
WILD-TECH APOLLO : comment aller sur la lune avec un four micro-ondes ?

Wild-Tech Apollo: How to Reach the Moon with a Microwave Oven?

Emmanuel Ducourneau

🔗 <http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/2493>

Référence électronique

Emmanuel Ducourneau, « WILD-TECH APOLLO : comment aller sur la lune avec un four micro-ondes ? », *Nacelles* [En ligne], 15 | 2026, mis en ligne le 18 février 2026, consulté le 14 avril 2026. URL : <http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/2493>

WILD-TECH APOLLO : comment aller sur la lune avec un four micro-ondes ?

Wild-Tech Apollo: How to Reach the Moon with a Microwave Oven?

Emmanuel Ducourneau

PLAN

1. Introduction
2. Du Carré Hermès à Apollo
 - 2.1. Lever de Terre : une composition photographique *wild-tech*
 - 2.2. Lever de Terre : une recomposition photographique *wild-tech*
3. La dimension *wild-tech* des systèmes d'exploration et de survie
 - 3.1. *Low egress rope, high hopes*
 - 3.2. De la lingerie à l'aérospatial : une combinaison spatiale *wild-tech*
 - 3.3. Du pistolet à calfeutrage au module de commande : un bouclier thermique *wild-tech*
 - 3.4. Du point de couture à l'amerrissage : des parachutes *wild-tech*
 - 3.5. Du fil de piano au roulage lunaire : un rover *wild-tech*
4. La dimension *wild-tech* du système informatique
 - 4.1. De la mer à l'espace : un INS *wild-tech* entre sous-marins, sextants et bougies d'allumage
 - 4.2. Du missile Polaris à la sonde martienne : un *hardware wild-tech*
 - 4.3. Du tissage textile au programme embarqué : un *software wild-tech*
 - 4.4. Un langage rudimentaire pour un défi complexe : une interface *wild-tech*
5. La dimension *wild-tech* du pilotage
 - 5.1. *Airmanship*
 - 5.2. Entre *airmen* et *chauffeurs* : l'astronaute *wild-tech*
6. Conclusion

TEXTE

1. Introduction

- 1 Le 25 mai 1961, face à une rivalité politique et technologique intense avec l'Union Soviétique, John F. Kennedy (1917-1963) s'adresse au Congrès des États-Unis et, à travers un discours historique, pose un défi inédit à la nation : envoyer un être humain sur la Lune avant la fin des années 1960 et assurer son retour sain et sauf sur Terre¹. Cet am-

bitieux projet impliquait de surmonter de nombreux obstacles inédits. Il fallait notamment comprendre la nature de la surface lunaire et déterminer comment y atterrir, maîtriser les techniques de rendez-vous en orbite entre deux vaisseaux, concevoir les calculs et les systèmes de contrôle nécessaires, ainsi que résoudre la question cruciale de la protection d'une capsule traversant l'atmosphère terrestre à une vitesse vertigineuse de 40 000 km/h, afin d'éviter qu'elle ne soit détruite par la chaleur extrême lors de la rentrée atmosphérique².

Apollo required literally thousands of “breakthroughs” that pushed the limits of science, engineering, manufacturing, reliability [...] there wasn’t anything that could simply be purchased [...] we would probably have concluded that there was no solution with the technology in the early 1960s³.

- 2 Il est clair que relever de tels défis, à première vue « impossibles⁴ » pour reprendre le mot de Christopher Kraft, directeur de vol de la mission Apollo 1, nécessitait d'inventer de nouveaux référents techniques. Ces innovations illogiques ou “loonshots⁵” ont abouti à un ensemble de techniques qui partagent certaines affinités avec le “wild-tech” tel que le définissent Emmanuel Grimaud, Yann Philippe Tastevin et Denis Vidal. Échappant aux alternatives du low et du high, « le wild tech renvoie aux manières de fabriquer qui bousculent les codes, redéfinissent ce qu'innover veut dire et parfois échappent à toute classification⁶ ». Il peut s'agir de mélanges surprenants de techniques locales et mondialisées (métallurgie, microélectronique, etc.), de technologies simples et complexes, de processus artisanaux et industriels, de savoir-faire situés et experts, d'usages attendus et inattendus, d'éléments « déjà là » ou ordinaires dont l'agencement produit des systèmes extraordinaires dont la valeur ne réside ni dans le degré de sophistication ni dans celui de simplification, mais de re-composition dans des situations inédites⁷.
- 3 La tendance de l'histoire des techniques à représenter l'évolution des objets techniques comme un processus linéaire pose un double problème. D'une part, elle repose sur un héritage des grands modèles évolutionnistes issus des Lumières, ce qui en fait une vision idéologiquement marquée. D'autre part, cette approche est largement

contredite par les faits, notamment par la diversité des trajectoires techniques observées à travers l'histoire. Comme le souligne E. Grimaud, toute tentative d'histoire globale des inventions finit par révéler ses propres limites :

Toute tentative d'histoire globale des inventions finit toujours par se prendre à son propre piège. Et on se demande s'il n'est pas aussi incongru de vouloir comparer un silex et un robot qu'un dauphin et une libellule. De la même façon que l'un vit dans l'eau et l'autre dans les airs, les techniques ont souvent été poussées dans des directions profondément disparates. Toujours plus d'altération, d'étrangement, qui nous pousse à explorer d'autres sens, à contorsionner le corps, à prendre d'autres postures⁸.

- 4 L'introduction du troisième terme que constitue le *wild-tech* permet de rendre compte de manière bien plus pragmatique des expérimentations techniques telles qu'elles se font, de leur mixité tout comme de l'impossibilité d'évaluer la plupart d'entre elles à l'aune des notions de progrès ou de régression. Si l'étrangisation est ici un moteur, on pourrait aisément montrer que les combinaisons techniques inattendues, imprévisibles et souvent bricolées constituent souvent – bien plus que l'unique choix du *low* ou la poursuite de toujours plus de *high* –, les solutions les plus intéressantes.
- 5 Le programme *Apollo* mérite à cet égard une relecture rétrospective. Fleuron de l'innovation technique et des espérances spatiales des années 1960, ce programme de la NASA qui s'est échelonné entre 1961 et 1972⁹ donne une impression d'étrangeté 60 ans plus tard qu'il nous faut prendre au sérieux.
- 6 Comment expliquer que celui-ci, malgré des moyens techniques que l'on pourrait aujourd'hui qualifier de modestes, ait permis à l'humanité de marcher sur la Lune, alors que toute innovation contemporaine, y compris un simple grille-pain¹⁰, semble nécessiter un investissement massif de ressources ? Ce paradoxe interroge notre rapport actuel à l'innovation : n'avons-nous pas délaissé une forme d'ingéniosité fondée sur des combinaisons techniques à la fois inattendues et remarquablement efficaces ? Une relecture historique et anthropologique du programme *Apollo* permettrait-elle de retrouver les logiques techniques qui ont rendu possible un tel exploit et qui semblent au-

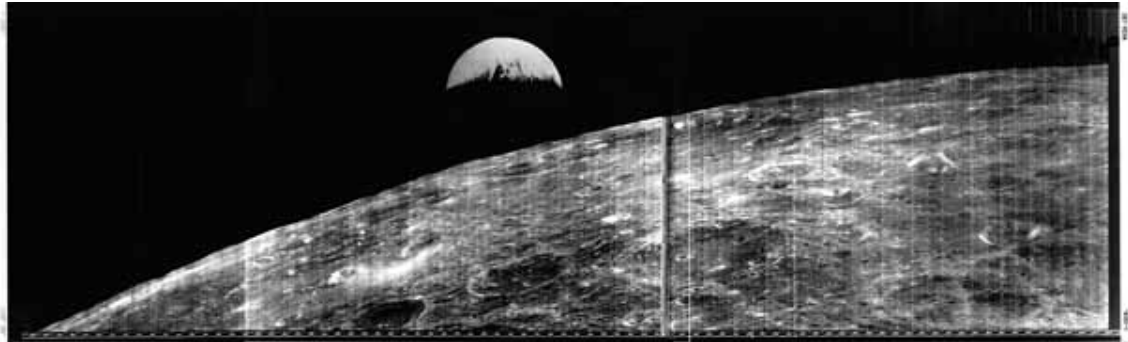
jourd'hui éclipsées par une vision de l'innovation axée sur le déploiement de technologies toujours plus complexes ?

- 7 L'analyse qui va suivre ne prétend en rien à l'exhaustivité. L'objectif est à la fois plus restreint et plus précis : à l'ère de l'Anthropocène où l'on s'interroge sérieusement sur les moyens de « bifurquer », c'est-à-dire d'opérer un changement radical de trajectoire face aux impasses écologiques et technologiques du présent¹¹, il s'agit de donner à sentir une « ambiance technique » oubliée et pourtant pas si lointaine et voir quelles leçons nous pourrions en tirer pour une autre histoire de l'invention ?

2. Du Carré Hermès à Apollo

- 8 Entre 2016 et 2020, le Carré Hermès, le foulard de soie imprimé par la maison Hermès depuis 1937, a fait l'objet d'une « onto-cartographie¹² », une étude détaillée de ses composants et de leurs interactions tout au long de son processus de création, production et diffusion¹³. La configuration des pratiques, des outils et des machines influence non seulement l'attention, la sensorialité et le périmètre cognitif de l'artisan, mais également l'esthétique de l'objet. Plus les techniques employées dans la création et fabrication d'un objet ont un profil *wild-tech*, plus celui-ci est d'une *beauté imparfaite*, caractérisée par la présence de « traces processuelles¹⁴ » qui sont les souvenirs de rencontres entre actants humains et non-humains au sein des processus techniques, des « événements passés dont l'éloignement continu dans le temps ne concède que des fragments, du réel morcelé¹⁵ ». Quel lien peut exister entre un foulard et un programme spatial ?
- 9 En explorant le mode esthétique du Carré Hermès en fonction du « degré bricologique¹⁶ » des pratiques et du niveau d'automatisation des métiers, une autre image s'est imposée : celle de la Terre capturée – par accident – par la sonde spatiale américaine *Lunar Orbiter 1* (LO1) en 1966, à proximité de la Lune. Cette photographie, marquée par ses imperfections, pourrait-elle également témoigner de processus techniques composites, où des technologies rigoureusement planifiées n'atteignent leur pleine efficacité qu'en s'appuyant sur des technologies existantes, astucieusement détournées et adaptées ?

Figure 1 : Première image de la Terre capturée depuis l'orbite lunaire par la sonde *Lunar Orbiter 1*



Les artefacts visibles témoignent de l'intégration de techniques hétérogènes dans le processus de captation, transmission et reconstitution de l'image.

<<https://science.nasa.gov/resource/first-view-of-earth-from-the-moon-and-oblique-view-of-the-lunar-surface/>>

2.1. Lever de Terre : une composition photographique *wild-tech*

- 10 Les photographies de la Terre prises à proximité de la Lune au cours de l'ère de l'exploration spatiale ont profondément influencé nos imaginaires, parfois même plus significativement que les missions Apollo elles-mêmes, et ce, à un coût bien moindre. Il y a la célèbre photographie *Earthrise* (AS8-14-2383HR) prise au cours de la mission Apollo 8 (1968), mais aussi celle, plus ancienne, prise par la sonde LO1 (1966), considérée comme la première représentation de la planète Terre depuis l'espace, celle qui a fait prendre conscience à l'humanité de sa beauté et fragilité¹⁷. Comme le souligne Charles Fishman, "*The photos taken in space are vivid and memorable*¹⁸", illustrant ainsi la puissance évocatrice et pédagogique de ces représentations de la Terre vue d'ailleurs¹⁹.
- 11 D'après l'historien John Johnson Jr., la photographie capturée par la sonde LO1 est l'"*unsung hero of the moon race*²⁰". Sa mission première consistait à réaliser une cartographie de la surface lunaire afin d'identifier des sites d'atterrissage pour les missions Apollo, une étape indispensable pour permettre l'envoi d'êtres humains sur la Lune. Dans un premier temps, il sera montré que la production de cette image, ainsi que sa restauration ultérieure *via* le *Lunar Orbiter Image*

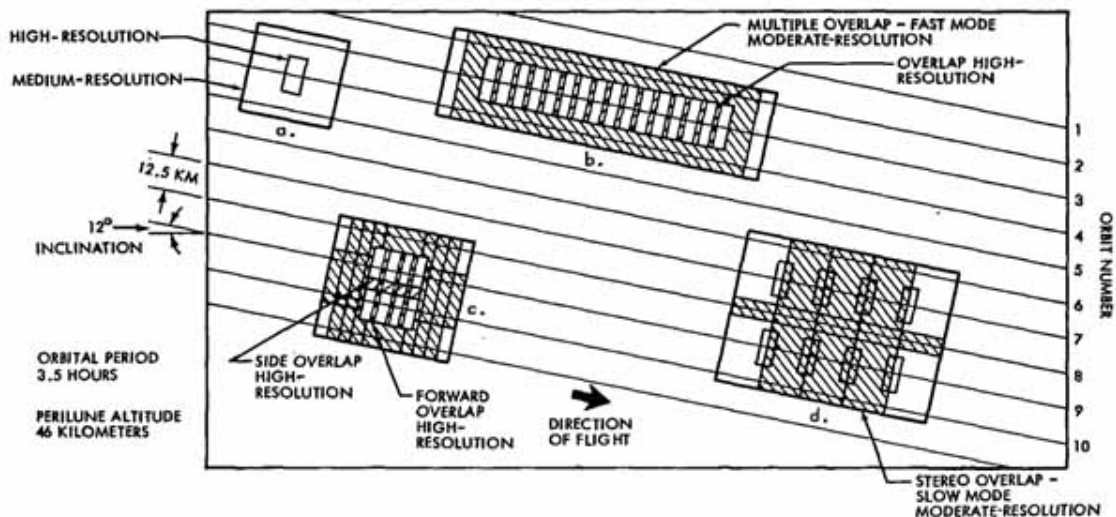
Recovery Project (LOIRP), intègre des processus techniques *wild-tech* perceptibles à travers les bruits et artefacts qui en définissent l'esthétique. Ensuite, l'analyse mettra en évidence que ces caractéristiques techniques reflètent plus largement celles ayant marqué le programme *Apollo* dans son ensemble.

- 12 Avant d'aller plus loin, il est important de souligner que l'objectif n'est pas de classer les techniques de l'époque selon les standards actuels. Ce qui est considéré comme *low-tech* aujourd'hui ne l'était pas nécessairement hier. Le concept de *wild-tech* s'affranchit de ces classifications. Ainsi, des combinaisons entre savoir-faire artisanaux et industriels observées dans les années 1960 demeurent pertinentes dans les années 2020, indépendamment du niveau technologique du contenu de ces associations.
- 13 Il convient de noter que le terme *high-tech* fait référence aux technologies développées dans les sociétés industrielles dans les années 1950, seulement quelques années avant le lancement du programme *Mercury* de la NASA. Ainsi, selon cette perspective, toutes les techniques antérieures ou développées dans d'autres parties du monde seraient donc par définition "*low*"²¹. Par conséquent, il serait tentant de dire que la notion de *wild-tech*, caractérisée par des combinaisons inattendues de techniques de niveaux différents, a émergé parallèlement au développement de l'aéronautique. Or, ces associations ne datent pas d'hier²².
- 14 Entre 1966 et 1968, dans le cadre du programme *Lunar Orbiter* initié par la NASA, cinq sondes spatiales conçues par Boeing furent lancées de la base de cap Kennedy (ex-cap Canaveral). La première d'entre elles (LO1) était déjà équipée d'un système photographique novateur. De quel type d'innovation s'agit-il ? Pour relever ce défi inédit, ce dispositif combinait des technologies de pointe avec des techniques photographiques traditionnelles pour capturer l'image, exposer et développer le film à bord, transformer le contenu du support en signal analogique, transmettre les données vers la Terre et recomposer l'image.
- 15 Tout d'abord, il est important de noter que cette conception n'a pas été créée *ex nihilo*. Elle s'inspirait en réalité de l'appareillage photographique utilisé sur le Samos-E1, un satellite de reconnaissance optique mis au point par l'US Air Force au début des années 1960²³.

Cette influence ne se limite pas à l'aspect technique, mais s'étend également aux domaines d'application, mêlant ainsi espionnage avec Samos-E1 et cartographie des zones d'atterrissage avec LO1.

- 16 D'après les documents NASA SP-242²⁴ et CR-782²⁵, le système photographique ne reposait pas sur un unique objectif fixe ni sur un zoom ajustable en fonction de l'étendue de la zone à capturer, mais comprenait une configuration à double objectif : un objectif de 610 mm fabriqué par Pacific Optical aux États-Unis pour les prises de vue en haute résolution (HR) et un objectif de 80 mm fabriqué par Schneider Kreuznach en Allemagne pour les images en résolution moyenne (MR). Les deux systèmes distincts d'objectifs, d'obturateurs et de platines utilisaient le même approvisionnement en film et enregistraient les images simultanément dans des zones adjacentes d'un film Eastman Kodak SO-243 de 70 mm. À une altitude de 46 km, qui correspondait approximativement à la hauteur du périlune, le système HR photographiait une zone de 4,15 par 16,6 km de la surface lunaire, centrée sur une zone de 31,6 par 37,4 km photographiée par le système MR. Dès lors, cet appareillage technique hybride permettait de combiner détails précis et contexte étendu grâce à l'association de deux images capturées par deux systèmes optiques distincts. Un dispositif à expositions multiples facilitait la création de toutes sortes de compositions et fournissait une multitude d'informations sur la surface lunaire.

