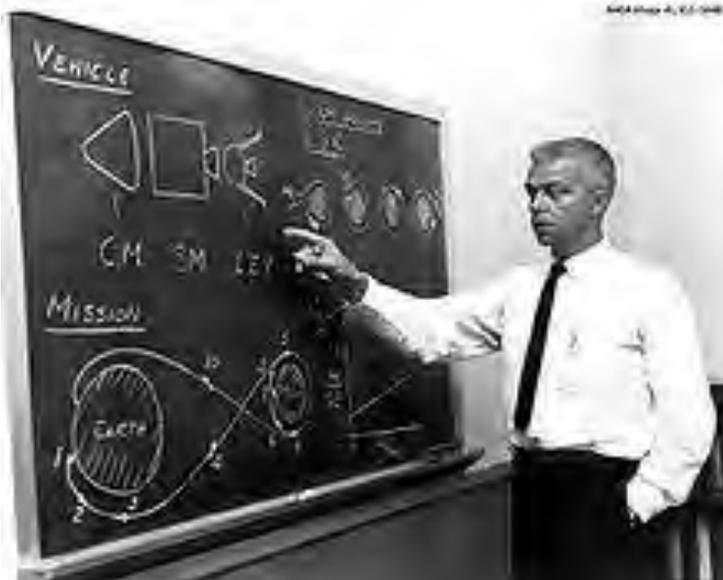
nouveau programme baptisé Apollo (nom choisi par Abe Silverstein à l'époque directeur des vols spatiaux habités) est voté à l'unanimité par le Sénat américain.

Les fonds alloués à la NASA vont passer de 400 millions de dollars en 1960 à 5,9 milliards de dollars en 1966, année de son budget le plus conséquent (environ 45 milliards valeur 2015). La NASA, grâce aux qualités manœuvrières de son administrateur James E. Webb, un vieux routier de la politique, put obtenir chaque année les fonds qu'elle souhaitait jusqu'au débarquement sur la Lune, même lorsque le soutien des élus commença à faiblir après 1963. James Webb sut en particulier s'assurer un appui solide auprès du président Lyndon B. Johnson qui avait succédé au président Kennedy assassiné en 1963.

Le développement du projet Apollo : Le choix de la méthode, le rendez-vous orbital lunaire

Dès 1959 des études sont lancées au sein de l'agence spatiale américaine dans une perspective à long terme, sur la manière de poser un engin habité sur la Lune. Trois scénarios principaux se dégagent :

- l'envoi direct d'un vaisseau sur la Lune (« Direct Ascent ») : une fusée de forte puissance, de type Nova, envoie le vaisseau complet; celui-ci atterrit sur la Lune puis en décolle avant de retourner sur la Terre;
- le rendez-vous orbital autour de la Terre (EOR pour « Earth-Orbit Rendez-vous ») : pour limiter les risques et le coût de développement de la fusée Nova, les composants du vaisseau sont envoyés en orbite terrestre par deux ou plusieurs fusées moins puissantes. Ces différents éléments sont assemblés en orbite en utilisant éventuellement une station spatiale comme base arrière. Le déroulement du vol du vaisseau, par la suite, est similaire à celui du premier scénario;
- le rendez-vous en orbite lunaire (LOR pour « Lunar Orbital Rendez-vous ») : une seule fusée est requise mais le vaisseau spatial comporte deux sous-ensembles qui se séparent une fois que l'orbite lunaire est atteinte. Un module dit « lunaire » se pose sur la Lune avec deux des trois astronautes et en décolle pour ramener les astronautes jusqu'au module dit « de commande », resté en orbite autour de la Lune, qui prend en charge le retour des astronautes vers la Terre. Cette solution permet d'économiser du poids par rapport aux deux autres scénarios (beaucoup moins de combustible est nécessaire pour faire atterrir puis décoller les hommes sur la Lune) et permet de concevoir un vaisseau destiné à sa mission proprement lunaire. En outre, la fusée à développer est moins puissante que celle requise par le premier scénario.



John Houbolt expliquant le scénario du LOR qu'il réussit à promouvoir non sans difficultés



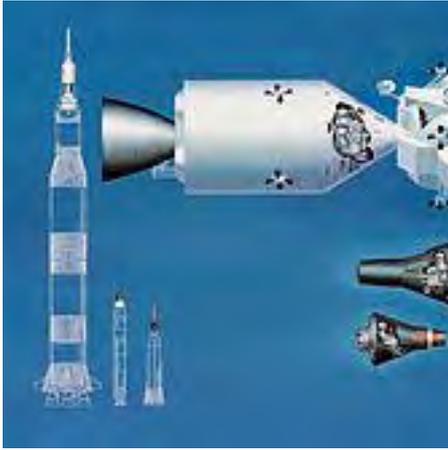
Logo du programme Apollo



Wernher von Braun, responsable du développement de la Saturn V, photographié devant le premier étage de la fusée

Lorsque le président américain John Kennedy donne à la NASA, en 1961, l'objectif de faire atterrir des hommes sur la Lune avant la fin de la décennie, l'évaluation de ces trois méthodes est encore peu avancée. L'agence spatiale manque d'éléments : elle n'a pas encore réalisé un seul véritable vol spatial habité (le premier vol orbital de la capsule Mercury n'a lieu qu'en septembre 1961). L'agence spatiale ne peut évaluer l'ampleur des difficultés soulevées par les rendez-vous entre engins spatiaux et elle ne maîtrise pas l'aptitude des astronautes à supporter de longs séjours dans l'espace et à y travailler; ses lanceurs ont essuyé par ailleurs une série d'échecs qui l'incite à la prudence dans ses choix techniques. Aussi, bien que le choix de la méthode conditionne les caractéristiques des véhicules spatiaux et des lanceurs à développer et que tout retard pris dans cette décision pèse sur l'échéance, la NASA va mettre plus d'un an, passé en études et en débats, avant que le scénario du LOR soit finalement retenu. Au début de cette phase d'étude, la technique du rendez-vous en orbite lunaire (LOR) est la solution qui a le moins d'appui malgré les démonstrations détaillées de John C. Houbolt du Centre de Recherche de Langley, son plus ardent défenseur. Aux yeux de beaucoup de spécialistes et responsables de la NASA, le rendez-vous entre module lunaire et module de commande autour de la lune paraît instinctivement trop risqué : si les modules n'arrivent pas à se rejoindre en orbite lunaire, les astronautes occupant le module lunaire n'ont pas le recours de freiner leur engin pour se laisser redescendre vers la Terre contrairement aux autres scénarios; ils sont alors condamnés à tourner indéfiniment autour de la Lune. Les avantages du LOR, en particulier le gain sur la masse à placer en orbite, ne sont pas appréciés à leur juste mesure. Toutefois, au fur et à mesure que les autres scénarios sont approfondis, le LOR gagne en crédibilité. Les partisans du vol direct, Max Faget et ses hommes du Centre des Vols Habités se rendent compte de la difficulté de faire atterrir un vaisseau complet sur le sol lunaire accidenté et aux caractéristiques incertaines. Wernher von Braun, qui dirige l'équipe du Centre de vol spatial Marshall qui doit développer le lanceur et est partisan d'un rendez-vous orbital terrestre, finit lui-même par être convaincu que le LOR est le seul scénario qui permettra de respecter l'échéance fixée par le président Kennedy. Au début de l'été 1962, alors que les principaux responsables de la NASA se sont tous convertis au LOR, ce scénario se heurte au veto de Jerome B. Wiesner, conseiller scientifique du président Kennedy. Le choix du LOR est finalement entériné le 7 novembre 1962. Dès juillet, 11 sociétés aérospatiales américaines sont sollicitées pour la construction du module lunaire sur la base d'un cahier des charges sommaire.

Un changement d'échelle



Le programme Apollo entraîne un changement d'échelle : comparaison des lanceurs et véhicules spatiaux des programmes Mercury, Gemini et Apollo



Le bâtiment d'assemblage (VAB) de la fusée Saturn V; la fusée de 110 mètres de haut en cours de déplacement donne l'échelle



Le premier étage de la fusée Saturn V en cours de construction au centre de Michoud

Le 5 mai 1961, quelques jours après le lancement du programme Apollo, l'astronaute Alan Shepard effectue le premier vol spatial américain (mission Mercury 3). En fait, il s'agit d'un simple vol suborbital car la fusée Mercury-Redstone utilisée (il n'y a pas d'autre lanceur disponible) n'a pas une puissance suffisante pour placer en orbite la petite capsule spatiale Mercury d'une masse un peu supérieure à une tonne. Le programme lunaire nécessite de pouvoir placer en orbite basse une charge utile de 120 tonnes. Le changement d'échelle qui en résulte est particulièrement important : la NASA va passer de la fusée de 30 tonnes qui a lancé Alan Shepard aux 3 000 tonnes de Saturn V qui nécessitera de développer des moteurs d'une puissance aujourd'hui inégalée ainsi que des technologies nouvelles comme l'utilisation de l'hydrogène liquide. Les effectifs affectés au programme spatial civil vont croître en proportion. Entre 1960 et 1963, le nombre d'employés de la NASA passe de 10 000 à 36 000. Pour accueillir ses nouveaux effectifs et disposer d'installations adaptées au programme lunaire, la NASA crée trois nouveaux centres entièrement affectés au programme Apollo aux périmètres précisément délimités : Le Manned Spacecraft Center (MSC), édifié en 1962 près de Houston au Texas, est destiné à la conception et la qualification des vaisseaux spatiaux (module lunaire et CSM), l'entraînement des astronautes et le suivi des missions à partir de leur décollage. Parmi les installations présentes sur le site, on trouve le centre de contrôle des missions, les simulateurs de vol et des équipements destinés à simuler les conditions spatiales et utilisés pour tester les livraisons des industriels. Le centre est dirigé par Robert Gilruth, ancien ingénieur de la NACA, qui joue un rôle de premier plan pour l'activité des vols habités américains depuis 1958. Contrairement aux deux autres établissements créés pour le programme Apollo, le MSC est activé dès le programme Gemini. Il emploie en 1964 15 000 personnes dont 10 000 employés de sociétés aérospatiales. Le Centre de vol spatial Marshall (George C. Marshall Space Flight Center ou MSFC) est une ancienne installation de l'Armée de Terre (Redstone Arsenal) située près de Huntsville dans l'Alabama transférée en 1960 à la NASA avec les spécialistes en majorité allemands de missiles balistiques dirigés par Wernher von Braun qui y travaillaient. Von Braun en restera le responsable jusqu'en 1970. Le centre est spécialisé dans la conception et la qualification des lanceurs de la famille Saturn. On y trouve des bancs d'essais, des bureaux d'étude et des installations d'assemblage. Les premiers exemplaires de la fusée Saturn I y sont construits avant que le reste de la production soit confié à l'industrie. Il emploiera jusqu'à 20 000 personnes. Le Centre spatial Kennedy (KSC), situé sur l'île Merritt en Floride, est le site d'où sont lancées les fusées géantes du programme Apollo. La NASA qui a besoin d'installations à l'échelle de la fusée Saturn V met en construction en 1963 cette nouvelle base de lancement qui jouxte celle de Cape Canaveral appartenant à l'Armée de l'Air américaine et d'où sont parties, jusqu'alors, toutes les missions habitées et les sondes spatiales de l'agence spatiale. Le centre

effectue la qualification de la fusée assemblée (« all up ») et contrôle les opérations sur le lanceur jusqu'à son décollage. Il emploie en 1965 environ 20 000 personnes. Au cœur du centre spatial, le complexe de lancement 39 comporte 2 aires de lancement (39A et 39B) et un immense bâtiment d'assemblage, le VAB (hauteur 140 mètres), dans lequel plusieurs fusées Saturn V peuvent être préparées en parallèle. Plusieurs plates-formes de lancement mobiles permettent de transporter la fusée Saturn assemblée jusqu'au site de lancement. Le premier lancement depuis le nouveau terrain est celui d'Apollo 4 en 1967. Jusqu'en 2011, le complexe était utilisé pour lancer la navette spatiale américaine. D'autres établissements de la NASA, jouent un rôle moins direct ou ne consacrent qu'une partie de leur activité au programme Apollo. En 1961, le Centre spatial John C. Stennis est édifié dans l'État du Mississippi. Le nouveau centre dispose de bancs d'essais utilisés pour tester les moteurs-fusées développés pour le programme. L'Ames Research Center est un centre de recherche ancien (1939) situé en Californie dont les souffleries sont utilisées pour mettre au point la forme de la capsule Apollo en vue de sa rentrée dans l'atmosphère terrestre. Le Langley Research Center (1914), situé à Hampton (Virginie) abrite également de nombreuses souffleries. Il a servi jusqu'en 1963 de siège au MSC et continue, par la suite, à abriter certains simulateurs du programme. Le Jet Propulsion Laboratory (1936), près de Los Angeles (Californie), est spécialisé dans le développement des sondes spatiales. C'est dans ce centre que sont conçues les familles de sondes spatiales qui vont permettre de reconnaître l'environnement lunaire (programme Surveyor, etc.).

Le rôle de l'industrie astronautique

Les principales entreprises de l'aéronautique sont fortement impliquées dans le programme qui se traduit par un accroissement considérable des effectifs (le personnel affecté aux projets de la NASA passe durant cette période de 36 500 à 376 500) et la construction d'établissements de grande taille. La société californienne North American, avionneur célèbre pour avoir construit les B-25 et le chasseur Mustang durant la Seconde Guerre mondiale, va jouer un rôle central dans le programme. L'arrêt et l'échec de plusieurs projets aéronautiques ont conduit son président à miser sur le développement de l'aéronautique. La société s'est déjà distinguée dans le domaine en produisant l'avion fusée X-15. Pour le programme Apollo, la société fournit pratiquement tous les composants sensibles hormis le module lunaire qui est confié à la société Grumman implantée à Bethpage, Long Island (État de New York). La division moteur Rocketdyne de North American fabrique les deux principaux moteurs-fusées les J-2 et F-1 dans l'usine de Canoga Park, tandis que sa division Espace construit le deuxième étage de la Saturn V à Seal Beach et le module de commande et de service Apollo à Downey. L'incendie du vaisseau Apollo 1 et de nombreux problèmes rencontrés dans le développement du programme entraîneront la fusion de North American avec la société Rockwell Standard Corporation en 1967; le nouveau groupe développera dans les années 1970-1980 la navette spatiale américaine avant d'être absorbé en 1996 par Boeing. La société McDonnell Douglas construit le troisième étage de la Saturn V à Huntington Beach en Californie tandis que le premier étage est construit dans l'établissement de Michoud (Louisiane) de la NASA par la société Chrysler. Parmi les fournisseurs de premier plan figure le laboratoire des instruments du Massachusetts Institute of Technology (MIT) qui conçoit le système de pilotage et de navigation des deux vaisseaux habités Apollo.

Premiers pas sur la Lune de Buzz Aldrin le 21 juillet 1969 lors de la mission Apollo 11 avec sa combinaison spatiale A7L



Lancement de la fusée Saturn V de la mission Apollo 11



Le centre de contrôle de tir lors du lancement d'Apollo 12. À l'époque les terminaux des contrôleurs disposent d'interfaces rudimentaires (1969)



Un défi technique et organisationnel sans précédent

Le projet Apollo a constitué un défi sans précédent sur le plan de la technique et de l'organisation : il fallait mettre au point un lanceur spatial dont le gigantisme générait des problèmes jamais rencontrés jusque-là, deux nouveaux moteurs innovants par leur puissance (F-1) ou leur technologie (J-2), des vaisseaux spatiaux d'une grande complexité avec une exigence de fiabilité élevée (probabilité de perte de l'équipage inférieure à 0,1 %) et un calendrier très tendu (8 ans entre le démarrage du programme Apollo et la date butoir fixée par le président Kennedy pour le premier atterrissage sur la Lune d'une mission habitée). Le programme a connu de nombreux déboires durant la phase de développement qui ont tous été résolus grâce à la mise à disposition de ressources financières exceptionnelles avec un point culminant en 1966 (5,5 % du budget fédéral alloué à la NASA), mais également une mobilisation des acteurs à tous les niveaux et la mise au point de méthodes organisationnelles (planification, gestion de crises, gestion de projet) qui ont fait école par la suite dans le monde de l'entreprise. La mise au point du moteur F-1, d'architecture conventionnelle mais d'une puissance exceptionnelle (2,5 tonnes d'ergols brûlés par seconde) fut très longue à cause de problèmes d'instabilité au niveau de la chambre de combustion qui ne furent résolus qu'en combinant études empiriques (comme l'utilisation de petites charges explosives dans la chambre de combustion) et travaux de recherche fondamentale. Le deuxième étage de la fusée Saturn V, qui constituait déjà un tour de force technique du fait de la taille de son réservoir d'hydrogène, eut beaucoup de mal à faire face à la cure d'amaigrissement imposée par l'augmentation de la charge utile au fur et à mesure de son développement. Mais les difficultés les plus importantes touchèrent les deux modules habités du programme : le CSM et le module lunaire Apollo. Le lancement du développement du module lunaire avait pris un an de retard à cause des atermoiements sur le scénario du débarquement lunaire. Il s'agissait d'un engin entièrement nouveau pour lequel aucune expérience antérieure ne pouvait être utilisée, par ailleurs très complexe du fait de son rôle. Les problèmes multiples — masse nettement supérieure aux prévisions initiales, difficulté de mise au point des logiciels indispensables à la mission, qualité déficiente, motorisation — entraînent des retards tellement importants qu'ils mirent à un moment en danger la tenue de l'échéance du programme tout entier. Les tests prennent une importance considérable dans le cadre du programme puisqu'ils représentent près de 50 % de la charge de travail totale. L'avancée de l'informatique permet pour la première fois dans un programme astronautique, de dérouler automatiquement la séquence des tests et l'enregistrement des mesures de centaines de paramètres (jusqu'à 1000 pour un étage de la fusée Saturn V) ce qui permet aux ingénieurs de se concentrer sur l'interprétation des résultats et réduit la durée des phases de qualification. Chaque étage de la fusée Saturn V subit ainsi quatre séquences de test : un test sur le site du constructeur, deux sur le site du MSFC, avec et sans mise à feu avec des séquences de test par sous-système puis répétition du compte à rebours et un test d'intégration enfin au centre spatial Kennedy une fois la fusée assemblée.

Budget de la NASA entre 1959 et 1970 (en milliards de dollars)												
Année	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
Budget du programme Apollo				0,535	1,285	2,27	2,51	2,97	2,91	2,556	2,025	1,75
Budget total de la NASA	0,145	0,401	0,744	1,257	2,552	4,171	5,093	5,933	5,426	4,724	4,253	3,755
Budget NASA (en % du budget de l'État fédéral)	0,2	0,5	0,9	1,4	2,8	4,3	5,3	5,5	3,1	2,4	2,1	1,7

Les astronautes : recrutement, rôle et entraînement

Le premier groupe de 7 astronautes sélectionnés pour le programme Mercury avait été recruté parmi les pilotes d'essais militaires ayant un diplôme de niveau minimum licence dans des domaines touchant à l'ingénierie, âgés de moins de 40 ans et satisfaisant une batterie de critères physiques et psychologiques. Les vagues de recrutement effectuées en 1962 (9 astronautes du groupe 2), 1963 (14 astronautes du groupe 3) et 1966 (15 astronautes du groupe 5) utilisent les mêmes critères de sélection en abaissant l'âge à 35 puis 34 ans, diminuant l'exigence en nombre d'heures de vol et élargissant la gamme des diplômes acceptés. En parallèle, deux groupes d'astronautes scientifiques détenteurs d'un doctorat sont recrutés en 1965 (groupe 4) et 1967 (groupe 6) dont un seul volera. Les astronautes passent beaucoup de temps dans les simulateurs du CSM et du module lunaire mais reçoivent également, entre autres, des cours d'astronomie pour la navigation astronomique, de géologie pour les préparer à l'identification des roches

lunaires et de photographie. Ils passent de nombreuses heures de vol sur des avions d'entraînement à réaction T-38 pour maintenir leur compétence de pilote (3 astronautes du groupe 3 se tueront en s'entraînant sur T-38). Ils sont impliqués très en amont dans le processus de conception et de mise au point des vaisseaux habités. Enfin, on leur demande de consacrer une partie de leur temps à des tâches de relations publiques qui se traduisent par des tournées dans les entreprises qui participent au projet. Deke Slayton joue un rôle officieux mais effectif de chef des astronautes en sélectionnant les équipages de chaque mission et défendant le point de vue des astronautes durant l'élaboration du projet et des missions. Les véhicules spatiaux Apollo sont initialement conçus pour donner une autonomie complète à l'équipage en cas de coupure des communications avec le centre de contrôle à Terre. Cette autonomie procurée par les programmes du système de navigation et de pilotage sera dans les faits fortement réduite lorsque les procédures suivies par les missions Apollo seront figées : c'est le contrôle au sol à Houston qui fournira les principaux paramètres tels que la position du vaisseau spatial ainsi que le vecteur de la poussée avant chaque allumage des moteurs. Houston dispose au moment des premiers vols vers la Lune de moyens de calcul plus puissants et, grâce à la télémesure, connaît parfaitement la position des vaisseaux et leur trajectoire. Une fois une phase de vol engagée, c'est toutefois à l'ordinateur de bord d'appliquer les corrections nécessaires en se basant sur ses capteurs et ses capacités de calcul. Par ailleurs, l'ordinateur joue un rôle essentiel pour le contrôle des moteurs (fonction autopilote) et gère de nombreux sous-systèmes, ce qui lui vaut le surnom de quatrième homme de l'équipage. Sans l'ordinateur, les astronautes n'auraient pu poser le module lunaire sur la Lune car lui seul pouvait optimiser suffisamment la consommation de carburant pour se contenter des faibles marges disponibles.



L'équipage d'Apollo 8 (de gauche à droite James A. Lovell Jr., William A. Anders et Frank Borman) devant un des simulateurs du Centre spatial Kennedy

La recherche de fiabilité



Le retour sur Terre d'Apollo 15. Un des parachutes s'est mis en torche mais leurs dimensions avaient été prévues pour que deux suffisent

La NASA est, dès le lancement du projet, très sensible aux problèmes de fiabilité. L'envoi d'astronautes sur le sol lunaire est une entreprise beaucoup plus risquée que les vols spatiaux autour de la Terre. Pour les missions en orbite terrestre, en cas d'incident grave, le retour est assuré relativement facilement par une brève poussée des rétrofusées. Par contre, une fois que le vaisseau a quitté l'orbite terrestre, un retour des astronautes sur Terre nécessite que les principaux sous-systèmes ne connaissent aucune défaillance. De manière assez empirique, la NASA avait déterminé que les composants du vaisseau devaient permettre d'atteindre une probabilité de succès de mission de 99 % tandis que la probabilité de perte de l'équipage devait être inférieure à 0,1 % en ne tenant pas compte des micro-météorites et des rayons cosmiques dont les effets étaient mal connus à l'époque. L'architecture des sous-systèmes et la qualité des composants élémentaires des véhicules et du lanceur devaient donc respecter ces objectifs. Des choix techniques garantissant une grande fiabilité sont retenus sur le module lunaire comme sur le module de commande et de service. Les ergols liquides utilisés par les moteurs sont hypergoliques, c'est-à-dire qu'ils s'enflamment spontanément quand ils sont mis en contact et ne sont pas à la merci d'un système d'allumage défaillant. Leur mise sous pression est effectuée classiquement grâce à de l'hélium supprimant le recours à une fragile turbopompe. Pour parvenir au taux de fiabilité visé sur les autres sous-systèmes, la NASA envisage d'abord de donner aux astronautes la possibilité de réparer les composants défaillants.

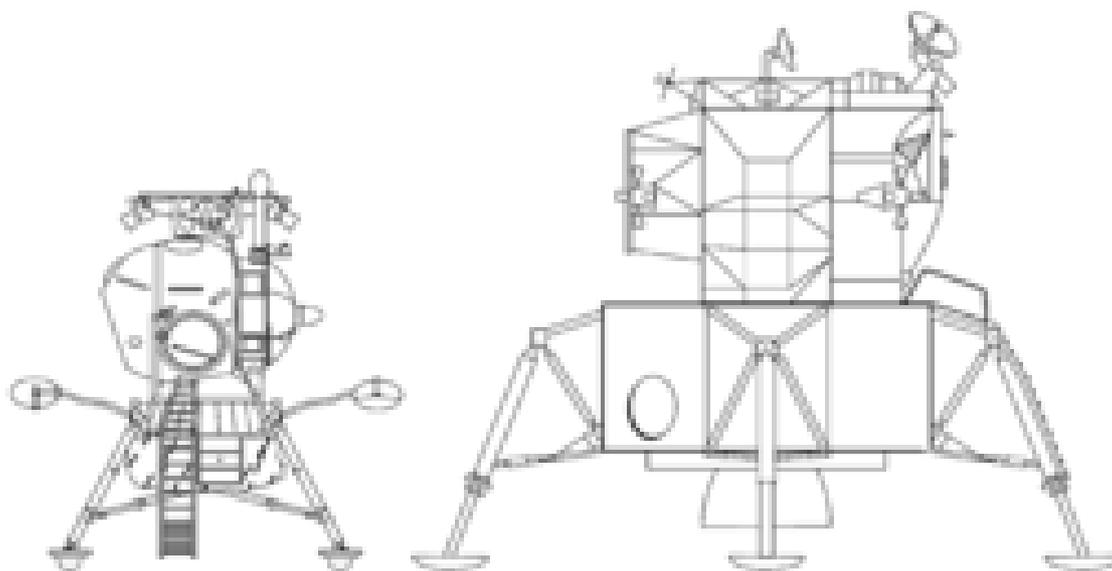
Mais ce choix suppose de former les astronautes à des systèmes nombreux et complexes, d'emporter des outils et des pièces de rechange et de rendre accessibles les composants à réparer, ce qui les rend vulnérables à l'humidité et à la contamination. La NASA renonce à cette solution en 1964 et décide d'intégrer dans la conception du vaisseau des solutions de contournement permettant de pallier toute anomalie affectant un sous-système critique.