Figure 2 : Système à expositions multiples

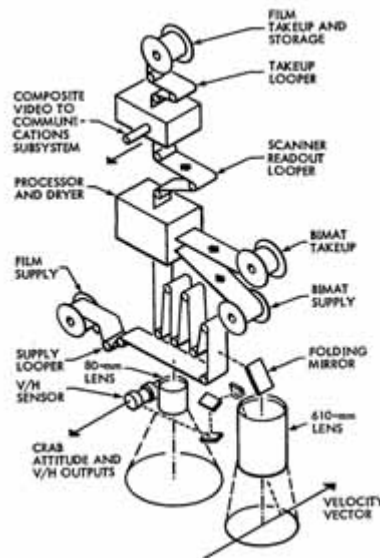


Un système à expositions multiples permettait d'obtenir une grande variété de compositions d'images à partir de seulement deux cadrages différents.

THE BOING COMPANY, *Lunar Orbiter I: Photographic Mission Summary*, NASA CR-782 Technical Reports Server (NTRS), 1967, p. 7, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670012120/downloads/19670012120.pdf>>

- 17 Développer un film à 400 000 kilomètres de la Terre était une première. Pourtant, l'exposition de l'image sur le film suivait un processus photochimique traditionnel. La sensibilité utilisée était extrêmement basse : 1,6 ASA. Cela permettait non seulement d'obtenir des images très définies, mais aussi de minimiser l'action des lumières parasites et du rayonnement cosmique qui s'infiltraient dans le compartiment photographique durant la mission, sans nécessiter l'utilisation de coûteux blindages. Le film était développé selon le procédé Kodak « Bimat » qui – sur Terre – n'impliquait pas de techniques compliquées et d'équipement lourd et onéreux selon un rapport de la CIA²⁶. Ce processus technique, idoine pour un développement dans des environnements où les équipements de laboratoire traditionnels ne pouvaient pas être utilisés, implique l'utilisation de deux films : celui exposé contient les images capturées en négatif, et un second, nommé « film transfert » pourvu d'une gélatine imprégnée d'une solution chimique de développement. Au cours du traitement dans le « processeur-séchoir », le négatif est mis en contact avec le film transfert pendant 3,4 minutes. Le réactif chimique qui y est présent interagit avec l'image sur le négatif, ce qui permet de développer et de fixer le négatif, tandis que le film transfert génère une image positive. Une fois le film séché, il était scanné pour transformer les données photographiques en signal analogique en vue d'une transmission des images vers la Terre.

Figure 3 : Système de prise de vue, développement et communication



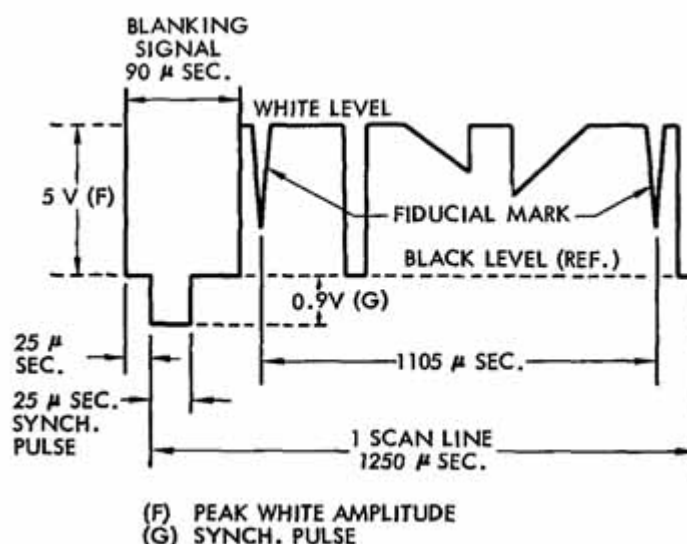
Le système de prise de vue, développement et communication combinait des technologies optiques et analogiques avec un traitement électronique avancé, illustrant un exemple de technologie composite où des techniques de prises de vue traditionnelles étaient adaptées aux contraintes de l'environnement spatial.

HANSEN Thomas P. et LANGLEY RESEARCH CENTER, *Guide to Lunar Orbiter Photographs*, NASA Technical Reports Server (NTRS), 1970, p. 1, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670012120/downloads/19670012120.pdf>>

- 18 La conversion du film était réalisée grâce à un faisceau lumineux de 6,5 microns de diamètre le parcourant sur une distance de 2,67 mm dans le sens de la longueur. Cette action était répétée 286 fois pour chaque millimètre scanné sur toute la largeur du film (70 mm). L'opération était répétée environ 17 000 fois pour produire un "framelet", c'est-à-dire une mince bande de film de 2,67 mm de longueur et environ 57 mm de largeur²⁷. Lorsque le balayage de la section était terminée, un mécanisme d'avancement déplaçait le film de 2,54 mm pour une poursuite du balayage dans la direction opposée. Ainsi, une paire de photographies (une image HR et une image MR) était constituée de 117 framelets²⁸. Sa conversion nécessitait 44 minutes de travail, soit 22 à 23 secondes par framelet. La sonde spatiale n'était équipée que d'une mémoire à tores magnétiques²⁹ de 128 mots, soit 256 octets (16 bits) ce qui équivaut à 1/5000^e de la capacité d'une disquette informatique³⁰. Par conséquent, les images devaient être immédiatement transmises vers la Terre. C'est un tube photomultiplicateur, po-

sitionné derrière le film, qui était en charge de convertir la lumière transmise en un signal électromagnétique dont l'amplitude variait proportionnellement à l'intensité lumineuse de chaque point de l'image. Le signal de chaque ligne était ensuite transformé en séquence vidéo transmise vers la Terre par un tube à ondes progressives (amplification du signal) et une antenne à haut-gain (concentration et transmission du signal).

Figure 4 : Transformation d'une image capturée en un signal électromagnétique structuré



Ce schéma illustre la transformation d'une image capturée en un signal électromagnétique structuré, incluant niveaux de référence, repères fiduciaux et impulsions de synchronisation, pour assurer sa transmission et sa reconstruction au sol.

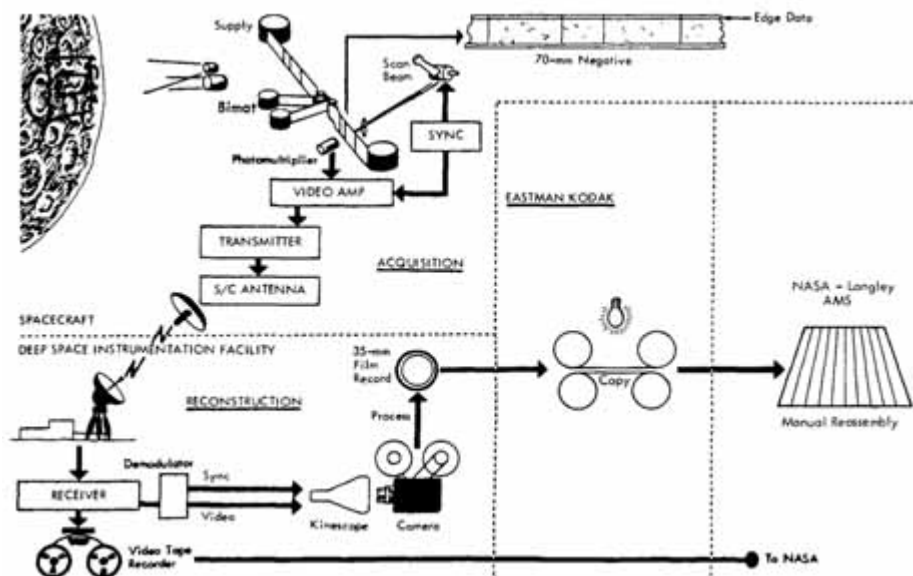
THE BOING COMPANY, *Lunar Orbiter I: Photographic Mission Summary*, NASA CR-782 Technical Reports Server (NTRS), 1967, p. 7, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670012120/downloads/19670012120.pdf>>

- 19 La séquence vidéo était captée par trois installations de la *Deep Space Network* (DSN), spécifiquement les *Deep Space Instrumentation Facilities* (DSIF), situées à Woomera (Australie), Madrid (Espagne), et Goldstone (États-Unis). Ces stations étaient équipées pour recevoir les données transmises depuis l'espace lointain. Dans un premier temps, la séquence vidéo était enregistrée sur bande magnétique pour archivage et réutilisation potentielle par la NASA. Son traitement initial était assuré par l'électronique de reconstruction au sol, la *Ground Reconstruction Electronics* (GRE), intégrée au système de re-

construction au sol, le *Ground Reconstruction System* (GRS). Après démodulation et conversion de la séquence vidéo en un signal électrique, ce dernier était dirigé vers un tube cathodique. Le signal électrique générait un faisceau d'électrons au sein de ce tube qui, une fois en contact avec le matériau phosphorescent de l'écran, produisait un point lumineux. Le balayage du faisceau électronique et sa modulation basée sur le signal électrique permettait de reconstruire l'image ligne par ligne. Un dispositif de capture d'image, le kineoscope – pré-curseur du magnétoscope – était utilisé pour enregistrer les images projetées par le tube cathodique sur un film Eastman Kodak SO-349 de 35 mm. Ce dispositif exigeait un agrandissement des *framelets* de 7,2 fois, résultant en une bande d'environ 2 cm sur 40 cm³¹. Après le développement du film dans les laboratoires de Eastman Kodak à Rochester aboutissant à la création d'un master, les copies étaient expédiées à la NASA, où elles étaient assemblées avec soin à la main sur une table lumineuse par des *artisans*³².

- 20 C'est en suivant ce circuit composite et hétérogène, alliant méthodes traditionnelles et technologies avancées, que la première image de la Terre, vue depuis la proximité de la Lune, a été créée (fig. 5). Pris individuellement, chaque sous-système paraît parfaitement intégré. C'est quand on étudie le processus technique dans sa globalité et ses composantes matériologiques que l'hétérogénéité du dispositif apparaît, s'apparentant à un mécanisme à la Rube Goldberg voire à un circuit à la Charles R. Bowers³³.

Figure 5 : Processus de capture, transmission et reconstruction des images prises par *Lunar Orbiter*



Processus de capture, transmission et reconstruction des images prises par *Lunar Orbiter*. Les clichés, développés en vol, étaient scannés, transmis sous forme de signal vidéo, puis reconvertis en film 35 mm sur Terre. Après traitement chez Eastman Kodak, les copies étaient assemblées manuellement à la NASA pour reconstituer les images finales.

<<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670012120/downloads/19670012120.pdf>>

2.2. Lever de Terre : une recomposition photographique *wild-tech*

- 21 Le LOIRP, bien qu'il ne découle pas directement du programme Apollo, en constitue une conséquence remarquable, où une forme d'hétérogénéité technique en engendre une autre. Tout comme celle ayant présidé à la fabrication des images du programme *Lunar Orbiter*, le LOIRP se distingue par la variété des méthodes et des technologies mobilisées pour restaurer des images capturées 50 ans auparavant par la sonde LO1. Cette hétérogénéité invite à son tour à l'inattendu, catalysant des perspectives de recherche nouvelles et surprenantes, tant pour envisager un retour sur la Lune que pour affiner notre compréhension du climat terrestre (correction du niveau de glace de la banquise arctique, identification d'un événement de type El Niño dans les années 1960, etc.).

- 22 Une fois le projet *Lunar Orbiter* achevé en 1968, 1 654 photographies (NASA, SP-242), contenues sur environ 1 474 bandes (NASA, JPL D-101562) ont été oubliées puisqu'elles avaient rempli leur fonction première : identifier des zones d'atterrissage pour les vaisseaux Apollo. Elles ont été soigneusement archivées pendant près de 20 ans par le gouvernement dans le Maryland. Lorsqu'elles ont été restituées au Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA à Pasadena, en 1986, la décision de savoir s'il fallait les détruire est devenue la responsabilité de son archiviste, Nancy Evans. Elle a décidé que les bandes devaient être préservées. "I could not morally get rid of this stuff", relatait-elle en 2009 au cours d'une interview dans le *Los Angeles Times*³⁴. Elles ont été stockées 20 ans de plus jusqu'au démarrage du programme LOIRP (2008) dans un McDonald's désaffecté, surnommé le "McMoon" (bâtiment 596), qui a été réaménagé par le NASA Ames Research Center spécialement pour l'occasion³⁵.
- 23 L'accès au contenu de ces enregistrements nécessitait un équipement spécial et coûteux : un lecteur Ampex FR-900, produit en quantité très restreinte et destiné uniquement aux organismes gouvernementaux, ainsi qu'un démodulateur spécifique au programme *Lunar Orbiter*. Evans est parvenue à obtenir quatre Ampex FR-900 obsolètes, dont trois étaient utilisés pour l'enregistrement de données radar à la base aérienne d'Eglin située en Floride. Ces appareils, hors d'usage, ont été entreposés pendant 20 ans, décrits comme étant dans un « garage » selon la NASA, et dans une « grange près des poulaillers » selon les membres actifs du projet interviewés par le magazine *Wired*³⁶, jusqu'à ce qu'une opportunité se présente pour les réparer. Dennis R. Wingo, ingénieur et entrepreneur dans le domaine spatial, et Keith Cowing, ancien scientifique de la NASA devenu journaliste et éditeur de Sites d'information spatiale, ont été les principaux instigateurs du projet. La réparation des lecteurs de bande et la construction d'un démodulateur était une affaire coûteuse et complexe. Rien que la réparation d'une tête de lecture a coûté 6 000 dollars. Comme leur fabrication s'est arrêtée en 1974, il était impossible de les remplacer et leur réparation se révélait ardue, notamment à cause de la difficulté à se procurer des pièces de rechange. Certaines d'entre elles auraient même été trouvées dans des stock de surplus militaire et sur Ebay³⁷. Quant au démodulateur, il a dû être reconstruit à partir de documents et données parcellaires retrouvés par les différents ac-

teurs du projet avec l'aide des entreprises Skycorp et SpaceRef Interactive³⁸. La réhabilitation des équipements a requis l'implication active d'ex-collaborateurs d'Ampex, de l'entreprise Video Magnetics, d'étudiants et de vétérans de l'armée parmi lesquels Ken Zin, un ancien de l'US Army qui se distinguait par son savoir-faire en matière de machines à bandes analogiques. Il ne s'agissait pas d'une simple réparation, mais d'une amélioration du matériel. L'un des objectifs était d'améliorer la stabilité du signal en remplaçant les composants à base de germanium, sensibles aux changements de température, par des versions à base de silicium. Les têtes magnétiques ont été également améliorées puisque l'électronique a été remplacée par des composants plus récents. Tout le matériel a été remis en état de fonctionnement, mais il a fallu une longue période d'apprentissage pour en maîtriser à nouveau l'usage.

24 Une fois le matériel restauré, ce dernier a été installé au McMoon, un espace qui, malgré sa reconversion, gardait des éléments de son passé de restaurant rapide. Ce choix de local, à la fois pratique et économique, s'est distingué par son approche non conventionnelle dans la restauration et l'analyse de données historiques issues des missions *Lunar Orbiter*. Pour mener à bien ce projet, la NASA, appuyée par une équipe d'ingénieurs, de scientifiques et de bénévoles, a entrepris de transformer un espace initialement dédié à la restauration rapide en centre technique capable de manipuler et de numériser des bandes magnétiques anciennes et précieuses. Un drapeau pirate a été hissé au-dessus du bâtiment pour afficher l'esprit anticonformiste et bricoleur des participants, un état d'esprit que l'on retrouve parfois chez celles et ceux engagés dans le *wild-tech*³⁹. Les modifications ont inclus la transformation des équipements spécifiques, tels que friteuses, grills et comptoirs de service, au profit d'un agencement adapté à un environnement de laboratoire sophistiqué, et les écrans d'ordinateur, les serveurs et le matériel de stockage des données ont remplacé les menus lumineux et les caisses enregistreuses. Cet espace a été rééquipé avec des tables de travail, des étagères pour stocker les équipements et les bandes magnétiques, ainsi que des stations informatiques nécessaires à la numérisation et à l'analyse des données.

25 Le processus de restauration des images est tout aussi composite que celui qui a permis de les créer, mêlant techniques analogiques et nu-

mériques. Le signal sortant des machines Ampex était analogique et contenait à la fois des données d'image et de télémétrie sous forme de signaux RF (Radio Fréquence). Le démodulateur convertissait ces signaux RF en un signal vidéo, similaire à celui produit par l'électronique embarquée sur les sondes spatiales. Cette conversion exigeait une expertise pour manipuler à la fois des technologies anciennes et modernes, engendrant divers défis techniques, y compris la recherche d'un substitut chimique à la graisse de baleine utilisée traditionnellement pour lubrifier les têtes de lecture⁴⁰. Le signal vidéo obtenu était ensuite converti en données numériques grâce à une carte de capture A/D 16 bits de haute précision, installée sur un ordinateur Macintosh fonctionnant sous Windows Vista, montrant que les associations surprenantes pour combiner le meilleur des deux mondes se vérifiaient dans les moindres détails du projet.

- 26 Le traitement numérique des données utilisait des logiciels spécifiquement développés pour le projet, ainsi qu'Adobe Photoshop pour certaines tâches, comme rapporté par le *New York Times*⁴¹. Les principales étapes de ce traitement incluaient l'alignement des lignes vidéo à une vitesse de 800 par seconde, la normalisation des niveaux de noir à 0 volts et de blanc à 5 volts, l'ajustement des lignes de balayage pour une uniformité sur les 17 000 lignes d'un *framelet* via un *averaging algorithm* et la segmentation des *framelets* en fichiers distincts grâce au logiciel conçu par Skycorp. Un algorithme d'apprentissage automatique, également développé par Skycorp, permettait encore d'améliorer la précision de l'alignement et la qualité des images en corrigeant les biais et les variations de largeur de ligne dues au système de capture embarqué. L'étape finale impliquait une inspection visuelle de chaque fichier ou *framelet* pour repérer et rectifier les éventuelles erreurs, suivie d'une réorganisation tout aussi manuelle en vue de recomposer la photo. Certaines anomalies étaient rectifiées à l'aide de logiciels de retouche populaires comme Photoshop ou de programmes spécialement développés pour l'occasion, selon les sources.
- 27 Cette combinaison d'opérations automatisées, préfigurant l'utilisation de l'intelligence artificielle, avec des interventions manuelles quasi-artisanales, a permis de redonner vie à des images, jusque-là enfermées sur des supports magnétiques difficiles d'accès. Indépendamment du niveau technologique du système étudié, l'introduction

de « pratiques bricolologiques » permet de débloquent le potentiel d'un système en lui apportant le degré d'ouverture nécessaire⁴². L'agencement innovant de techniques ordinaires, poussées à leur paroxysme de sophistication dans le cadre du programme *Lunar Orbiter*, a ouvert des possibilités, donnant naissance à des images spectaculaires à deux moments distincts : d'abord dans les années 1960, où elles ont facilité la sélection des sites d'alunissage optimaux pour le programme *Apollo*, puis dans les années 2000, avec leur restauration, elles soutiennent désormais les nouvelles initiatives lunaires et les études climatiques terrestres. Cela suggère que ce procédé technique dissimulait un potentiel suffisamment important pour produire des images de haute précision à 50 ans d'intervalle, à condition de savoir comment libérer ce potentiel.

- 28 Ce savoir-faire d'un genre particulier, développé pour la remise en état d'images, a permis de réactiver ISEE-3 en 2014, 36 ans après sa mise en service. Baptisé *ISEE-3 Reboot*, ce projet a permis de remettre en fonction le satellite scientifique du programme *International Sun-Earth Explorer* (ISEE), dont la NASA avait interrompu l'exploitation en 1997. C'est encore une fois D. Wingo et K. Cowing, deux acteurs majeurs du LOIRP, qui ont réussi à remettre en service le transmetteur pour remettre le satellite en orbite stable et lui permettre de poursuivre sa mission (étude du Soleil et du milieu interplanétaire) grâce à l'expérience acquise sur LOIRP : “*we’ve done this before*”⁴³, disait K. Cowing.

Figure 6 : La Terre capturée depuis l'orbite lunaire par la sonde *Lunar Orbiter 1*



Image de la Terre capturée depuis l'orbite lunaire par la sonde *Lunar Orbiter 1*, restaurée dans le cadre du programme LOIRP. Bien que la disparition des artefacts ne laisse plus de prises sur un processus de production hétérogène, la restauration a néanmoins emprunté un circuit technique singulier.

<https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/20140506_earthrise-new-lg.png>

3. La dimension *wild-tech* des systèmes d'exploration et de survie

- 29 La capture et le traitement d'une image entre la Lune et la Terre représentaient un défi sans précédent dans un climat de rivalité intense entre les États-Unis et l'Union Soviétique. La solution à ce défi a impliqué la mise en place d'un processus technique composite, s'étendant sur 400 000 kilomètres. Cette dimension composite ne se limite pas uniquement au processus technique, mais s'étend également à l'image elle-même. En effet, après sa capture, elle devait être décomposée en *framelets* à bord de la sonde spatiale, puis recomposée à partir de ces derniers une fois sur Terre pour rendre possible son voyage entre la Lune et la Terre. Le caractère composite du processus technique a engendré une image tout aussi composite, dont la

nature se manifeste à travers une esthétique singulière, marquée par des traces révélant les zones de jonction entre les différents éléments du processus technique. Encore plus remarquable, 40 ans plus tard, le processus déployé pour recomposer l'image à partir des bandes de l'époque a également emprunté une voie composite, du fait qu'il a nécessité la combinaison de techniques appartenant à deux espace-temps différents. Cela a permis non seulement de récupérer l'image, mais aussi de la restaurer à un niveau de qualité inédit et sans les imperfections présentes sur l'originale.

- 30 Quand un objet technique a été conçu selon un mode d'innovation composite ou *wild-tech*, dont l'analyse historique révèle une relative frugalité, sa reproduction devient complexe et exige une approche tout aussi composite pour être maîtrisée. Le caractère *wild* ne réside pas uniquement dans l'aspect inattendu de la combinaison entre des techniques appartenant à des espace-temps différents, mais aussi dans le fait que, une fois conçu de cette façon, l'objet technique s'avère difficile à « domestiquer ». Autrement dit, sa domestication technique nécessite la composition de compétences qui sont ardues à recomposer. Cette complexité pourrait-elle expliquer les défis actuels du retour sur la Lune, malgré l'avancée des technologies contemporaines ?
- 31 Cette question reste ouverte pour le moment⁴⁴. La conception des engins du programme *Apollo* suit-elle une logique similaire à celle de l'image qui a permis d'identifier leurs zones de déploiement ? Ces compositions techniques extraordinaires sont-elles saillantes uniquement à travers une analyse historique, ou étaient-elles envisagées dès le départ ? Dans un cas comme dans l'autre, comment pouvons-nous réinventer nos modes d'innovation à partir de ce modèle dans un contexte où l'inédit refait surface ?
- 32 Dans les années 1960, une grande partie des technologies visionnaires requises pour marcher sur la Lune dépassait les technologies à disposition et nos capacités à pouvoir les produire. Ainsi, un nombre surprenant de composants cruciaux du programme *Apollo* (combinaison, rover, ordinateur, etc.) résultaient de mélanges inattendus nécessitant l'association de savoir-faire artisanaux et industriels, de composants « déjà là » et d'éléments spécialement conçus pour l'occasion. Un grand nombre d'artisans et d'ouvriers, dans l'ombre des in-

généieurs, ont contribué à la réussite du programme Apollo. Comme le souligne C. Fishman :

The guts of the computer were stitched together by women using wire instead of thread. In fact, an arresting amount of work across Apollo was done by hand: the heat shield was applied to the spaceship by hand with a fancy caulking gun; the parachutes were sewn by hand, and also folded by hand. The only three staff members in the country who were trained and licensed to fold and pack the Apollo parachutes were considered so indispensable that NASA officials forbade them to ever ride in the same car, to avoid their all being injured in a single accident⁴⁵.

- 33 Les astronautes ont consacré un temps considérable aux échanges avec les artisans et ouvriers afin de s'approprier les technologies essentielles à leur mission : marcher sur la Lune et assurer un retour sécurisé sur Terre. Cette étude examine cinq objets clés de l'exploration lunaire : la combinaison spatiale, le parachute, le bouclier thermique, le rover et l'ordinateur de bord dont la conception, particulièrement remarquable, justifie une section dédiée. *"The blend of craftsmanship and high technology was part of every element of getting Apollo to the Moon, in some ways as emblematic of the 1960s as anything, the collision of the 1950s with the 1970s and 1980s to come⁴⁶".*

3.1. Low egress rope, high hopes

- 34 *Supra*, la question suivante était soulevée : ces compositions techniques extraordinaires apparaissent-elles uniquement à travers une analyse rétrospective, ou étaient-elles déjà envisagées dès leur conception ? Pour apporter un élément de réponse, il convient d'évoquer le design du dispositif permettant de descendre du module lunaire (LM) ou d'y remonter.
- 35 Le 24 mars 1964, 80 cadres de la NASA se sont réunis à Bethpage pour discuter du LM à partir d'une maquette réalisée par l'entreprise Grumman. Le principal défi résidait dans le passage des astronautes depuis l'écouille principale du module lunaire, située dans l'étage supérieur, jusqu'à la surface de la Lune, soit une descente de plus de trois mètres. *"We had given considerable thought to the problem of egress to the lunar surface⁴⁷"* disait Thomas J. Kelly, le responsable de

la conception du LM. La solution présentée lors de l'événement était une corde nouée nommée "*egress rope*"⁴⁸. À ce stade du développement, cette utilisation apparaissait comme la solution la plus adaptée pour permettre aux astronautes de circuler entre le module lunaire et le sol Lunaire. Un palan était également prévu pour descendre l'équipement scientifique et remonter les échantillons de roche lunaire, illustrant la recherche constante de solutions techniques simples et efficaces. Comme le souligne C. Fishman : "*In the whole vast engineering enterprise that was NASA's leap to the Moon, there are almost no ridiculous ideas*"⁴⁹.

- 36 La corde s'est imposée comme une option privilégiée, car, comme le précise l'auteur : "*It was simple. It was robust. It weighted almost nothing. It was reliable. It could be tested to be sure it wouldn't fail*"⁵⁰.
- 37 Dans un programme où chaque détail revêtait une importance cruciale, la priorité était donnée à la simplicité et à la fiabilité plutôt qu'à une sophistication excessive, illustrant ainsi une approche pragmatique de l'innovation.
- 38 Le fait que les concepteurs évoluaient dans un environnement perçu comme *high-tech* pour l'époque n'excluait pas le recours à des techniques simples ni leur association avec des solutions plus avancées. Même lorsque ces alternatives n'étaient pas retenues dans le design final, elles faisaient partie intégrante du processus d'expérimentation et de validation technologique. En effet, ce dispositif posait aussi de nombreux problèmes pouvant faire échouer la mission : "*inconvenient, insecure, uncomfortable, strenuous, and also far from fail-safe*"⁵¹. L'astronaute Ed White, qui décédera trois ans plus tard dans le tragique incendie d'Apollo 1, l'a expérimenté durant une journée, mais a fini par se blesser⁵². Ainsi, les inconvénients l'ont emporté sur les avantages, conduisant à l'abandon du dispositif au profit d'une échelle, une solution toujours simple mais néanmoins plus sophistiquée que la corde. Ce choix témoigne d'un processus d'ajustement continu, où chaque alternative, même la plus rudimentaire, était envisagée, expérimentée et optimisée avant d'être validée ou rejetée.

3.2. De la lingerie à l'aérospatial : une combinaison spatiale *wild-tech*

- 39 Faire évoluer les corps humains dans l'espace était un défi inédit. La combinaison A7L était un élément-clé du programme Apollo puisqu'il n'aurait pas été possible de marcher sur la Lune sans ce vaisseau spatial miniature. Elle a été conçue pour fournir à l'astronaute un environnement de vie à bord d'un vaisseau spatial non-pressurisé et pendant des activités extravéhiculaires (EVA), telles que marcher sur la Lune.
- 40 La combinaison était composée d'une vingtaine de couches de tissu⁵³. Chacune avait une fonction spécifique, allant de la régulation thermique à la protection contre les micro-météorites. *"They were marvels: 21 layers of nested fabric, strong enough to stop a micrometeorite, but still flexible enough for Aldrin's kangaroo hops and quick cuts"*⁵⁴.
- 41 La combinaison était fabriquée par Playtex, les créateurs du soutien-gorge "Cross Your Heart" qui a conquis les États-Unis à partir des années 1960. L'entreprise a cédé le savoir-faire de sa branche industrielle (ILC Dover) à la NASA, cette dernière ayant judicieusement identifié que l'entreprise possédait beaucoup d'expérience dans la création de vêtements à la fois flexibles et près du corps.
- 42 Les matériaux de certaines couches de la combinaison spatiale étaient issus de ceux utilisés dans la fabrication des soutiens-gorges et des gaines, notamment le caoutchouc trempé et l'élasthane, plus connu sous les noms commerciaux Lycra ou Spandex⁵⁵. Les autres matériaux, tels que le néoprène, le nylon, le Téflon, le Mylar et le Nomex, existaient également avant l'ère de la conquête spatiale et étaient utilisés pour des applications très différentes, comme la fabrication de tuyaux, de brosses à dents, de revêtements antiadhésifs pour les ustensiles de cuisine, de films photographiques, ainsi que d'équipements de protection pour les pompiers et les pilotes de course, entre autres.
- 43 La NASA n'a pas créé un nouveau matériau pour permettre à l'être humain de se mouvoir dans un environnement hostile. Plutôt que d'en créer un, elle a élaboré un composé multi-couches à partir de

matériaux préexistants provenant de domaines divers et variés. En reprenant les termes de Gilles Deleuze et Félix Guattari⁵⁶, la combinaison spatiale ne relève pas d'un simple alliage, mais d'une alliance de matériaux conservant chacun leurs propriétés distinctes. Cette association stratégique permet une accumulation de caractéristiques complémentaires, constituant ainsi une réponse efficace à une problématique inédite. Une analyse fragmentée de la combinaison révèle une organisation en strates successives, à l'image des *framelets* qui composent les images transmises par les sondes du programme *Lunar Orbiter*.

44 L'assemblage des combinaisons était jugé si délicat et crucial qu'il était réalisé à la main⁵⁷. Chaque couche était cousue par des femmes, transférées de la division des produits grand public vers la division industrielle de Playtex. Chaque point de couture devait être impeccable pour que les combinaisons fonctionnent correctement et assurent la protection des astronautes dans les conditions extrêmes de la Lune. Chacune était confectionnée sur mesure, adaptée aux dimensions précises des astronautes, ce qui s'apparente au travail d'un tailleur. Les hommes assuraient d'autres tâches artisanales. Par exemple, les flexibles convolutés, positionnées au niveau des articulations principales pour permettre des mouvements amples avec une dépense minimale d'énergie, étaient réalisés par des ouvriers spécialisés. Le soufflet était fabriqué en enroulant une maille en nylon autour d'un moule, puis l'ensemble était trempé dans un bain de néoprène liquide. Pour assurer une pénétration optimale du caoutchouc synthétique dans les plis, l'ouvrier soufflait à travers un petit tube pour pousser la matière dans les creux, processus technique directement issu de la fabrication des soutiens-gorges⁵⁸. C'est un exemple parmi tant d'autres des pratiques artisanales qui ont ponctué le processus de fabrication de la combinaison spatiale du programme Apollo.

45 Ces composants artisanaux étaient associés à des composants industriels d'un degré de sophistication supérieur. Ainsi, la combinaison était connectée à un système primaire de survie (PLSS), un ensemble de composants chargés de maintenir en vie les astronautes durant leurs EVA. Par l'intermédiaire de différents sous-systèmes, il maintenait la pression à l'intérieure à peu près à un tiers de celle trouvée sur Terre, fournissait l'oxygène nécessaire à la respiration, éliminait le di-

oxyde de carbone, l'humidité et les odeurs. Le PLSS y régulaient aussi la température à l'aide d'un circuit de refroidissement à eau, il surveillait et affichait les informations clés relatives aux signes vitaux, et offrait des capacités de communication⁵⁹.

Figure 7 : Assemblage manuel d'une combinaison spatiale A7L



La combinaison spatiale A7L était assemblée manuellement par des techniciens et couturières d'ILC Dover, une division de Playtex. Leur expertise en confection de vêtements ajustés et flexibles a permis de garantir à la fois protection et mobilité, chaque couture répondant aux exigences strictes de la NASA.

Ralph Morse, The Life Picture Collection, Getty Images

3.3. Du pistolet à calfeutrage au module de commande : un bouclier thermique *wild-tech*

- 46 Le module de commande et de service (CSM) composé du module de commande (CM) et du module de service (CS) voyageait à une vitesse de 40 000 kilomètres par heure. Pour retourner sur Terre depuis la Lune, les astronautes à bord du CM qui contient l'espace de vie de l'équipage, les commandes de vol et les systèmes de survie devaient traverser l'atmosphère à une vitesse d'approche proche de celle susmentionnée. Pour protéger le CM contre cette chaleur extrême, qui pouvait atteindre 2 760°C, la NASA a développé un bouclier ther-

mique ablatif. Ce bouclier, représentant les deux tiers du poids du module d'ascension du LM⁶⁰, était constitué d'une ossature en nid d'abeille en acier inoxydable, soudée entre deux plaques du même matériau, surmontée d'une coque également structurée en nid d'abeille en fibre de verre, imprégnée de résine époxy-phénolique (elle-même composée d'une dizaine de matières telles que de la poudre de nylon et des fibres de quartz), le tout assemblé par collage par l'entreprise Avco située à Lowell. Ce composite était conçu pour se vaporiser (phénomène d'ablation) sous l'effet de la friction atmosphérique, un processus qui empêche la chaleur de pénétrer dans le compartiment de vie.

- 47 À la fin des années 1960, le remplissage manuel des 370 000 cellules hexagonales était la seule méthode envisageable. Chez Avco, l'équipe, majoritairement féminine du fait de leur habileté jugée supérieure, utilisait des pistolets spécialement conçus, basés sur ceux à calfeutrage. Ces artisans étaient affectueusement appelés « artilleurs » (*gunners*⁶¹). Leur travail était considéré comme si délicat et crucial pour la réussite du programme *Apollo* que chacun recevait une formation de deux semaines avant de pouvoir travailler sur le bouclier thermique du CM. Avco effectuait des radiographies des sections en nid d'abeille achevées pour vérifier que chaque cellule était correctement remplie.

Figure 8 : Assemblage et isolation manuelle du bouclier thermique d'un vaisseau *Apollo* (Lowell)



Des techniciens assemblent et isolent manuellement le bouclier thermique d'un vaisseau Apollo à Lowell, un processus nécessitant une grande précision pour assurer une protection efficace contre la chaleur extrême de la rentrée atmosphérique.