En cas de panne, des systèmes de secours prennent le relais dans un mode plus ou moins dégradé. Ainsi, le système de navigation du module lunaire (ordinateur et système inertiel) est doublé par un système de secours développé par un autre constructeur pour éviter qu'une même faille logicielle mette en panne les deux systèmes. Les quatre groupes de moteurs de contrôle d'attitude sont regroupés par paires indépendantes, chacune d'entre elles pouvant couvrir le besoin en mode dégradé. Le système de régulation thermique est doublé. Les circuits d'alimentation électrique sont également doublés. L'antenne de télécommunications en bande S peut être remplacée par deux antennes plus petites en cas de défaillance. Il n'y a néanmoins pas de parade à une panne de moteur : seuls des tests poussés avec un maximum de réalisme peuvent permettre d'atteindre le taux de fiabilité attendu. Des solutions techniques conservatrices mais éprouvées sont dans certains cas retenues. C'est le cas de l'énergie électrique sur le module lunaire (choix des batteries), des systèmes pyrotechniques (choix de systèmes existants standardisés et éprouvés) ainsi que l'électronique de bord (les circuits intégrés, bien qu'acceptés dans les ordinateurs, ne sont pas retenus pour le reste de l'électronique). Selon Neil Armstrong, les responsables

du projet avaient calculé qu'il y aurait environ 1 000 anomalies à chaque mission Apollo (fusée, CSM et LEM), chiffre extrapolé du nombre de composants et du taux de fiabilité exigé des constructeurs. Il y en aura en fait en moyenne 150, ce qu'Armstrong attribue à l'implication exceptionnellement forte des personnes ayant travaillé sur le projet.

Le programme lunaire soviétique en toile de fond

Depuis Spoutnik 1, les dirigeants de l'Union Soviétique et les responsables du programme spatial soviétique avaient toujours fait en sorte de maintenir leur avance sur le programme américain. Il ne faisait aucun doute dans l'esprit des dirigeants américains comme dans celui de l'opinion publique que l'URSS allait lancer son propre programme de vol habité vers la Lune et tenter de réussir avant les États-Unis pour conserver le prestige associé à leur domination durant la première phase de la course à l'espace. Néanmoins, après une déclaration publique en 1961 d'un dirigeant soviétique semblant relever le défi, aucune information officielle ne filtrera plus sur l'existence d'un programme lunaire habité soviétique au point de susciter le doute sur son existence chez certains représentants du congrès américain qui commencèrent, pour cette raison, à contester le budget alloué au programme Apollo à compter de 1963. Cependant, pour les dirigeants de la NASA, la menace d'une réussite soviétique exerça une pression constante sur le calendrier du programme Apollo : la décision de lancer la mission circumlunaire Apollo 8, alors que le vaisseau spatial Apollo n'était pas complètement qualifié, constituait une certaine prise de risque, qui avait été largement motivée par la crainte de se faire devancer par les Soviétiques. Certains indices contribuèrent par la suite à diminuer la pression sur les décideurs de la NASA dans la dernière ligne droite qui précéda le lancement d'Apollo 11. Au cours des années 1970, aucune information ne filtra sur la réalité du programme soviétique et dans l'atmosphère de désenchantement qui suivit la fin du programme Apollo, le célèbre journaliste américain Walter Cronkite annonça gravement à son public que l'argent dépensé pour celui-ci avait été gaspillé, car « les Russes n'avaient jamais été dans la course ». Ce n'est qu'avec la glasnost à la fin des années 1980 que commenceront à paraître quelques informations sur le sujet et il fallut attendre la chute de l'URSS pour que la réalité du programme lunaire soviétique soit reconnue par les dirigeants russes.



Pour compenser la puissance plus faible du lanceur N-1, les Soviétiques avaient conçu un module lunaire beaucoup plus léger (ici à gauche du module américain) transportant un seul cosmonaute

À compter du début des années 1960, le programme spatial habité soviétique, si performant jusque-là, tourne à la confusion. Sergueï Korolev, à l'origine des succès les plus éclatants de l'aéronautique soviétique, commence à concevoir à cette époque la fusée géante N-1 pour laquelle il réclame le développement de moteurs cryogéniques performants (c'est-à-dire utilisant de l'hydrogène comme ceux en cours de développement chez les Américains) mais se heurte au refus de Valentin Glouchko qui possède un monopole sur la fabrication des moteurs-fusées. Aucun programme lunaire n'est lancé en 1961

car les responsables soviétiques sont persuadés que la NASA court à l'échec. Le premier secrétaire du PCUS Nikita Khrouchtchev demande en juin 1961 à son protégé Vladimir Tchelomeï, rival de Korolev, de développer un lanceur, le Proton et un vaisseau LK-1 (LK pour *Lounnyï korabl'* - Лунный корабль - vaisseau lunaire) en vue d'un vol habité circumlunaire. Korolev riposte en proposant une mission de débarquement lunaire basée sur un vaisseau concurrent, le Soyouz (Союз), apte à des rendez-vous en orbite et un module d'atterrissage L3. Constatant les progrès américains, Khrouchtchev décide finalement le 3 août 1964, avec 3 ans de retard, de lancer les équipes soviétiques dans la course à la Lune : les programmes Proton (Протон) / Zond (Зонд, « sonde ») de survol de la Lune par une sonde inhabitée et N1-L3 de débarquement d'un cosmonaute sur la Lune de Korolev reçoivent alors le feu vert du Politburo. Toutefois, le limogeage de Khrouchtchev, remplacé par Léonid Brejnev à la tête du Parti communiste de l'URSS en octobre de la même année, se traduit par de nouveaux attermolements et des problèmes dans la répartition des ressources budgétaires entre les deux programmes. Gravement handicapé par la mort de Korolev en 1966 et par l'insuffisance des moyens financiers, le développement de la fusée N-1 rencontre des problèmes majeurs (4 vols, 4 échecs en 1969-1971) qui conduisent à son abandon le 2 mai 1974. C'est la fin des ambitions lunaires de l'URSS. Le lanceur Proton comme le vaisseau Soyouz après des débuts laborieux jouent aujourd'hui un rôle central dans le programme spatial russe.

Les composants du programme Apollo

Les principaux composants du programme Apollo sont la famille de lanceurs Saturn ainsi que les deux vaisseaux habités : le CSM et le module lunaire. Pour le séjour sur la Lune, un véhicule est développé ainsi qu'un ensemble d'instruments scientifiques, l'ALSEP.

Les fusées Saturn

Trois types de lanceurs sont développés dans le cadre du programme Apollo : Saturn I qui va permettre de confirmer la maîtrise du mélange LOX/LH₂, Saturn IB utilisé pour les premiers tests du vaisseau Apollo en orbite terrestre et enfin, le lanceur lourd Saturn V dont les performances exceptionnelles et jamais dépassées depuis, permettront les missions lunaires.

Un lanceur lourd pour les satellites militaires

Les débuts de la famille de lanceurs Saturn sont antérieurs au programme Apollo et à la création de la NASA. Début 1957, le Département de la Défense (DOD) américain identifie un besoin pour un lanceur lourd permettant de placer en orbite des satellites de reconnaissance et de télécommunications pesant jusqu'à 18 tonnes. À cette époque, les lanceurs américains les plus puissants en cours de développement peuvent tout au plus lancer 1,5 tonne en orbite basse car ils dérivent de missiles balistiques beaucoup plus légers que leurs homologues soviétiques. En 1957, Wernher von Braun et son équipe d'ingénieurs, venus comme lui d'Allemagne, travaillent à la mise au point des missiles intercontinentaux Redstone et Jupiter au sein de l'Army Ballistic Missile Agency (ABMA), un service de l'Armée de Terre situé à Huntsville (Alabama). Cette dernière lui demande de concevoir un lanceur permettant de répondre à la demande du DOD. Von Braun propose un engin, qu'il baptise Super-Jupiter, dont le premier étage, constitué de 8 étages Redstone regroupés en fagot autour d'un étage Jupiter, fournit les 680 tonnes de poussée nécessaires pour lancer les satellites lourds. La course à l'espace, qui débute fin 1957, décide le DOD, après examen de projets concurrents, à financer en août 1958 le développement de ce nouveau premier étage rebaptisé Juno V puis finalement Saturn (la planète située au-delà de Jupiter). Le lanceur utilise, à la demande du DOD, 8 moteurs-fusées H-1 simple évolution du propulseur utilisé sur la fusée Jupiter, ce qui doit permettre une mise en service rapide.



Lancement de la fusée Saturn V transportant l'équipage d'Apollo 11 qui sera le premier à se poser sur la Lune



Le moteur cryogénique J2 développé à compter de 1961 pour la propulsion des étages supérieurs de la fusée Saturn

La récupération du projet Saturn par la NASA

Durant l'été 1958, la NASA, qui vient tout juste d'être créée, identifie le lanceur comme un composant clé de son programme spatial. Mais début 1959, le Département de la Défense décide d'arrêter ce programme coûteux dont les objectifs sont désormais couverts par d'autres lanceurs en développement. La NASA obtient le transfert en son sein du projet et des équipes de von Braun fin 1959; celui-ci est effectif au printemps 1960 et la nouvelle entité de la NASA prend le nom de Centre de vol spatial Marshall (George C. Marshall Space Flight Center MSFC). La question des étages supérieurs du lanceur était jusque-là restée en suspens : l'utilisation d'étages de fusée existants, trop peu puissants et d'un diamètre trop faible, n'était pas satisfaisante. Fin 1959, un comité de la NASA travaille sur l'architecture des futurs lanceurs de la NASA. Son animateur, Abe Silverstein, responsable du centre de recherche Lewis et partisan de la propulsion par des moteurs utilisant le couple hydrogène/oxygène en cours d'expérimentation sur la fusée Atlas-Centaur, réussit à convaincre un von Braun réticent d'en doter les étages supérieurs de la fusée Saturn. Le comité identifie dans son rapport final six configurations de lanceur de puissance croissante (codés A1 à C3) permettant de répondre aux objectifs de la NASA tout en procédant à une mise au point progressive du modèle le plus puissant. Le centre Marshall étudie en parallèle à l'époque un lanceur hors normes capable d'envoyer une mission vers la Lune : cette fusée baptisée Nova, est dotée d'un premier étage fournissant 5 300 tonnes de poussée et est capable de lancer 81,6 tonnes sur une trajectoire interplanétaire.

Les Saturn IB et V dans leurs configurations définitives

Lorsque le président Kennedy accède au pouvoir début 1961, les configurations du lanceur Saturn sont toujours en cours de discussion, reflétant l'incertitude sur les missions futures du lanceur. Toutefois, dès juillet 1960, Rocketdyne, sélectionné par la NASA, avait démarré les études sur le moteur J-2 consommant hydrogène et oxygène et d'une poussée de 89 tonnes retenu pour propulser les étages supérieurs. Le même motoriste travaillait depuis 1956, initialement à la demande de l'armée de l'Air, sur l'énorme moteur F-1 (677 tonnes de poussée) retenu pour le premier étage. Fin 1961, la configuration du

lanceur lourd (C-5 futur Saturn V) est figée : le premier étage est propulsé par cinq F-1, le deuxième étage par cinq J-2 et le troisième par un J-2. L'énorme lanceur peut placer 113 tonnes en orbite basse et envoyer 41 tonnes vers la Lune. Deux modèles moins puissants doivent être utilisés durant la première phase du projet :

- la C-1 (ou Saturn I), utilisée pour tester des maquettes des vaisseaux Apollo, est constituée d'un premier étage propulsé par huit moteurs H-1 couronné d'un second étage propulsé par six RL-10;
- la C-1B (ou Saturn IB), chargée de qualifier les vaisseaux Apollo sur l'orbite terrestre, est constituée du 1^{er} étage de la S-1 couronné du troisième étage de la C-5.

Fin 1962, le choix du scénario du rendez-vous en orbite lunaire (LOR) confirme le rôle du lanceur Saturn V et entraîne l'arrêt des études sur le lanceur Nova.

Caractéristiques des lanceurs Saturn			
Lanceur	Saturn I	Saturn IB	Saturn V
Charge utile en orbite basse (LEO) injection vers la Lune (TLI)	9 t (LEO)	18,6 t (LEO)	118 t (LEO) 47 t (TLI)
1 ^{er} étage	S-I (poussée 670 t) 8 moteurs H-1 (LOX/Kérosène)	S-IB (poussée 670 t) 8 moteurs H-1 (LOX/Kérosène)	S-IC (Poussée 3 402 t) 5 moteurs F-1 (LOX/Kérosène)
2 ^e étage	S-IV (Poussée 40 t.) 6 RL-10 (LOX/LH2)	S-IVB (Poussée 89 t.) 1 moteur J-2 (LOX/LH2)	S-II (Poussée 500 t.) 5 moteurs J-2 (LOX/LH2)
3 ^e étage	-	-	S-IVB (Poussée 100 t.) 1 moteur J-2 (LOX/LH2)
Vols	10 (1961-1965) Satellites Pegasus, maquette du CSM	9 (1966-1975) Qualification CSM, relève Skylab, vol Apollo-Soyouz	13 (1967-1973) missions lunaires et lancement Skylab

Le vaisseau Apollo (CSM)

Le véhicule spatial Apollo (ou module de commande et de service abrégé en CSM) transporte les astronautes à l'aller et au retour. Pesant plus de 30 tonnes, il est pratiquement dix fois plus lourd que le vaisseau Gemini. La masse supplémentaire (21,5 tonnes) est en grande partie représentée par le moteur et les ergols qui fournissent un delta-v de 2 800 m/s permettant au vaisseau de s'insérer en orbite lunaire puis de quitter cette orbite. Le vaisseau Apollo reprend une disposition inaugurée avec le vaisseau Gemini : un module de commande (CM) abrite l'équipage et un module de service (SM) contient le moteur de propulsion principal, l'essentiel des sources d'énergie ainsi que l'équipement nécessaire à la survie des astronautes. Le module de service est largué juste avant l'atterrissage.

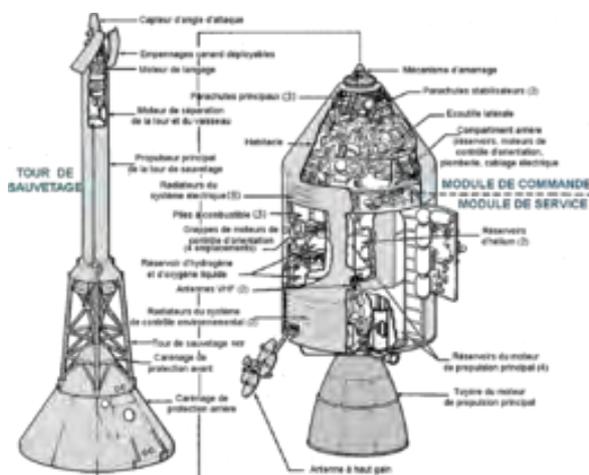


Schéma du vaisseau Apollo et de la tour de sauvetage

Le module de commande

Le module de commande Apollo est la partie dans laquelle les trois astronautes séjournent durant la mission, sauf lorsque deux d'entre eux descendent sur la Lune au moyen du module lunaire. Pesant 6,5 tonnes et de forme conique, sa structure externe comporte une double paroi : une enceinte constituée de tôles et nid d'abeilles à base d'aluminium qui renferme la zone pressurisée et un bouclier thermique qui recouvre la première paroi et dont l'épaisseur varie en fonction de l'exposition durant la rentrée atmosphérique. Le bouclier thermique est réalisé avec un matériau composite constitué de fibres de silice et microbilles de résine, dans une matrice de résine époxy. Ce matériau est inséré dans un nid d'abeille en acier.



Le vaisseau Apollo en orbite lunaire le 2 août 1971

L'espace pressurisé représente un volume de 6,5 m³. Les astronautes sont installés sur 3 couchettes côte à côte parallèles au fond du cône et suspendues à des poutrelles partant du plancher et du plafond (la pointe du cône). En position allongée, les astronautes ont en face d'eux, suspendu au plafond, un panneau de commandes large de deux mètres et haut de un mètre présentant les principaux interrupteurs et voyants de contrôles. Les cadrans sont répartis en fonction du rôle de chaque membre d'équipage. Sur les parois latérales se trouvent des baies réservées à la navigation, d'autres panneaux de commande ainsi que des zones de stockage de nourriture et de déchets. Pour la navigation et le pilotage, les astronautes utilisent un télescope et un ordinateur qui exploite les données fournies par une centrale inertielle.

Le vaisseau dispose de deux écoutilles : l'une située à la pointe du cône comporte un tunnel et est utilisée pour passer dans le module lunaire lorsque celui-ci est amarré au vaisseau Apollo. L'autre placée sur la paroi latérale est utilisée à Terre pour pénétrer dans le vaisseau et dans l'espace pour les sorties extra véhiculaires (le vide est alors effectué dans la cabine car il n'y a pas de sas). Les astronautes disposent par ailleurs de 5 hublots pour effectuer des observations et réaliser les manœuvres de rendez-vous avec le module lunaire. Le module de commande dépend pour les principales manœuvres comme pour l'énergie et le support-vie du module de service. Il dispose de 4 grappes de petits moteurs d'orientation permettant les manœuvres lors de la rentrée. Celles-ci s'effectuent en orientant le module en roulis, la capsule ayant une incidence voisine de 25 à 30 degrés par rapport à son axe de symétrie. Cette incidence est obtenue par balourd statique de construction.

Le module de service

Le module de service (SM ou « Service Module » en anglais) est un cylindre d'aluminium non pressurisé de 5 mètres de long et 3,9 mètres de diamètre pesant 24 tonnes. Il est accouplé à la base du module de commande et la longue tuyère du moteur-fusée principal de 9 tonnes de poussée en dépasse de 2,5 mètres. Le module est organisé autour d'un cylindre central qui contient les réservoirs d'hélium servant à pressuriser les réservoirs d'ergols principaux ainsi que la partie haute du moteur principal. Autour de cette partie centrale, l'espace est découpé en six secteurs en forme de parts de gâteau. Quatre de ces secteurs abritent les réservoirs d'ergols (18,5 tonnes). Un secteur contient 3 piles à combustibles qui fournissent la puissance électrique et en sous-produit l'eau ainsi que les réservoirs d'hydrogène et d'oxygène qui les alimentent. L'oxygène est également utilisé pour renouveler l'atmosphère de la cabine. Un secteur reçoit des équipements qui ont varié en fonction des missions : appareils scientifiques, petit satellite, caméras, réservoir d'oxygène supplémentaire. Le module de service contient également les radiateurs qui dissipent l'excédent de chaleur du système électrique et qui régulent la température de la cabine. Quatre grappes de

petits moteurs de contrôles d'attitude sont disposées sur le pourtour du cylindre. Une antenne comportant 5 petites paraboles, assurant les communications à grande distance, est déployée une fois le vaisseau lancé.

La tour de sauvetage

La tour de sauvetage est un dispositif destiné à éloigner le vaisseau spatial du lanceur Saturn V si celui-ci subit une défaillance durant les premières phases du vol. Le recours à des sièges éjectables, utilisé sur le vaisseau spatial Gemini, est exclu compte tenu du diamètre de la boule de feu que créerait l'explosion de la fusée Saturn V. La tour de sauvetage est constituée d'un propulseur à poudre situé au bout d'un treillis métallique lui-même perché au sommet du vaisseau Apollo. En cas d'incident, le moteur-fusée de la tour arrache le vaisseau de la fusée tandis qu'un petit propulseur l'écarte de la trajectoire de la fusée. La tour est alors larguée et le vaisseau entame sa descente en suivant une séquence similaire à celle d'un retour sur Terre. Si le lancement se déroule sans problème, la tour est éjectée lorsque le deuxième étage de la fusée Saturn est mis à feu.

Le module lunaire

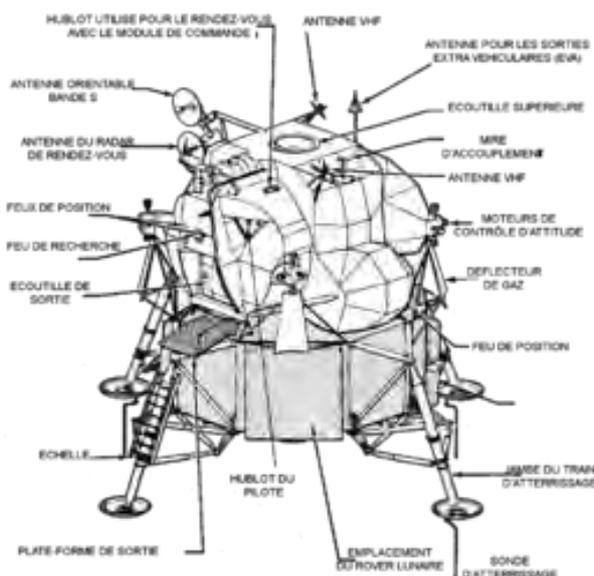


Schéma du module lunaire

Le module lunaire comporte deux étages : un étage de descente permet d'atterrir sur la Lune et sert par ailleurs de plate-forme de lancement au deuxième étage, l'étage de remontée, qui ramène les astronautes au vaisseau Apollo en orbite à la fin de leur séjour sur la Lune. La structure du module lunaire est, pour l'essentiel, réalisée avec un alliage d'aluminium choisi pour sa légèreté. Les pièces sont généralement soudées entre elles mais parfois également rivetées.

L'étage de descente

Le corps de l'étage de descente, qui pèse plus de 10 tonnes, a la forme d'une boîte octogonale d'un diamètre de 4,12 mètres et d'une hauteur de 1,65 mètre. Sa structure, constituée de deux paires de panneaux parallèles assemblés en croix, délimite cinq compartiments carrés (dont un central) et quatre compartiments triangulaires. La fonction principale de l'étage de descente est d'amener le LEM sur la Lune. À cet effet, l'étage dispose d'un moteur fusée à la fois orientable et à poussée variable. La modulation de la poussée permet d'optimiser la trajectoire de descente mais surtout de poser en douceur le LEM qui s'est fortement allégé en consommant ses ergols. Le comburant, du peroxyde d'azote (5 tonnes), et le carburant, de l'aérozine 50 (3 tonnes), sont stockés dans quatre réservoirs placés dans les compartiments carrés situés aux quatre coins de la structure. Le moteur se trouve dans le compartiment carré central. Le deuxième rôle de l'étage de descente est de transporter tous les équipements et consommables qui peuvent être abandonnés sur la Lune à la fin du séjour, ce qui permet de limiter le poids de l'étage de remontée.

L'étage de remontée



Test du module lunaire d'Apollo 9 en orbite autour de la Terre

L'étage de remontée pèse environ 4,5 tonnes. Sa forme complexe, qui résulte d'une optimisation de l'espace occupé, lui donne l'allure d'une tête d'insecte. Il est essentiellement composé de la cabine pressurisée qui héberge deux astronautes dans un volume de 4,5 m³ et du moteur de remontée avec ses réservoirs d'ergols. La partie avant de la cabine pressurisée occupe la plus grande partie d'un cylindre de 2,34 mètres de diamètre et de 1,07 mètre de profondeur. C'est là que se tient l'équipage lorsqu'il n'est pas en excursion sur la Lune. Le pilote (à gauche face à l'avant) et le commandant de bord sont debout, tenus par des harnais qui les maintiennent en place en impesanteur et durant les phases d'accélération. Sur la cloison avant, chaque astronaute a devant lui un petit hublot triangulaire (0,18 m²) incliné vers le bas, qui lui permet d'observer le sol lunaire avec un bon angle de vision, ainsi que les principales commandes de vol et cadrans de contrôle regroupés par panneaux généralement dédiés à un sous-système. Les commandes et contrôles communs sont placés entre les deux astronautes (par exemple la console d'accès à l'ordinateur de navigation), certaines commandes sont doublées (commandes pilotant l'orientation et la poussée des moteurs), les autres commandes sont réparties en fonction des tâches assignées à chaque astronaute. Les panneaux de commandes et coupe-circuit se prolongent sur les parois latérales situées de part et d'autre des astronautes. Le pilote a au-dessus de sa tête un petit hublot (0,07 m²) qui lui permet de contrôler la manœuvre de rendez-vous avec le module de commande. L'arrière de la cabine pressurisée est beaucoup plus exigu (1,37 × 1,42 m pour 1,52 m de haut) : son plancher est plus haut de 48 cm et, de plus, encombré par un capot recouvrant le sommet du moteur de remontée. Les parois latérales sont occupées par les rangements et à gauche, par une partie du système de contrôle environnemental. Au plafond se trouve l'écouille utilisée pour passer dans le Module de Commande derrière laquelle se trouve un tunnel court (80 cm de diamètre pour 46 cm de long) comportant un système de verrouillage utilisé pour solidariser les deux vaisseaux. Les forces en jeu au moment de l'accostage qui pourraient déformer le tunnel sont amorties par des poutres qui les répercutent sur toute la structure. Le LEM ne dispose pas de sas, qui aurait ajouté trop de poids. Pour descendre sur le sol lunaire, les astronautes font le vide dans la cabine et, à leur retour, ils pressurisent la cabine avec les réserves d'oxygène. Pour descendre, ils se glissent dans l'écouille : celle-ci donne sur une petite plate-forme horizontale qui débouche sur l'échelle dont les barreaux sont situés de part et d'autre d'une des jambes de l'étage de descente.