Anthony Stewart, National Geographic, Getty Images

3.4. Du point de couture à l'amerrissage : des parachutes *wild-tech*

- 48 Pour ralentir la chute vers la Terre, lors de la dernière étape de ce voyage de près de 385 000 kilomètres entre la Terre et la Lune, les ingénieurs de la NASA ont développé un système d'atterrissage nommé *Earth Landing System (ELS)*, composé de parachutes, afin de garantir que les astronautes parcourent en toute sécurité les derniers kilomètres de descente.
- 49 Le développement de l'ELS a commencé en janvier 1962, lorsque la NASA a publié les premières spécifications pour l'atterrissage du module de commande (CM) sur l'eau à environ 35 kilomètres par heure⁶². Dans sa configuration finale, l'ELS se composait de neuf parachutes déployés dans une séquence complexe : un parachute de séparation du bouclier thermique avant nommé "*apex cover*", deux de freinage, trois de pilotage et trois principaux. Durant une rentrée normale, la séquence commençait à 7 300 mètres d'altitude avec le largage du bouclier thermique avant à l'aide de son parachute de 2,1 mètres. Les deux de freinage de 5 mètres s'ouvraient moins de deux secondes plus tard pour fournir une première décélération initiale et stabiliser le CM. Ils restaient attachés au vaisseau jusqu'à 3 350 mètres d'altitude. Au largage des parachutes de freinage, les trois parachutes de pilotage de 2,1 mètres se déployaient, fournissant une force suffisante pour extraire ceux principaux de 25,5 mètres ayant comme fonction de ralentir le CM jusqu'à son amerrissage⁶³.
- 50 Avec une surface au sol de 700 mètres carrés, le parachute principal était conçu en nylon de haute résistance, capable de ralentir un vaisseau de près de 6 tonnes, passant de 260 à 35 kilomètres par heure. Pourtant, un mètre carré de ce tissu pesait moins de 34 grammes. Chaque parachute était un assemblage de panneaux de tissu, cousus avec 5,6 kilomètres de fil déployés sur 2 millions de points. Les coutures étaient réalisées à la main sur des machines à coudre traditionnelles de marque Singer par des artisans⁶⁴. Un seul point défectueux aurait suffi pour causer une catastrophe lors de l'amerrissage. C'est

pour cela que le parachute était inspecté sur une table lumineuse point par point⁶⁵.

The care in the manufacture of the parachutes greatly contributed to their success. Charles Lowry, engineering manager at North American Aviation responsible for the Apollo ELS said of the team of seamstresses who sewed the Apollo spacecraft's parachutes, "These ladies took great pride in what they did. They all seemed to understand, more than any of us, that their sewing was the last important step in returning these astronauts safely home"⁶⁶.

- 51 Finalement, les parachutes étaient pliés et emballés à la main à l'aide d'un béliet hydraulique pour qu'il occupe le volume le plus petit possible⁶⁷. Lors du programme Apollo, seulement trois personnes dans le pays étaient formées et certifiées par la Federal Aviation Administration (FAA) pour leur pliage : Norma Cretal, Buzz Corey et Jimmy Calunga. Leur expertise était jugée tellement cruciale que la NASA interdisait qu'ils se déplacent ensemble dans le même véhicule, l'agence ne pouvant courir le risque de les voir tous blessés dans un unique accident⁶⁸.

Figure 9 : Inspection de l'installation du *Earth Landing System* avant la fixation du couvercle de l'apex sur un véhicule d'essai Apollo



Sur un véhicule d'essai Apollo au site de test des parachutes du DOD à El Centro, Californie, des responsables de Northrop Ventura inspectent l'installation du *Earth Landing System* avant la fixation du couvercle de l'apex.

3.5. Du fil de piano au roulage lunaire : un rover *wild-tech*

- 52 Le rover lunaire (LRV) est une astromobile fabriquée à quatre exemplaires (dont 3 ont roulé sur la Lune) par la NASA, utilisée par les astronautes au cours des missions *Apollo* pour leur permettre de s'aventurer à plusieurs kilomètres des sites d'alunissage pour explorer les caractéristiques géologiques les plus intéressantes. Une fois de plus, rouler ailleurs que sur Terre avec un véhicule tout-terrain pour étudier la géologie lunaire, tout en devant se conformer à la contrainte d'entrer dans un volume ne dépassant pas celui du coffre d'une voiture terrestre, constituait une entreprise inédite. Comme le souligne C. Fishman, le rover lunaire a marqué un tournant dans l'exploration spatiale : "*Moon car, had just changed the history of space exploration*"⁶⁹.
- 53 Le premier roulage en condition opérationnelle eut lieu le 31 juillet 1971 dans le cadre de la mission *Apollo 15*. Quant à sa conception, elle ne débuta que deux années auparavant, résultant des efforts de Sam Romano et Ferenc Pavlics, deux ingénieurs General Motors (GM), pour persuader la NASA de lancer la production d'un tel véhicule. L'aventure commença au début de l'année 1969. S. Romano et F. Pavlics avaient créé un modèle réduit du rover lunaire qu'ils envisageaient d'envoyer sur la Lune. Ce modèle, ressemblant à un jouet pour enfant et conçu avec une attention minutieuse aux détails, incluant des sièges cousus par l'épouse de Pavlics, était propulsé par un moteur électrique et contrôlé par télécommande⁷⁰. Ils se rendirent à Huntsville, au Centre de vol Marshall de la NASA, et installèrent le modèle réduit dans le couloir menant au bureau du directeur Werner von Braun, responsable de la conception du lanceur Saturn V utilisé pour les missions *Apollo*. Trente minutes plus tard, W. von Braun déclara : "*we must do this*"⁷¹.
- 54 Après la création de ce modèle réduit, qui a permis de concrétiser une idée abstraite et de la rendre suffisamment tangible pour convaincre l'un des principaux scientifiques du programme *Apollo*, deux autres aspects de sa conception et de sa fabrication illustrent l'interaction entre *high-tech* industrielles et *low-tech* artisanales,

comme le souligne C. Fishman : “*the rover was an improbable combination of high-tech and low-tech*”⁷². Son processus de pliage s'apparentait à de l'origami. Effectivement, les sièges étaient conçus pour se replier, et la partie avant comprenant les roues et les suspensions, était montée sur une articulation permettant de la rabattre à plat vers le milieu du véhicule. La partie arrière suivait le même principe, similaire à un transat qui se plie à plat pour le transport. Lorsque les parties avant et arrière étaient repliées vers le centre, les roues se libéraient et pivotaient également vers l'intérieur, créant ainsi un ensemble compact. Sur la Lune, grâce à un système composé de ressorts, de poulies, de cordes et de rubans de nylon, le rover pouvait se déplier facilement⁷³. Une fois cette opération accomplie, il était quasiment prêt à être utilisé⁷⁴.

- 55 La dimension *wild-tech* du rover la plus intéressante concerne ses roues car leur design devait résoudre un paradoxe : comment assurer traction et stabilité sans s'enliser dans le sol lunaire à la matérialité méconnue ? Afin de s'ajuster de manière optimale à la surface de la Lune, les roues, chacune entraînée par un modeste moteur de 0,25 cv, disposaient de jantes en titane et d'une bande de roulement faite d'un maillage métallique. Ce design permettait aux particules de pénétrer à l'intérieur de la roue, pour ensuite être relâchées progressivement au fur et à mesure que la roue tournait. Cette bande de roulement était fabriquée à partir de fils de piano⁷⁵. Le fil de piano, revêtu de zinc, était tissé à la main sur un métier à tisser spécialement conçu. Chaque pneu en nécessitait près d'un kilomètre. Des moyens importants ont été utilisés pour tester la roue. Un système comprenant une roue accrochée à un carrousel de conception frugale roulant sur un sol reproduisant la poussière lunaire était installé à l'intérieur d'une chambre à vide embarquée dans un avion de transport KC-135 affecté aux essais. Ce dernier effectue plusieurs vols balistiques afin de reproduire la gravité lunaire et ainsi tester la roue dans des conditions qui en simulaient l'environnement⁷⁶.

Figure 10 : Bande de roulement du rover lunaire



La bande de roulement du rover lunaire était fabriquée en maillage métallique, composée de fil de piano recouvert de zinc et tissée à la main sur un métier spécialement conçu. Cette structure ingénieuse permettait aux particules de régolithe lunaire de s'infiltrer dans le maillage avant d'être progressivement relâchées, limitant ainsi l'accumulation de poussière et optimisant l'adhérence sur le sol lunaire.

NASA, Apollo 17 Panoramic Camera Photograph AS17-137-20979, 1972, <<https://archive.org/details/as17-137-20979>>

4. La dimension *wild-tech* du système informatique

- 56 L'Apollo Guidance Computer (AGC), le système de navigation et de pilotage embarqué dans le CM et le LM du programme *Apollo* était inédit sur au moins six dimensions. Tout d'abord dans sa raison d'être : rendre possible l'exploration humaine de la Lune et assurer un retour sécurisé sur Terre. C'est pour cela qu'il était considéré comme le quatrième membre de l'équipage⁷⁷. Deuxièmement, c'était le premier ordinateur à offrir un niveau de performance et de fiabilité élevé tout en ayant un encombrement limité (1 pied cube, soit environ 30 litres) – établi de manière intuitive et improvisée – et un poids modéré (70 livres, soit environ 32 kg), dans un contexte où “*every pound of supplies you launched to the Moon from Cape Kennedy required three pounds of fuel on the launchpad*”⁷⁸. Troisièmement, il s'agissait du pre-

mier ordinateur à intégrer largement des circuits intégrés à base de silicium (environ 2 800 pièces par unité pour la version finale dite “Block II”). Quatrièmement, lorsque le cahier des charges de l’AGC a été défini, les techniques de programmation logicielle étaient relativement rudimentaires, surtout si on les compare aux avancées réalisées depuis la fin des années 1960, à l’issue de programme *Apollo*. L’AGC était le premier ordinateur performant, efficace et fiable à être doté d’un système d’exploitation tissé sur une mémoire à tores magnétiques à partir d’un langage d’assemblage créé de toutes pièces (AGC4). Cinquièmement, il disposait d’une interface humain-machine (IHM) connue sous le nom de *display keyboard* (DSKY), qui rendait possible des interactions complexes entre l’ordinateur et les astronautes dans le contexte exigeant des vols habités. Sixièmement, son système de navigation inertielle (INS) représentait le premier système de navigation conçu spécifiquement pour s’orienter et naviguer dans l’espace en l’absence de points de référence terrestres ou magnétiques.

- 57 Bien que l’AGC soit le premier ordinateur à avoir permis l’envoi d’êtres humains sur un autre corps céleste, il convient de souligner qu’il ne fut ni le premier à être miniaturisé ni le premier à exploiter des circuits intégrés en silicium ni le premier à embarquer un système d’exploitation en temps réel reposant sur une mémoire à tores magnétiques. De même, il ne fut pas le premier à être doté d’une IHM ni à intégrer un INS. Malgré ce que certaines simplifications peuvent suggérer, le programme *Apollo*, et en particulier l’AGC, n’est pas une invention. La nouveauté résidait dans la manière dont des technologies développées dès les années 1950 ont été combinées et portées à un niveau de performance et de fiabilité jamais atteint auparavant. Cette innovation peut être qualifiée de recomposition de haut niveau.
- 58 Avant de poursuivre, il convient d’examiner le niveau de performance et de fiabilité de l’AGC. Dans sa version finale, il était conçu pour gérer 200 interfaces d’entrée et de sortie⁷⁹ : recevoir des données provenant des gyroscopes, des accéléromètres et du radar installés sur le LM, recevoir des données du centre de contrôle de mission par liaison radio, contrôler le moteur principal et les systèmes de contrôle par réaction (RCS), afficher les données de positionnement et de vitesse, accepter les commandes et les instructions des astronautes *via* un clavier, etc. Il accomplissait toutes ces opérations avec

un taux de fiabilité record (une erreur sur 312 millions d'heures de test) et avec une capacité de calcul qui, comparée aux standards technologiques actuels, peut être considérée comme extrêmement limitée. *"The Apollo guidance and navigation computer [...] did all that with less computing power than a typical microwave oven as today, and it was indispensable in getting from lunar orbit to the Moon's surface and then back to the safety of the command module"*⁸⁰.

59 En effet, la puissance informatique de l'AGC est estimée à 1 Mhz⁸¹. Mis à part certains jouets actuels pour enfants, des ampoules LED ou des équipements hautement spécialisés destinés à des usages à faible consommation d'énergie, la plupart des dispositifs électroniques contemporains, y compris les fours micro-ondes, emploient des processeurs fonctionnant à des vitesses nettement supérieures à 1 MHz. Le processeur A12 Bionic équipant l'iPhone XS (2018), dispose de plusieurs cœurs et offre une puissance de calcul qui peut atteindre 2,5 GHz par unité. Avec ses 18 cœurs spécialisés, un iPhone XS peut exécuter jusqu'à 5 000 milliards d'opérations par seconde⁸². Partant du principe que l'AGC était capable de traiter 85 000 instructions par seconde, en supposant que certaines instructions complexes nécessitaient plusieurs cycles d'horloge⁸³, il s'ensuit que l'iPhone XS est près de 60 millions de fois plus rapide que l'AGC. Cette évolution illustre l'ampleur des progrès réalisés en informatique, comme le souligne cette comparaison saisissante : *"It takes about the same amount of computing to answer one Google Search query as all the computing done – in flight and on the ground – for the entire Apollo program!"*⁸⁴.

60 Il ne s'agit pas seulement d'une limitation de la puissance de calcul. La mémoire de masse (ROM) disposait de 36 864 mots, soit 73 728 octets (16 bits) ou 1/20^e de la capacité de stockage d'une disquette ou l'équivalent d'un courriel contenant du texte accompagné d'une image de signature de petit format, et la mémoire vive disposait de 2 048 mots, soit 4 096 octets (16 bits). Bien que toute comparaison demeure hasardeuse, elle permet néanmoins de contextualiser la puissance informatique disponible à l'époque par rapport à celle à portée de main aujourd'hui. Dès lors, une question s'impose : comment est-il possible de voyager entre la Terre et la Lune avec un équipement informatique embarqué aussi modeste ? Ce qui a été montré dans les sections précédentes s'applique-t-il également à l'électronique ?

- 61 Bien entendu, le succès du programme *Apollo* ne repose pas uniquement sur l'informatique bien que sans l'apport de cette dernière, l'idée même de marcher sur la Lune serait restée au stade du rêve.

*if you consider interconnections, reliability, ruggedness, and documentation, the Apollo guidance computer is at least as impressive as the PC on your desktop, and the Apollo software an equally intricate ballet of many people's work and ideas*⁸⁵.

- 62 Qu'implique le terme « *interconnections* » employé par David Mindell ? Ce terme est-il équivalent à « associations » ou à « combinaisons » ? Si c'est bien le cas, quelles sont ces *interconnections magiques* qui permettent de marcher sur la Lune avec un vaisseau dont les capacités informatiques et la mémoire de masse intégrée sont comparables à celles d'un jouet d'enfant et d'une cartouche de jeu Nintendo Famicom ? Certaines de ces combinaisons ont-elles des traits communs avec le concept de *wild-tech* ?
- 63 La responsabilité de concevoir l'AGC n'a pas été attribuée à un industriel tel que Minneapolis Honeywell, qui avait pourtant élaboré le système de contrôle pour le programme *Mercury*, mais plutôt à une institution universitaire : l'Instrumentation Lab (IL) du Massachusetts Institute of Technology (MIT), rebaptisé "Draper" en l'honneur de l'ingénieur et pilote Charles Stark Draper, qui a supervisé son développement. Ce laboratoire a démontré son expertise en concevant la première unité de mesure inertielle (IMU), installée à bord d'un bombardier Boeing B-29 Superfortress en 1953, qui a servi de fondation au système de navigation inertielle (INS) employé initialement dans des missiles balistiques (Thor, Atlas, Titan, etc.) et sous-marins. Ces connaissances ont également bénéficié au JPL en charge du développement des sondes spatiales du programme *Mariner* et *Lunar Orbiter* étudié plus haut. Qu'est-ce qu'un INS ? Comment cela se fait-il qu'un système développé pour diriger des missiles balistiques ou des sous-marins ait pu se retrouver dérivé dans un vaisseau spatial ?

Figure 11 : Apollo Guidance Computer (AGC)



L'Apollo Guidance Computer (AGC), avec ses 1 MHz et 4 Ko de RAM, était des millions de fois moins puissant qu'un smartphone moderne comme l'iPhone XS. Malgré sa mémoire limitée (73 Ko de ROM) et une capacité de calcul bien inférieure aux standards actuels, il a permis la navigation et l'alunissage du programme *Apollo*.

NASA, Draper Laboratory, <<https://dodlithr.blogspot.com/2011/10/apollo-guidance-computer-agc-software.html>>

4.1. De la mer à l'espace : un INS *wild-tech* entre sous-marins, sextants et bougies d'allumage

- 64 L'unité de navigation inertielle du vaisseau *Apollo* trouve son origine dans celle développée pour le missile nucléaire *Polaris UGM-27* et le sous-marin *George Washington*. Bien avant d'être utilisée dans l'espace, cette technologie avait été conçue pour évoluer sous l'eau, illustrant ainsi le parallèle souligné par C. Fishman : "*Submarines were like spaceships under the sea*"⁸⁶.
- 65 Chaque sous-marin devait être équipé d'un INS afin de connaître sa position. De plus, chaque missile en embarquait pour atteindre sa cible depuis sa rampe de lancement immergée. Les deux INS étaient coordonnés pour permettre au missile de connaître sa position initiale avec exactitude au moment de son lancement. Un INS est équipé

de gyroscopes et d'accéléromètres pour mesurer respectivement les changements d'orientation et les accélérations subies par l'engin. Ces mesures permettent de calculer une position, une vitesse et une trajectoire sans nécessiter de points de références extérieurs. Celui du vaisseau *Apollo* incluait également un télescope de balayage et un sextant, utilisés par les astronautes pour réaliser des observations astronomiques. Ces instruments étaient utilisés pour corriger les éventuelles erreurs de l'INS lors de longs trajets, illustrant ainsi un premier exemple de collaboration entre l'humain et la machine, ou encore, une association entre les méthodes traditionnelles de navigation des explorateurs d'autrefois et la technologie moderne de ces nouveaux explorateurs⁸⁷.

*The space sextant was a variant on the maritime instrument used since the eighteenth century for measuring the angles of celestial objects above the horizon. Indeed Philip Bowditch, an IL engineer who did major design work on the optical system, was descended from Nathaniel Bowditch whose maritime navigation books are still used at the sea*⁸⁸.