Instruments scientifiques, véhicules et équipements

Pour remplir la mission lunaire, la NASA dut concevoir plusieurs instruments scientifiques, équipements et véhicules destinés à être mis en œuvre sur le sol lunaire. Les principaux développements sont :

- le rover lunaire, utilisé à partir de la mission Apollo 15, est un véhicule rustique tous-terrains à propulsion électrique, alimenté par des batteries. Pouvant atteindre la modeste vitesse de 14 km/h, il permet de porter le rayon d'action des astronautes de quelques centaines de mètres à une dizaine de kilomètres et dispose d'une capacité d'emport de 490 kg;
- l'ALSEP est un ensemble d'instruments scientifiques installé par les astronautes près de chaque site d'atterrissage à partir d'Apollo 12. Alimenté en énergie électrique par un générateur thermoélectrique à radioisotope (RTG) il comporte de quatre à sept instruments scientifiques dont la composition a varié selon les missions : sismomètre actif ou passif, spectromètre de masse, réflecteur laser, gravimètre, détecteur de poussière, etc. Ces instruments ont fourni en continu, jusqu'à leur arrêt en 1977, des informations sur l'atmosphère, le sol et le sous-sol lunaire : sismicité, vent solaire, température, composition de l'atmosphère, champ magnétique, etc.;
- les combinaisons spatiales (modèle Apollo A7L) portées par les astronautes, d'une masse de 111 kg avec le système de survie, furent spécialement conçues pour les longues excursions sur le sol lunaire (plus de 7 heures pour certaines sorties des équipages d'Apollo 15, 16 et 17) au cours desquelles les astronautes devaient se déplacer dans un environnement particulièrement hostile — températures extrêmes, micro-météorites, poussière lunaire — tout en effectuant de nombreux travaux nécessitant une certaine flexibilité.



Le rover lunaire utilisé par la mission Apollo 17



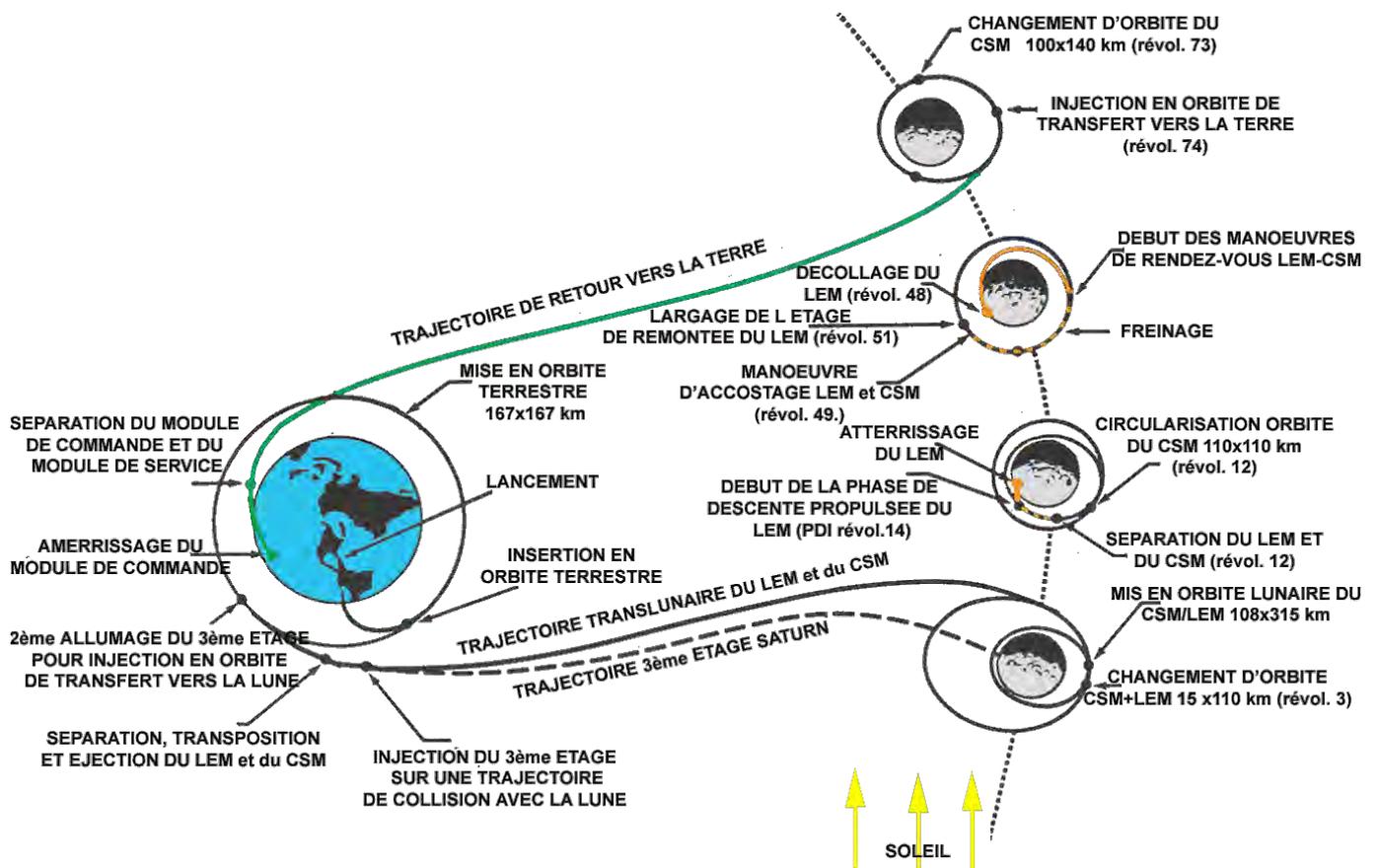
Une partie des instruments scientifiques de l'ALSEP de la mission Apollo 16

Le déroulement d'une mission lunaire type

Les fenêtres de lancement et le site d'atterrissage

Les six missions lunaires Apollo ont été programmées pour que le module lunaire atterrisse au tout début du jour lunaire (qui dure 28 jours terrestres). Les astronautes bénéficient ainsi d'une lumière rasante pour le repérage du terrain à l'atterrissage (entre 10 et 15° d'élévation au-dessus de l'horizon selon les missions) et de températures relativement modérées : la température au sol passe progressivement de 0 à 130 °C entre le lever du Soleil et le moment où le Soleil culmine au bout de 177 heures terrestres. Compte tenu de ces conditions, pour chaque lieu d'atterrissage, la fenêtre de lancement de la fusée Saturn était réduite à 1 jour par mois pour un site donné. Le site retenu est toujours situé sur la face visible de la Terre pour que les communications entre le vaisseau et la Terre ne soient pas interrompues; il n'est pas trop éloigné de la bande équatoriale de la Lune pour limiter la consommation de carburant que nécessiterait un déport du vaisseau vers des latitudes plus élevées.

La mise en orbite terrestre



Déroulement de la mission Apollo 15

La fusée décolle systématiquement depuis le Pad 39 du centre spatial Kennedy. Le lancement des 3 000 tonnes de la fusée est particulièrement spectaculaire : les 5 moteurs du premier étage sont allumés simultanément consommant 15 tonnes de carburant chaque seconde puis la fusée, qui est retenue par des pinces, est lâchée dès que les ordinateurs ont vérifié que la poussée des moteurs a atteint sa puissance nominale. La fusée s'élève d'abord très lentement, mettant près de 10 secondes à se dégager de la tour de lancement. La séparation du premier étage S1-C intervient 2 minutes et demie après le lancement à une altitude de 56 km alors que la fusée a atteint une vitesse de Mach 8 (10 000 km/h). Peu après, les moteurs-fusées du deuxième étage S-II s'allument : la jupe inter-étages se détache et la tour de sauvetage est éjectée car le vaisseau spatial est suffisamment haut pour pouvoir retomber sans son aide en cas d'interruption de la mission. Le deuxième étage est à son tour largué alors que la fusée atteint une vitesse de 24 680 km/h et une altitude de 185 km. Le troisième étage S-IVB est alors mis à contribution durant 140 secondes pour placer l'ensemble de la fusée restante sur une orbite circulaire de 180 km onze minutes et demie après le décollage.

De l'orbite terrestre à l'orbite lunaire

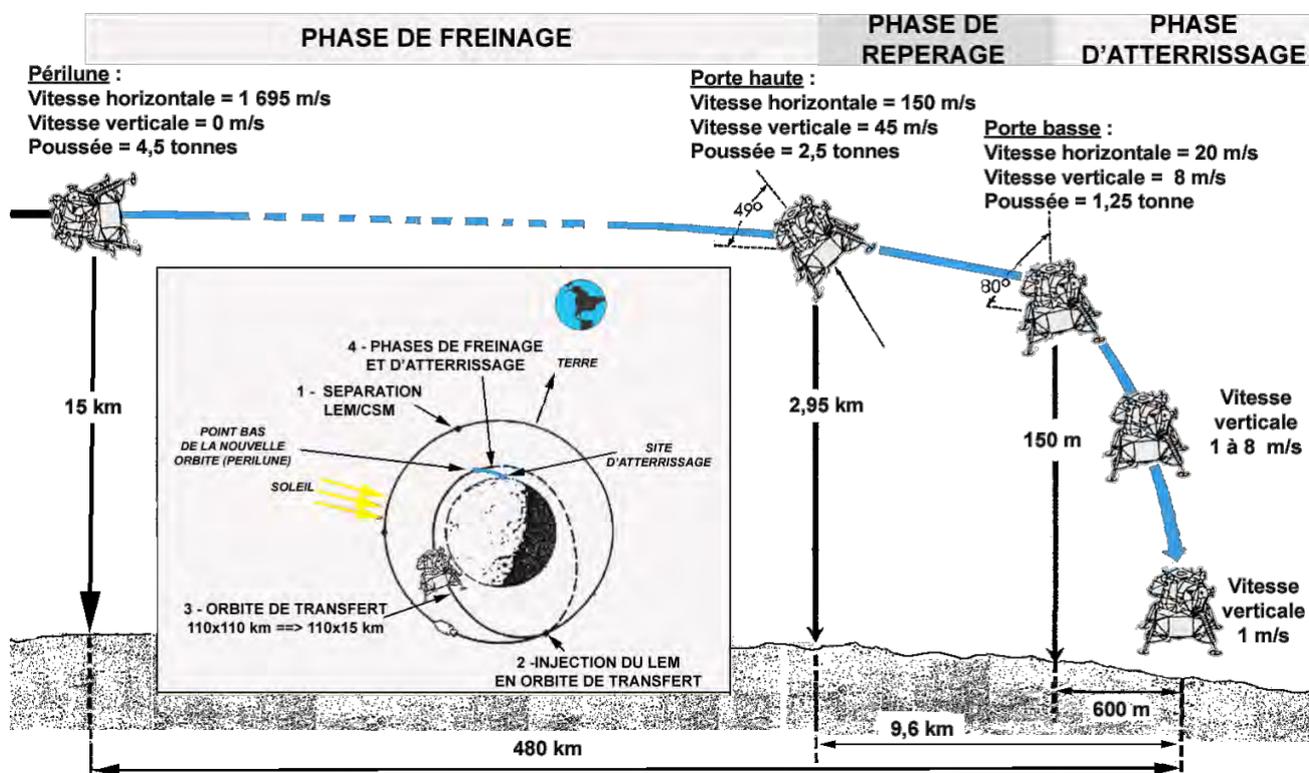
Une fois placés en orbite basse, les vaisseaux Apollo (LEM et modules de Commande et de Service) ainsi que le troisième étage de la fusée effectuent un tour et demi autour de la Terre puis le moteur du troisième étage est rallumé pour injecter l'ensemble sur une orbite de transfert vers la Lune. L'injection se traduit par une augmentation de la vitesse de 3 040 m/s (10 000 km/h). Environ une demi-heure après la fin de la poussée, le Module de Commande et de Service (CSM) se détache du reste du train spatial puis pivote de 180° pour venir repêcher le LEM dans son carénage. Après avoir vérifié l'arrimage des deux vaisseaux et pressurisé le LEM, les astronautes déclenchent par pyrotechnie la détente de ressorts situés dans le carénage du LEM : ceux-ci écartent le LEM et le CSM du troisième étage de la fusée Saturn à une vitesse d'environ 30 cm/s. Le troisième étage va alors entamer une trajectoire divergente qui, selon les missions le place en orbite autour du Soleil ou l'envoie s'écraser sur la Lune. Durant le trajet de 70 heures vers la Lune, des corrections peuvent être apportées à la trajectoire du CSM et du LEM pour optimiser la consommation finale de propergols. Initialement, le déroulement d'une mission Apollo prévoyait une quantité relativement importante de carburant pour ces manœuvres. À l'usage, à peine 5 % de cette

quantité sera consommée grâce à la précision de la navigation. Le train spatial est mis en rotation lente pour limiter l'échauffement des vaisseaux en réduisant la durée de l'exposition continue au Soleil. Une fois arrivé à proximité de la Lune, le moteur du module de commande est allumé pour placer les vaisseaux en orbite en les freinant. Si ce freinage n'est pas réalisé, la trajectoire permet aux vaisseaux de revenir se placer en orbite terrestre après avoir fait le tour de la Lune sans utiliser leurs moteurs. Cette disposition sauvera d'ailleurs la mission Apollo 13. Un peu plus tard, le moteur du CSM est utilisé une deuxième fois pour placer les deux vaisseaux sur une orbite circulaire de 110 km d'altitude.



Manœuvre d'amarrage du CMS et du LEM durant le transit vers la Lune

La descente et l'atterrissage sur la Lune



Déroulement de l'atterrissage sur la Lune

La descente sur la Lune repose en grande partie sur le système de guidage, navigation et contrôle (PGNCS : *Primary Guidance and Control System*) piloté par l'ordinateur embarqué (LGC). Celui-ci va d'une part, déterminer périodiquement la position et la trajectoire réelle du vaisseau en utilisant d'abord la centrale inertielle puis le radar d'atterrissage (fonction de navigation), et d'autre part, calculer la trajectoire à suivre en utilisant ses programmes et piloter, en fonction de tous ces éléments, la poussée et l'orientation des moteurs (fonction de guidage). Le pilote du LEM peut toutefois corriger l'altitude en cours à tout moment et, dans la dernière phase, reprendre complètement la main sur les commandes des moteurs. Mais seul le système de navigation et de pilotage permet, en optimisant trajectoire et consommation des ressources, de poser le LEM avant d'avoir épuisé tout le carburant.

L'abaissement de l'orbite

Cette phase est désignée par l'acronyme DOI (*Descent Orbit Insertion*) dans la terminologie NASA. L'objectif de cette phase est d'abaisser l'altitude du LEM de 110 km à 15 km au-dessus du sol lunaire. À cet effet, son orbite circulaire est transformée en une orbite elliptique de 15 km sur 110 km. Cette phase

permet de réduire la distance à parcourir jusqu'au sol lunaire à un faible coût en propergols (elle ne nécessite qu'une brève impulsion du moteur). La limite des 15 km a été retenue pour éviter que la trajectoire finale ne s'approche trop du relief. Deux des trois astronautes de l'équipage prennent place dans le Module Lunaire pour descendre sur la Lune. Ils initialisent le système de navigation avant d'entamer la descente vers la Lune. Le LEM et le CSM se séparent avant que le moteur ne soit mis en marche (jusqu'à Apollo 12). Le changement d'orbite est initié lorsque le vaisseau spatial se situe aux antipodes (à une demi-orbite) du point où démarrera la phase suivante. Une fois que la distance entre le LEM et le module de commande est suffisante (une centaine de mètres), une petite accélération est d'abord imprimée par les moteurs contrôlant l'attitude pour plaquer le carburant du moteur de descente contre les vannes de distribution puis le moteur de descente est allumé brièvement pour freiner le LEM d'environ 25 m/s (90 km/h). À partir d'Apollo 14, pour économiser les propergols de l'étage de descente, c'est le moteur du Module de Commande et de Service qui est sollicité pour abaisser l'orbite. Le CSM accompagne donc le LEM dans son orbite elliptique et s'en sépare avant que la descente propulsée ne démarre.

La descente propulsée

Cette phase est caractérisée par une action continue du moteur de descente. Elle démarre lorsque le LEM a atteint le point le plus bas de son orbite elliptique. Elle se décompose elle-même en 3 phases : la phase de freinage, la phase d'approche et la phase d'atterrissage.

La phase de freinage

La phase de freinage vise à réduire la vitesse du vaisseau de la manière la plus efficace possible : celle-ci va passer de 1 695 m/s (6 000 km/h) à 150 m/s (550 km/h). Le moteur est allumé à 10 % de sa puissance durant 26 secondes, le temps que le moteur s'aligne grâce à son cardan sur le centre de gravité du vaisseau, puis il est poussé au maximum de sa puissance. Le module lunaire qui au début de la trajectoire est pratiquement parallèle au sol va progressivement s'incliner tandis que sa vitesse de descente nulle au départ augmente jusqu'à 45 m/s en fin de phase. Lorsque le LEM se trouve à une altitude inférieure à 12-13 km, le radar d'atterrissage accroche le sol et se met à fournir des informations (altitude, vitesse de déplacement) qui vont permettre de vérifier que la trajectoire est correcte : jusqu'alors celle-ci était extrapolée uniquement à partir de l'accélération mesurée par la centrale à inertie. Une différence trop importante entre les données fournies par le radar et la trajectoire visée ou le non fonctionnement du radar sont des motifs d'interruption de la mission.

La phase d'approche

La phase d'approche démarre à 7 km du site visé alors que LEM est à une altitude de 700 mètres. Elle doit permettre au pilote de repérer la zone d'atterrissage et de choisir le lieu précis (dégagé) où il souhaite atterrir. Son point de départ est désigné sous le terme de « porte haute » (« *high gate* »), expression empruntée à l'aéronautique. Le module lunaire est progressivement redressé en position verticale fournissant au pilote une meilleure vision du terrain. Celui-ci peut ainsi localiser le point d'atterrissage auquel conduit la trajectoire grâce à une échelle gravée sur son hublot graduée en degrés (*Landing Point Designator*, LPD) : l'ordinateur fournit à la demande l'angle sous lequel l'astronaute peut voir le lieu d'atterrissage sur cette échelle. Si celui-ci juge que le terrain n'est pas propice à un atterrissage ou qu'il ne correspond pas au lieu prévu, il peut alors corriger l'angle d'approche en agissant sur les commandes de vol par incrément de 0,5° dans le sens vertical ou 2° en latéral.



Buzz Aldrin dans le module lunaire



Buzz Aldrin photographié par Armstrong alors qu'il s'apprête à franchir l'écouille du Lem pour une sortie extravéhiculaire sur la Lune

L'atterrissage sur le sol lunaire

Lorsque le module lunaire est descendu à une altitude de 150 mètres ce qui le place théoriquement à une distance de 700 mètres du lieu visé (point désigné sous le terme de *low gate*), démarre la phase d'atterrissage. Si la trajectoire a été convenablement suivie, les vitesses horizontale et verticale sont respectivement alors de 66 km/h et 18 km/h. La procédure prévoit que le pilote prenne la main pour amener le module lunaire au sol mais il peut, s'il le souhaite, laisser faire l'ordinateur de bord qui dispose d'un programme de pilotage pour cette dernière partie du vol. En prenant en compte les différents aléas (phase de repérage allongée de deux minutes, modification de la cible de dernière minute de 500 mètres pour éviter un relief, mauvaise combustion finale, jauge de propergol pessimiste), le pilote dispose d'une marge de 32 secondes pour poser le LEM avant l'épuisement des ergols. La dernière partie de la phase est un vol stationnaire à la manière d'un hélicoptère qui permet à la fois d'annuler toutes les composantes de vitesse mais également de mieux repérer les lieux. Des sondes situées sous les semelles du train d'atterrissage prennent contact avec le sol lunaire lorsque l'altitude est inférieure à 1,3 mètre et transmettent l'information au pilote. Celui-ci doit alors couper le moteur de descente pour éviter que le LEM ne rebondisse ou ne se renverse (la tuyère touche presque le sol).

Le séjour sur la Lune

Le séjour sur la Lune est rythmé par les sorties extra-véhiculaires : une unique sortie pour Apollo 11 mais jusqu'à trois sorties pour les dernières missions. Avant chaque sortie, les astronautes doivent faire le plein en eau et oxygène de leur système de survie portable puis enfiler leur tenue. Ils font ensuite le vide avant d'ouvrir l'écouille qui donne accès à l'échelle.

Les outils et les instruments scientifiques sont sortis des baies de stockage de l'étage de descente puis sont déployés non loin du LEM ou à plus grande distance. À partir d'Apollo 14, les astronautes disposent d'une brouette puis dans le cadre des vols suivants du rover lunaire qui leur permet de s'éloigner d'une dizaine de kilomètres du LEM en transportant de lourdes charges. Le rover occupe une baie entière du module lunaire; il est stocké en position repliée sur une palette que les astronautes abaissent pour libérer le véhicule. Le rover est déployé par un système de ressorts et de câbles agissant via des poulies et actionnés par les astronautes. Avant de quitter la Lune, les échantillons géologiques placés dans des conteneurs sont hissés jusqu'à l'étage de remontée grâce à un palan. Le matériel qui n'est plus nécessaire (survie portable, appareils photos, etc.) est abandonné pour alléger au maximum l'étage de remontée.

La remontée et le rendez-vous avec le module de commande et de service

La phase de remontée doit permettre au LEM de rejoindre le module de commande resté en orbite. Cet objectif est atteint en 2 temps : l'étage du LEM décolle du sol lunaire pour se mettre en orbite basse puis à l'aide de poussées ponctuelles du moteur-fusée, il rejoint le module de commande. Avant le décollage, la position précise du LEM au sol est entrée dans l'ordinateur afin de déterminer la meilleure trajectoire. L'instant du départ est calculé de manière à optimiser la trajectoire de rendez-vous avec le module de Commande. L'étage de descente reste au sol et sert de plate-forme de lancement. La séparation des deux étages est déclenchée avant le décollage par de petites charges pyrotechniques qui sectionnent les quatre points solidarissant les deux étages ainsi que les câbles et tuyauteries.

Le Module Lunaire suit d'abord une trajectoire verticale jusqu'à une altitude d'environ 75 mètres pour se dégager du relief lunaire puis s'incline progressivement pour rejoindre finalement à l'horizontale le périlune (point bas) d'une orbite elliptique de 15 km sur 67 km. Un rendez-vous en orbite lunaire est alors effectué entre le CSM (pilote par le troisième membre d'équipage, le seul de la mission à ne pas aller sur la Lune) et le LEM en orbite lunaire. Après que les pierres lunaires ont été transférées, le LEM est libéré et lancé sur une trajectoire qui l'amènera à s'écraser sur la Lune. Le vaisseau spatial peut alors entamer son retour vers la Terre. Apollo 16 et Apollo 17 resteront en orbite une journée de plus pour réaliser des expériences scientifiques et larguer un petit satellite scientifique de 36 kg.

Le retour vers la Terre

Pour quitter l'orbite lunaire et placer le vaisseau spatial sur la trajectoire de retour vers la Terre, le moteur du module de commande et de service est sollicité durant deux minutes et demie après avoir soigneusement orienté le vaisseau; il fournit un delta-v d'environ 1 000 m/s qui doit permettre au vaisseau de rejoindre l'orbite terrestre. C'est l'un des moments critiques de la mission car une défaillance du moteur ou une mauvaise précision dans l'orientation condamnerait les astronautes. Le moteur est allumé alors que le vaisseau se situe sur la face située à l'opposé de la Terre de manière à ce que la nouvelle trajectoire, une orbite de transfert fortement elliptique, frôle la surface de la Terre à 40 km d'altitude dans la position qu'elle occupera à l'arrivée du vaisseau. Le trajet de retour dure environ trois jours mais peut être un peu raccourci en optant pour une trajectoire plus tendue. Peu après l'injection sur le trajet de retour (*trans-Earth Injection*, TEI), une sortie extravéhiculaire est effectuée pour récupérer les films photographiques des caméras placés dans le module de service qui doit être largué avant l'entrée dans l'atmosphère terrestre.