- 66 Non seulement ce système hybride a permis la navigation dans l'espace à partir d'équipements relativement frugaux (comparé aux technologies de navigation actuelles), mais il a également été déterminant pour le succès de missions comme *Apollo 12*. En effet, lorsque la foudre a neutralisé plusieurs systèmes techniques, l'utilisation de savoir-faire traditionnels de navigation a été cruciale pour évaluer la fiabilité de l'INS⁸⁹. La fabrication de l'INS a été confiée à l'entreprise AC Spark Plug, une filiale de GM réputée pour ses bougies d'allumage pour automobiles. C'est ainsi que l'INS est née de l'étrange rencontre entre la meilleure université technologique du pays et un fabricant de bougies d'allumage pour automobiles⁹⁰.

Figure 12 : Systèmes périphériques de l'Apollo Guidance Computer (AGC)

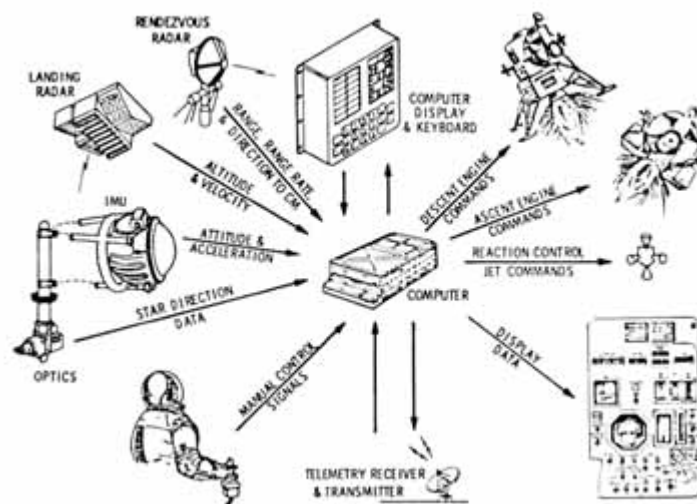


Fig. 1 The Lunar Module Computer Interfaces

Cette illustration montre les systèmes périphériques de l'Apollo Guidance Computer (AGC), incluant le système de navigation inertielle (INS), les radars, les commandes moteur et l'interface DSKY, permettant aux astronautes de gérer la navigation et le contrôle du vol lunaire.

EXO CRUISER, "Apollo Guidance Computer (AGC) Software", 12 octobre 2011, <<https://dodlit.hr.blogspot.com/2011/10/apollo-guidance-computer-agc-software.html>>

4.2. Du missile Polaris à la sonde martienne : un *hardware wild-tech*

- 67 Les informations fournies par l'INS, qu'elles aient été ajustées ou non par l'astronaute, nécessitaient un traitement informatique pour établir la position, la vitesse et la trajectoire du vaisseau. Cela permettait ensuite de calculer les ajustements nécessaires et de réaliser les manœuvres de vol. L'AGC intégrait plusieurs milliers de circuits intégrés et disposait d'une mémoire à tores magnétiques pour le stockage des données.
- 68 L'invention du circuit intégré est attribuée à Jack Kilby et Robert Noyce, trois ans avant le début du programme *Apollo*. Initialement, le germanium servait de substrat semi-conducteur, mais fut rapidement supplanté par le silicium, qui offrait des avantages significatifs tels qu'une meilleure résistance aux températures extrêmes et une stabilité chimique supérieure, assurant une fiabilité accrue. Du-

rant le développement du projet *Polaris*, Eldon Hall, en charge du développement du *hardware* de l'AGC, a fait la connaissance de J. Kilby et R. Noyce, travaillant respectivement chez Texas Instruments et Fairchild Semiconductor. Il s'agissait de mieux comprendre la fabrication des circuits intégrés, qui mélangeait techniques manuelles et automatisées et de vérifier leur capacité à produire des composants évolutifs et robustes⁹¹. Fairchild a été choisie pour fournir les circuits intégrés employés dans les ordinateurs des programmes *Polaris* et *Apollo*⁹². Pour le projet *Apollo* en particulier, l'entreprise a mis en place une ligne de production spécifique et des conditions de travail optimales destinées aux techniciens responsables des opérations manuelles du processus technique, comme l'assemblage et les essais. Seul le personnel le plus dévoué et possédant une attention particulière au détail a été retenu⁹³. Gordon Russell, responsable des ventes chez Fairchild, souligna l'importance d'un environnement de travail confortable pour maintenir des standards élevés (et éviter toute grève durable susceptible de perturber le calendrier du programme), mentionnant : *“the girls must have a separate facility where they can concentrate and maintain their high standards”*⁹⁴.

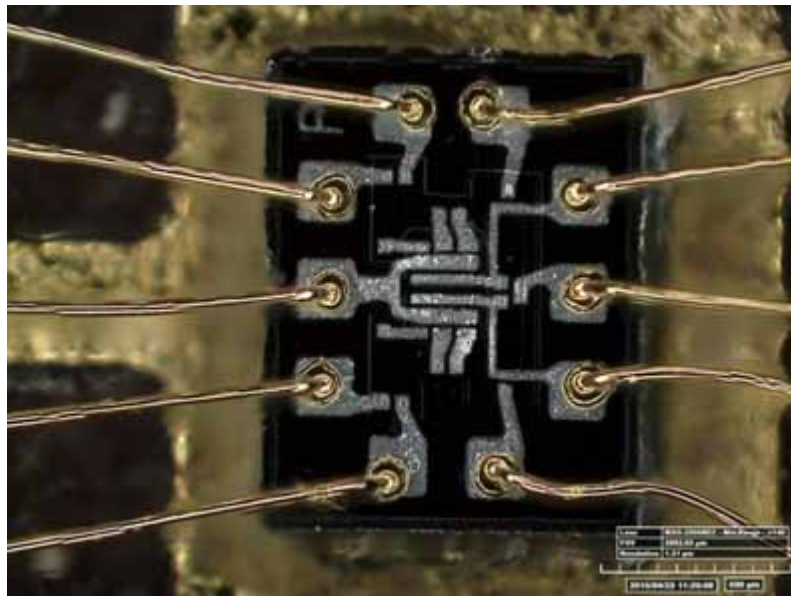
- 69 La performance et la compacité n'étaient pas les seuls avantages offerts par les circuits intégrés ; la fiabilité des ordinateurs était la considération première. Ils devaient être *“as reliable as a parachute”*⁹⁵. Cette fiabilité était cruciale, notamment parce que les ingénieurs avaient opté pour un ordinateur non-réparable, contrairement aux prototypes développés pour les sous-marins. Il était impossible d'emporter des pièces de rechange sans augmenter le poids du vaisseau, et le compartiment devait être totalement hermétique et donc inaccessible, afin de protéger le système informatique de l'humidité⁹⁶. Pourtant, du point de vue de l'innovation, la NASA refusait les « boîtes noires », les systèmes dont les mécanismes internes sont inconnus ou délibérément dissimulés⁹⁷ : *“NASA needed to know because that was how its managers practiced systems engineering, where every subsystem had to be a white box open to scrutiny”*⁹⁸. Pour atteindre un niveau de fiabilité équivalent à une erreur toutes les 100 000 heures d'opération, le MIT a acquis 400 000 composants, qui ont ensuite subi une batterie de tests rigoureux, incluant centrifugation, radiographie, vibration et cuisson au four. À la suite de ces tests, les composants ont été utilisés pour effectuer plus de 300 millions

d'heures de test au total. Une seule erreur fut reportée. Pour le programme *Apollo*, le MIT a finalement acheté un million de circuits intégrés, permettant la construction de 70 ordinateurs, dont seulement une vingtaine d'exemplaires ont été utilisés pour des missions spatiales avec des astronautes⁹⁹.

- 70 L'architecture de l'AGC, basée sur l'utilisation de circuits intégrés, n'est pas seulement issue de l'ordinateur du projet *Polaris*, mais aussi d'un concept d'ordinateur élaboré pour une sonde spatiale qui aurait dû voyager dans l'espace pour capturer des images de Mars. Cette étude n'a jamais dépassé le stade de maquette en bois. À la fin des années 1950, un groupe de chercheurs composé du mathématicien Hal Laning, du physicien Milt Trageser, de l'ingénieur Richard Battin et de l'informaticien Ramon Alonso a conçu un ordinateur destiné à assurer la navigation autonome d'une sonde spatiale en direction de Mars sur une durée de trois ans. À l'instar des systèmes évoqués précédemment, cet ordinateur reposait sur une INS pour déterminer sa position sans recours à des repères externes. Toutefois, au-delà de son architecture technique, c'est surtout la mise en place de simulations informatiques pour planifier cette mission qui s'est révélée déterminante pour le développement du programme *Apollo*.
- 71 Ces expérimentations ont été réalisées sur *Whirlwind*, considéré comme le premier ordinateur à fonctionner en temps réel (tubes à vide)¹⁰⁰. Que ce soit pour les travaux de recherche précédant le programme *Apollo* ou pour son développement lui-même, les ordinateurs de cette époque utilisaient des cartes perforées en papier pour fonctionner. Ces dernières, inspirées par les billets de train du XIX^e siècle, trouvaient leur origine principale dans les cartes utilisées pour programmer les métiers à tisser et la machine analytique de Charles Babbage (1791-1871), considérée comme le précurseur des ordinateurs. Par la suite, IBM a adapté cette technologie au domaine de l'informatique, où elle a été utilisée pour les expérimentations autour du projet *Mars probe*¹⁰¹ et pour la programmation de l'AGC. Le concept d'ordinateur pour faire voyager une sonde spatiale en toute autonomie vers Mars repose sur des calculs perforés sur du papier dont le volume ne pouvait excéder 1 024 mots, soit 2 048 octets (16 bits) ou 1/700^e de la mémoire d'une disquette. Pourtant, ces calculs ont posé les bases du *software* qui a permis aux êtres humains de marcher sur la Lune. Envisageons l'AGC comme le résultat d'une

combinaison de projets antérieurs, soit AGC $\approx$ Polaris + Mars Probe. Dans cette perspective, le Mod 3C, une première version de l'AGC qui exploitait des transistors au lieu de circuits intégrés (*core-transistor logic*) à l'instar de l'ordinateur du projet *Mars probe*, incarne une synthèse de ces deux influences préliminaires. “They [engineers of IL's Apollo project] started, logically enough, with the Mars probe computer and a good dose of Polaris. After a few prototypes, a computer design emerged that was designated ‘Mod 3C’¹⁰²”.

Figure 13 : Des circuits intégrés



Les circuits intégrés étaient indispensables à la miniaturisation de l'ordinateur embarqué dans les modules spatiaux.

Smithsonian National Air and Space Museum/AFP-HO

4.3. Du tissage textile au programme embarqué : un *software wild-tech*

72 Avant de se pencher sur les détails de la mémoire qui était aussi le *software* de l'AGC, il est essentiel de préciser l'environnement informatique utilisé durant le programme Apollo. Alors que l'AGC a été conçu pour des opérations en temps réel dans l'espace, le travail de recherche et développement au sol s'appuyait sur des systèmes informatiques puissants pour l'époque, mais qui n'étaient pas des ordinateurs en temps réel comme l'était par exemple *Whirlwind*. L'utilisa-

tion de circuits intégrés dans l'AGC, au-delà d'offrir une plus grande fiabilité, a également permis d'accroître sa puissance, libérant ainsi de l'espace qui a été utilisé pour augmenter la capacité de mémoire (de 4 000 mots sur *Mars probe* à 36 864 mots sur *Apollo*). Qu'il s'agisse du *Whirlwind* ou de l'AGC, ces ordinateurs étaient équipés d'une mémoire à tores magnétiques. Le processus de fabrication de ce support, également présent à bord des sondes *Lunar Orbiter*, était particulièrement inattendu, surtout à travers le prisme de notre connaissance actuelle de la technologie. "*Apollo spacecraft had no disk drives, no flash memory, nor even any magnetic paper tapes*¹⁰³". Ce moyen de stockage reposait sur un réseau complexe de fils de cuivre enroulés à travers de petits anneaux en ferrite. Chaque tore représentait un bit de mémoire : selon le sens du courant électrique qui traversait l'anneau, celui-ci était aimanté dans une direction (valeur 1) ou dans l'autre (valeur 0). Un tissage astucieux permettait à chaque tore de stocker 64 bits. Ce système permettait de conserver l'information même en l'absence d'alimentation électrique, offrant ainsi une forme de mémoire non-volatile et robuste. Cela sauva notamment la mission *Apollo 12* puisque lorsque le vaisseau fut frappé par la foudre juste après le décollage, l'ordinateur a parfaitement redémarré.

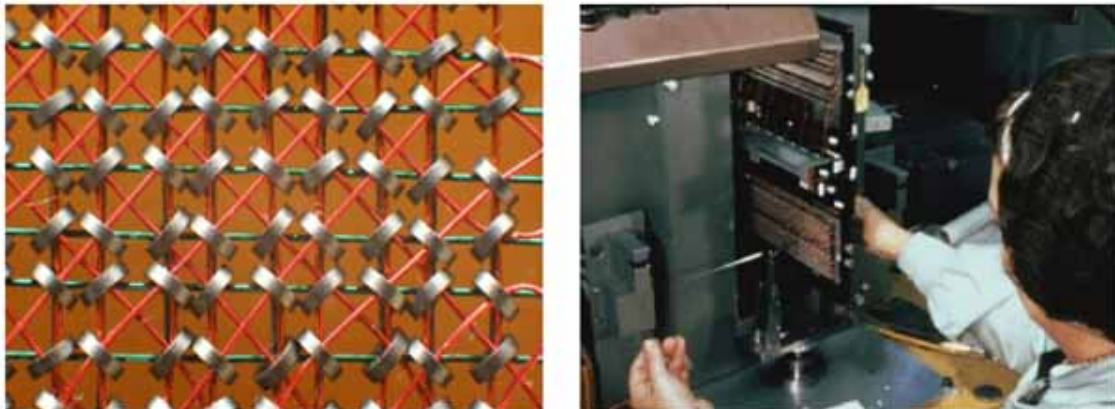
73 Cette mémoire était fabriquée en grande partie à la main par des tisserandes spécialisées de l'entreprise Raytheon¹⁰⁴, mondialement connue pour la fabrication du premier four à micro-ondes (1947)¹⁰⁵. Ce tissage était minutieux car chaque fil devait être positionné avec une grande précision pour assurer l'intégrité des données. La moindre erreur dans le tissage ou dans la polarisation d'un tore affectait le fonctionnement de la mémoire. Raytheon réalisait la fabrication dans ses usines à Waltham. La ville était renommée pour son savoir-faire en mécanique de précision et comptait sur une communauté ayant une connaissance approfondie de l'industrie textile. "*We have to build, essentially, a weaving machine*¹⁰⁶", souligna Ralph Ragan, cadre de l'entreprise. La NASA était bien consciente que la réussite des missions spatiales était étroitement liée à l'habileté des tisserandes. Pour mettre en lumière l'importance de leur contribution, elle organisa des visites d'astronautes dans les ateliers, dans le but d'éveiller chez ces artisans de l'informatique une prise de conscience quant à l'impact significatif de leur travail sur le programme *Apollo*. D'après une entrevue entre le directeur technique du

programme Apollo chez Raytheon Jack Poundstone et D. Mindell¹⁰⁷, *“the women at the plant ‘adopted’ the astronauts, and took great care and pride in the quality of their manufacture¹⁰⁸”*. Mais en quoi consistait exactement ce tissage ?

- 74 Le tissage réalisé par ces femmes était à la fois un support de stockage et le *software* qui permit à Neil Armstrong et Buzz Aldrin de marcher sur la Lune. Les anciennes ouvrières textiles de Waltham ne tissaient pas seulement la mémoire de l'ordinateur, mais littéralement les instructions de programmation. Dans les années 1960, le concept de *software* était nouveau. *“The hardware adapted to Apollo was relatively familiar in the world of military avionics. Radically new, however, was the software that would interact with the astronauts to control the mission¹⁰⁹”*. Un programme n'était pas réellement un *software*, mais un *hardware* composé de 589 824 1 et 0. *“Everything they made was scrap”*, disait Edmond Blondin, cadre chez Raytheon¹¹⁰, insistant sur le fait que le moindre défaut dans l'assemblage de 1 et de 0 rendait l'ensemble inutilisable.
- 75 Contrairement aux logiciels modernes dématérialisés, le programme de l'AGC était une entité matérielle, comme le souligne D. Mindell : *“The software for Apollo was an actual thing. You could hold it in your hand and it weighted a few pounds¹¹¹”*. Le programme de l'AGC a d'abord été conçu sur cartons perforés par l'équipe de Margaret Hamilton, pionnière du *software engineering*, à l'aide du langage de programmation AGC4 spécialement créé pour l'occasion. Passer d'un code perforé sur du carton à un tissage sur tores magnétiques nécessitait la traduction des perforations en un schéma de tissage. Ce schéma déterminait le chemin que chaque fil devait prendre à travers les tores pour reproduire fidèlement le programme informatique. Une fois ce schéma établi, le processus de tissage pouvait commencer, intégrant physiquement le *software* dans le *hardware* de l'AGC. Chaque programme nécessitait plusieurs semaines de tissage, environ huit pour l'intégralité du *software* de l'AGC. Chaque module contenait 65 536 bits d'informations, soit 8 kilo-octets de données¹¹².
- 76 La nature du support de stockage et du *software* rendait impossible toute modification du programme au dernier moment car tout changement de code passait par une refabrication du support. Ce qui était initialement considéré comme une limitation fut par la suite vu

comme un avantage, car cela empêchait tout “*risky last minute changes of the program just before flight were physically prevented*”¹¹³. De plus, cela obligeait les ingénieurs à produire un programme parfaitement fonctionnel avant fabrication.

Figure 14 : Tores câblés (gauche) et processus de tissage du logiciel (droite)



Tores câblés constituant une mémoire à tores magnétiques dans les années 1960. À gauche, une vue détaillée d’une mémoire à tores magnétiques où l’on distingue clairement les tores et les fils de lecture/écriture qui les traversent. À droite, une illustration du processus de tissage du logiciel directement dans cette mémoire « corde », un procédé minutieux documenté dans le film *Moon Machines* ¹¹⁴.

<<https://www.inneance.fr/il-y-a-50-ans-lordinateur-qui-emmena-lhomme-sur-la-lune/>>

4.4. Un langage rudimentaire pour un défi complexe : une interface *wild-tech*

- 77 Un composant de l’AGC jouait le rôle de pont entre le *hardware* et un *software* pas si soft que cela, entre l’humain et la machine. Cet élément ne constituait pas la première IHM puisqu’elle s’inscrivait historiquement dans la lignée d’inventions telles que l’interface imaginaire de Vannevar Bush, le *Sketchpad* d’Ivan Sutherland, et la souris de pointage de Douglas Engelbart ¹¹⁵.
- 78 Avec le programme *Apollo*, la nécessité de réaliser des opérations complexes sur la Lune, telles que l’alunissage et le retour sur Terre, a nécessité le développement d’une interface plus avancée et interactive, menant à la création de la DSKY pour *Display Keyboard*, prononcée “Diskey”. Celle-ci permettait pour la première fois aux astronautes de communiquer directement avec l’ordinateur de bord *via*

des commandes numériques et de recevoir des informations en temps réel sur l'état de la mission. Cette évolution soulève une question centrale dans le programme Apollo : le pilotage devait-il être manuel, comme le préconisaient les partisans de l'approche des *airmen*, ou largement automatisé, selon les défenseurs de l'école des « chauffeurs »¹¹⁶ ? Ce débat sera examiné dans la partie suivante.

- 79 Dans l'hypothèse d'une automatisation du pilotage, il convient également d'examiner quelles tâches devaient impérativement rester sous contrôle manuel. La mention de la DSKY s'impose en raison de la décision finale de la NASA, qui a opté pour un équilibre entre des procédures automatisées, gérées par l'AGC, et des interventions manuelles réalisées par les astronautes. Par conséquent, il était impératif de concevoir une IHM efficace pour faciliter les échanges entre les êtres humains et les machines afin de garantir le succès des missions Apollo.
- 80 L'interface DSKY était basée sur une idée astucieuse de R. Alonso, l'informaticien impliqué dans la conception de l'ordinateur du projet *Mars probe*. L'objectif était d'aligner la logique de l'interface DSKY sur celle d'une phrase simple, en résumant une phrase à ses composants les plus élémentaires – un verbe et un nom – afin de créer une interface qui soit à la fois intuitive, efficace et frugale. Cette interface dite « VERB-NOUN » permettait d'exécuter des commandes spécifiques en combinant un verbe et un nom, simplifiant ainsi la manière dont les opérations complexes étaient exécutées pendant une mission qui nécessitait environ 13 000 saisies de clavier¹¹⁷. Le verbe (VERB) indique l'action à effectuer par l'AGC. Le nom (NOUN) spécifie l'objet de l'action. Chaque élément est suivi d'un chiffre qui indique le numéro de l'action et le numéro de l'objet de l'action. Par exemple, si un astronaute voulait connaître la vitesse et l'altitude du vaisseau, il saisissait VERB 16 pour « afficher » et NOUN 36 pour « temps écoulé au sol ». Ainsi la commande « VERB 16 NOUN 36 » correspondait à l'affichage du temps écoulé au sol¹¹⁸. « [The onboard computer] was, with its computational ability, a joy to operate. It was just a tremendous machine. It was so simple and straightforward the even pilots could learn how to use it », disait l'astronaute David Scott. L'interface était tellement intuitive que les astronautes avaient l'impression de jouer au piano¹¹⁹. Cette approche était nettement plus simple que le système DOS utili-

sant l'invite de commande C>, développé par Microsoft 12 ans plus tard.

Figure 15 : Liste de combinaisons *verbe-nom* inscrite sur le tableau de bord du vaisseau Apollo



Liste de combinaisons *verbe-nom* inscrite sur le tableau de bord du vaisseau Apollo, illustrant le mode de commande de l'AGC via l'interface DSKY.

<<https://apollo11space.com/apollo-guidance-computer-and-its-significance-during-the-apollo-11-mission/>>

5. La dimension *wild-tech* du pilotage

81 Pour comprendre, voire ressentir ce que cela fait de piloter dans un environnement technologique combinant techniques – *déjà là* – des décennies 1940 et 1950 et techniques – *pas encore là* – des décennies 1970 et 1980, il suffit de regarder l'entame du film *First Man*¹²⁰. On y voit Neil Armstrong, incarné par Ryan Gosling, en train de se battre littéralement avec un North American X-15, un avion-fusée hypersonique expérimental de vol suborbital construit dans le cadre d'un programme de recherche sur les vols à très haute vitesse (vitesse max. : 7 273 km/h) et très haute altitude (plafond : 95 900 m). « Ça ta-

basse dur », dit-il à 1:34, dans un environnement spartiate et bruyant dominé par les hurlements d'un avion dont la carcasse métallique subit les contraintes du milieu.

- 82 Il s'agit en fait d'un vol d'essai qui eut lieu le 20 avril 1962. Ce jour-là, N. Armstrong a atteint une altitude de 63 kilomètres. Durant sa descente, l'avion entre dans un mode de vol connu sous le nom de “*skip-glide*”, adoptant une trajectoire qui le fait rebondir et glisser sur l'atmosphère de la Terre, à la manière d'un caillou faisant des ricochets sur l'eau. Ce phénomène a prolongé la durée du vol (12 minutes et 29 secondes), l'éloignant de la zone d'atterrissage sécurisée. Armstrong a été contraint d'utiliser son instinct et ses compétences de pilote, face à une situation inédite, pour retourner sain et sauf vers la base aérienne d'Edwards en Californie, en passant à tout juste 30 mètres au-dessus des arbres de Josué à la bordure du lac asséch¹²¹.

5.1. *Airmanship*

- 83 Ce jour-là, Armstrong a expérimenté l'atmosphère comme s'il s'agissait d'une nouvelle matière, la ressentant à travers les réactions de son manche de contrôle pour prendre des décisions éclairées (*airmanship*), à la manière d'un artisan d'art expérimentant de nouveaux matériaux pour repousser les limites de son métier (*craftsmanship*). La plupart des astronautes du programme Apollo ont évolué dans ce type d'environnement, déterminé par la relative simplicité technique des « vaisseaux-outils », poussant les pilotes à opérer au plus près des nouvelles matérialités de l'espace. Ce mode d'apprentissage de l'espace a permis aux futurs astronautes du programme Apollo de développer des compétences attentionnelles et sensorielles exceptionnelles, cruciales pour le succès des missions. Une ethnographie menée auprès de ces astronautes aurait vraisemblablement révélé des états de concentration optimale (*flow*) tels que décrits par Mihály Csíkszentmihályi¹²², ainsi que des aptitudes hypersensorielles¹²³ et intuitives¹²⁴. L'analyse aurait également mis en lumière des processus cognitifs incarnés et étendus, s'inscrivant dans les travaux de Francisco Varela, Andy Clark et David Chalmers et Mark Rowlands¹²⁵, ainsi que des axes de résonance entre l'astronaute et son environnement spatial *via* la machine, dans une perspective proche

de celle développée par Hartmut Rosa¹²⁶. Ces dynamiques rappellent celles observables dans d'autres contextes d'expertise, notamment chez les artisans d'art de la maison Hermès¹²⁷. “The X-15 rocket-plane [...] sought to prove that human skill and judgement would be required for at least one phase of spaceflight: reentry from space back into the atmosphere¹²⁸”. Damien Chazelle retranscrit cette réflexion à plusieurs endroits du film. À la 40^e minute du film, qui revient sur la mission Gemini 8, destinée à réaliser le premier amarrage de deux engins spatiaux en orbite, un événement critique survient. Le vaisseau Gemini se met à tourner de manière incontrôlable sur son axe de roulis après l'amarrage avec le module Agena. D. Scott, le coéquipier d'Armstrong, a remarqué une baisse anormale du niveau de carburant, ce qui a conduit Armstrong à déduire rapidement que l'un des propulseurs d'attitude du Gemini était bloqué à pleine puissance. Grâce à son sang-froid et à sa compréhension approfondie de la mécanique du vaisseau, il a pris la décision de se désamarrer d'Agena et d'utiliser les propulseurs de contrôle d'urgence pour stabiliser le module Gemini. Cette manœuvre décisive a non seulement sauvé la mission, mais aussi la vie des deux astronautes, mettant en lumière l'importance de l'expérience acquise dans la gestion des situations extrêmes. Par ailleurs, c'est l'expérience de B. Aldrin en tant que pilote qui a été déterminante dans l'élaboration du protocole de rendez-vous, exposé dans sa Thèse intitulée *Line-of-sight guidance techniques for manned orbital rendezvous*, soutenue en 1963¹²⁹. Les concepts qu'il a formulés ont joué un rôle essentiel dans l'établissement des procédures d'amarrage pour les missions spatiales, Gemini 8 y compris.

- 84 À la 82^e minute du film, on observe N. Armstrong aux commandes du Lunar Landing Research Vehicle (LLRV), un engin notoirement complexe à piloter qui requiert des compétences de pilotage exceptionnelles. Ce moment met en lumière la nature périlleuse de la préparation des astronautes, où la marge d'erreur est extrêmement réduite. Même face à l'échec, Armstrong ne montre pas de signe de frustration, incarnant une philosophie résiliente : « il faut échouer sur Terre pour ne pas échouer là-haut ». Armstrong passait par l'expérimentation et n'excluait pas d'échouer ou de se blesser pour transformer le virtuel en réel. Dans le premier cas, ce réel est une *bonne surprise* et donnait lieu à des découvertes qui vont le rapprocher de la Lune. Dans le second cas, ce réel est une *mauvaise surprise* au cours de la

mise au point qui va éviter la *vraie* mauvaise surprise au moment où il faudra réaliser la même manœuvre dans l'espace. Armstrong, pour le dire avec Matthew Crawford¹³⁰, semblait avoir compris qu'il n'était pas possible d'avoir le côté positif des prises¹³¹ (*affordances*) sans leur côté négatif puisque ce sont les deux faces de la même médaille. C'était un programme d'essai avec du matériel à risque comme toute opération dans un milieu hostile tel que l'espace. Il vivait positivement l'hétéronomie des choses et les périls de la réalité matérielle malgré les retours périlleux de certaines *matières* (l'atmosphère, le sol, etc.). "[Pilots] spent years flying and testing dangerous machines. Project Mercury's successor, Project Gemini, epitomized the pilot-centered approach, enabling hands-on control of orbital maneuvers¹³²".

5.2. Entre *airmen* et chauffeurs : l'astronaute *wild-tech*

- 85 Forts de leur expérience à bord de machines exigeant un contrôle manuel précis, les astronautes du programme *Gemini* avaient consolidé une approche du vol spatial centrée sur le rôle actif du pilote. C'est pourquoi, lors de l'élaboration du cahier des charges du programme *Apollo*, il y a eu un débat prolongé sur le choix du mode de pilotage des vaisseaux : manuel ou automatique.
- 86 Pour reprendre la terminologie de Charles H. Gibbs-Smith¹³³, deux approches s'opposaient dans la conception du pilotage spatial. D'un côté, les astronautes et pilotes d'essai défendaient la vision des *airmen*, pour qui piloter un vaisseau spatial relevait d'une expérience directe, d'un apprentissage en immersion, où l'humain devait garder un contrôle manuel sur sa machine : "[The Airmen looked upon the early aeroplane] as something to experience, to learn in, and to fly in¹³⁴". De l'autre, les administrateurs et ingénieurs préconisaient une approche plus automatisée, celle des *chauffeurs*, pour qui l'engin devait fonctionner de manière autonome, avec une intervention humaine limitée à une simple supervision : "These chauffeurs saw themselves as 'outside' their machines, which had a certain stately autonomy; the human role was to guide, rather than direct¹³⁵". Ce débat structurant a profondément marqué la conception des systèmes de

pilotage du programme *Apollo*, conduisant à un équilibre entre intervention humaine et automatisation avancée¹³⁶.

- 87 De cette dualité est né un astronaute *wild-tech*, à la fois pilote et ingénieur, capable d'alterner entre le contrôle manuel et l'exploitation des systèmes automatisés selon les exigences de la mission. Bien que la préférence ait été donnée à l'automatisation, les moments cruciaux tels que l'alunissage et le retour sur Terre étaient effectués manuellement, conformément aux principes de la première approche. En outre, une composante manuelle de pilotage n'aurait pas été envisageable sans que les pilotes aient eux-mêmes été exposés à des situations de vol extrêmes durant leur formation. Pour cette raison, l'approche de pilotage adoptée dans le programme *Apollo* peut être qualifiée de *wild-tech*, combinant les atouts de l'école des *airmen* et de l'école des *chauffeurs* pour concrétiser un projet dépassant ce que chaque approche, prise isolément, aurait pu accomplir. Une stratégie exclusivement manuelle ou entièrement automatisée n'aurait pas permis un alunissage aussi précoce. L'excès d'automatisation du programme soviétique est l'une des explications pour lesquelles les cosmonautes n'ont jamais foulé le sol lunaire¹³⁷. Il est probable que le même sort aurait été réservé à tout programme reposant intégralement sur le pilotage manuel. Cette décision a influé sur le design de l'AGC et de son interface DSKY susmentionnés, ainsi que sur la conception des vaisseaux *Apollo*. "*The computer design and its software then reflected a philosophy of automating the fights while not actually replacing the astronauts*¹³⁸".
- 88 En effet, une approche *airmen* privilégie l'instabilité, tandis qu'une orientation *chauffeurs* favorise le contrôle. *The more stable an aircraft is, the more effort will be required to move it off of its point of equilibrium. [...] The opposite is also true – the more controllable, or maneuverable, an aircraft, the less stable it will be*¹³⁹.
- 89 Ainsi, l'approche *airmen* incarne une philosophie plutôt *low-tech* axée sur l'instabilité, tandis que l'approche *chauffeurs* représente une vision plutôt *high-tech* orientée vers le contrôle, comme si un vaisseau était une "*flying machine as a winged automobile, to be driven into the air by brute force of engine and propeller, so to say, and sedately steered about the sky as if it were a land*¹⁴⁰".

- 90 Le LM, en particulier, était conçu pour être hautement manœuvrable, avec une capacité d'ajustement fin lors de l'alunissage car "*the entire Apollo program culminated in the landing*"¹⁴¹. L'instabilité inhérente à ce design était compensée par un système de contrôle de vol avancé permettant aux astronautes de réaliser des ajustements précis de la vitesse et de l'orientation. Cela était essentiel pour permettre l'alunissage dans des terrains accidentés ou pour éviter des obstacles imprévus dans les derniers moments avant de toucher le sol lunaire. La conception favorisait une réponse rapide et précise aux commandes des pilotes, ce qui est caractéristique d'un véhicule conçu pour opérer dans un environnement où la moindre erreur peut avoir des conséquences fatales. Durant la mission Apollo 11, le passage au contrôle manuel s'est avéré décisif, notamment en réponse à l'erreur 1202, une surcharge du système de navigation et de guidage qui ajoutait un niveau de complexité à une tâche déjà extrêmement délicate¹⁴². Cette capacité à basculer sur un pilotage manuel, combinée aux expériences antérieures d'Armstrong, a joué un rôle clé dans le succès de la mission.
- 91 D'un autre côté, le CSM, conçu pour le transport des astronautes vers la Lune et leur retour sur Terre, mettait l'accent sur la stabilité. Cette stabilité était cruciale pour les longues périodes de vol en absence de pilotage actif, particulièrement lors du voyage de retour vers la Terre, où une rentrée atmosphérique précise était vitale pour la survie de l'équipage. Le CSM devait maintenir une trajectoire stable et prévisible, réduisant les risques pendant les phases de vol où les corrections de cap étaient moins fréquentes mais critiques en termes de précision. "*Despite the automation, on each of the six Apollo landings the astronaut in command took control and landed in a manual mode*"¹⁴³. Par conséquent, l'instabilité relative du LM et la contrôlabilité du CSM constituaient une combinaison *wild-tech*, caractérisée à la fois par une instabilité et une haute capacité de contrôle pour mener à bien les différentes missions.
- 92 Pour conclure sur un aspect plus anecdotique, l'ingéniosité des astronautes du programme Apollo s'illustre à travers des situations inattendues, telles que l'intervention de B. Aldrin, qui a dû ajuster manuellement l'antenne du vaisseau afin de rétablir la communication avec Houston après une perte de signal¹⁴⁴. Ou encore, l'épisode insolite du décollage où un stylo surnommé plus tard "*space pen*" a été

utilisé par B. Aldrin pour activer un commutateur défectueux, essentiel à la mise à feu des propulseurs pour quitter la Lune¹⁴⁵. Ces anecdotes illustrent brillamment que, même au cœur de l'une des entreprises technologiques les plus avancées de l'histoire humaine, la capacité à improviser avec les moyens du bord a joué un rôle crucial, prouvant que les compétences pratiques et l'ingéniosité humaine étaient tout aussi importantes que les prouesses technologiques elles-mêmes.