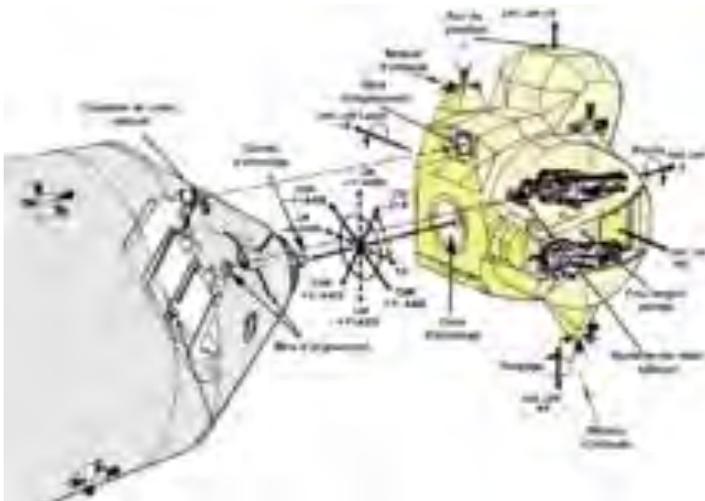


Schéma de la manœuvre de rendez-vous en orbite lunaire après le séjour sur la Lune



Répétition de la manœuvre de rendez-vous en orbite lunaire : le LEM « Snoopy » photographié par le pilote du CMS « Charlie Brown » (Apollo 10)



Récupération de la capsule d'Apollo 8 par le USS Yorktown

De petites corrections sont effectuées au cours du trajet pour optimiser l'angle d'entrée dans l'atmosphère et le point de chute. Au fur et à mesure que le vaisseau se rapproche de la Terre, la vitesse du vaisseau, qui était tombée à 850 m/s à la limite de l'influence des champs de gravité de la Terre et de la Lune, s'accroît jusqu'à atteindre 11 km/s lorsque le vaisseau pénètre dans les couches denses de l'atmosphère; celles-ci font sentir leur influence à compter de 120 km d'altitude. Peu avant de pénétrer dans l'atmosphère, le module de service du vaisseau est largué au moyen de systèmes pyrotechniques, emportant avec lui le moteur principal et la majorité des réserves d'oxygène et d'électricité. La rentrée dans l'atmosphère se fait sous un angle très précis fixé à 6,5° avec une tolérance de 1°. Si l'angle de pénétration est trop important, le bouclier thermique qui est porté normalement à une température de 3 000 °C durant la rentrée dans l'atmosphère, subit une température supérieure à celle pour laquelle il est conçu et la décélération est plus importante; ces deux phénomènes pouvant entraîner la mort de l'équipage. Avec un angle inférieur, le vaisseau spatial peut rebondir sur la couche atmosphérique et repartir sur une longue trajectoire elliptique condamnant son équipage incapable de manœuvrer et ne disposant de très peu de réserves d'air. Après une phase de décélération qui atteint 4 g, le vaisseau a perdu sa vitesse horizontale et descend pratiquement à la verticale. À 7 000 mètres d'altitude, la protection située à l'extrémité conique du vaisseau est éjectée et deux petits parachutes se déploient pour stabiliser la cabine et faire chuter sa vitesse de 480 à 280 km/h. À 3 000 mètres, trois petits parachutes pilotes sont déployés latéralement par des mortiers pour extraire les trois parachutes principaux en évitant qu'ils s'emmêlent. Le vaisseau percute la surface de l'océan à une vitesse de 35 km/h. Les parachutes sont immédiatement largués et trois ballonnets se gonflent de manière à éviter que le vaisseau reste la pointe sous l'eau. Une flottille comprenant un porte-avions ou un porte-hélicoptères est positionnée à l'avance sur la zone où doit amerrir le module de commande. Des avions sont chargés de localiser le point de chute tandis que des hélicoptères amènent sur place des plongeurs qui, montés sur des embarcations légères, récupèrent les astronautes et placent des élingues sur le vaisseau pour qu'il puisse être hissé sur le pont du porte-aéronefs.

La chronologie des vols

La maîtrise du vol spatial : les programmes Mercury et Gemini

Aucun vol orbital américain n'avait encore eu lieu au lancement du programme Apollo. Le seul vol du programme Mercury — ce programme avait débuté en 1959 — avait eu lieu 3 semaines avant le discours du président Kennedy et fut un simple vol balistique faute de disposer d'une fusée suffisamment puissante. Il fallut attendre la mission Mercury-Atlas 6 du 20 février 1962 pour que John Glenn devienne le premier astronaute américain à boucler une orbite autour de la Terre. Trois autres vols habités eurent lieu en 1962 et en 1963. À l'issue du programme Mercury, des aspects importants du vol spatial, qui devaient être mis en application pour les vols lunaires, n'étaient toujours pas maîtrisés alors qu'il n'était pas possible de les tester au sol.



Rendez-vous spatial entre Gemini 6A et Gemini 7 (1965) : le programme Gemini a permis de mettre au point la technique de rendez-vous spatial qui sera utilisée par le module lunaire et le CSM



Première sortie extravéhiculaire américaine : Edward White Gemini 4 (1965)

Les dirigeants de la NASA lancèrent un programme destiné à acquérir ces techniques sans attendre la mise au point du vaisseau très sophistiqué de la mission lunaire : le programme Gemini devait remplir trois objectifs :

- maîtriser les techniques de localisation, manœuvre et rendez-vous spatial;
- mettre au point les techniques permettant de travailler dans l'espace au cours de sorties extravéhiculaires;
- étudier les conséquences de l'apesanteur sur la physiologie humaine au cours de vols de longue durée.

Le vaisseau spatial Gemini, qui devait initialement être une simple version améliorée de la capsule Mercury, se transforma au fur et à mesure de sa conception en un vaisseau complètement différent de 3,5 tonnes (contre environ une tonne pour le vaisseau Mercury), capable de voler avec deux astronautes durant deux semaines. Le vaisseau était lancé par une fusée Titan II, missile de l'armée de l'air américaine reconverti en lanceur. Le programme rencontra des problèmes de mise au point. Le lanceur souffrait d'effet pogo, les piles à combustible utilisées pour la première fois fuyaient et la tentative de mise au point d'une aile volante pour faire atterrir la capsule sur le sol ferme échoua. Tous ces déboires gonflèrent le coût du programme de 350 millions de dollars à 1 milliard de dollars. Toutefois, fin 1963, tout était rentré dans l'ordre et deux vols sans équipage purent avoir lieu en 1964 et début 1965. Le premier vol habité Gemini 3 emporta les astronautes Virgil Grissom et John Young le 23 mars 1965. Au cours de la mission suivante, l'astronaute Edward White réalisa la première sortie dans l'espace américaine. Huit autres missions, émaillées d'incidents sans conséquence, s'échelonnèrent jusqu'en novembre 1966 : elles permirent de mettre au point les techniques de rendez-vous spatial et d'amarrage, de réaliser des vols de longue durée (Gemini 7 resta près de 14 jours en orbite) et d'effectuer de nombreuses autres expériences.

Les opérations de reconnaissance : programmes Ranger, Pegasus, Lunar Orbiter et Surveyor

Parallèlement au programme Apollo, la NASA lance plusieurs programmes pour affiner sa connaissance du milieu spatial et du terrain lunaire. Ces informations sont nécessaires pour la conception des engins spatiaux et préparer les atterrissages. En 1965, trois satellites Pegasus sont placés en orbite par une fusée Saturn I pour évaluer le danger représenté par les micrométéorites; les résultats seront utilisés pour dimensionner la protection des vaisseaux Apollo. Les sondes Ranger (1961–1965), après une longue série

d'échecs, ramènent à compter de fin 1964, une série de photos de bonne qualité de la surface lunaire qui permettent d'identifier des sites propices à l'atterrissage. Le programme Lunar Orbiter, composé de cinq sondes qui sont placées en orbite autour de la Lune en 1966–1967, complète ce travail : une couverture photographique de 99 % du sol lunaire est réalisée, la fréquence des micrométéorites dans la banlieue lunaire est déterminée et l'intensité du rayonnement cosmique est mesurée. Le programme permet également de valider le fonctionnement du réseau de télémesure. Les mesures effectuées indiquent que le champ gravitationnel lunaire est beaucoup moins homogène que celui de la Terre rendant dangereuses les orbites à basse altitude. Le phénomène, sous-estimé par la suite, réduira à 10 km l'altitude de l'orbite du Lem d'Apollo 15 dont l'équipage était endormi, alors que la limite de sécurité avait été fixée à 15 km pour disposer d'une marge suffisante par rapport aux reliefs. Le 2 juin 1966, la sonde Surveyor 1 effectue le premier atterrissage en douceur sur la Lune fournissant des informations précieuses et rassurantes sur la consistance du sol lunaire (le sol est relativement ferme) ce qui permet de dimensionner le train d'atterrissage du module lunaire.



Les sondes Surveyor ont fourni des informations sur le sol lunaire qui ont permis de dimensionner le train d'atterrissage du module lunaire. Charles Conrad (Apollo 12) examine Surveyor 3

Les vols de la fusée Saturn I

La fusée Saturn I (ou Saturn C-1) avait été conçue alors que le cahier des charges du programme lunaire n'était pas encore figé. Sa capacité d'emport s'avéra finalement trop faible même pour remplir les objectifs des premières phases du programme. Néanmoins, dix des douze fusées commandées furent construites et lancées entre le 27 octobre 1961 et le 30 juillet 1965, dont six avec l'ensemble des étages. Aucun des composants de cette fusée ne fut réutilisé dans la suite du programme. Après cinq vols consacrés à la mise au point de la fusée (missions SA-1, SA-2, SA-3, SA-4, SA-5), Saturn I fut utilisée pour lancer deux maquettes du vaisseau Apollo (missions A-101, A-102) et placer trois satellites Pegasus en orbite (missions A-103, A-104, A-105).

Les vols de la fusée Saturn IB

Les vols de la fusée Saturn IB permirent la mise au point du troisième étage de la fusée Saturn V (l'étage IVB dont le moteur consommait de l'hydrogène) et d'effectuer les premiers tests du vaisseau spatial Apollo :

- **AS-201** (rétrospectivement et officieusement *Apollo 1a*) (26 février 1966), mission non habitée, premier essai du lanceur Saturn IB. C'est un vol purement balistique culminant à 450 km (sans mise en orbite) qui emporte un véritable vaisseau Apollo et non une maquette. Il permet de tester avec succès l'étage IVB qui sera réutilisé sur la fusée Saturn V, le moteur principal du vaisseau Apollo qui est mis à feu pour porter la vitesse à 8 km/s, ainsi que le bouclier thermique de la capsule Apollo durant la phase de rentrée atmosphérique;

- **AS-203** (rétrospectivement et officieusement *Apollo 3*) (5 juillet 1966), est une mission non habitée dont l'objectif est d'étudier le comportement de l'hydrogène et de l'oxygène liquide dans les réservoirs une fois la fusée placée en orbite. La mission est un succès;
- **AS-202** (rétrospectivement et officieusement *Apollo 2*) (25 août 1966) est une mission non habitée. La fusée Saturn 1-B, comme dans le premier vol AS-201, lance sa charge utile sur une longue trajectoire balistique qui lui fait parcourir les trois-quarts du tour de la Terre. La mission doit permettre de tester le comportement du vaisseau Apollo et de la tour de sauvetage fournis dans des versions complètement opérationnelles. Le vaisseau Apollo dispose pour la première fois de ses programmes de pilotage et de navigation et de ses piles à combustible. Le moteur du vaisseau Apollo est allumé à quatre reprises. La rentrée dans l'atmosphère à 8 500 m/s permet de tester le comportement du bouclier thermique soumis à un échauffement prolongé.

L'incendie du module de commande et de service d'Apollo 1

Le 27 janvier 1967, alors que l'équipage du premier vol habité Apollo 1 (initialement *AS-204*) qui doit décoller un mois plus tard effectue une répétition au sol en conditions réelles, un incendie se déclare dans le vaisseau Apollo (CMS) dans lequel les 3 astronautes se trouvent sanglés sur leurs couchettes. Les flammes font rage dans l'atmosphère confinée composée uniquement d'oxygène; Virgil Grissom, Edward White et Roger Chaffee décèdent asphyxiés sans être parvenus à ouvrir l'écotille dont le mécanisme complexe ne permettait pas une ouverture rapide. Le vaisseau avait rencontré de nombreux problèmes de mise au point avant l'accident. Le déclenchement de l'incendie sera attribué, sans être clairement identifié, à un court-circuit dû à un fil électrique dénudé. L'enquête révèle l'utilisation de nombreux matériaux inflammables dans la cabine et beaucoup de négligences dans le câblage électrique et la plomberie. Le déclenchement et l'extension de l'incendie avait été favorisé par l'atmosphère d'oxygène pur (dépourvu d'azote) donc extrêmement inflammable, une solution qui était déjà celle des vaisseaux Mercury et Gemini. De nombreuses modifications furent apportées pour que la cabine du vaisseau offre une meilleure résistance au feu. L'écotille fut modifiée pour pouvoir être ouverte en moins de 10 secondes. Une atmosphère d'azote et d'oxygène était utilisée durant la première phase du vol. L'ensemble du programme Apollo subit une revue qui entraîna la modification de nombreux composants. Les exigences de qualité et les procédures de test furent renforcées. Tout le programme subit un décalage de 21 mois accroissant la pression sur les équipes : la fin de la décennie approchait. Par ailleurs, tout le monde s'inquiétait de l'avancement du programme soviétique, même si aucune information officielle ne filtrait de l'Union soviétique.



L'intérieur du vaisseau d'Apollo dévasté par l'incendie durant lequel son équipage a péri asphyxié



Le module lunaire est placé dans son carénage pour la mission Apollo 5

Les déboires du vaisseau spatial Apollo permirent au programme de développement de la fusée géante Saturn V de rattraper son retard. Celle-ci avait en effet rencontré de nombreux problèmes touchant en particulier le deuxième étage (le S-II qui est encore aujourd'hui le plus gros étage à hydrogène jamais conçu) : excès de poids, phénomènes de vibration (effet pogo), etc.

- **Apollo 4** (9 novembre 1967), mission non habitée, premier essai du lanceur Saturn V. La mission Apollo 4 est le premier vol du lanceur géant Saturn V. À cette occasion, un vaisseau Apollo effectue pour la première fois une rentrée atmosphérique qui restera la rentrée terrestre la plus rapide jusqu'à Stardust. Afin de recueillir un maximum d'informations sur le comportement de la fusée, 4098 capteurs sont installés. Le premier lancement de Saturn V est un succès complet.
- **Apollo 5** (22 janvier 1968 – 12 février 1968), mission non habitée, essai du lanceur Saturn IB et du module lunaire.

La mission Apollo 5 doit permettre de tester le module lunaire dans des conditions de vol réelles, c'est-à-dire dans le vide spatial. Il s'agit en particulier de vérifier le fonctionnement de ses moteurs d'ascension et de descente, ainsi que sa capacité à effectuer les manœuvres de séparation prévues. La mission est également destinée à tester une manœuvre d'urgence consistant à mettre à feu les moteurs d'ascension sans avoir largué l'étage de descente (manœuvre d'interruption de la phase d'atterrissage). Malgré quelques caprices de l'électronique du module lunaire, le fonctionnement de celui-ci peut être validé par ce vol.

- **Apollo 6** (4 avril 1968) deuxième vol de Saturn V, mission non habitée. La mission Apollo 6 est une répétition plus complète d'Apollo 4. Le test est peu satisfaisant : deux des moteurs J-2 du 2^e étage cessent prématurément de fonctionner ce qui ne peut être compensé que par une durée de fonctionnement prolongée des autres moteurs de l'étage. Alors que la fusée est sur son orbite de parking, l'unique moteur J-2 du 3^e étage refuse de se rallumer pour simuler l'injection sur une trajectoire lunaire. En sollicitant le moteur du vaisseau Apollo, les équipes de la NASA parviennent malgré tout à effectuer les tests attendus. Malgré ces péripéties, la NASA estima que désormais la fusée Saturn V et les véhicules Apollo pouvaient embarquer des équipages en toute sécurité.

Les vols habités préparatoires



Walter Schirra observe l'extérieur à travers le hublot utilisé pour les manœuvres de rendez-vous (9^e jour de la mission Apollo 7)



Sortie extravéhiculaire durant la mission Apollo 9

Le premier vol habité n'a eu lieu qu'en octobre 1968 mais les missions destinées à valider le fonctionnement des différents composants du programme et à effectuer une répétition presque complète d'une mission lunaire, se succèdent rapidement. Quatre missions préparatoires se déroulent sans anomalie majeure sur une période de 7 mois.

- **Apollo 7** (11 octobre 1968 – 22 octobre 1968).

Apollo 7 est la première mission habitée du programme Apollo. Son but est de valider les modifications effectuées sur le vaisseau spatial à la suite de l'incendie d'Apollo 1 (CMS version 2). Une fusée Saturn 1 B est utilisée car le module lunaire ne fait pas partie de l'expédition. Au cours de son séjour en orbite, l'équipage répète les manœuvres qui seront effectuées lors des missions lunaires. Après avoir quitté l'orbite terrestre et effectué leur rentrée dans l'atmosphère, la capsule et son équipage sont récupérés sans incident dans l'Atlantique. C'était la première mission américaine à envoyer une équipe de trois hommes dans l'espace et à diffuser des images pour la télévision. La fusée Saturn IB ne sera plus utilisée par la suite dans le cadre du programme d'exploration lunaire.

- **Apollo 8** (21 décembre 1968 – 27 décembre 1968)

La mission Apollo 8 est le premier vol habité à quitter l'orbite terrestre. À ce stade d'avancement du programme, il s'agit d'une mission risquée car une défaillance du moteur du vaisseau Apollo au moment de sa mise en orbite lunaire ou de son injection sur la trajectoire de retour aurait pu être fatale à l'équipage d'autant que le module lunaire a été remplacé par une maquette. Mais les dirigeants de la NASA redoutent un coup d'éclat des Soviétiques pour la fin de l'année et décident de courir le risque. Les astronautes font au total 10 révolutions autour de la Lune. Durant ce vol, ils réalisent de nombreux clichés de la Lune dont le premier lever de Terre. Apollo 8 permet pour la première fois à un homme d'observer directement la « face cachée » de la Lune. L'une des tâches assignées à l'équipage consistait à effectuer une reconnaissance photographique de la surface lunaire, notamment de la mer de la Tranquillité où devait se poser Apollo 11.

- **Apollo 9** (3 mars 1969 – 13 mars 1969)

Apollo 9 constitue le premier essai en vol de l'ensemble des équipements prévus pour une mission lunaire : fusée Saturn V, module lunaire et vaisseau Apollo. Pour la première fois, on baptise le vaisseau Apollo (Gumdrop) et le Lem (Spider), une décision destinée à faciliter les communications avec le sol lorsque les deux vaisseaux ont un équipage. Les astronautes effectuent toutes les manœuvres de la mission lunaire tout en restant en orbite terrestre. Le module lunaire simule un atterrissage puis réalise le premier rendez-vous réel avec le vaisseau Apollo. Les astronautes effectuent également une sortie extravéhiculaire de 56 minutes pour simuler le transfert d'équipage du module lunaire au vaisseau Apollo en passant par l'extérieur (manœuvre de secours mise en œuvre en cas d'amarrage infructueux

entre les deux vaisseaux). En outre, ils testent l'utilisation du module lunaire comme « canot de sauvetage » dans la perspective d'une défaillance du vaisseau Apollo; c'est cette procédure qui sera utilisée avec succès par l'équipage d'Apollo 13.

- **Apollo 10** (18 mai 1969 – 26 mai 1969)

Les dirigeants de la NASA envisagèrent que cette mission soit celle du premier atterrissage sur le sol lunaire, car l'ensemble des véhicules et des manœuvres avait été testé sans qu'aucun problème majeur n'ait été détecté. Mais, dans la mesure où les Soviétiques ne semblaient pas préparer de mission d'éclat, ils préférèrent opter pour une dernière répétition au réalisme encore plus poussé. Peu après avoir quitté son orbite terrestre basse, le vaisseau Apollo, surnommé « Charlie Brown », exécuta la manœuvre d'amarrage au LEM. Après s'être séparé du troisième étage de Saturn V, il effectua une rotation à 180° puis arrima son nez au sommet du module lunaire avant de l'extraire de son carénage. Une fois le train spatial placé en orbite autour de la Lune, le module lunaire, surnommé « Snoopy », entama la descente vers le sol lunaire qui fut interrompue à 15,6 km de la surface. Après avoir largué l'étage de descente non sans quelques difficultés dues à une erreur de procédure, le LEM réalisa un rendez-vous avec le vaisseau Apollo. La mission reproduisit les principales étapes du vol final, à la fois dans l'espace et au sol. Young était aux commandes du vaisseau Apollo alors que Stafford et Cernan occupaient le module lunaire.



Panorama de la surface lunaire par Apollo 17

Les missions lunaires

Les sept missions suivantes lancées entre 1969 et 1972 ont toutes pour objectifs de poser un équipage en différents points de la Lune, présentant un intérêt géologique. Apollo 11 est la première mission à remplir l'objectif fixé par le président Kennedy. Apollo 12 est une mission sans histoire, contrairement à Apollo 13 qui, à la suite d'une explosion dans le module de service, frôle la catastrophe et doit renoncer à se poser sur la Lune. La NASA a modifié le modèle de module lunaire emporté par les missions à partir d'Apollo 15 pour répondre aux attentes des scientifiques : le séjour sur la Lune est prolongé grâce à des réserves de consommables plus importantes. Le module lunaire plus lourd transporte le rover lunaire qui accroît le rayon d'action des astronautes durant leurs sorties.

- **Apollo 11** (16 juillet 1969 – 24 juillet 1969)

Le 21 juillet 1969, les astronautes Neil Armstrong et Buzz Aldrin, après un atterrissage mouvementé dans la mer de la Tranquillité, font leurs premiers pas sur la Lune. Armstrong, qui est le premier à sortir du module lunaire, prononce sa phrase devenue depuis célèbre « C'est un petit pas pour un homme, un bond de géant pour l'Humanité » - « That's one small step for a man; one giant leap for mankind ». L'objectif principal de la mission était de réussir l'atterrissage. L'équipage installe une version simplifiée de la station scientifique ALSEP et la sortie extravéhiculaire, au cours de laquelle une vingtaine de kilogrammes de roches lunaires sont collectées, ne dure que 2 heures 30. Après un séjour de 21 heures 38 sur le sol lunaire, le module lunaire décolle sans encombre. À leur arrivée sur Terre, l'équipage et les échantillons lunaires sont placés en quarantaine durant 21 jours pour éviter une éventuelle contamination terrestre par des virus extraterrestres, une procédure exigée par les scientifiques qui sera abandonnée à partir d'Apollo 15.

- **Apollo 12** (14 novembre 1969 – 24 novembre 1969)

32 secondes après son décollage, la fusée Saturn V est frappée par la foudre, entraînant une perte temporaire de la puissance électrique. Le module lunaire fait un atterrissage de précision dans l'Océan des Tempêtes à 180 m de la sonde spatiale Surveyor 3 dont certains éléments seront ramenés à Terre pour évaluer l'incidence de leur séjour prolongé sur le sol lunaire et dans le vide. Charles Conrad et Alan Bean installent une station scientifique automatisée ALSEP, mènent à bien des observations géologiques et prennent de nouvelles photographies de la Lune et de sa surface. Ils recueillent

également 34,1 kg d'échantillons du sol lunaire. Durant ce séjour sur le sol lunaire de 31 heures 31 minutes, les deux astronautes réalisent deux excursions d'un total de 7 heures 45 minutes parcourant ainsi 2 km à pied et s'éloignent jusqu'à 470 m du module lunaire. De nombreuses améliorations ont été réalisées en particulier dans la précision de l'atterrissage par rapport à la mission Apollo 11. Les résultats sont si positifs qu'on projette d'envoyer Apollo 13 dans une zone plus accidentée.

- **Apollo 13** (11 avril 1970 – 17 avril 1970)

La mission est interrompue à la suite de l'explosion d'un réservoir d'oxygène liquide situé dans le module de service d'*Odyssey* durant le transit de la Terre à la Lune, 55 heures 54 minutes après son envol. Le CSM est pratiquement hors service sans oxygène ni puissance électrique. Les astronautes n'osent pas se servir de son moteur pour manœuvrer. Ils se réfugient dans le module lunaire *Aquarius* dont ils utilisent les ressources et le moteur pour les manœuvres de correction de trajectoire qui permettent d'optimiser la trajectoire de retour vers la Terre. Heureusement, la trajectoire de transit Terre-Lune a été calculée pour que, en l'absence de manœuvre, le train spatial puisse revenir vers la Terre après avoir fait le tour de la Lune. Les astronautes réintègrent le vaisseau *Odyssey* immédiatement avant l'arrivée à Terre, larguent le module lunaire qui a servi de radeau de sauvetage avant d'effectuer une rentrée dans l'atmosphère sans encombre. L'explication de l'accident est déterminée sans ambiguïté : durant une vidange du réservoir d'oxygène, 15 jours avant le décollage, la gaine des fils électriques qui le traversent a fondu et ceux-ci se sont retrouvés entièrement dénudés. Lorsque Jack Swigert a actionné le brassage du réservoir, des étincelles ont jailli et déclenché son explosion.



K. Slayton et l'équipage de secours d'Apollo 13 peu après l'explosion dans le vaisseau Apollo 13 tentent de comprendre la situation et d'y remédier



James Irwin salue le drapeau américain qu'il vient de planter (Apollo 15)



Gene Cernan après sa deuxième sortie sur le sol lunaire, sa tenue maculée de poussière lunaire, est photographié dans le module lunaire par son coéquipier Harrison Schmitt (Apollo 17)

- **Apollo 14** (31 janvier 1971 – 9 février 1971).

Le début du transit vers la Lune est marqué par un incident qui manque d'interrompre la mission : l'équipage doit s'y reprendre à cinq reprises pour parvenir à amarrer le module CSM au module lunaire. Apollo 14 atterrit dans la région accidentée de Fra Mauro qui était l'objectif initial d'Apollo 13. Un des moments marquants de la mission se produit lorsque Alan Shepard, qui est le premier (et le seul) des astronautes du programme Mercury à marcher sur la Lune, tire 2 balles de golf à l'aide d'un club emmené clandestinement. Shepard et Edgar Mitchell passèrent plus de 9 heures au cours de 2 sorties à explorer une zone où la NASA pensait trouver des roches figurant parmi les plus anciennes. Ils ramènent 42,9 kg d'échantillons rocheux.