6. Conclusion

93 Il est pertinent de rappeler que l'humanité a atteint la Lune avec des moyens techniques relativement limités, notamment en comparaison des technologies contemporaines qui, malgré des avancées considérables et une multiplication des missions spatiales, n'ont pas encore permis un nouveau voyage habité vers notre satellite¹⁴⁶. Cependant, qualifier le programme *Apollo* de *low-tech* serait réducteur. D'une part, si certaines technologies de l'époque étaient effectivement plus simples, d'autres représentaient le summum de l'innovation technologique. D'autre part, évaluer les technologies d'alors avec nos critères actuels pour qualifier un processus de frugal ou de sophistiqué est évidemment trompeur. Il est plus pertinent de chercher à comprendre comment les combinaisons de technologies disponibles ont permis d'accomplir tant avec si peu. Non seulement les missions lunaires n'ont pas été renouvelées, mais face aux technologies de l'époque, nous serions sans doute déconcertés par le défi d'en exploiter pleinement le potentiel. À moins que, comme par le passé, cette contrainte ne suscite un sursaut d'inventivité, fondé sur des combinaisons techniques inattendues, aux allures presque magiques. En effet, les responsables de la NASA ont établi un cadre technique d'un équilibre exceptionnel, qui n'avait certainement pas été théorisé à l'époque, capable de maximiser l'efficacité des moyens à disposition. Pour reprendre les termes de Joe Shea, ingénieur système à la NASA, l'AGC et le programme *Apollo* dans son ensemble constituent un "*balanced program*"¹⁴⁷. Il apparaît que nous avons perdu quelque chose, un art ou une science des équilibres techniques qui permet de réaliser de grandes choses (sans nécessairement juger la valeur de ces exploits, souvent controversés, comme en témoigne la multitude de débris flottant en orbite terrestre issus de la conquête spatiale¹⁴⁸) avec

des moyens limités. L'abondance des moyens techniques actuels réduit la nécessité de penser ces équilibres, ce qui peut limiter l'ingéniosité des innovations et conduire à une efficacité parfois décevante, voire insatisfaisante. Plus préoccupant encore, cette inefficacité pourrait être perçue comme une régression, puisque nous serions vraisemblablement dans l'incapacité de réitérer ces exploits passés avec les technologies de l'époque, sans avoir la certitude de réussir à les accomplir dans la décennie actuelle avec les technologies dont nous disposons maintenant. Dans un contexte où le concept de « progrès » est omniprésent, une telle réévaluation de l'innovation technique est pour le moins embarrassante. À titre d'exemple, la NASA a récemment révélé que ses capacités en calcul intensif, notamment pour la recherche et la planification des missions, étaient sursollicitées et dépassées¹⁴⁹. Pour saisir ces équilibres, il est essentiel de se replonger dans les processus techniques de l'époque, en effectuant leur onto-cartographie, soit une cartographie aussi détaillée que possible de leur composition matérielle. Cette démarche, exigeante et minutieuse, mériterait d'être approfondie. Ces quelques pages n'en donnent qu'un aperçu. C'est une combinaison très caractéristique du *wild-tech*, associant des techniques qui, *a priori*, n'avaient rien à faire ensemble, qui a permis de relever des défis d'une difficulté inédite. À cela il faut ajouter une forme d'intelligence que nous avons peut-être perdue, qui consiste à associer des dispositifs et des savoir-faire de niveaux techniques et de natures contrastés, dont la combinaison décuple, voire transcende la puissance de chaque dispositif et savoir-faire pris individuellement. Faire du *wild-tech* ne relève ni de l'addition ni de la multiplication, mais plutôt d'une concaténation. Une redécouverte d'une certaine conception du *wild-tech* développée pour l'espace pourrait-elle inspirer des modes de conception à la fois puissants et frugaux pour répondre à des problématiques profondément terrestres ? Le *wild-tech* pourrait-il s'imposer comme une *orientation* de la technique capable de nous faire atterrir¹⁵⁰ ?

NOTES

1 <https://www.youtube.com/watch?v=GmN1wO_24Ao>.

- 2 FISHMAN Charles, *One Giant Leap: The Impossible Mission That Flew Us to the Moon*, New York/Londres, Simon & Schuster Paperbacks, 2019.
- 3 *Ibid. supra*, p. 123.
- 4 *Ibid.*, p. 6
- 5 BAHCALL Safi, *Loonshots How to Nurture the Crazy Ideas That Win Wars, Cure Diseases, and Transform Industries*, New York, St Martin's Press, 2020 [2019].
- 6 *Techniques & Cultures*, n° 67 (Low Tech? Wild Tech!), GRIMAUD Emmanuel, TASTEVIN Yann Philippe et VIDAL Denis [dir.], 2017, Doi : [10.4000/tc.8260](https://doi.org/10.4000/tc.8260) ([http s://doi.org/10.4000/tc.8260](http://s://doi.org/10.4000/tc.8260)).
- 7 <www.wildtechschoolab.com>
- 8 GRIMAUD Emmanuel, « Wild Tech : repenser l'innovation avec Charlie Bowers », *Techniques & Cultures*, n° 67 (Low Tech? Wild Tech!), 2017, p. 258-279, Doi : [10.4000/tc.8493](https://doi.org/10.4000/tc.8493) (<https://doi.org/10.4000/tc.8493>).
- 9 Bien que le programme Apollo se soit officiellement terminé en 1972 avec Apollo 17, une dernière mission, Apollo-Soyouz, a eu lieu en 1975. Il s'agissait d'un vol conjoint entre les États-Unis et l'URSS, visant à tester l'amarrage entre un vaisseau Apollo et un Soyouz dans un contexte de détente politique. Cette mission marqua la première coopération spatiale entre les deux puissances, mais ne faisait pas partie du programme lunaire Apollo.
- 10 THWAITES Thomas, *The Toaster Project: Or a Heroic Attempt to Build a Simple Electric Appliance from Scratch*, New York, Princeton Architectural Press, 2011.
- 11 STIEGLER Bernard (dir.), « Bifurquer : "il n'y a pas d'alternative" », [Paris], Les Liens qui Libèrent, 2020.
- 12 BRYANT Levi R., *Onto-Cartography: An Ontology of Machines and Media*, Edinburgh, Edinburgh University Press, "Speculative realism", 2014. CIA, Kodak Bimat transfer Processing System, CIA Reading Room, 1967, <<https://www.cia.gov/readingroom/document/cia-rdp33-02415a000500120032-7>>.
- 13 DUCOURNEAU Emmanuel, *Vers un design de l'être : la bricologie comme savoir-faire et savoir-être de l'artisan Hermès*, Thèse en anthropologie, Joël Candau et d'Arnaud Halloy (dir.), Université Côte d'Azur, Besign, 2020.
- 14 GALINON-MÉLÉNEC Béatrice, "The Future of the 'Homme-trace'. A substantial societal challenge", *Netcom*, vol. 28, n° 1-2 (Représenter des populations

et des territoires en mouvement), 2014, p. 110, Doi : [10.4000/netcom.1554](https://doi.org/10.4000/netcom.1554) (<https://doi.org/10.4000/netcom.1554>).

15 CANDAU Joël, « Traces singulières, traces partagées ? », *Socio-Anthropologie*, vol. 12 (Traces), 2002, Doi : [10.4000/socio-anthropologie.149](https://doi.org/10.4000/socio-anthropologie.149) (<https://doi.org/10.4000/socio-anthropologie.149>).

16 DUCOURNEAU Emmanuel, *Vers un design de l'être...*, op. cit. Cette notion désigne le degré de détournement, d'adaptation et de réappropriation de techniques existantes dans un processus technique pour faire face à une difficulté, qu'il s'agisse d'une complexité nouvelle ou d'un problème de production. Elle met en jeu la capacité de l'individu à exploiter les ressources disponibles, à s'adapter aux contraintes et, parfois, à faire preuve d'improvisation.

17 GREVSMÜHL Sebastian Vincent, *La Terre vue d'en haut : l'invention de l'environnement global*, Paris, Éd. Du Seuil, « Anthropocène », 2014.

18 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 27.

19 WILFORD John Noble, "Last Apollo Wednesday; Scholars Assess Program: \$25-Billion Space Project Ran 11 Years-Cape Kennedy Presses Countdown", *New York Times*, 3 décembre 1972, <<https://timesmachine.nytimes.com/timesmachine/1972/12/03/issue.html>>.

L'anthropologue Claude Lévi-Strauss, peu adepte de la télévision, ne faisait exception que pour les images de l'espace. Fasciné par les lancements lunaires, il avait rester scotché à son écran, malgré la monotonie et la longueur des retransmissions.

20 JOHNSON John Jr, "New light on the moon", *Los Angeles Times*, 22 mars 2009, <<https://www.latimes.com/archives/la-xpm-2009-mar-22-na-lunar22-story.html>>.

21 MATEUS Quentin et ROUSSILHE Gauthier, *Perspectives low-tech : comment vivre, faire et s'organiser autrement ?*, Paris, Éd. Divergences, 2023.

22 Dans *La Chine ancienne : des origines à l'Empire*, Jacques Gernet donne un exemple éclairant. La brouette chinoise, qui a subi une transformation notable au cours du premier millénaire en intégrant un mât et une voile dans certaines régions de Chine, illustre une association *wild-tech* de techniques considérées aujourd'hui comme *low-tech*. Au ^{xvii}^e siècle, cette innovation a inspiré l'ingénieur néerlandais Simon Stevin à concevoir les chariots à voile, « les premiers à démontrer que l'on pouvait se déplacer sur terre à des vitesses encore inconnues » représentant ainsi un défi inédit

pour l'époque. GERNET Jacques, *La Chine ancienne : des origines à l'Empire*, 10^e éd., mise à jour, Paris, PUF, « Que sais-je ?, 1113 », 2005 [1964].

23 KREBS Günter, "Lunar Orbiter 1, 2, 3, 4, 5", *Gunter's Space Page*, <https://space.skyrocket.de/doc_sdat/lunar-orbiter.htm>.

24 HANSEN Thomas P. et LANGLEY RESEARCH CENTER, *Guide to Lunar Orbiter Photographs*, Washington, NASA Technical Reports Server (NTRS), "NASA SP-242", 1970, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710026703/downloads/19710026703.pdf>>.

25 THE BOING COMPANY, *Lunar Orbiter I: Photographic Mission Summary*, Washington, NASA Technical Reports Server (NTRS), "NASA CR-782", 1967, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670012120/downloads/19670012120.pdf>>.

26 CIA, "Lunar Orbiter Photography Evaluation", CIA Reading Room, 1967, <<https://www.cia.gov/readingroom/docs/CIA-RDP33-02415A000500120032-7.pdf>>.

27 GRAMMER Richard, STETS J. F., BUTTNER B. W. et FILBERT H. C., "Ground Reconstruction of Lunar Orbiter Photography", *Journal of the SMPTE*, vol. 76, n° 8, 1967, p. 765-773. BOCKER David E. et HUGUES J. Kenrick, *Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon*, Washington, NASA, "NASA SP-206", 1971.

28 *Ibid. supra*.

29 Nous reviendrons plus longuement sur ce type de mémoire lorsqu'il sera question du système informatique du vaisseau spatial Apollo.

30 THE BOING COMPANY, *Lunar Orbiter V: Photographic Mission Summary*, Washington, NASA Technical Reports Server (NTRS), "NASA CR-1095", 1968, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680019419/downloads/19680019419.pdf>>.

31 GRAMMER Richard et al., "Ground Reconstruction...", *op. cit.*

32 Il s'agissait d'artisans dans la mesure où leur travail exigeait une grande minutie, une expertise technique spécifique et un savoir-faire manuel pointu. Comme dans les métiers de l'artisanat, ce processus reposait sur une transmission de compétences, une maîtrise des matériaux et des outils spécifiques, ainsi qu'une attention aux détails comparable à celle des restaurateurs d'œuvres d'art.

33 GRIMAUD Emmanuel, « Wild Tech : repenser l'innovation... », *op. cit.* Une machine de Rube Goldberg désigne un dispositif volontairement complexe et exagérément indirect pour accomplir une tâche simple. De manière simi-

laire, les circuits conçus par Charles R. Bowers dans ses films d'animation intègrent des mécanismes à la fois absurdes et ingénieux, illustrant une approche burlesque de la technicité.

34 JOHNSON John Jr, "New light on the moon", art. cit.

35 MOONVIEWS, "Lunar Orbiter Image Recovery Project (LOIRP)", Moonviews, <<https://moonviews.com/?cat=67>>.

36 Doug Bierend, "The Hackers Who Recovered NASA's Lost Lunar Photos", *Wired*, 23 avril 2014, <<https://www.wired.com/2014/04/lost-lunar-photos-recovered-by-great-feats-of-hackerdom-developed-at-a-mcdonalds/>>.

37 FOUST Jeff, "Lunar Orbiter Image Recovery Project Seeks Public Support to Retrieve Apollo Era Moon Images", *SpaceNews*, 8 janvier 2014, <<https://spacenews.com/lunar-orbiter-image-recovery-project-seeks-public-support-to-retrieve-apollo-era-moon-images/>>.

38 WINGO Dennis R., "The Lunar Orbiter Image Recovery Project (LOIRP)", *American Geophysical Union, Fall Meeting*, San Francisco, 2019.

39 Le bricolage peut être interprété comme une pratique d'émancipation et de résistance face aux standards industriels et sociétaux. À la manière du bricoleur décrit par Claude LÉVI-STRAUSS (*La Pensée Sauvage*, 1^{re} éd., Paris, Plon, 1962), celles et ceux qui pratiquent le *wild-tech* s'appuient sur la réutilisation créative de matériaux ou d'équipements disponibles, mais ils portent aussi une charge critique : celle d'un refus implicite de la conformité aux logiques de production et de consommation normées. En réparant ce que la société industrielle délaisse, en proposant des solutions inédites là où les objets standardisés échouent, les bricoleurs et leurs héritiers contemporains s'inscrivent dans une dynamique de contestation discrète mais tenace. Dans cette perspective, le *wild-tech* – au même titre que le bricolage – rejoint les « arts de faire » de Certeau (1990), qui révèlent l'existence de pratiques rebelles, inventives et insoumises, ouvrant des espaces de liberté et de créativité au cœur même des dispositifs techniques et sociaux dominants. CERTEAU DE Michel, *L'invention du quotidien*, t. 1 : *Arts de faire*, Paris, Folio, « Essais », 1990.

40 CHANG Kenneth, "Would-Be Rescuers of Wayward Spacecraft Previously Solved a NASA Mystery", *The New York Times*, 15 juillet 2014, <<https://www.nytimes.com/2014/07/16/science/space/would-be-rescuers-of-zombie-spacecraft-had-previously-solved-a-nasa-mystery.html>>.

41 *Ibid. supra.*

42 *Techniques & cultures*, n° 65 (Essais de bricolage. Ethnologie de l'art et du design contemporains, GOLSENNE Thomas et RIBAUT Patricia [dir.]), 2015, Doi : [10.4000/tc.7545](https://doi.org/10.4000/tc.7545) (<https://doi.org/10.4000/tc.7545>). DUCOURNEAU Emmanuel, *Vers un design de l'être...*, op. cit.

43 CHANG Kenneth, "Would-Be Rescuers of Wayward ...", art. cit.

44 Voir notamment :

SCOLES Sarah et MOSKOWITZ Clara, "Why Is It So Hard to Go Back to the Moon?", *Scientific American*, 18 septembre 2024. <<https://www.scientific-american.com/article/why-is-it-so-much-harder-for-nasa-to-send-people-to-the-moon-now-than-it-was-during-the-apollo-era>>, consulté le 16 septembre 2025. L'article met en évidence la perte de savoir-faire et d'infrastructures entre Apollo et Artemis, soulignant combien la reconstitution des compétences collectives est complexe ;

"The Long Road Back to the Moon: Overcoming the Challenges of Lunar Exploration", *New Space Economy*, 6 mai 2024, <<https://newspaceeconomy.ca/2024/05/06/the-long-road-back-to-the-moon-overcoming-the-challenges-of-lunar-exploration/>>, consulté le 16 septembre 2025. Le texte insiste sur la nécessité de recomposer un écosystème industriel et technique complet, là où les chaînes existantes ont disparu, ce qui correspond bien à l'idée d'une « domestication » ardue des technologies lunaires ;

PEARSON Ezzy, "How scientists are tackling the biggest problems of returning humans to the Moon", *Science Focus* (BBC), 26 janvier 2024, <<https://www.sciencefocus.com/space/moon-on-earth>>, consulté le 16 septembre 2025. L'article montre que certains défis (régolithe abrasif, variations thermiques extrêmes, gravité réduite, etc.) résistent aux avancées technologiques contemporaines, illustrant le caractère "wild" des environnements et objets techniques à maîtriser.

45 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. xvi.

46 *Ibid. supra*, p. 28.

47 *Ibid.*, p. 228.

48 *Ibid.*, p. 229.

49 *Ibid.*

50 *Ibid.*, p. 230.

51 *Ibid.*

52 *Ibid.*, p. 231. BROOKS Courtney G., GRIMWOOD James M. et SWENSON Loyd S., *Chariots for Apollo: A History of Manned Lunar Spacecraft*, Washington, NASA, "NASA SP-4205", 1979. KELLY Thomas J., *Moon Lander: How We Developed the Apollo Lunar Module*, Washington, Smithsonian, 2009 [2001].

53 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, *op. cit.*, p. 3. SMITHSONIAN NATIONAL AIR AND SPACE MUSEUM, "Armstrong's Spacesuit", <<https://airandspace.si.edu/expl ore/stories/armstrong-suit>>.

54 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, *op. cit.*, p. 3.

55 SMITHSONIAN NATIONAL AIR AND SPACE MUSEUM, "Armstrong's Spacesuit", *art. cit.*

56 DELEUZE Gilles et GUATTARI Félix, *Capitalisme et schizophrénie : 2 : Mille plateaux*, 2 vol., Éd. de Minuit, 1980 [1972].

57 MONCHAUX DE Nicholas, *Spacesuit: Fashioning Apollo*, Cambridge, MIT Press, 2011. AYREY Bill, *Lunar Outfitters: Making the Apollo Space Suit*, Gainesville, University Press of Florida, 2020.

58 CULTRERA Paul, « Unité de mobilité extravéhiculaire type A7L », *De la Terre à la Lune*, <<http://www.de-la-terre-a-la-lune.com/apollo.php?page=a7l>>. Ce Site se base sur diverses sources, notamment les contributions de Bill Ayrey (ILC Dover) et du collectionneur David Mather.