- **Apollo 15** (26 juillet 1971 – 7 août 1971)

Apollo 15 est la première mission à emporter un module lunaire alourdi grâce, entre autres, à l'optimisation du lanceur Saturn V. Le poids supplémentaire est principalement constitué par le rover lunaire et des consommables (oxygène et puissance électrique) embarqués à bord du module lunaire Apollo qui permettent d'allonger le séjour sur la Lune de 35 heures à 67 heures. David Scott et James

Irwin passent 2 jours et 18 heures sur le sol lunaire. Au cours de leurs trois sorties extravéhiculaires, qui durent en tout 18 heures 36 minutes, ils parcourent plus de 28,2 km à proximité du mont Hadley grâce au rover lunaire. Parmi les 76 kg de roches prélevées, les astronautes trouvent ce qu'on pense être un cristallin de la croûte lunaire originelle vieille d'environ 4,6 milliards d'années. Un petit satellite emportant trois expériences scientifiques est largué alors que le CMS est en orbite autour de la Lune. Worden fait une sortie spatiale de 16 minutes dans l'espace alors que le vaisseau Apollo se trouve encore à 315 000 km de la Terre. Au retour, durant la descente vers le sol terrestre, un des trois parachutes se met en torche sans dommage pour l'équipage.

- **Apollo 16** (16 avril 1972 – 27 avril 1972)

Apollo 16 est la première mission à se poser sur les hauts-plateaux lunaires. John Watts Young et Charles Duke passent 20 heures 14 minutes sur la Lune, installant plusieurs expériences, parcourant 26,7 km à l'aide du rover lunaire et recueillant 95,4 kg d'échantillons rocheux. L'équipage largue un mini-satellite destiné à étudier les particules et le champ magnétique solaire.

- **Apollo 17** (7 décembre 1972 – 19 décembre 1972)

Apollo 17 est la dernière mission sur la Lune. L'astronaute Eugene Cernan et son compagnon Harrison Schmitt, un géologue civil américain, le seul astronaute scientifique du programme Apollo à avoir volé, sont les derniers hommes à marcher sur la Lune : ils y passent 22 h 05 min, parcourant grâce à la Jeep lunaire 36 km dans la région des monts Taurus, près du cratère de Littrow. C'est l'équipage qui ramène le plus de roches lunaires (111 kg) et effectue la plus longue sortie extra-véhiculaire.

La fin prématurée du programme Apollo

La NASA se préoccupe dès 1963 de la suite à donner au programme Apollo. En 1965, l'agence crée une structure affectée aux missions postérieures à celles déjà planifiées regroupées sous l'appellation Apollo Applications Program (AAP). La NASA propose plusieurs types de mission dont le lancement en orbite d'une station spatiale, des séjours prolongés sur la Lune mettant en œuvre plusieurs nouveaux modules dérivés du LEM, une mission habitée vers Mars, le survol de Vénus par une mission habitée, etc. Mais les objectifs scientifiques trop vagues ne réussissent pas à convaincre le Congrès américain beaucoup moins motivé par les programmes spatiaux « post-Apollo ». Par ailleurs, les priorités des États-Unis ont changé : les dispositifs sociaux mis en place par le président Lyndon Johnson dans le cadre de sa guerre contre la pauvreté (Medicare et Medicaid) et surtout un conflit vietnamien qui s'envenime prélèvent une part croissante du budget. Ce dernier ne consacre aucun fonds à l'AAP pour les années 1966 et 1967. Les budgets votés par la suite ne permettront de financer que le lancement de la station spatiale Skylab réalisée en utilisant un troisième étage de la fusée Saturn V. En 1970, le programme Apollo lui-même est touché par les réductions budgétaires : la dernière mission planifiée (Apollo 20) est annulée tandis que les vols restants sont étalés jusqu'en 1974. La NASA doit se préparer à se séparer de 50 000 de ses employés et sous-traitants (sur 190 000) tandis que l'on annonce l'arrêt définitif de la fabrication de la fusée Saturn V qui ne survivra donc pas au programme. Un projet de mission habitée vers Mars (pour un coût compris entre trois et cinq fois celui du programme Apollo) proposé par un comité d'experts sollicité par le nouveau président républicain Richard Nixon ne reçoit aucun appui ni dans la communauté des scientifiques ni dans l'opinion publique et est rejeté par le Congrès sans débat. Le 20 septembre 1970, le responsable de la NASA, démissionnaire, annonce que les contraintes budgétaires nécessitent de supprimer deux nouvelles missions Apollo 18 et Apollo 19. L'annulation des missions laisse trois fusées Saturn V inutilisées dont l'une permettra néanmoins de lancer la station spatiale Skylab. Les deux restantes sont aujourd'hui exposées au Johnson Space Center et au centre spatial Kennedy. La station spatiale Skylab est occupée successivement par trois équipages lancés par des fusées Saturn IB et utilisant des vaisseaux Apollo (1973). Une fusée Saturn IB fut utilisée pour le lancement de la mission Apollo-Soyouz qui emportait un vaisseau spatial Apollo (1975). Ce sera la dernière mission à utiliser du matériel développé dans le cadre du programme Apollo. Le coût du programme est évalué à 25,4 milliards de dollars en 1969 (équivalent à 135 milliards de dollars, en 2006).

Le bilan du programme Apollo : Le triomphe de l'aéronautique américaine

L'objectif fixé au programme Apollo par le président Kennedy en 1961 est rempli au-delà de toute espérance. L'aéronautique américaine a su développer dans un temps record un lanceur d'une puissance inimaginable dix ans auparavant, maîtriser complètement le recours à l'hydrogène pour sa propulsion et réaliser ce qui paraissait, peu de temps auparavant, relever de la science-fiction : amener l'homme sur un

autre astre. Malgré le saut technologique, le taux de réussite des lancements des fusées Saturn a été de 100 % et tous les équipages ont pu être ramenés à Terre. Aux yeux du monde entier le programme Apollo est une démonstration magistrale du savoir-faire américain et de sa supériorité sur l'astronautique soviétique qui au même moment accumule les échecs. Pour beaucoup d'Américains cette victoire démontre la supériorité de la société américaine même si cette foi dans leur système est fortement ébranlée à la même époque par l'ampleur de la contestation étudiante liée à la guerre du Viêt Nam et l'agitation sociale qui touche en particulier la minorité noire dans les grandes villes liée avec le mouvement des droits civiques.

Le bilan scientifique



Le « rocher de la genèse » ramené par la mission Apollo 15

Le programme Apollo, lorsqu'il est lancé, répond à des considérations de politique extérieure : l'architecture des missions et la conception des véhicules sont définies sans se soucier de leur pertinence et de leur pérennité du point de vue de la recherche scientifique. Celle-ci est intégrée dans le projet tardivement et avec beaucoup de difficultés. Absorbés par les défis techniques à relever, la NASA et le MSC — ce dernier était particulièrement concerné puisque chargé de la conception des vaisseaux habités et de l'entraînement des astronautes — ont du mal à consacrer des forces à la prise en compte des besoins scientifiques. Enfin, membres de la NASA et scientifiques (ceux-ci étant représentés notamment par le National Academy of Sciences et le Space Science Board) tâtonnèrent longtemps pour mettre au point un mode de travail constructif, chacun voulant assumer la conduite des projets. Après avoir lancé les premières études en 1962, le Space Science Board définit au cours de l'été 1965 les points clés à traiter pour les 15 prochaines années dans le domaine de la recherche lunaire. Ce document servira de cahier des charges pour la conception des expériences scientifiques à mettre en œuvre au cours des missions Apollo. Pour mener des recherches scientifiques sur le terrain, il valait mieux disposer de scientifiques entraînés comme astronautes que de pilotes — le vivier dans lequel avait puisé jusque-là la NASA — formés à la géologie. En 1965, malgré les réticences d'une partie du management, la NASA recrute 6 scientifiques. Seuls deux d'entre eux étaient des pilotes vétérans et les autres durent suivre une formation de pilote de chasseur à réaction. Début 1966, le MSC, après avoir été plusieurs fois relancé par la direction de la NASA, mit en place une structure destinée aux expériences scientifiques permettant d'amorcer le processus de développement des instruments embarqués. Seul le géologue Schmitt aura l'occasion d'aller sur la Lune.

Une connaissance affinée de la Lune

Les missions Apollo ont permis de collecter en tout 382 kg de roches lunaires dans six régions différentes de notre satellite (à comparer aux 336 grammes ramenés sur Terre par les missions soviétiques robotisées du programme Luna à la même époque). Ces roches sont conservées dans un bâtiment construit à cet effet au Centre spatial de Houston. Une organisation est mise en place pour la fourniture de petits échantillons de roches aux scientifiques du monde entier qui en font la demande. Un institut consacré aux sciences planétaires, le Lunar and Planetary Institute, est créé à la même époque à Houston pour faciliter la coopération internationale et centraliser les résultats des études menées. Par ailleurs de nombreuses données scientifiques ont été collectées au cours des missions : mesures effectuées par les astronautes durant leur séjour sur le sol lunaire, photographies prises depuis l'orbite lunaire, relevés effectués par les instruments logés dans une des baies du module de service à partir de la mission Apollo 15. Enfin, les stations scientifiques ALSEP, comportant de 3 à 8 instruments et déposées sur le sol lunaire durant les sorties extravéhiculaires, ont transmis leurs mesures aux stations terrestres jusqu'à l'épuisement de leur source d'énergie radioactive en septembre 1977. Les réflecteurs laser qui faisaient partie des ALSEP mais n'ont pas besoin d'une source d'énergie, car complètement passifs, sont encore utilisés de nos jours pour mesurer les variations de distance entre la Terre et la Lune.

Roches lunaires		
Mission lunaire	Masse ramportée	Année
Apollo 11	22 kg	1969
Apollo 12	34 kg	1969
Apollo 14	43 kg	1971
Apollo 15	77 kg	1971
Apollo 16	95 kg	1972
Apollo 17	111 kg	1972
Luna 16	101 g	1970
Luna 20	55 g	1972
Luna 24	170 g	1976

Contre toute attente les roches lunaires ramenées comme les observations et les mesures effectuées n'ont pas permis de trancher entre les différents scénarios de formation de la Lune : produit de la collision entre un astre vagabond et la Terre (thèse aujourd'hui privilégiée), capture d'un astre par la Terre, formation en parallèle, etc. En effet, l'interprétation de données issues d'un milieu extraterrestre s'est avérée beaucoup plus difficile que ce que les scientifiques avaient imaginé, car nécessitant entre autres, un gros effort de recherche interdisciplinaire. Les échantillons de roche collectées indiquent une géologie complexe aussi les scientifiques estiment que la Lune est, dans ce domaine, en grande partie inexplorée malgré les 6 expéditions Apollo.

Les données collectées par les 4 sismomètres ont permis d'esquisser une modélisation de la structure interne de la Lune : une croûte de 60 km d'épaisseur surmontant une couche homogène et de nature différente de 1 000 km d'épaisseur avec en profondeur un cœur à moitié fondu (1 500 °C) constitué sans doute de silicates. Les altimètres laser d'Apollo 15 et 16 ont confirmé que le centre de gravité de la Lune ne coïncidait pas avec son centre géométrique. Les données géologiques et géochimiques recueillies ont été par contre beaucoup plus difficiles à interpréter et n'ont permis de tirer que des conclusions générales : les échantillons reflètent une composition chimique différente de celle de la Terre avec une proportion plus faible des éléments les plus volatils et plus d'éléments radioactifs que la moyenne cosmique. Trois types de roche semblent prédominer : des basaltes riches en fer dans les mers, des plagioclases ou anorthosites riches en aluminium dans les zones situées en altitude et des basaltes riches en uranium et en thorium avec des concentrations importantes de potassium, terres rares et phosphore (basaltes « KREEP »). Mais pour certains scientifiques de cette époque, ces roches ne reflètent pas la composition du sol de la Lune primordiale sans doute enseveli par le bombardement constant subi par celle-ci depuis plusieurs milliards d'années.

Les retombées technologiques

L'impact du programme Apollo et des programmes spatiaux américains contemporains sur l'évolution technologique est indirect et porte sur des domaines bien précis. Il est difficile de distinguer la contribution du programme de celle des projets militaires (missile balistique) qui le précèdent ou l'accompagnent. Si les technologies concernées peuvent être clairement identifiées, il est beaucoup moins facile de mesurer précisément l'incidence du programme spatial sur les progrès constatés.

L'industrie métallurgique, qui doit répondre à des exigences particulièrement sévères (allègement, absence de défaut) et aux contraintes de l'environnement spatial (vide entraînant la sublimation des métaux, vibration, chaleur), crée de nouvelles techniques de soudure, dont le soudage par explosion, pour obtenir des pièces sans défaut. Le recours à l'usinage chimique, qui deviendra plus tard un procédé essentiel pour la fabrication des composants électroniques, est fréquent. Il a fallu mettre au point de nouveaux alliages et recourir à des matériaux composites. Les instruments de mesure installés dans les engins spatiaux ont dû satisfaire des exigences de précision, fiabilité et rapidité beaucoup plus élevées que la norme.

L'instrumentation biomédicale est née de la nécessité de contrôler l'état de santé des astronautes en vol. Enfin, les projets de la NASA des années 1960 ont permis d'affiner les techniques de calcul de la fiabilité et de mettre au point un grand nombre de techniques de gestion de projet : PERT, WBS, gestion de la valeur acquise, revue technique, contrôle qualité. Le programme Apollo a contribué à l'essor de l'informatique : le développement des programmes de navigation et de pilotage des vaisseaux Apollo voit apparaître la scission entre matériel et logiciel. Les méthodes de programmation et de test sont également en partie nées des exigences de fiabilité et de la complexité des logiciels développés pour le programme. Enfin, le projet lance l'utilisation des circuits intégrés qui ont fait leur apparition en 1961. La NASA achète au début du programme 60 % de la production mondiale pour les besoins des ordinateurs des vaisseaux Apollo.



La construction de l'ordinateur de bord des vaisseaux Apollo contribua à la généralisation des circuits intégrés

L'impact sur la société



*Jamais vu auparavant : La Terre vue de la Lune
(Apollo 8)*



*« L'Eagle s'est posé » : le Washington Post paru
le lendemain des premiers pas des deux premiers
hommes sur la Lune*

Lorsque les astronautes d'Apollo 8 effectuent le voyage initial vers la Lune, donnant à des millions de téléspectateurs pour la première fois la possibilité d'apercevoir leur planète plongée dans l'espace. Les photos de la Terre prises depuis l'espace lointain par les équipages du programme Apollo frapperont les esprits à l'époque. La plus célèbre de ces photos est La Bille bleue prise par les astronautes d'Apollo 17. D'autres photos, comme celles montrant un lever de Terre au-dessus d'un sol lunaire dépourvu de couleurs ou celles mettant en évidence la minceur de la couche atmosphérique ont fait prendre conscience du caractère unique et fragile de notre planète, le vaisseau Terre. Ces images ont sans doute contribué à l'expansion des mouvements écologiques au cours des décennies suivantes.

Premiers pas sur la Lune, un événement marquant et quelques voix discordantes (Apollo 11)

Le 20 juillet 1969, 600 millions de téléspectateurs, soit un cinquième de la population mondiale de l'époque, assistent en direct à la télévision aux premiers pas de Neil Armstrong et Buzz Aldrin. Si presque tout le monde s'accorde sur le fait qu'il s'agit d'un événement marquant, il y a toutefois des voix pour s'élever contre le gaspillage d'argent comme certains représentants de la communauté noire américaine, à l'époque en pleine ébullition. Mais l'intérêt pour le programme spatial faiblit rapidement. Le déroulement de la mission Apollo 12, pourtant filmé en couleurs contrairement à Apollo 11, fut beaucoup moins suivi. Les commentaires très techniques, hors de portée de l'Américain moyen, l'absence de péripéties banalisaient l'événement. Il fallut l'accident d'Apollo 13, qui replaçait l'homme au cœur de la mission, pour raviver l'intérêt du public.

L'héritage du programme Apollo

La navette spatiale : l'utopie de l'espace à bas coût

Au début des années 1970, alors que le programme Apollo touche à sa fin, certains décideurs politiques envisagent l'arrêt des vols habités trop coûteux et aux retombées limitées. La fin de la guerre froide et l'effondrement du programme spatial soviétique a privé le projet habité américain d'une grande partie de ses justifications. Mais Richard Nixon ne veut pas être celui qui a arrêté les missions habitées auxquelles se rattache encore malgré tout une part de prestige. Par ailleurs, si l'opinion publique et la communauté scientifique s'accordent sur la nécessité de réduire le budget spatial en particulier consacré aux vols habités, le président n'est pas insensible au lobbying de l'industrie et aux considérations électorales : la Californie qui concentre une grande partie des emplois de l'aéronautique (les effectifs employés par l'industrie aérospatiale en Californie passent de 455 000 à 370 000 personnes entre 1967 et 1970) est un

enjeu important pour les élections à venir. En partie pour répondre aux critiques sur le coût du programme Apollo, la NASA a élaboré à cette époque son projet de navette spatiale qui doit permettre d'abaisser de manière significative le prix du kilogramme placé en orbite par rapport aux lanceurs non réutilisables. Le président Nixon donne son feu vert au programme de la navette spatiale mais celle-ci devra s'inscrire par la suite dans un cadre budgétaire spatial civil en décroissance constante : les sommes allouées à la NASA passent progressivement de 1,7 % du budget total de l'État fédéral en 1970 à 0,7 % en 1986, son point le plus bas. Les espoirs suscités par la navette spatiale seront déçus : on estime en 2008, alors que le programme de la navette est en voie d'achèvement, que chaque vol de la navette spatiale américaine revient à 1,5 milliard de dollars en intégrant les coûts de développement : un coût non concurrentiel par rapport à celui d'un lanceur classique. La souplesse opérationnelle n'est pas non plus au rendez-vous : la cadence de lancement atteint 5 % de celle prévue initialement.

Missions spatiales habitées et communauté scientifique

La communauté scientifique américaine tire un bilan négatif du programme Apollo. Les retombées scientifiques du programme sont limitées au regard des sommes investies et la part du programme spatial consacrée à la science (satellites scientifiques, sondes spatiales) a diminué durant les années Apollo. Le phénomène se répètera d'ailleurs au cours des décennies suivantes, les programmes scientifiques de la NASA étant régulièrement victimes soit des dépassements budgétaires des programmes spatiaux habités soit d'arbitrages en leur défaveur. Aussi, l'Académie des Sciences américaine demande à l'époque que l'activité spatiale soit recentrée sur des thèmes scientifiques et ses applications dans le domaine de la météorologie, l'agriculture, l'hydrologie, l'océanographie, etc. Elle s'oppose également au développement de la navette spatiale. La communauté scientifique est aujourd'hui dans son ensemble toujours peu favorable aux missions habitées au-delà de l'orbite basse : en 2004, à la suite de la relance des missions habitées vers la Lune et Mars, le comité chargé du financement de l'astrophysique au sein de l'American Physical Society, s'inquiétait de l'importance des fonds monopolisés par ce type de mission aux objectifs mal cernés au détriment de projets, comme les télescopes spatiaux, qui avaient largement prouvé leur intérêt scientifique.

Regards contemporains : entre nostalgie, négation et frustration

Après les progrès fulgurants des années 1960 dont le débarquement lunaire constitue l'acmé, le vol spatial habité, contrairement à toutes les prédictions de l'époque, s'est replié durant ses cinquante dernières années sur l'orbite terrestre basse. L'astronaute Gene Cernan, dans son autobiographie publiée en 1999, écrit « Tout se passe comme si le programme Apollo avait vu le jour avant son heure, comme si le président Kennedy avait été chercher une décennie au cœur du XXI^e siècle et qu'il avait réussi à l'insérer au début des années 1960 ». Pour l'historien américain J.R. McNeill, l'aventure du programme Apollo et de l'exploration spatiale en général pourrait être une impasse condamnée à devenir dans le futur une simple note de bas de page de l'histoire de la civilisation, à moins que des découvertes ne relancent son intérêt ou que renaisse une course au prestige entre des nations disposant de moyens financiers suffisants. À l'époque du débarquement sur la Lune, il existait déjà une petite minorité d'incrédules qui se recrutait aux États-Unis dans les classes sociales les plus défavorisées, coupées de toute connaissance scientifique, et les minorités. L'audience de la thèse du moon hoax (canular lunaire) s'élargit dans les années 1970 lorsqu'un climat de défiance vis-à-vis des institutions s'installe chez beaucoup d'Américains dans le sillage du scandale du Watergate et de la guerre du Viêt Nam : c'est à cette époque, symbolisée dans les médias par le film *Les Trois Jours du Condor*, qu'est tourné *Capricorn One* (1978) qui raconte l'histoire d'un faux débarquement sur Mars mis en scène par la NASA. En 2001, l'émission « Théorie du complot : avons-nous atterri sur la Lune ? », basée sur des pseudo témoignages scientifiques et diffusée sur la chaîne de télévision Fox rencontre un succès d'audience qui témoigne surtout de l'absence de culture scientifique de ses auditeurs. Malgré ses incohérences évidentes, la théorie du faux débarquement sur la Lune continue à trouver des partisans pour les raisons déjà citées mais sans doute également parce que l'événement est si éloigné de toute expérience personnelle, qu'il dégage pour beaucoup un sentiment d'irréalité. La stagnation du programme spatial habité américain après les succès du programme Apollo suscite un intense sentiment de frustration chez beaucoup de passionnés d'aéronautique. Au moment même où le programme Apollo subit un coup d'arrêt à la fin des années 1960, naissent des associations militant pour un programme spatial habité ambitieux prolongeant l'effort spatial engagé. Selon T.E. Dark, l'apparition de ces mouvements est à mettre en relation avec la crise que subit à la fin des années 1960

l'idée de progrès, une croyance au cœur de la société américaine. L'apparition du mouvement écologique, un scepticisme naissant vis-à-vis des bienfaits de la croissance économique et la crainte d'un déclin culturel américain expliquent principalement cette crise. Promouvoir le programme spatial était un moyen de faire revivre l'idée de progrès sous une autre forme. L'association la plus connue à l'époque, la L5 Society, préconise la colonisation de l'espace par la création de gigantesques habitats spatiaux au point de Lagrange L5. Elle reçoit l'attention du Congrès américain ainsi que de la NASA. Mais le concept d'habitats spatiaux géants ne dépassera jamais le stade de l'étude théorique, car il nécessite de lancer un million de tonnes en orbite autour de la Terre en 6 ou 10 ans, un objectif qui ne pouvait être atteint que si le coût de la mise en orbite était abaissé à 55 dollars le kg comme envisagé par l'étude de Gerard K. O'Neill et la NASA en 1975-1977. La L5 Society disparaît en 1987, victime des désillusions nées de la crise de l'énergie et des déboires de la navette spatiale américaine. En 1998 est fondée la Mars Society qui milite pour la colonisation de Mars. Son créateur, Robert Zubrin, rédige plusieurs ouvrages très documentés sur les moyens de mener une mission habitée sur Mars. The Planetary Society est une association plus ancienne, née en 1980, dont le fondateur le plus connu est Carl Sagan, qui a un ancrage international et compte plus de 100 000 membres. Plus réaliste, elle milite surtout pour l'exploration du système solaire mais a tout de même apporté son soutien au programme de mission habitée vers la « planète rouge » de la Mars Society.

Les tentatives avortées de retour de l'homme sur la Lune



Vue d'artiste du module lunaire du programme Constellation qui aurait dû atterrir sur la Lune vers 2020

Depuis la mission habitée Apollo 17 de 1972, plus aucun astronaute ne s'est éloigné de plus de quelques centaines de kilomètres de la Terre. Le 20 juillet 1989, pour le 20^e anniversaire de l'atterrissage d'Apollo 11, le président des États-Unis George H. W. Bush lance un programme spatial ambitieux sur 30 ans, le Space Exploration Initiative (SEI), qui doit permettre l'installation d'une base permanente sur la Lune. Mais son coût, l'absence de soutien dans l'opinion publique et les fortes réticences du Congrès font capoter le projet. En 2004, son fils, le président George W. Bush, rend public les objectifs à long terme qu'il souhaite assigner au programme spatial américain alors que l'accident de la navette spatiale Columbia vient de clouer au sol une flotte de navettes spatiales vieillissantes et que le sort de la station spatiale internationale, dont l'achèvement approche, est en suspens. Le projet présidentiel Vision for Space Exploration veut replacer l'Homme au cœur de l'exploration spatiale : le retour d'astronautes sur la Lune est programmé avant 2020 pour une série de missions destinées à préparer une éventuelle présence permanente de l'homme sur le sol lunaire et mettre au point le matériel nécessaire à de futures missions habitées sur Mars fixées à une échéance beaucoup plus lointaine. Cette fois-ci, l'opinion comme le Congrès sont favorables au projet : le programme Constellation est alors mis sur pied par la NASA pour répondre aux attentes présidentielles. Il prévoit la construction de deux types de lanceur Ares I et Ares V ainsi que, de manière similaire au programme Apollo, deux vaisseaux habités Altair et Orion. La NASA

utilise, en les adaptant, des moteurs-fusées développés pour la fusée Saturn V, les propulseurs à poudre de la navette spatiale ainsi que de nombreuses installations au sol remontant à l'époque du programme Apollo. Mais le programme prend du retard et se heurte à un problème de financement qui selon les plans initiaux, doit s'effectuer sans augmentation substantielle du budget global de la NASA. À la suite de son investiture, le président américain Barack Obama fait expertiser le programme Constellation par la commission Augustine, créée à cet effet le 7 mai 2009. Celle-ci conclut qu'il manque 3 milliards de \$ par an pour atteindre les objectifs fixés mais confirme l'intérêt d'une seconde exploration humaine de la Lune comme étape intermédiaire avant une mission habitée vers Mars. Début février 2010 le président Obama annonce l'annulation du programme Constellation qui est confirmée par la suite.

Les autres sondes envoyées dans le système solaire

Nous avons traité ici des sondes envoyées vers la Lune ou des vaisseaux spatiaux (ou satellites) qui sont ou ont été en orbite terrestre. Les sondes envoyées vers d'autres planètes sont traitées dans le document propre à chaque planète. Ex : Les nombreuses sondes envoyées vers Mars, Cassini/Huygens avec Saturne, Galiléo, Juno et Juice avec Jupiter, New Horizons avec la planète naine Pluton, Dawn avec la planète naine Cérès et l'astéroïde Vesta, etc.

V ICONOGRAPHIE APOLLO

Les équipages des missions Apollo



Morts suite à l'incendie du vaisseau spatial avant le lancement- Apollo 1 : Grissom-White-Chaffee



Apollo 7 : Schirra-Cunningham-Eisele



Apollo 8 : Borman-Anders-Lovell



Apollo 9 : McDivitt-Schweickart-Scott



Apollo 10 : Stafford-Cernan-Young



Apollo 11 : Armstrong-Aldrin-Collins



Apollo 12 : Conrad-Bean-Gordon



Apollo 13 : Lovell-Haise-Swigert



Apollo 14 : Shepard-Mitchell-Roosa



Apollo 15 : Scott-Irwin-Worden



Apollo 16 : Young-Duke-Mattingly



Apollo 17 : Cernan-Schmitt-Evans

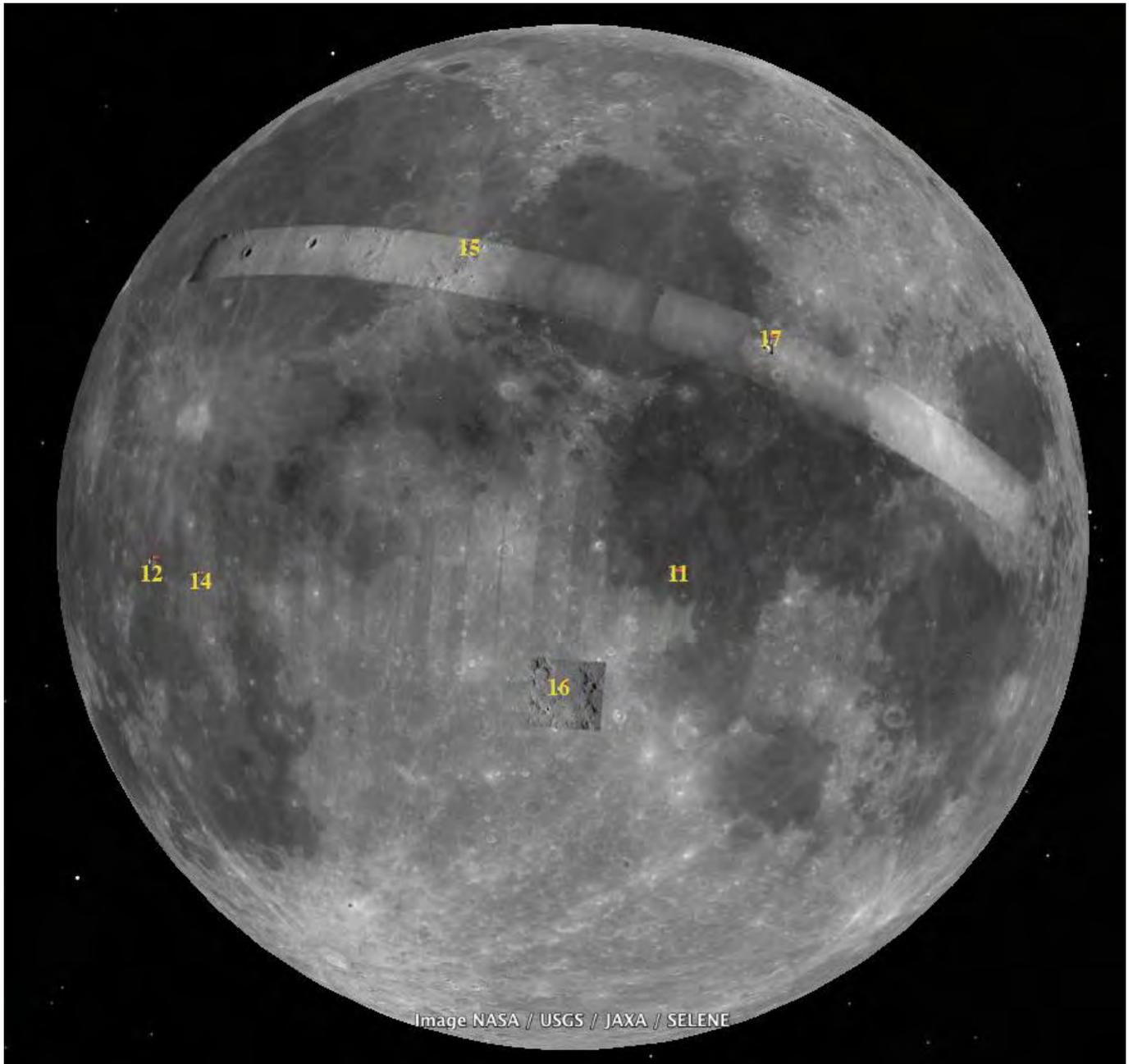


Image NASA / USGS / JAXA / SELENE

Les sites d'atterrissage des missions Apollo (avec leurs numéros)



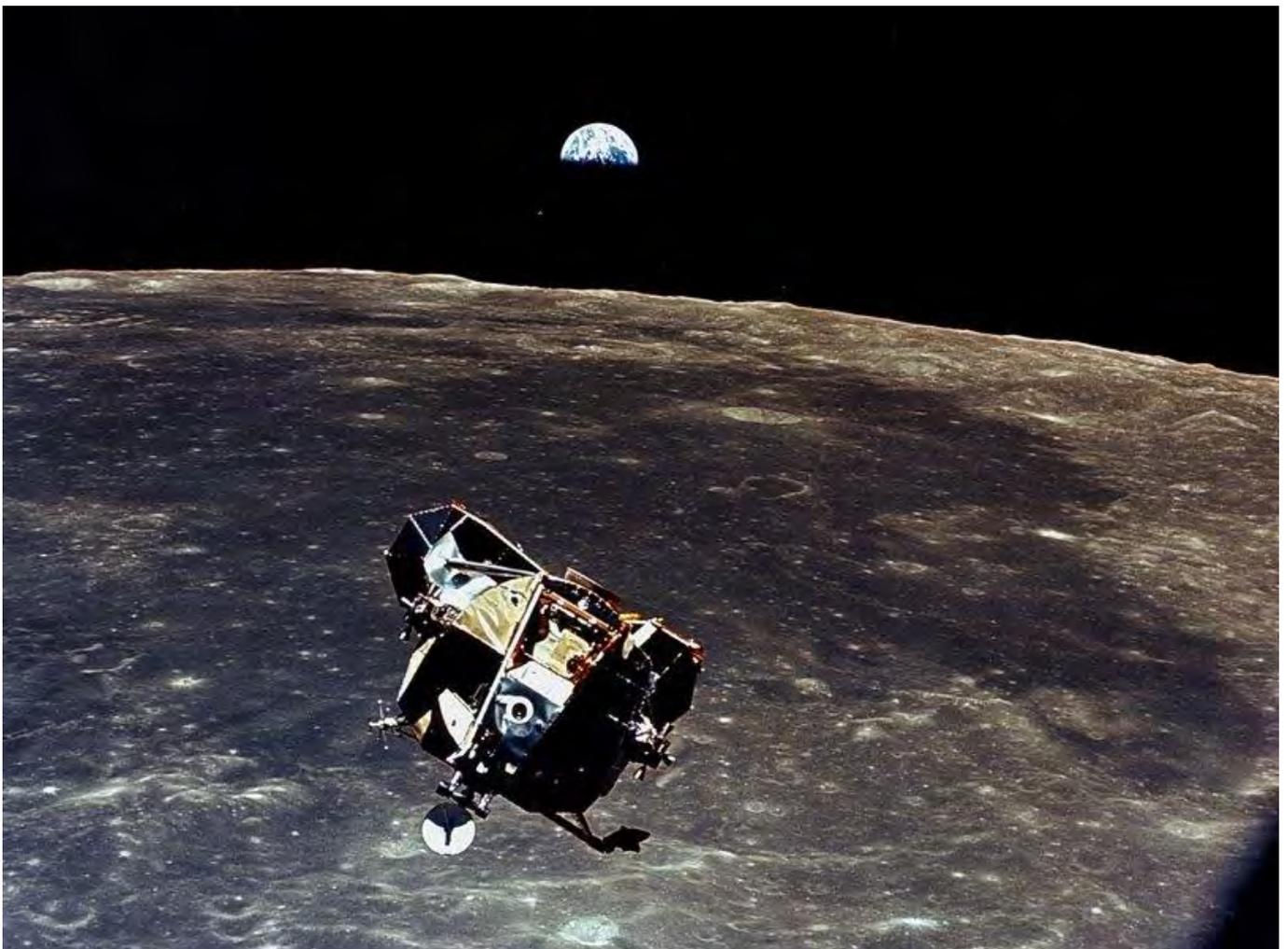
Buzz Aldrin sur la Lune



Neil Armstrong sur la Lune



Equipage d'Apollo 11, de gauche à droite : Armstrong, Collins, Aldrin



Le module Apollo 11 renvoyé vers la Lune et vue sur la Terre



40° anniversaire d'Apollo 11

Le soir du quarantième anniversaire d'Apollo 11, le premier atterrissage d'hommes sur la Lune, l'équipage d'Apollo 11, Buzz Aldrin, à gauche, Michael Collins, second en partant de la gauche, puis Neil Armstrong et le créateur du NASA Mission Control et ancien directeur du NASA Johnson Space Center, Chris Kraft, à droite, réunis au Musée de l'Air et de l'Espace de Washington, le dimanche 19 juillet 2009.

Une synthèse des vols de toutes les missions Apollo / 1967-1972 est reprise sous forme de tableau en Annexe 3

Table des matières

I Généralités	1
II L'aventure spatiale en orbite autour de la Terre.....	3
A) Les premiers satellites.....	3
B) Les premiers vols habités	13
1) Soviétiques	13
2) Américains	14
C) Les missions longue durée : les « stations » spatiales.....	21
1) Soviétiques puis internationales.....	23
a) Saliout	23
b) Mir	24
2) Américaines puis internationales.....	28
a) Skylab	28
b) ISS : la Station Spatiale Internationale	33
c) Autres : la station spatiale chinoise Tiangong	66
D) La navette spatiale américaine.....	68
III Les sondes envoyées vers ou sur la Lune	96
IV Le programme Apollo : l'homme sur la Lune	102
V Iconographie Apollo	140
Table des matières	144
Annexe 1 : Les rumeurs sur les premiers vols habités soviétiques	
Annexe 2 : Les missions lunaires	
Annexe 3 : Synthèse des missions Apollo	

Annexe 1 : Vladimir Iliouchine ou Youri Gagarine qui fut le premier ?

Il est possible que le matin du 7 avril 1961, soit 5 jours avant le vol de Youri Gagarine, un autre Russe, Vladimir Sergeyeitch Iliouchine ait effectué un vol dans l'espace à bord de la capsule "Rossiya" (Russie). Sa mission ne fut pas une réussite et le héros faillit périr dans ce vol. Ceci fut gardé secret pour des raisons de propagande politique. Un de ses collègues avait été lancé 2 mois auparavant, en secret, le 2 février 1961. Quelque chose d'anormal arriva dès le début du vol et le pilote tomba dans le coma. Incapable de revenir sur Terre avant le début de la seconde orbite, il dut rester dans l'espace jusqu'à la 17e orbite afin de ne pas atterrir sur un sol étranger, il périt dans l'espace.

Elliott H. Haimoff de Global Science Productions a produit un documentaire de 51 mn sur le vol d'Iliouchine avec l'assistance du reporter moscovite Paul Tsarinsky. Ils consacrèrent 5 ans et 500.000 \$ pour la réalisation du film et revendiquèrent les preuves de la réalité du vol. Ce documentaire fut acquit et diffusé par Public Broadcasting Service aux USA. Plus tard il fut repris et diffusé par d'autres médias autour du vol y compris Discovery Channel, Horizon et Canadian Broadcasting Corporation. Après avoir vu ce film j'ai été intrigué et j'ai cherché à comprendre. Pour vous donner une idée de l'affaire, voici une transcription de ce film dont l'adaptation française de Vidéoadapt fut diffusée sur Planète et les sites qui vous permettront de l'approfondir.

Le 12 avril 1961 les médias soviétiques annoncèrent le lancement, la mise en orbite et le retour sur Terre de Youri Gagarine après qu'il eut effectué une orbite autour de notre planète, à bord de Vostok (ci-contre). Officiellement, il fut le premier homme dans l'espace. Cet exploit fut célébré comme il se doit, dans le monde entier, sauf en Chine. Plus loin, l'explication semblera convaincante. Depuis, Gagarine s'imposait parmi les plus grands hommes de l'Histoire.



Mais le démantèlement du bloc communiste et la mise en place de la démocratie dans la Fédération de Russie, ont donné lieu à une stupéfiante révélation. Certains documents du Kremlin, récemment déclassifiés et mis à la disposition des journalistes occidentaux, ainsi que de nouveaux témoignages, confirmèrent que Youri Gagarine, symbole et figure légendaire de l'empire soviétique, n'était pas le premier, mais le second dans l'espace. Ce titre reviendrait à Vladimir Iliouchine.

Il serait désormais établi que le lieutenant colonel Vladimir Iliouchine, fut le premier dans l'espace. Bien que de nombreuses fuites aient circulé à cette époque, ce n'est qu'aujourd'hui que les archives du Kremlin et les récits de témoins directs permettent de confirmer ces révélations.



Après plusieurs décennies de propagande, de mensonges et de démentis officiels, la lumière put enfin être faite sur l'un des plus grands exploits de l'humanité. Il aura fallu plus de 50 ans d'enquête pour localiser le véritable conquérant de l'espace. A plus de 70 ans, cet ancien général de l'armée de l'air travaille encore comme ingénieur au bureau d'études de Sukkoï, le célèbre avionneur basé à Moscou. Le lieutenant colonel Iliouchine a testé plus de 145 appareils d'essais dont le SU 27, le 1er intercepteur russe.

Pour rassembler les pièces du puzzle de cette mission spatiale ratée et de l'imposture qui s'en suivit, l'équipe de reportage d'Elliott H. Haimoff (il produisit plusieurs reportages pour PBS et d'autres radios) a passé 48 heures avec Iliouchine, qui leur a ouvert son musée familial et laissé entrevoir l'incroyable histoire de sa vie. Malgré sa promesse de relater sa version des faits, lors de l'entrevue du 29 juin 1998, il a ensuite annoncé qu'il préférerait garder le secret. Cependant, il a divulgué d'autres informations qui prouvent d'une manière irréfutable sa participation au programme spatial soviétique. Pour mieux comprendre ses craintes, il faut se rappeler le fonctionnement du régime communiste de l'époque et le secret défense qui a toujours entouré les programmes spatiaux.

Le 4 octobre 1957 à 19h28mn34s, l'URSS accomplit ce que la plupart des experts jugeaient irréalisable. Ils inaugurèrent le début de l'ère spatiale avec la mise en orbite (226,07/950,59 km, inclinée à 65,1° et parcourue en 96,2 mn) de Spoutnik 1, dont la masse était de 83 kg. La fusée de 29 m de haut avait une masse de 267 t. Plus tard, l'on saura qu'en réalité tout le 3e étage fut satellisé, soit plus d'une tonne, les soviétiques gardèrent cette information secrète pour ne pas dévoiler leur possibilité de lancer une bombe atomique sur les USA. Le succès de cette mission fut accueilli avec un mélange de stupeur et de terreur, car la fusée n'était en réalité qu'un missile amélioré. Le monde prit alors conscience qu'une ogive nucléaire aurait pu être lancée n'importe où sur la Terre. Après le lancement de Spoutnik, relate le Dr Roald Sagdeyev, ancien directeur de l'agence spatiale soviétique, la presse soviétique a publié des communiqués discrets qui annonçaient simplement la mise en orbite de petits objets. Les dirigeants russes ont visiblement été très surpris par l'ampleur des réactions dans les médias internationaux. Ils ont alors compris qu'entre leurs mains, ce petit jouet pouvait devenir un instrument politique et de propagande.



La réussite de la mission ne fut possible que grâce à l'intelligence et à la détermination du directeur du programme spatial soviétique: Sergueï Korolev, appelé aussi l'homme sans nom. Selon le Dr Sergueï Khrouchtchev, fils de Nikita Khrouchtchev le secrétaire général du parti communiste, aujourd'hui Senior Fellow à l'université Brown (New England), Korolev n'était pas un ingénieur de génie, ni un scientifique. C'était un bon ingénieur doué d'une organisation exceptionnelle. Il réussit à gérer un nombre incroyable de personnes. Sergueï Khrouchtchev d'ajouter que sans lui, ils n'auraient rien fait, car tous ces chercheurs se seraient dispersés comme des fourmis. Il les rassembla et les fit travailler pour lui. Personne ne connaissait Sergueï Korolev, personne ne l'avait rencontré raconte Dennis Ogden, correspondant à Moscou (1955 à 1963) du journal communiste britannique Daily Worker. Il ajoute que personne n'avait jamais entendu parler de lui. Il était toujours cité comme le concepteur, mais jamais nominalement. Il n'apparaissait pas dans les conférences de Presse. Le Comité Nobel contacta les dirigeants soviétiques, dans l'intention d'offrir le prix au concepteur du vecteur du Spoutnik avec toute la reconnaissance et les financements qu'un tel honneur implique. Mais Nikita Khrouchtchev n'était pas prêt à laisser Korolev accepter ce prix en son seul nom et il lui refusa l'autorisation de quitter le pays pour recevoir sa récompense. Il n'y avait aucune explication rationnelle. Sans parler des américains, les Russes eux-mêmes ne comprenaient pas pourquoi on refusait de donner le nom de Korolev, alors que le comité voulait lui remettre le Prix Nobel. La seule réponse fut: " Non, le Nobel ne nous intéresse pas, c'est un secret !". Pour Dennis Ogden, c'était symptomatique d'une société qui commençait à sortir de l'hystérie stalinienne.

A la fin des années 50, les USA comme l'URSS, savaient que le défi suivant serait d'envoyer un homme en orbite terrestre. Plusieurs pilotes d'essais militaires s'entraînèrent dans chacun des deux pays. Le programme soviétique resta une des branches les plus secrètes de l'armée. Ces pilotes furent appelés Cosmonautes (Astronautes aux USA, Spationautes en France et Taïkonautes en Chine). Le colonel Youri Lyzlov, des forces stratégiques spatiales (1960 à 1986) déclara que les cosmonautes ne seront célèbres qu'après être revenus de l'espace. Avant cela, le secret le plus absolu devait être la règle. Cette interdiction visait à ne pas attirer l'attention sur les futurs cosmonautes, mais c'était aussi un moyen de pouvoir dissimuler la vérité en cas d'accident. Dans les années 60, Thomas Maggard raconte que les photos étaient réduites à l'essentiel et certains détails de l'arrière-plan étaient modifiés sans raison apparente. Sur une photo par exemple, un cosmonaute, à l'entraînement, fut effacé.

En 1960 se produisit une catastrophe qui illustra tragiquement la paranoïa qui entourait le secret défense soviétique. Un missile, R-16 ICBM, se révéla défectueux au moment du lancement. Au lieu de décoller, il resta fixé à la rampe. Au mépris des consignes de sécurité les plus élémentaires, le Kremlin ordonna au chef de projet et à ses ingénieurs de réparer immédiatement la fusée, pour un lancement le jour même. On était en pleine guerre froide.

Mikhail Yangel (constructeur du missile) et le maréchal Mitrofan Nedelin, responsable des forces stratégiques spatiales voulaient offrir en cadeau à Khrouchtchev, pour célébrer l'anniversaire de la révolution bolchevique du 7 novembre, le lancement réussi du premier missile R-16. En 1960, en pleine guerre froide, l'URSS et les USA sont engagés dans une véritable frénésie de constitution de leurs arsenaux de missiles intercontinentaux. Chez les soviétiques, la difficulté de transformer la Sémiorka en missile opérationnel en raison de l'oxygène liquide, justifia la création du missile R16 (SS-7). C'est le combustible composé d'acide nitrique et d'UDMH qui fut choisi. Le 20 octobre 1960, le missile se trouvait sur une plate-forme du site 41. Le 24 octobre 1960, le maréchal Nedelin, responsable des forces stratégiques spatiales, était assis sur une chaise à proximité immédiate de la fusée, fumant une cigarette. Il était exaspéré des reports successifs. Il incitait le personnel à s'activer. Tout le monde savait que c'était contraire aux règles de sécurité, mais personne n'osa s'opposer au chef de peur de perdre son emploi, relate le Dr Roald Sagdeyev, qui continue en racontant qu'ils étaient plus de 200, y compris les responsables, à se démener lorsqu'une gigantesque boule de feu, de plus de 120 m de diamètre, jaillit, anéantissant tout sur le pas de tir. Il était 18h45, soit 30 mn avant le lancement. De très fortes explosions durèrent environ 20 secondes et l'incendie fit rage pendant 2 heures. Les lueurs furent visibles jusqu'à 50 km.

Quelques minutes avant le désastre, le général Mrykin invita Mikhail Yangel, Kouznetsov et Iosifiyan, (ingénieur en chef des systèmes électriques), à fumer une cigarette en aparté. Iosifiyan persuada aussi Bogomolov, lequel ne fumait pas, de venir avec eux probablement pour discuter de la situation. Dans les mémoires de Chertok, Iosifiyan et Bogomolov voulait parler à Yangel de retarder le lancement. Quelques minutes plus tard, sains et saufs par miracle à l'extérieur du complexe, Yangel et les autres, virent la catastrophe qui s'étalait devant eux. Lorsque Yangel informa Khrouchtchev, ce dernier, en colère, lui demanda pourquoi il était toujours vivant.

Aucune liste des morts n'ayant été dressée, personne ne connaîtra jamais le nombre des victimes. Le plus incroyable, c'est que les soviétiques affirmèrent que la tragédie n'avait pas eu lieu. Il faudra attendre 30 ans avant que le gouvernement ne révèle l'affaire. D'autres documents déclassifiés du Kremlin indiquent que 7 cosmonautes périrent au cours d'entraînements:

- Aleksei Ledovskiy est décédé le 1 Novembre 1957 lors d'un vol suborbital à Kasputin Yar au bord de la Volga. Il faisait partie du groupe des cosmonautes fantômes.
- Serenti Shivorin est décédé le 1 Février 1958 lors d'un vol suborbital. Hermann Oberth, le théoricien américain de l'espace, déclarait en 1959, qu'un pilote était mort lors d'un vol balistique à Kapustin Yar. Cependant, il ne révéla jamais ses sources. En décembre 1959, l'agence de presse italienne, Continentale, relatait, selon une source communiste tchécoslovaque de haut rang, le décès de plusieurs cosmonautes dont Shivorin.
- Andrei Mitkov décédé le 1 Janvier 1959 lors d'un vol suborbital à Kasputin Yar. Il faisait partie du groupe des cosmonautes fantômes.

- Ivan Kachur décédé le 27 Septembre 1960 lors d'un vol orbital. Il faisait partie du groupe des cosmonautes fantômes.
- Piotr Dolgov est décédé le 11 Octobre 1960 lors d'un vol orbital. Le vol fut suivi pendant 20 minutes par des stations en Turquie, Japon, Suède, Angleterre et Italie. Il faisait partie du groupe des cosmonautes fantômes.
- Grachev décédé le 15 Septembre 1961 lors d'un vol orbital. Il faisait partie du groupe des cosmonautes fantômes. Un cratère lunaire porte son nom, sur la face arrière de la Lune.
- Alexis Belokonyov décédé le 15 Mai 1962 lors d'un vol orbital. Il faisait partie du groupe des cosmonautes fantômes.

Ces cosmonautes ne furent jamais reconnus comme les pionniers qu'ils ont été, eux qui ont sacrifié leur vie pour la conquête de l'espace. Ils restent de simples noms sur la liste secrète des cosmonautes disparus à l'entraînement. Pour Gordon Feller, historien et journaliste de l'Union soviétique et éditeur de Russian Business News, la plupart de ces hommes ont réalisé qu'ils s'étaient faits roulés et ils étaient très en colère. Hélas, ils ne pouvaient rien faire. Ils n'avaient nulle part où aller et il n'y avait pas de presse libre. Ils ont raconté leur histoire aux membres de leur famille, mais que pouvaient-ils faire de plus ? Pour le colonel Youri Lyzlo des forces stratégiques soviétiques, tout était basé sur la propagande et le secret. Tout le monde le savait bien et ce que disaient les radios et les journaux était une chose, mais la réalité était très différente.

A cela, Dennis Ogden (correspondant à Moscou (1955 à 1963) du journal communiste britannique Daily Worker) ajoute que ce que les responsables soviétiques de la propagande ne comprenaient pas, qu'en rapportant les difficultés, les problèmes, les erreurs, les accidents et les défaillances, ils auraient dressé un portrait beaucoup plus favorable de l'URSS. A force d'affirmer que tout était parfait, ils minimisaient les accomplissements du pays et de son peuple. Présenter les choses de cette façon, c'était sous-estimer l'héroïsme, la lutte et les efforts du peuple soviétique. C'était une approche vraiment idiote.