59 JONES R. L., *Evaluation and Comparison of Three Space Suit Assemblies*, Washington, NASA, "NASA TN D-3482", 1966, <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19660022897.pdf>>.

60 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, *op. cit.*, p. 245.

61 History.com, "Moon Landing Technology: The Inventions That Made Apollo Possible", History, 19 juillet 2019, note de bas de page 61.

62 WEST Robert B., *Apollo Experience Report - Earth Landing System*, Washington, NASA, NASA Technical Reports Server (NTRS), "NASA TN D7437", 1973, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740003586/downloads/19740003586.pdf>>.

63 INTERBATOLO Alfredo, *Apollo Recovery Operations*, NASA Technical Reports Server (NTRS), 2009, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090016307/downloads/20090016307.pdf>>. URI John, "60 Years Ago: Apollo Parachute Development and Testing", NASA History, 3 mai 2023, <<https://www.nasa.gov/history/60-years-ago-apollo-parachute-development-and-testing/>>.

64 History.com, *art. cit.*

65 Les artisans chargés de l'inspection de la qualité des carrés Hermès sur table lumineuse, dont l'origine remonte aux mouchoirs de cou, parfois imprimés sur de la toile de parachute, sont désignés sous le terme de « visiteurs ». Voir DUCOURNEAU Emmanuel, *Vers un design de l'être...*, op. cit. et DUBREUIL Élise, KLEMENZ Hélène et GRISON Marie-Noëlle (dir.), *Avec armes et bagages : dans un mouchoir de poche*, [cata. expo., Paris, Musée de l'Armée, Hôtel national des Invalides, 26 octobre 2012-13 janvier 2013], Paris, N. Chaudun, 2012.

66 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. xvi.

67 <<https://www.youtube.com/watch?v=gDNDQQIx1JE>>.

68 SCHEIBE Donna, "Woman Chute Rigger Helps Bring Back Astronauts Alive", *Los Angeles Times*, 11 juillet 1971, p. J1, J2, <<https://www.newspapers.com/image/384778395/>>.

69 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 288.

70 *Ibid. supra*, p. 287. Complétant le modèle, ils y ont ajouté une figurine du fils de Pavlics, un astronaute G.I. Joe, pour illustrer son utilisation.

71 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 288.

72 *Ibid. supra*, p. 289.

73 THE BOEING COMPANY, *Lunar Roving Vehicle Operations Handbook* (Contract NAS8-25145), NASA, 1971, April 19, <<https://www.laboiteverte.fr/le-manuel-dutilisation-du-rover-lunaire/>>. NASA, "Apollo Lunar Roving Vehicle", NASA Space Science Data Coordinated Archive (NSSDC), <[archive.wikiwix.com](http://archive.wikiwix.com/http://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fnssdc.gsfc.nasa.gov%2Fplanetary%2Flunar%2Fapollo_lrv.html#federation=archive.wikiwix.com&tab=url) (http://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fnssdc.gsfc.nasa.gov%2Fplanetary%2Flunar%2Fapollo_lrv.html#federation=archive.wikiwix.com&tab=url)>. Images et simulations : <<http://www.de-la-terre-a-la-lune.com/apollo.php?page=lrp>>.

74 Il est très probable que de multiples essais, bricolages et prototypes aient été nécessaires pour y parvenir, la culture technique autour de von Braun accordant une place centrale au test – y compris l'identification franche des erreurs et l'apprentissage par l'échec (APPEL News Staff, *Snapshot from Apollo: The all-up testing decision*, NASA APPEL Knowledge Services, 2010b, [Originally published in ASK OCE, vol. 1, n° 7, 2006] / APPEL News Staff, *Admitting mistakes: A lesson from Wernher von Braun*, NASA APPEL Knowledge Services, 2010a, [Originally published in ASK OCE, vol. 1, n° 6, 2006]).

75 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 289.

76 MULLIS Howell C., *A Study and Analysis of the MSFC Lunar Roving Vehicle Dust Profile Test Program*, Washington, NASA, "NASA BER Report n° 139-92", 1971, <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19720007590/downloads/19720007590.pdf>>. NASA, *Apollo 15 Lunar Surface Journal*, NASA, 1972, <[archive.wikiwix.com \(https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.hq.nasa.gov%2Faj%2F19720007590_19720007590.pdf%2Findex.html#federation=archive.wikiwix.com&tab=url\)](https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.hq.nasa.gov%2Faj%2F19720007590_19720007590.pdf%2Findex.html#federation=archive.wikiwix.com&tab=url)>.

77 TOMAYKO James E., "Computers in Spaceflight: The NASA Experience", Wichita, NASA, "NASA Contractor Report 182505", 1988, p. 29, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19880069935/downloads/19880069935_Optimized.pdf>.

78 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 91.

79 *Ibid. supra*, p. 130.

80 *Ibid.*, p. 92.

81 MINDELL David A., *Digital Apollo: Human and Machine in Spaceflight*, Cambridge, MIT Press, 2008.

82 VINCENT James, « Apple qualifie la puce A12 Bionic de la plus intelligente et la plus puissante jamais intégrée à un smartphone », *The Verge*, 12 septembre 2018, <<https://www.theverge.com/circuitbreaker/2018/9/12/17826338/apple-iphone-a12-processor-chip-bionic-specs-speed>>. ZAFAR Ramish, "Apple A12 Bionic: 7 Billion Transistors, 5 TOPS Neural Engone & More", 13 septembre 2018, *Wccf Tech*, <<https://wccftech.com/apple-a12-specifications-features-cores/>>. Une comparaison intéressante : l'Apollo Guidance Computer (AGC) embarquait 5 600 circuits intégrés, chacun contenant l'équivalent de six transistors, soit un total de 33 600 transistors. À titre de comparaison, l'iPhone XS (2018) possède 6,9 milliards de transistors, soit 200 000 fois plus que l'AGC.

83 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 99.

84 MANBER Udi et NORVIG Peter, "The Power of Apollo Missions in a Single Phone", *Google Search Blog*, 28 août 2012, <<https://search.googleblog.com/2012/08/the-power-of-apollo-missions-in-single.html>>.

85 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 15.

86 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 106.

87 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 114. À une époque où l'Union soviétique cherchait activement à obtenir des informations sur le programme spatial américain, le sextant spatial représentait également l'outil ultime impossible à pirater. Seul l'astronaute l'utilisant pouvait connaître sa position dans l'espace (HACK THE MOON, "Space Sextant Navigates Moon Missions", <<https://wehackthemoon.com/tech/space-sextant-navigates-moon-missions>>).

88 *Ibid. supra.*

89 La partie suivante abordera l'évolution du mode d'engagement de l'astronaute dans un environnement technique *wild-tech*.

90 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 108.

91 La croissance du silicium (procédé de Lely) et la production des circuits intégrés (procédé Planar) incluaient de nombreuses étapes manuelles.

92 LÉCUYER Christophe, *Making Silicon Valley: Innovation and the Growth of High Tech, 1930-1970*, Cambridge/Londres, MIT Press, "Inside technology", 2006.

93 SPEER Raymond D., "[Strict Control Kept Out Semiconductor Flaws](https://web.mit.edu/digitalapollo/Documents/Chapter6/speercontrol.pdf) (<https://web.mit.edu/digitalapollo/Documents/Chapter6/speercontrol.pdf>)", *Electronic Design*, n° 17, 1969, p. 29.

94 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 128.

95 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 127.

96 *Ibid. supra*, p. 137.

97 ASHBY Ross W., *An Introduction to Cybernetics*, 1^{re} éd., Londres, Chapman & Hall, 1956.

98 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 135, p. 148.

99 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, op. cit., p. 128.

100 Avant de mettre en marche cet ordinateur, il fallait informer la centrale électrique de Cambridge, car son fonctionnement exerçait une pression considérable sur le réseau électrique de la ville.

101 Le projet *Mars Probe* envisageait l'envoi d'un petit vaisseau spatial chargé de survoler la planète Mars, d'en capturer des images, puis de rapporter le film sur Terre.

102 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 124.

103 *Ibid. supra*, p. 154.

104 *Ibid.*, p. 155.

105 MORIN Isabelle, « Les 50 ans du micro-ondes : petites ondes, grande révolution », *La Presse*, 5 avril 2018, <<https://www.lapresse.ca/vivre/gourmand/201804/05/01-5159930-les-50-ans-du-micro-ondes-petites-ondes-grande-revolution.php>>.

106 MINDELL David, *Digital Apollo...*, *op. cit.*, p. 155.

107 *Ibid. supra*.

108 Ces propos s'apparentent à ceux que l'on pourrait trouver dans une ethnographie portant sur les savoir-faire artisanaux.

109 MINDELL David, *Digital Apollo...*, *op. cit.*, p. 7.

110 BATES David, HALL Eldon et BLONDIN Ed, "Ed Blondin's Introduction", *Apollo Guidance Computer History Project: Third Conference*, Cambridge, 30 novembre 2001, <https://www.youtube.com/watch?v=LPpC_kN8E24&t=1s>.

111 MINDELL David, *Digital Apollo...*, *op. cit.*, p. 154.

112 <<https://www.youtube.com/watch?v=ndvmFlg1WmE>>.

113 HOAG David G., "The History of Apollo On-Board Guidance and Navigation", P-357, Cambridge, Charles Stark Draper Laboratory, septembre 1976, p. 280.

114 RILEY Christopher, COPP Duncan et DAVIDSON Nick (réal.), *Moon Machines*, Science Channel, 2008.

115 BEAUDOUIN-LAFON Michel, « 40 ans d'interaction homme-machine : points de repère et perspectives », *Interstices*, 2007.

116 GIBBS-SMITH Charles H., *Aviation: An Historical Survey from Its Origins to the End of World War II* (<https://archive.org/details/aviationhistoric0000gibb>), 1^{re} éd., Londres, HMSO, 1970.

117 FISHMAN Charles, *One Giant Leap...*, *op. cit.*, p. 134.

118 *Ibid. supra*, p. 132. <<https://www.nasa.gov/history/afj/ap11fj/a11-csmocindex.html>>.

119 TOMAYKO James E., "Computers in Spaceflight...", *op. cit.*, p. 58.

120 CHAZELLE Damien (réal.), *First Man*, Universal Pictures, 2018.

- 121 SWOPES Bryan R., "MH-96 Flight Control System", *This Day in Aviation*, 2018, <<https://www.thisdayinaviation.com/tag/mh-96-flight-control-system/>>.
- 122 CSÍKSZENTMIHÁLYI Mihály, *Flow: The Psychology of Optimal Experience*, 1^{re} éd., New York, HarperPerennial, 1990. CULTRERA Paul, « Unité de mobilité extravéhiculaire type (<http://www.de-la-terre-a-la-lune.com/apollo.php?page=a7l>)A7L (<http://www.de-la-terre-a-la-lune.com/apollo.php?page=a7l>) », *op. cit.*
- 123 GROSSMAN Evelyne, *Éloge de l'hypersensible*, [Paris], Les Éd. de Minuit, « Paradoxe », 2017.
- 124 PETITMENGIN Claire, *L'expérience intuitive*, Paris, l'Harmattan, « Sciences cognitives », 2001. TADIÉ Marc, « Perceptions extra-sensorielles des populations primitives », in MALAURIE Jean (dir.), *De la vérité en ethnologie... : Séminaire de Jean Malaurie 2000-2001*, Paris, Economica, « Polaires », 2002, p. 31-53.
- 125 VARELA Francisco J., THOMSON Evan et ROSCH Eleanor, *L'inscription corporelle de l'esprit : sciences cognitives et expérience humaine*, Véronique Havellange (trad.), Paris, Éd. du Seuil, « La couleur des idées », 1993. CLARK Andy et CHALMERS David, "The Extended Mind", *Analysis*, vol. 58, n° 1, 1998, p. 7-19, Doi : [10.1093/analys/58.1.7](https://doi.org/10.1093/analys/58.1.7) (<https://doi.org/10.1093/analys/58.1.7>). ROWLANDS Mark, *The New Science of the Mind: From Extended Mind to Embodied Phenomenology*, Cambridge, MIT Press, 13 août 2010.
- 126 HARTMUT Rosa, *Résonance : une sociologie de la relation au monde*, Sacha ZILBERFARB et Sarah RAQUILLET (trad.), Paris, la Découverte, « Théorie critique », 2018 [2016].
- 127 DUCOURNEAU Emmanuel, *Vers un design de l'être...*, *op. cit.*
- 128 MINDELL David, *Digital Apollo...*, *op. cit.*, p. 6.
- 129 ALDRIN Buzz, *Line-of-Sight Guidance Techniques for Manned Orbital Rendezvous* (<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12652>), Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1963.
- 130 CRAWFORD Matthew B., *Éloge du carburateur : essai sur le sens et la valeur du travail*, Marc Saint-Upéry (trad.), Paris, la Découverte, « Poche », 2016 [2009].
- 131 GIBSON James J., *Approche écologique de la perception visuelle*, [Bellevaux], Éd. Dehors, 2014 [1979]. GAVER William W., "Technology Affordances", in

OLSON Gary M., ROBERTSON Scott P. et OLSON Judith R. (eds), *Human Factors in Computing Systems: Reaching Through Technology: CHI '91: Conference Proceedings*, New York, Association for Computing Machinery, 1991.

132 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 7.

133 GIBBS-SMITH Charles H., *Aviation...*, op. cit.

134 *Ibid. supra*, p. 96.

135 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 21.

136 L'ouvrage *L'Étoffe des héros* (Paule Guivarch [trad.], Paris, Gallimard, « Du monde entier, 19 », 1982 ; *The Right Stuff*, 1979) de Tom WOLFE, ainsi que son adaptation cinématographique réalisée par Philip Kaufman en 1983, illustrent également la tension entre les « airmen » et les « chauffeurs » dans l'histoire de l'astronautique américaine.

137 *Ibid. supra*, p. 5.

138 *Ibid.*, p. 6.

139 *Ibid.*, p. 20-21.

140 GIBBS-SMITH Charles H., *Aviation...*, op. cit., p. 58.

141 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 7.

142 *Ibid. supra*, p. 221-222.

143 *Ibid.*, p. 6.

144 *Ibid.*, p. 2.

145 History.com, « Buzz Aldrin's Improvised Fix That Saved Apollo 11 », History.

146 À cela s'ajoutent des considérations économiques, politiques et sociales qui restreignent les missions lunaires au XXI^e siècle.

147 MINDELL David, *Digital Apollo...*, op. cit., p. 6.

148 <<https://geoxc-apps.bd.esri.com/space/satellite-explorer/>> et <<http://platform.leolabs.space/visualization>>.

149 NASA OFFICE OF INSPECTOR GENERAL, *Audit of NASA's High-End Computing Capabilities*, NASA OIG Report, « IG-24-009 », 14 mars 2024, <<https://oig.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/03/ig-24-009.pdf>>.

150 LATOUR Bruno, *Où atterrir ? : comment s'orienter en politique*, 1^{re} éd., Paris, la Découverte, « Cahiers libres », 2017.

RÉSUMÉS

Français

L'article examine le programme *Apollo* à travers la notion de "*wild-tech*", un mode d'innovation hybride qui dépasse l'opposition *low/high-tech* en combinant savoir-faire artisanaux et industriels. Face à un défi *a priori* « impossible » pour les années 1960, le succès du programme repose sur la recombinaison créative de technologies existantes. Les exemples sont nombreux : la combinaison A7L, produite par Playtex et cousue à la main en 21 couches ; le bouclier thermique appliqué manuellement au pistolet de calfeutrage ; les parachutes réalisés à la main sur machines Singer et inspectés point par point ; le rover lunaire associant titane et tressage manuel de fil de piano. Le paradoxe s'incarne aussi dans l'*Apollo Guidance Computer*, ordinateur moins puissant qu'un four micro-ondes actuel, dont le logiciel était tissé sur mémoire magnétique par les ouvrières de Raytheon, l'entreprise mondialement connue pour la fabrication du premier four à micro-ondes en 1947. Enfin, l'astronaute lui-même apparaît comme pilote *wild-tech*, capable d'articuler automatisation et pilotage manuel, une compétence décisive lors de l'alunissage. *Apollo* illustre ainsi la possibilité de relever des défis inédits avec des ressources limitées grâce à une expertise de l'association de techniques hétérogènes, dont l'effet procède non d'une addition ou multiplication mais d'une concaténation.

English

The article examines the *Apollo* program through the lens of "*wild-tech*," a hybrid mode of innovation that transcends the *low/high-tech* divide by combining artisanal skills with industrial know-how. Faced with a challenge deemed "impossible" for the 1960s, *Apollo*'s success relied on the creative recombination of existing technologies. Striking examples abound: the A7L spacesuit, produced by Playtex and hand-stitched in 21 layers; the heat shield applied manually with caulking guns; parachutes sewn on Singer machines and inspected stitch by stitch; the lunar rover combining titanium rims with hand-woven piano wire. The paradox also appears in the *Apollo Guidance Computer*, less powerful than a modern microwave oven, whose software was woven onto magnetic core memory by Raytheon workers – the very company that had introduced the first microwave oven in 1947. Finally, the astronaut emerges as a *wild-tech* pilot, able to shift between automation and manual control, a crucial skill during *Apollo 11*'s landing. *Apollo* thus illustrates the possibility of meeting unprecedented challenges with limited resources through the art of associating heterogeneous techniques, whose effect arises not from addition or multiplication but from concatenation.

INDEX

Mots-clés

wild-tech, artisanat, industrie, technologie, astronautique

Keywords

wild-tech, craftsmanship, industry, technology, astronautics

Index géographique

États-Unis, Lune

AUTEUR

Emmanuel Ducourneau

Emmanuel Ducourneau est designer, anthropologue au Laboratoire d'ethnologie et de sociologie comparative (LESC) - CNRS (UMR 7186), PEPR O2R.