L'Union soviétique, en médiatisant ses avancées technologiques et en dissimulant ses échecs, permit au communisme d'avoir une très bonne réputation. Partout le communisme était synonyme de réussite. Khrouchtchev est littéralement obsédé par l'idée d'être le premier à envoyer un homme dans l'espace. Il ordonna à Korolev de s'y employer à n'importe quel prix. A l'époque le lieutenant colonel Vladimir Iliouchine était sans conteste le plus célèbre et le plus expérimenté des pilotes d'essais soviétiques. Déjà détenteur de plusieurs dizaines de records de vitesse et d'altitude. En 1959, il établit un nouveau record du monde d'altitude de près de 30 000 m à bord d'un intercepteur SU 9. Cet exploit lui vaut d'être élevé au rang de héros de l'Union soviétique, la plus haute distinction militaire qui est réservée à de rares élus.

Iliouchine, né le 31 mars 1927, descend d'une grande famille de militaires et d'ingénieurs en aéronautique. Son père Sergueï Vladimirovich Iliouchine était considéré comme un héros et fut un membre privilégié de "l'establishment" soviétique. Il fut un des plus grands constructeurs d'avions. Il construisit la plupart des bombardiers et des chasseurs qui ont sauvé le pays de l'invasion nazie, pendant la seconde guerre mondiale. Lors de la bataille de Stalingrad, l'il-2 sturmovik (*ci-dessous*) fut le plus célèbre des appareils soviétiques. C'était un avion d'attaque au sol et cela a conféré à son concepteur une grande influence auprès de Staline et de Khrouchtchev.



Sergei Vladimirovich Iliouchine compta, par ailleurs, parmi les hommes les plus puissants du pays, lui-même décoré à 3

reprises du titre de héros de l'Union soviétique, il occupa une place de choix au sein du pouvoir puisqu'il était un des principaux représentants du soviét suprême. Après la guerre, il ne tarda pas à réaliser que l'avenir de l'avion passait par une transition de la production militaire, vers la production civile. Il prouva une nouvelle fois son génie en dessinant certains des meilleurs avions commerciaux jamais conçus. Beaucoup considèrent alors le complexe aéronautique Iliouchine comme l'un des plus grands avionneurs civils du monde. Il était très respecté par son travail en tant qu'ingénieur aéronautique et sa contribution majeure au développement de l'aviation civile russe, juste après la guerre, fut primordiale.

Craignant de rester à jamais prisonnier de la réputation de ce père écrasant, Vladimir Iliouchine mit tout son cœur pour sortir de son ombre. Il était bien décidé à ne pas reprendre le complexe aéronautique familial, au lieu de quoi, il intégra l'école des pilotes d'essais et s'employa par la suite à concevoir et tester des avions de chasse. En 1952, dans un ultime acte de défis, il se



fit engager chez Sukkoï, rival direct et ennemi personnel de son père. On raconte que Sergei Iliouchine fut pris d'une telle rage contre son fils, qu'il mit des années à lui pardonner. Tout au long des années 50, les 2 hommes n'eurent aucun contact. Dans un premier temps, Vladimir Iliouchine repoussa les propositions qui lui furent faites d'aller dans l'espace. Il n'apparaît pas sur les photos de 1959 publiées dans un reportage du magazine populaire "Ogonyok". A cette période, il avait concentré tous ses efforts à obtenir le record du monde d'altitude. Il rétorqua que l'espace était tout juste bon pour les rats et les chiens de laboratoires. En effet, la capsule spatiale doit être pilotée par des ingénieurs restant au sol, grâce à des dispositifs télécommandés, les cosmonautes n'avaient pratiquement rien à faire. Le voyage ne présentait donc pas un grand intérêt pour le meilleur pilote d'essais de son temps, un inconvénient certain qui n'empêcha pourtant pas la plupart des collègues d'Iliouchine, eux-mêmes des aviateurs accomplis, de rejoindre le corps des cosmonautes. Mais peu de temps après avoir été fait héros de l'Union soviétique, le pilote changea d'avis. Bientôt il réalisa que son record d'altitude ferait pâle figure, à côté d'une première mise en orbite. A cause, peut-être, d'un formidable coup politique de son père, Vladimir Iliouchine fut autorisé à rejoindre le groupe des cosmonautes un an après que ce groupe soit formé. Il mit alors tout en œuvre pour devenir le premier homme de l'espace. La conquête spatiale lui apparaissait désormais comme une opportunité personnelle de se démarquer enfin de son père, en devenant à son tour un héros immortel dans un autre domaine que l'aviation. Il subit un entraînement spécial intensif et apparut

rapidement comme le plus talentueux des cosmonautes du groupe. Au début de 1961 des photos, publiées en URSS, montraient Vladimir Iliouchine subissant un entraînement spatial.

Pour Gordon Feller, le spécialiste de l'Union soviétique, les " Iliouchine " ont apporté à l'Union soviétique un sens très développé de la dynastie. Il y a plusieurs familles qui ont beaucoup compté dans l'histoire de la Russie et les " Iliouchine " sont de ceux-là. Il faut préciser qu'ils se sont toujours distingués dans la même sphère aéronautique et aérospatiale. Selon lui, ce n'est pas un hasard si Vladimir Iliouchine fut choisi pour cette mission, c'était le candidat idéal. Il avait le bon âge, la trentaine, l'entraînement idéal et un nom célèbre. Si cela avait marché, il était le personnage rêvé. C'est pour cette raison que Feller s'intéressa à cet événement, parce qu'il était logique que les dirigeants communistes l'aient choisi.

Grâce à ses accomplissements professionnels et à l'influence politique de sa famille, le lieutenant colonel Iliouchine se vit enfin offrir l'occasion de devenir le premier homme dans l'espace. Pendant des mois, il se soumit avec ténacité aux séances intensives de rattrapage sans lequel il ne pouvait prétendre être remarqué parmi les cosmonautes qui se préparaient depuis au moins 2 ans. Le colonel Youri Lyzlov déclara qu'il connaissait bien Vladimir et que c'était quelqu'un de très gai et d'intelligent, toujours prêt à rendre service. Pendant l'entraînement, il était très concentré et vérifiait toujours méticuleusement les moindres détails. Il accomplissait toutes ses tâches à la perfection s'imposant ainsi comme le meilleur du groupe. Malgré le secret dont s'entourait le programme soviétique, plusieurs fuites précédèrent le vol de Vladimir Iliouchine, sans doute parce qu'il restait aux yeux du monde l'homme qui s'était le plus éloigné de la Terre en battant le record d'altitude.

Dennis Ogden se souvint d'une photo d'Iliouchine en habit de cosmonaute et on en parlait comme le futur homme de l'espace. Le capitaine Anatoly Gruschenko, armée de l'air soviétique de 1960 à 1972 et aujourd'hui aux USA, était chargé de filmer le lancement sous tous ses aspects. Il raconte que Vladimir Iliouchine était le plus gentil, le plus liant et le plus heureux des pilotes. Il était confiant, déterminé et prêt à réussir sa mission. D'après les documents déclassifiés, Iliouchine fut placé dans la capsule "Rossiya" (Russie) qui a été lancée dans le plus grand secret à l'aube du 7 avril 1961. Anatoly Gruschenko raconte qu'il était survolté à l'idée de participer à cet événement. Il se disait que la plupart des gens se contentent de lire l'histoire et lui, il en fait partie. A l'époque, la CIA et les services de renseignements militaires ne font aucune déclaration pour confirmer ou démentir la détection du lancement ou du vol lui-même. Même après plusieurs décennies, les archives de la CIA et du

Département d'Etat restent classifiés. Sans doute les services secrets occidentaux ne tenaient-ils pas à dévoiler leur capacité à détecter les lancements et les orbites soviétiques ou bien leurs sources.

Parmi les premiers reporters qui rompèrent le silence, Dennis Ogden affirme avoir vu Iliouchine en combinaison spatiale dans un reportage où il était cité comme faisant partie du corps des pilotes préparés à devenir cosmonautes. Aussi, lorsqu'il entendit dire que Vladimir Iliouchine était allé dans l'espace, il n'en fut pas surpris. Certain de cette information, il chercha à obtenir la confirmation auprès des autorités: ministère de la presse, la Pravda, les Izvestia, l'Agence Tass, l'Etoile Rouge. Partout il obtint la même réponse: "Nous ne savons rien". Ce n'est que plus tard qu'il réalisa qu'on lui mentait. Il fit un compte-rendu dans le Daily Worker, le journal communiste anglais. Il révéla qu'il fut menacé plusieurs fois et craignait pour sa vie et celle de son informateur.

Avant d'avoir achevé la première révolution, Iliouchine ne répondit plus aux appels radio des contrôleurs du vol. Il avait perdu connaissance. C'était une répétition tragique que ce qui c'était passé en février. Compte tenu de l'importance de Vladimir Iliouchine, il fut décidé de tenter un atterrissage d'urgence à la 3e orbite. Selon les lois de la mécanique céleste, il ne pouvait revenir au point prévu qu'à la 17e révolution. Les archives révèlent que l'atterrissage eut lieu à la 3e orbite et eut pour conséquence la pose de la capsule, Rossiya, en Chine communiste à une période où les relations entre les deux pays étaient très tendues.

Si les américains font amerrir leurs capsules par soucis d'économie, les Russes les font atterrir, parce qu'ils disposent d'une très grande surface terrestre. Mais à ce moment-là, les procédures de rentrée n'étaient pas au point. La procédure normale voulait que le cosmonaute s'éjecte de la capsule à 20 000 pieds (~ 7 000 m) et il touchait le sol en parachute. Les documents du Kremlin indiquent qu'étant inconscient, Ilyushin ne put s'extraire du Vostok et fut gravement blessé lors du brutal atterrissage, mais il s'en sortit vivant. Il fut ainsi le premier à revenir vivant d'un séjour spatial. Capturé par des villageois chinois, puis remis aux autorités chinoises qui le firent hospitaliser. Il fut gardé pendant un an, au titre d' "honorabile invité", un euphémisme réservé aux agents étrangers.

Gordon Feller raconte qu'en lisant les archives soviétiques, il constata que plusieurs documents signalaient, à une époque où les relations sino-soviétiques étaient tendues, que les officiels du parti communiste chinois avaient posé diverses questions sur la nature du programme spatial des soviets et sur le rôle d'Iliouchine. Il remarqua aussi que les questions étaient toujours liées à un incident survenu sur leur territoire.

Dans son livre *Uncovering Soviet Disasters*, James Oberg raconte que pour l'URSS, le pire venait de se produire. La mission était un fiasco avec leur cosmonaute aux mains de l'ennemi. Les dirigeants furent totalement désarçonnés. Certains éléments indiquent qu'ils envisageaient d'abord de rendre public l'accident, mais plus tard ils décidèrent d'ignorer les médias étrangers. Finalement, ils démentirent avec obstination en invoquant diverses explications aussi incohérentes que contradictoires. Mais il était trop tard. Dennis Ogden fut parmi les premiers à révéler l'affaire, mais aujourd'hui encore, il refuse de donner le nom de son informateur, haut placé et digne de confiance. Le Times de Londres publia les mêmes informations, de même que les Hongrois, les Yougoslaves et les autres correspondants qui étaient au courant. Ils s'appelaient pour se faire part mutuellement de l'événement et essayer d'obtenir des confirmations. Le jour même, un journaliste français, Edouard Brobovsky, révéla le nom d'Iliouchine et un bulgare ainsi que plusieurs représentant de l'US Air Force révélèrent qu'un essai avait eu lieu. Or, toutes ces sources étaient indépendantes. Cela n'avait pas circulé par le bouche-à-oreille. Au moment de l'atterrissage d'urgence, des fuites révélèrent aux correspondants étrangers à Moscou qu'un vol humain avait eu lieu ou était imminent. Juste un jour après l'échec d'Iliouchine, une décision rapide fut prise pour lancer sa doublure: Youri Gagarine.



Le vol de Gagarine se termina presque en tragédie au moment de la désatellisation, la cabine (ci-contre) ne pouvant se déconnecter du module de service. Après plusieurs tentatives infructueuses, le module d'atterrissage se sépara finalement, sans raisons apparentes. La manœuvre de désorbitation se produisit à peu près 10 minutes plus tard et Gagarine se posa en parachute loin de la zone prévue et de l'équipe de récupération. Il fut accueilli par des insultes et des jets de pierres, les paysans l'ayant pris pour un espion américain. L'affaire de l'U2 venait de se produire. Gagarine leur cria qu'il était l'un des leurs et tout rentra dans l'ordre.

Quant aux suites du vol d'Iliouchine, les soviétiques continuèrent pendant des décennies à démentir avec véhémence ce qu'ils appellent un tissu de mensonge. Les responsables de la propagande furent chargés de discréditer et de dénigrer les reporters et correspondants étrangers. Ce n'est qu'après la chute du communisme et le démantèlement de l'URSS, que l'accès aux archives du Kremlin permettra de confirmer la véracité de l'histoire.

Ce sont ses collègues soviétiques qui en parlèrent devant lui, relate Gordon Feller. Ils en parlaient à mots couverts, dit-il, ce qui lui mit la "puce à l'oreille" et le convainquit qu'il y avait quelque chose qui ce ou c'était passé et cela valait la peine de s'y intéresser. Mais ce n'est que 8 ans plus tard qu'il eut accès aux documents. Dans une société qui s'articule autour du secret, les archives doivent être protégées à tout prix, pas pour préserver la mémoire, mais pour préserver la fiction. C'est pour cela,

qu'aujourd'hui, il est encore très difficile de mettre la main sur des documents d'archives. Ce n'est que depuis la chute de l'empire soviétique et la déclassification d'un certain nombre de documents probants, que la lumière a enfin pu se faire. Gordon Feller a bénéficié d'un coup du sort comme il en arrive parfois. Il réussit à s'introduire dans une bibliothèque et il a eu l'opportunité de lire des choses auxquelles il n'aurait pas eu accès autrement. Il y avait 3 types de documents:

- ceux sur la préparation du lancement
- ceux sur la catastrophe elle-même
- ceux sur les discussions qui suivirent.

En avril 1961, les médias soviétiques furent de plus en plus véhéments, contradictoires et incohérents dans leur obstination à donner leur point de vue. Selon une première version officielle, le lieutenant-colonel Ilyushin n'avait jamais intégré le corps des cosmonautes et il serait en excellente santé. Plus tard, les soviétiques reconnaissaient qu'il avait suivi la préparation, mais précisaient qu'un mois avant le vol, il fut victime d'un accident de voiture, ce qui l'empêcha de partir dans l'espace. Plus tard encore, ils prétendirent qu'Iliouchine n'avait pas fait partie du projet, à cause d'un accident survenu en 1959. Les médias



soviétiques situent l'accident à un an après et affirment qu'il est resté dans le coma jusqu'en 1961. A l'époque toutes ses contradictions confortaient les journalistes occidentaux dans leur scepticisme. Un des éléments les plus probants fut notamment une photo de Vladimir Iliouchine, datée de décembre 1960, recevant le titre de héros de l'Union soviétique pour son record d'altitude à 28 857 m à bord d'un T-431, modifié en Su-9. Il n'était visiblement pas dans le coma. A aucun moment le gouvernement ne fit intervenir Iliouchine pour démentir ces informations, mais maintint cependant, par l'intermédiaire des médias, qu'il n'était pas le premier homme dans l'espace. Tout ceci fait dire à Ogden que le pire ennemi de l'URSS était elle-même et qu'il était totalement stupide de vanter l'efficacité de sa propagande.

Pour expliquer la présence de Vladimir Iliouchine à Hangchow en Chine continentale pendant 35 jours, les organes de presse officiels annoncèrent qu'il a été envoyé dans un centre médical de rééducation. Mais là encore, la énième version présentait de multiples incohérences. Pour Thomas Maggard, il y a eu 2 communiqués pour signaler sa présence dans un hôpital de Pékin et dans un autre à Hangchow. Mais il était invraisemblable qu'un homme victime d'un accident de voiture en URSS, fut soigné en Chine, d'autant qu'il était un le plus grand pilote d'essais et le fils du plus grand constructeur d'avions soviétique et que les deux nations étaient sur le pied de guerre. Des troupes étaient amassées le long de la longue frontière commune. Les médecins soviétiques étaient-ils si mauvais ? Pourtant les dirigeants reconnurent que les infrastructures médicales étaient bien meilleures que les chinoises. Après des recherches, Dennis Ogden ne trouva aucune trace d'un soviétique soigné en Chine.

Après le vol d'Iliouchine les dirigeants soviétiques sont dans l'impasse. Nikita Khrouchtchev ne peut pas compter uniquement et efficacement sur la propagande pour escamoter le fiasco. Son fils, le Dr Serguéi Khrouchtchev, Senior Fellow à l'université de Brown raconte que lorsque son père est arrivé au pouvoir, la société soviétique était ouverte. Mais avant cela, tout était secret et beaucoup de choses le sont encore. Elles n'ont jamais été expliquées. Les dirigeants se disaient qu'il était inutile de parler des échecs, car ils ne servaient pas les intérêts du communisme. L'ancien directeur de l'agence spatiale soviétique, Roald Sagdeyev raconte que les échecs n'étaient connus que par un cercle très restreint. Il y avait une sorte de transmission orale entre amis. Avec le recul, il ne peut s'empêcher de penser qu'ils ont eu beaucoup de chances de ne pas rencontrer plus de problèmes, car cette façon de dissimuler les erreurs nuisait énormément au programme spatial, d'autant plus que la méfiance était de rigueur. Gordon Feller d'ajouter qu'en économie, comme en politique, la doctrine marxiste-léniniste se targuait d'être une analyse scientifique objective des lois humaines et naturelles. Alors si la théorie est bien appliquée, tout doit être totalement parfait dans la pratique. C'était donc terriblement gênant, non seulement d'en parler à l'extérieur, mais aussi de l'admettre dans les coulisses du pouvoir. Après cela, les dirigeants n'avaient personne à présenter au public, alors même que Nikita Khrouchtchev avait fait du programme spatial le fer de lance de la propagande. Un tel échec était intolérable.

Par une coïncidence, plus qu'étonnante, le samedi 8 avril 1961, au lendemain de la mission malheureuse d'Iliouchine, Korolev organisa une réunion intense avec divers membres de l'armée et du gouvernement pour leur présenter le prochain premier homme dans l'espace, la doublure d'Iliouchine: le lieutenant Youri Gagarine. Mais cette rencontre ne sera rendue publique qu'après le vol de Gagarine, quant aux images, elles ne seront diffusées que plusieurs années plus tard. L'annonce se fit par l'intermédiaire du chef d'Etat-major en des termes sibyllins: "Il est très difficile de faire un choix parmi 6 cosmonautes parfaitement entraînés, mais il faut le faire. Le Haut Commandement de l'Armée de l'air recommande donc le lieutenant Youri Gagarine pour le premier vol dans l'espace. Guermamm Titov sera sa doublure." Dès qu'il fut informé, Gagarine déclara: " Permettez-moi d'assurer au gouvernement soviétique, au parti communiste et au peuple tout entier, que c'est avec fierté que j'accomplirai avec fierté la mission qui m'a été confiée et que je parviendrais à surmonter les difficultés qui pourront se présenter, comme doit le faire un bon communiste." Avec le recul, il est difficile de concevoir que le premier homme dans l'espace ait été choisi si rapidement un samedi, avec seulement 3 ou 4 jours de préparation pour le vol le plus mémorable de

toute l'histoire de l'humanité. Comparé à Iliouchine, héros détenteur de multiples records, Gagarine fait pâle figure. Frais émoulu de l'école d'aviation, il est encore considéré comme novice. Il n'a aucun accomplissement notable à son actif, mais il est jeune, intelligent, séduisant et membre dévoué du parti communiste.

Cinq jours après le vol d'Iliouchine, l'URSS annonça le succès de la mission de Gagarine. Il faut préciser que Nikita Khrouchtchev présent lors du premier lancement, était en vacances au bord de la Mer Noire au moment du vol de Gagarine. La nouvelle qu'on lui apprend au téléphone le prend totalement par surprise. Il rentre immédiatement à Moscou pour y organiser une formidable cérémonie en l'honneur du nouveau héros. D'après certains historiens, c'est le stress dû à l'échec d'Iliouchine, qui aurait poussé le premier secrétaire du parti communiste à partir se reposer au bord de la Mer Noire. Korolev aurait alors prit les choses en main, décidant de lancer Gagarine, sans se soucier des conséquences et sans même prendre la peine de prévenir Nikita Khrouchtchev de la possibilité d'un nouvel échec.

Il est clair que Gagarine était un instrument politique et le premier secrétaire et son pays l'ont exploité au maximum. Au retour, il fut d'abord accueilli à Moscou, puis il fit le tour du monde. Il était le porte-parole de l'URSS. Il était décrit comme le soviétique moyen, intelligent et courageux. C'était exactement l'image que les dirigeants voulaient donner du communisme. Dans un dossier du Département d'Etat américain récemment déclassifié, une note intéressante révèle qu'après le succès de Gagarine, tous les pays du globe ont envoyé des lettres de félicitations à Nikita Khrouchtchev, tous sauf la Chine, qui a gardé un silence mystérieux. Pourquoi les dirigeants chinois Mao Tsé Dong et Liu Shaoqi, se sont-ils abstenus d'envoyer une lettre de félicitations à Gagarine. Pourtant toutes les missions soviétiques suivantes furent applaudies par les chinois. Peut-être était-ce un moyen pour montrer au monde qu'ils n'étaient pas dupes: Gagarine n'était pas le premier. Pour l'URSS, l'exploit de Gagarine fit oublier Iliouchine. Ceux qui connaissent la vérité comme Dennis Ogden, son informateur, les ingénieurs et techniciens qui ont participé au lancement, furent contraints de se faire les complices d'une composition du silence motivé par le jeune capitaine Anatoly Gruschenko de l'Armée de l'Air (1960-1972). Ce dernier déclara que son supérieur l'appela pour lui ordonner, dans des termes très clairs, de détruire tout ce qu'il avait sur Vladimir et de ne pas dire un mot sur cette affaire. Au son de sa voix, il avait compris que sa famille et lui écoperaient d'un aller simple pour la Sibérie avec une adresse définitive.

Quant à Dennis Ogden, il raconte qu'il fut convoqué au ministère de la presse pour rencontrer un certain Arlovov, ministre. Le comité central l'avait chargé de faire une enquête sur son article. Il s'est penché par-dessus la table et lui dit qu'il ne voulait savoir qu'une chose, le nom de son informateur. Il lui répondit qu'il ne pouvait pas pour une question d'éthique. Alors il perdit son calme et insista, car cette personne avait fait beaucoup de tort à son pays. Il ne fut pas expulsé, car il eut été mal vu à l'étranger d'expulser un journaliste communiste. Tout au long de cette histoire de propagandes et de démentis, Vladimir Iliouchine fut relégué dans les supercheries, des inventions fabriquées par des reporters occidentaux et à l'imagination débordante. Ogden lui-même fut étiqueté comme menteur éhonté. Cependant les soviétiques ont fait l'impossible pour découvrir qui le renseignait. A l'époque, le KGB le fit suivre en permanence afin de capturer son informateur. Les 2 hommes finissent par craindre pour leur vie. Il raconte qu'un jour lors d'une réception, il sentit que celui qui le filait était derrière lui. En passant la porte, il vit son informateur devant lui. Ce dernier comprit aussitôt et fit semblant de ne pas le voir.

La Chine et l'URSS partageaient la même hostilité envers l'occident, aucun communiqué de presse ne fut émis concernant le séjour de Vladimir Iliouchine en Chine ou les conditions de sa libération. Le marché conclut entre les deux puissances pour négocier son retour, reste mystérieux. On parle d'accord économique. Il fut sans doute échangé contre des espions, de l'assistance technique et de l'argent. Il rentra tranquillement chez lui environ un an après sa mission. Il recommença à travailler chez Sukkoï dans la plus grande discrétion. Thomas Maggard explique que Vladimir Iliouchine représentait une situation problématique pour Nikita Khrouchtchev, tout d'abord parce qu'il était un célèbre pilote d'essais et ensuite parce qu'il appartenait à une grande famille, ceux que l'on considérait alors comme l'élite soviétique. Il semble qu'il fut décidé d'un commun accord que Vladimir garderait le silence.

L'ingénieur de génie Korolev fut lui-même victime de l'hystérie et du secret qui entoura le programme spatial. Tout comme Iliouchine, il fut privé de la reconnaissance qui lui revenait de droit. Korolev était le concepteur en chef de la fusée qui lança Gagarine. Le comité Nobel voulait attribuer à cet homme un prix pour ce qu'il avait accompli. Nikita Khrouchtchev s'y opposa. Il restera l'homme sans nom jusqu'en 1966, après sa mort. Pour Gordon Feller, il est difficile d'imaginer lorsqu'il mourut, qu'il fut spolié de 2 prix Nobel. Parce qu'il vivait dans une société dominée par la paranoïa et la dissimulation, sa contribution unique à la conquête de l'espace n'a pu être connue du monde qu'à titre posthume. Avec le recul, quand on contemple ces destins et ces personnalités: Khrouchtchev, Korolev, Gagarine et Iliouchine, on ne peut s'empêcher de remarquer qu'il y a une dimension très shakespearienne dans l'existence menée par chacun des cosmonautes après les événements. Bien sûr, si Gagarine n'était pas le premier homme dans l'espace, il le savait probablement. C'est peut-être cela qui l'a fait sombrer dans l'alcoolisme, au point de ne plus pouvoir se maîtriser en public. Il semble qu'il était devenu incontrôlable pour le parti communiste parce qu'il disait des choses très gênantes, voire carrément dangereuses. Certains racontent même qu'il a lancé un jour, un verre de champagne au visage de Brejnev, alors secrétaire général du parti, lors d'une réception officielle. Peu de temps après, en mars 1968, il s'écrase aux commandes d'un Mig dans des circonstances suspectes. Par un ultime coup du sort, c'est Vladimir Iliouchine qui dirige la commission d'enquête sur l'accident. Les comptes-rendus sont vagues et laissent de nombreuses questions en suspens. Iliouchine lui-même signale que le corps de Gagarine n'a jamais été retrouvé. Dans l'épave, un doigt de l'ancien héros fut récupéré et beaucoup d'experts se demandent s'il n'a pas été assassiné par le KGB, sur ordre de Brejnev. Quant au véritable conquérant de l'espace, il continue à vivre avec le souvenir de la vie qui lui fut volée, même s'il sait, au fond de lui, qu'il a permis à l'homme de franchir une étape importante dans la conquête de l'espace.

La conclusion sera apportée par le capitaine Anatoly Gruschenko de l'Armée de l'Air (1960-1972) qui a émigré aux USA il y a plusieurs années. Il se réjouit de la disparition du système communiste en Russie et surtout qu'il n'a plus à se taire pour protéger la réputation de l'Union soviétique et de ses dirigeants. Il déclara que si le KGB venait le chercher, il leur cracherait au visage pour ce qu'ils ont fait à Vladimir qui devrait être vénéré comme le véritable héros qu'il est. Né le 31 mars 1927, après avoir eu une vie bien remplie, il vit à Moscou.

Que penser de ce documentaire ?

Aucune confirmation visuelle n'y est visible. Il n'y a aucune photo ou film montrant Ilyushin à l'entraînement ou au cours de sa mission. Bien que Elliott H. Haimoff décrive la mission d'Iliouchine, les images montrent seulement ce qu'il est en train de raconter. Elles sont trompeuses, rien concernant l'événement n'est visible. C'est tout juste un film d'archives montrant des cosmonautes à l'entraînement. Parfois des intervenants importants font part de leur vécu (Dr. Roald Sagdeyev, Dr. Sergei Khrouchtchev en regard de l'aspect général du système soviétique et de son programme spatial, mais rien sur le vol d'Iliouchine. Les seules évidences qui attesteraient du vol sont :

- Interview de Dennis Ogden, le reporter qui rompit le silence en 1960.
- Interview du Capitaine Anatoly Gruschenko, qui réside aux USA et qui prétend avoir filmé le décollage.
- Interview du Dr. Tom Maggard. Il n'était pas présent, mais a obtenu des informations d'un informateur de haut rang.
- Interview de Gordon Feller, qui déclara avoir consulté les archives du Kremlin concernant le vol.

"Les déclarations extraordinaires exigent une preuve extraordinaire." - ici nous sommes confrontés à une déclaration, pouvant changer le cours de l'histoire, basée sur les propos de deux hommes.

A l'opposé, il y a pléthore de récits de première main révélés en Russie, après la chute de l'Union soviétique par ceux qui étaient intimement liés aux événements de cette période. Les journaux intimes et les mémoires des directeurs de programmes ou autres, des cosmonautes et des ingénieurs soviétiques au centre du programme de l'espace ont été édités. Des documents personnels et officiels, les journaux intimes et les notes contemporaines de cette période furent vendus aux enchères et achetés par des musées et des instituts occidentaux. Les plus grands secrets de l'Union soviétique - l'échec du programme lunaire, le désastre de Nedelin, les terrifiantes ogives bactériologiques et nucléaires développées pour leurs missiles - sont dévoilés à l'étranger. Il est certain que la vérité sur Iliouchine devrait être incluse parmi de telles révélations. Mais il n'y a pas eu le moindre indice de source russe. Au cours des deux années qui suivirent la révélation du documentaire d'Haimoff, personne n'est venu pour le justifier. Un ami d'Ilyushin a déclaré qu'il n'avait jamais entendu parler de telles sornettes.

En réponse aux doutes au sujet du documentaire, Haimoff a fourni la réponse suivante: "Je suis absolument dégoûté par tous ces sceptiques et les clones du genre James Oberg (l'auteur de *Uncovering Soviet Disasters*) qui ont été dupés pendant ces 40 dernières années; ils sont justes l'expression de leur aigreur, n'étant pas capables de révéler cette histoire les premiers. Pas un, évidemment, ne peut même prétendre être aussi impliqué que nous dans l'ensemble de cette affaire. Tout ceux qui affirment que ceci est un mythe ou une escroquerie, sont en réalité des escrocs eux-mêmes, pouvant seulement être considéré comme des marionnettes de la propagande russe... Nous voulons laisser l'Histoire décider de la valeur de la propagande soviétique soutenue au cours des 40 dernières années en tant que modèle de pensée, en sachant la vérité de cette affaire et ne voulant pas passer pour idiot ignorant."

A cela, un détracteur rétorqua : "Je ne voudrais pas décrire Haimoff en termes acerbes. Mais considérer la quantité de documents qui existent, cela contredit l'affirmation que le vol d'Iliouchine s'est produit. Nous avons les journaux intimes, jour après jour, de Kamanin, chef des cosmonautes au moment du lancement de Gagarine. Nous avons les mémoires des chefs du projet Vostok, Chertok, Feoktistov, Mishin et beaucoup d'autres qui décrivent avec une pléthore de détails leurs propres activités en relation avec le lancement. Nous savons qui est arrivé au centre spatial pour le lancement et à quel moment, quelles procédures officielles étaient en cours lors du choix des équipages, la préparation du véhicule de lancement, etc. Plus important, nous savons les relier aux procédures et préparations des lancements postérieurs. Il n'y a rien qui indique la véracité du vol.

Il y a des centaines de photographies réalisées sur des cosmonautes à l'entraînement, de la préparation au retour de vol. Même à l'époque soviétique, les censeurs faisaient des erreurs et laissées voir des photographies montrant des cosmonautes ou des sondes inconnus. Ceux-ci ont fourni des documents pour les observateurs soviétiques de l'espace au moment où le secret entourait le programme. Mais malgré ces centaines de photos réalisées avant et depuis la chute de l'Union soviétique, il n'y en a aucune montrant Iliouchine à l'entraînement, encore moins de son lancement. Contre cette masse incroyable de documents, les défenseurs de la théorie d'Iliouchine n'ont apporté aucun document, aucun témoignage de première main, sauf les déclarations de Mr Gruschenko, mais aucune photo de document.

Nous sommes disposés à garder un esprit ouvert. Naturellement, si des preuves sont fournies, l'Histoire en serait bouleversée. Mais dans un monde où l'ancien chef du programme soviétique des armes bactériologiques a admis que les missiles ICBM furent équipés d'ogives contenant de l'anthrax et le bacille de la peste, où l'ancien chef du programme lunaire a admis les milliards de roubles gaspillés pour battre les américains, où la mort de centaines de techniciens, ingénieurs, cosmonautes, officiers dans des accidents au sol fut admis, comment l'histoire d'Iliouchine pourrait-elle être gardée secrète ? Voilà, en conclusion, c'est à vous de la tirer: Gagarine, premier ou deuxième ? Le KGB a-t-il était suffisamment prévoyant pour faire disparaître toutes les preuves ? L'avenir nous le dira.

Paul Tsarinsky a écrit sur le site My Hero : "... J'étais stagiaire d'Elliott H. Haimoff...un reporter professionnel qui a produit

beaucoup de film pour PBS et autres médias. Durant mon stage j'ai été mené à traduire des documents russes en anglais. C'est ainsi que je pris connaissance de l'affaire Iliouchine. J'assure que toute cette histoire est réelle. Il n'y a pas si longtemps il (Haimoff) est allé en Russie pour interviewer Iliouchine. De retour de là-bas, il fit son documentaire et le montra. Il me raconta que la plupart de ses articles sont issues des archives du Kremlin, lesquelles furent accessibles aux occidentaux au cours des années 90. Pour plus d'infos, je vous conseille de visiter les sites ci-dessous et l'équipe du site: "My Hero" encourage les visiteurs à lire les informations additionnelles et à donner leur avis et leurs commentaires de cette histoire controversée. Robert G Kennedy III dit tout ce qu'il en pense.

Beaucoup d'informations de cette époque, furent interceptées, lors de conversations radio, par les frères Achille et Giovanni Battista Judica-Cordiglia à Torre Bert en Italie et révélées dans le journal Corriere della Serra.

Pravda.ru; Apr. 4, 2001; *News (English)*: "Gagarin Was Not The First Cosmonaut"

Launchspace, Oct./Nov. 1998, *Cover Story*: "A Tribute to our Fallen Heroes"

Uncovering Soviet Disasters: Exploring the Limits of Glasnost - chapitre 10: "Dead Cosmonauts". Edition de 1988 de James Oberg, ingénieur et historien: *Random House, New York*

CHRONOLOGIE DES MISSIONS D'EXPLORATION DE LA LUNE

Mission	Pays	Date de lancement	Type de mission	Résultats
Luna 1A	 Union soviétique	23-sept-58	Impact lunaire	Échec au lancement (1 ^{er} étage).
Luna 1B (en)	 Union soviétique	11-oct-58	Impact lunaire	Échec au lancement (1 ^{er} étage).
Luna 1C (en)	 Union soviétique	04-déc-58	Impact lunaire	Échec au lancement (2 ^e étage).
Luna 1	 Union soviétique	02-janv-59	Impact lunaire	Échec partiel Survол de la Lune à une distance de 5 955 km.
Pioneer 4	 États-Unis	03-mars-59	Survол	Échec de la mise sur orbite. Passe à moins de 60 000 km de la Lune.
Luna 2A (en)	 Union soviétique	18-juin-59	Impact lunaire	Échec au lancement (2 ^e étage).
Luna 2	 Union soviétique	12-sept-59	Impact lunaire	Succès. Premier objet artificiel sur le sol de la Lune.
Luna 3	 Union soviétique	04-oct-59	Orbite circumlunaire	Premières photos de la face cachée de la Lune.
Luna 3A (en)	 Union soviétique	15-avr-60	Orbite circumlunaire	Échec au lancement (dernier étage).
Luna 3B (en)	 Union soviétique	19-avr-60	Orbite circumlunaire	Échec au lancement (1 ^{er} étage).
Ranger 1	 États-Unis	23-août-61	Qualification sonde lunaire	Échec au lancement.
Ranger 2	 États-Unis	18-nov-61	Qualification sonde lunaire	Échec au lancement.
Ranger 3	 États-Unis	18-nov-61	Impacteur	Échec, mauvaise trajectoire.
Ranger 4	 États-Unis	23-avr-62	Impacteur	Échec, mauvaise trajectoire.
Ranger 5	 États-Unis	18-oct-62	Impacteur	Échec, mauvaise trajectoire.
Sputnik 25 (en)	 Union soviétique	04-janv-63	Atterrisseur	Échec. La sonde ne parvient pas à quitter l'orbite terrestre.
Luna 4A (en)	 Union soviétique	03-févr-63	Atterrisseur	Le lanceur ne suit pas la trajectoire programmée.
Luna 4	 Union soviétique	02-avr-63	Atterrisseur	Échec. Survол de la Lune à une distance de 833 km.
Ranger 6	 États-Unis	30-janv-64	Impacteur	Panne des caméras.
Luna 5A (en)	 Union soviétique	21-mars-64	Atterrisseur	Le dernier étage lanceur ne parvient pas à atteindre l'orbite désirée.
Luna 5B (en)	 Union soviétique	20-avr-64	Atterrisseur	Le quatrième étage du lanceur ne s'allume pas.
Ranger 7	 États-Unis	28-juil-64	Impacteur	Première sonde américaine à transmettre des images proches de la surface lunaire.
Ranger 8	 États-Unis	17-févr-65	Impacteur	4 300 photographies pendant les 17 dernières minutes de vol.
Ranger 9	 États-Unis	21-mars-65	Impacteur	Plus de 7 000 photographies pendant près de 23 minutes.
Cosmos 60 (en)	 Union soviétique	12-mars-65	Atterrisseur	5 814 photographies pendant les 19 dernières minutes de vol.
Luna 5C (en)	 Union soviétique	10-avr-65	Atterrisseur	La sonde ne parvient pas à quitter l'orbite terrestre.
Luna 5	 Union soviétique	09-mat-65	Atterrisseur	Le dernier étage lanceur ne parvient pas à atteindre l'orbite désirée.
Luna 6	 Union soviétique	08-juin-65	Atterrisseur	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Luna 7	 Union soviétique	04-oct-65	Atterrisseur	La sonde passe au large de la Lune à une distance de 159 000 km.
Luna 8	 Union soviétique	03-déc-65	Atterrisseur	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Luna 9	 Union soviétique	31-janv-66	Atterrisseur	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Cosmos 111 (en)	 Union soviétique	1er mars 1966	Orbiteur	Premier atterrissage en douceur et première photo prise depuis la surface de la Lune.

Luna 10	 Union soviétique	31-mars-66	Orbiteur	Premier orbiteur , opérationnel jusqu'au 30 mai 1966.
Surveyor 1	 États-Unis	30-mai-66	Atterrisseur	Premier atterrissage en douceur sur la Lune d'une sonde américaine. Actif jusqu'au 14 juillet 1966. 11 237 images envoyées.
Lunar Orbiter 1	 États-Unis	10-août-66	Orbiteur	Premier orbiteur américain, opérationnel du 18 au 29 août 1966.
Luna 11	 Union soviétique	24-août-66	Orbiteur	Opérationnel jusqu'au 31 octobre 1966.
Surveyor 2	 États-Unis	20-sept-66	Atterrisseur	Échec.
Luna 12	 Union soviétique	22-oct-66	Orbiteur	Photos prises depuis l'orbite lunaire.
Lunar Orbiter 2	 États-Unis	06-nov-66	Orbiteur	Opérationnel du 18 au 25 novembre 1966.
Luna 13	 Union soviétique	21-déc-66	Atterrisseur	Répétition de la mission Luna 9.
Lunar Orbiter 3	 États-Unis	04-févr-67	Orbiteur	Opérationnel du 15 au 23 février 1967.
Cosmos 159 (en)	 Union soviétique	17-avr-67	Orbiteur	Se place sur une mauvaise orbite terrestre.
Surveyor 3	 États-Unis	17-avr-67	Atterrisseur	Actif jusqu'au 3 mai 1967. 6 315 images envoyées.
Lunar Orbiter 4	 États-Unis	08-mai-67	Orbiteur	Opérationnel du 11 au 26 mai 1967.
Surveyor 4	 États-Unis	14-juil-67	Atterrisseur	Échec.
Lunar Orbiter 5	 États-Unis	1 ^{er} août 1967	Orbiteur	Images en haute résolution. Opérationnel du 6 au 18 août 1967.
Surveyor 5	 États-Unis	08-sept-67	Atterrisseur	Actif jusqu'au 17 décembre 1967. 19 049 images envoyées.
Surveyor 6	 États-Unis	07-nov-67	Atterrisseur	Actif jusqu'au 24 novembre 1967. 29 814 images envoyées.
Surveyor 7	 États-Unis	07-janv-68	Atterrisseur	Le 17 novembre, redécolle et se repose 2,5 mètres plus loin.
Luna 14A (en)	 Union soviétique	07-févr-68	Atterrisseur	Opérationnel jusqu'au 21 février 1968. 21 091 images envoyées.
Luna 14	 Union soviétique	07-avr-68	Orbiteur	Défaillance du troisième étage du lanceur.
Apollo 8	 États-Unis	21-déc-68	Orbiteur	Cartographie détaillée de la Lune, mesure du champ de gravité, test futur système de télécommunications.
Luna 1969A (en)	 Union soviétique	19-févr-69	Mission habitée, survol	Premier vol habité autour de la Lune (Borman, Lovell et Anders).
Luna 1969B (ft)	 Union soviétique	15-avr-69	Rover lunaire	Problème avec la coiffe du lanceur.
Luna 15A (en) ^(Lequel?)	 Union soviétique	14-juin-69	Retour échantillon	Échec.
Apollo 10	 États-Unis	18-mai-69	Mission habitée, orbiteur	Répétition générale du premier débarquement sur la Lune (Stafford, Young et Cernan).
Luna 15	 Union soviétique	13-juil-69	Retour échantillon	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Apollo 11	 États-Unis	16-juil-69	Mission habitée, exploration surface	Armstrong et Aldrin sont les premiers hommes sur la Lune .
Cosmos 300 (en)	 Union soviétique	23-sept-69	Retour échantillon	La sonde ne parvient pas à quitter l'orbite terrestre.
Cosmos 305 (en)	 Union soviétique	22-oct-69	Retour échantillon	La sonde ne parvient pas à quitter l'orbite terrestre.
Apollo 12	 États-Unis	14-nov-69	Mission habitée, exploration surface	Conrad et Bean retrouvent la sonde Surveyor 3.
Luna 16A (en)	 Union soviétique	06-févr-70	Retour échantillon	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Apollo 13	 États-Unis	11-avr-70	Mission habitée, exploration surface	Échec. Retour de l'équipage sain et sauf.
Luna 16	 Union soviétique	12-sept-70	Retour échantillon	Un échantillon de sol de 101 g est ramené sur Terre .
Luna 17	 Union soviétique	10-nov-70	Rover lunaire	Le rover Lunokhod 1 fonctionne jusqu'au 14 septembre 1971 et parcourt 10,5 km.
Apollo 14	 États-Unis	31-janv-71	Mission habitée, exploration surface	Shepard et Mitchell parcourent plus de 3 km.
Apollo 15	 États-Unis	26-juil-71	Mission habitée, exploration surface	1 ^{re} utilisation d'un rover. Scott et Irwin parcourent 27,76 km.

Luna 18		Union soviétique	02-sept-71	Retour échantillon	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Luna 19		Union soviétique	28-sept-71	Orbiteur	Fonctionne jusqu'au 3 octobre 1972.
Luna 20		Union soviétique	14-févr-72	Retour échantillon	Un échantillon de sol de 55 g est ramené sur Terre.
Apollo 16		États-Unis	16-avr-72	Mission habitée, exploration surface	2 ^e utilisation d'un rover. Young et Duke parcourent 26,55 km.
Apollo 17		États-Unis	07-déc-72	Mission habitée, exploration surface	3 ^e utilisation d'un rover. Cernan et le géologue Schmitt, derniers hommes sur la Lune, parcourent 35,89 km (record).
Luna 21		Union soviétique	08-janv-73	Rover lunaire	Le rover Lunokhod 2 fonctionne jusqu'au 3 juillet 1973 ry parcourt au moins 37 km.
Luna 22		Union soviétique	29-mai-74	Orbiteur	Fonctionne jusqu'au 2 septembre 1975.
Luna 23		Union soviétique	02-nov-74	Retour échantillon	La foreuse est endommagée ; aucun échantillon n'est ramené.
Luna 24A (en)		Union soviétique	16-oct-75	Retour échantillon	Échec.
Luna 24		Union soviétique	09-août-76	Retour échantillon	Un échantillon de 170,1 g est ramené sur Terre.
Hiten		Japon	24-janv-90	Orbiteur, impacteur, survol	Échec partiel.
Clementine		États-Unis	25-janv-94	Orbiteur	Première sonde lunaire lancée par la NASA depuis 20 ans.
Lunar Prospector		États-Unis	07-janv-98	Orbiteur, impacteur	Carte détaillée de la distribution des éléments chimiques présents à la surface de la Lune.
Smart 1		Europe	27-sept-03	Orbiteur	Premier engin européen. Se déplaçant par propulsion ionique, il se met en orbite lunaire 14 mois après son décollage.
Kaguya		Japon	14-sept-07	Orbiteur	Études sur la géomorphologie de la Lune.
Chang'e 1		Chine	24-oct-07	Orbiteur	Premier engin chinois autour de la Lune. Cartographie en trois dimensions jusqu'en 2009.
Chandrayaan-1		Inde	22-oct-08	Orbiteur	Premier satellite indien. Plusieurs objectifs dont une cartographie du sol.
LRO		États-Unis	18-juin-09	Orbiteur	Observations extrêmement détaillées de la surface.
LCROSS		États-Unis	18-juin-09	Impacteur	Analyse des débris de Lune soulevés par l'impact du dernier étage de la fusée porteuse.
Chang'e 2		Chine	1 ^{er} octobre 2010	Orbiteur	Images d'une résolution de 10 mètres pour celles prises à 100 km d'altitude, et 1,5 mètre pour celles photographiées à 15 km.
THEMIS 1 et 2 ^{Note 2}		États-Unis	15-sept-10	Orbiteur	
GRAIL		États-Unis	10-sept-11	Orbiteur	Relevé détaillé du champ de gravité de la Lune.
LADEE		États-Unis	02-mai-13	Orbiteur	Étude de l'atmosphère ténue (exosphère) et de la poussière de la Lune en suspension.
Chang'e 3		Chine	1 ^{er} décembre 2013	Rover	Premier atterrissage d'une sonde chinoise.
Chang'e 4		Chine	07-déc-18	Rover	Premier atterrissage sur la face cachée.
Beresheet		Israël	22-févr-19	Atterrisseur	La sonde s'écrase sur le sol lunaire.
Chandrayaan-2		Inde	22-juil-19	Orbiteur, Rover	Perte de contact avec l'atterrisseur avant le contact avec la surface lunaire.
Chang'e 5		Chine	23-nov-20	Mission de retour d'échantillons	Retour d'échantillons le 16 décembre 2020
Danuri		Corée du Sud	4 aout 2022	Orbiteur	Test de transmission effectués avec succès , avec envoi d'images prises entre le 15 septembre et 15 octobre 2022.
Artemis I		États-Unis	16-nov-22	Mission non-habitée en orbite circumlunaire	Images de la Lune transmise le 21 novembre 2022. Retour sur Terre le 11 décembre 2022

Mission	Équipage	Départ	Atterrissage	Retour	Détails	Collecte
Apollo 1	Virgil I. Grissom Edward H. White Roger B. Chaffee	27 01 1967			Feu dans la capsule sur le pas de tir et décès des 3 astronautes avant le décollage	
Apollo 2					<i>n'a jamais existé</i>	
Apollo 3					<i>n'a jamais existé</i>	
Apollo 4					<i>vol inhabité</i>	
Apollo 5					<i>vol inhabité</i>	
Apollo 6					<i>vol inhabité</i>	
Apollo 7	Walter Schirra Jr. R. Walter Cunningham Donn F. Eisele	11 10 1968		22 10 1968	163 orbites autour de la Terre	
Apollo 8	Frank Borman William A. Anders James A. Lovell Jr.	21 12 1968		27 12 1968	10 orbites autour de la Lune Pour la première fois, des hommes "voient" la face cachée de la Lune	
Apollo 9	James A. McDivitt Russell L. Schweickart David R. Scott	03 03 1969		13 03 1969	151 orbites autour de la Terre Premier essai du LM (module lunaire)	
Apollo 10	Thomas Stafford Eugene Cernan John Young	18 05 1969		26 05 1969	31 orbites autour de la Lune Deuxième essai du LM (module lunaire)	
Apollo 11	Neil Armstrong Edwin E. Aldrin Jr. Michael Collins	16 07 1969	20 07 1969	24 07 1969	Atterrissage dans la Mer de la Tranquillité Ils ont passé 21h36 sur la surface de la Lune	Les 2 premiers hommes sur la Lune Premier pas sur la Lune le 21 07 1969 à 02h56 GMT
Apollo 12	Charles Conrad Jr. Alan L. Bean Richard F. Gordon Jr.	14 11 1969	19 11 1969	24 11 1969	Atterrissage dans l'Océan des Tempêtes 31 heures sur la Lune, dont 7,7 h dehors	32 kg d'échantillons 3° et 4° hommes sur la Lune
Apollo 13	James A. Lovell Jr. Fred W. Haise Jr. John L. Swigert Jr.	11 04 1970		17 04 1970	1,5 orbite autour de la Lune, l'atterrissage a été annulé suite à l'explosion d'un réservoir d'oxygène lors de l'aller vers la Lune	
Apollo 14	Alan B. Shepard Jr. Edgar D. Mitchell Stuart A. Roosa	31 01 1971	05 02 1971	09 02 1971	Atterrissage sur la formation Fra Mauro au bord de la Mer des Pluies (site prévu pour Apollo 13)	5° et 6° hommes sur la Lune
Apollo 15	David R. Scott James B. Irwin Alfred M. Worden	26 07 1971	30 07 1971	07 08 1971	Mont Hadley. Dépose d'un véhicule "Rover" qui a roulé plus de 28 km sur la Lune. Les 2 astronautes sont restés plus de 3 jours sur la Lune	85 kg d'échantillons 7° et 8° hommes sur la Lune
Apollo 16	John W. Young Charles M. Duke Jr Thomas K. Mattingly II	16 04 1972	21 04 1972	27 04 1972	Atterrissage dans la région du cratère "Descartes" Plusieurs sorties avec le Rover	95,8 kg d'échantillons 9° et 10° hommes sur la Lune
Apollo 17	Eugene A. Cernan Harrison H. Schmitt Ronald E. Evans	07 12 1972	11 12 1972	19 12 1972	Atterrissage vallée de Taurus-Littrow (près de la Mer de la Sérénité). 36 km avec le Rover. 75 h sur le sol lunaire dont 22 h dehors	110 kg d'échantillons 11° et 12° (et derniers hommes) sur la Lune