

APOLLO 11

Compte rendu de participation



Participant – Méduse Spatiale
(Merlin)
Catégorie Junior

Défi KSC-4 / Apollo

APOLLO 11 sur Kerbal Space Program

TABLE DES MATIERES

PRÉAMBULE, INTRODUCTION ET CAHIER DES CHARGES...	3
AVANT LE DÉPART	4
1 / Introduction – la réalité-	4
1 - Le contexte particulier, la course à l'espace	4
2 - Le programme pré Apollo II	4
2 / Les véhicules	5
1 - Le vaisseau Apollo	5
a) Le module de service	5
b) Le module de commande	6
c) Le KSM	10
d) Le module lunaire	14
e) Le KLM	16
2 - Un lanceur à la mesure du vaisseau, vue détaillée	18
a) Le S-IVB	18
b) L'étage de tout en haut	19
c) Le S-II	19
d) Le deuxième étage	20
e) Le S-IC	21
f) ...Moar Thrust !	23
g) La tour de sauvetage	23
3 – Vue d'ensemble sur Saturn V	24
a) Saturn V	24
b) Kerturn V	25
3 / Quelques questions	28
CONCLUSION	31

PRÉAMBULE, INTRODUCTION ET CAHIER DES CHARGES...

Vous venez de double cliquer sur le fichier *Méduse-Spatiale_KSC4-Apollo I I_Junior.pdf* et avez lu les quelques mots de la page de garde, ainsi que les quelques lignes du sommaire... Comme le laisse entendre le titre, ce dossier me servira pour vous transmettre l'essentiel de l'expérience que j'ai eue en participant au Challenge KSC4 de l'ensemble Association-Sites-Forum-Discord qu'est *Kerbal Space Challenge*. Avant de lire la trentaine de pages qui suit, posons les bases sur lesquelles repose ma participation au challenge, que ce soit le dossier ou la mission sur KSP.

Le but du dossier est de retranscrire textuellement ce que j'ai appris, découvert, et redécouvert autour du programme Apollo, et de l'angle que j'ai choisi pour refaire Apollo II sur Kerbal Space Program. Vous y trouverez donc des descriptions des éléments du programme Apollo, entrecoupées de descriptions des choix que j'ai faits sur KSP pour reproduire plus ou moins lesdits éléments. J'ai choisi de m'intéresser principalement aux technologies mises en œuvre, c'est pourquoi l'essentiel du dossier est consacré aux véhicules plus qu'à l'histoire de l'exploration Lunaire.

Je trouve qu'avant de partir tête baissée sur KSP, il est intéressant d'exprimer clairement les objectifs fixés ainsi que les contraintes imposées afin de dresser un cahier des charges précis.

Selon le cahier des charges du défi pour la catégorie Junior, il faut faire une mission habitée, avec un lanceur 'de type' Saturn V, donc sans boosters latéraux. Ce dernier doit pouvoir atteindre l'orbite et emmener l'équipage vers la lune. Là, ils doivent pouvoir se poser sans rien casser et rentrer *en vie* sur Terre.

En tenant compte de cela, et de mes objectifs personnels, voici le cahier des charges qui sera suivi pour la mission lunaire :

L'objectif est de faire voyager 3 kerbonautes en toute sécurité jusqu'à la Lune et de les ramener vivants vers la Terre. Deux d'entre eux doivent poser le pied sur la lune à l'aide d'un atterrisseur sûr.

Pour cela, un lanceur, ainsi qu'un module de commande et de service doivent être construits en adoptant une architecture, des fonctions et un aspect qui se rapprochent de la réalité du programme Apollo. Les deux kerbonautes sélectionnées pour se poser doivent le faire au moyen d'un atterrisseur adoptant une architecture similaire à celle du véritable atterrisseur.

La mission doit suivre le déroulement suivant :

Le lanceur décolle depuis la Floride, et place les trois modules du vaisseau ainsi que l'étage de transfert en orbite Terrestre.

L'étage de transfert est mis à feu pour obtenir une rencontre avec la lune et placer le vaisseau sur une trajectoire de retour libre.

Le vaisseau est assemblé pendant le voyage trans-lunaire, au moyen d'un arrimage du module de commande avec l'atterrisseur.

L'étage de transfert est séparé, le vaisseau s'injecte par lui-même en orbite lunaire.

L'atterrisseur se sépare, corrige son orbite et va se poser dans la mer de la tranquillité.

Les Kerbonautes sortent sur le sol Lunaire, placent le drapeau, courent, et remontent dans le vaisseau par des échelles.

L'étage supérieur de l'atterrisseur se détache de la base, remonte en orbite lunaire. Il réalise ensuite un rendez-vous en orbite avec le module resté en orbite, dans lequel le troisième kerbonaute attend. Les deux vaisseaux s'arriment, tout l'équipage repasse dans le module de commande et l'atterrisseur vide est abandonné.

Le vaisseau revient vers la Terre, et réalise une rentrée Atmosphérique en toute sécurité. La température du module ainsi que la décélération subie doivent être modérées.

Le module se pose dans l'eau au moyen de parachutes.

AVANT LE DÉPART...

I / Introduction – La réalité]

Avant de partir à l'aventure sur KSP, on peut quand même s'intéresser à ce qui s'est passé dans la réalité ! On va donc observer ici une bonne partie des éléments entourant, et ayant rendu possible, les premiers pas de Neil et Buzz sur notre satellite, ainsi que leurs caractéristiques techniques quand l'occasion se présente.

1) Le contexte particulier : La course à l'espace

Si le programme Apollo bat son plein de la toute fin de la décennie 1960 au début des années 1970, il trouve ses bases bien plus tôt. Il est lancé en 1961, alors qu'Alan Shepard vient tout juste de devenir le premier américain à effectuer un vol suborbital. Kennedy alors président des états unis d'Amérique place le projet comme objectif majeur de la nation et affiche clairement son souhait de voir un américain poser le pied sur la lune avant la fin de la décennie, notamment dans un discours resté célèbre à l'université de Rice « We choose to go to the moon ». Le budget alloué au programme spatial américain est drastiquement augmenté et les choses peuvent commencer.

La mise en place de ce programme ultra-ambitieux est en fait permise grâce à la tension forte entre États Unis et URSS dans le contexte de guerre froide. En effet, il apparaît vite qu'être le premier à accomplir quelque chose dans le nouveau domaine de pointe qu'est la conquête spatiale est source de prestige, et de supériorité face à l'autre superpuissance ! Seulement, les soviétiques conservent l'avance prise dès le début et continuent d'accumuler les premières. Ils envoient ainsi le premier satellite artificiel en orbite, le premier être vivant en orbite, premier humain dans l'espace, etc. Ils sont même les premiers à envoyer un objet artificiel se crasher sur la surface lunaire : Luna 2. Les Américains souhaitent donc rattraper leur retard et obtenir la supériorité sur leur adversaire dans le domaine.

Pour atteindre son objectif, la NASA fonctionne donc par étapes. Premièrement, la maîtrise des techniques de vol et de mise en orbite est atteinte avec le programme Mercury. Le programme Gemini vient ensuite pour permettre la maîtrise des techniques de vol spatial, et des séjours de longue durée. Il doit apporter de nombreux éléments fondamentaux du programme Apollo. Nécessaire au retour des deux astronautes posés sur la surface lunaire, le rendez-vous orbital doit être maîtrisé. Pour la même occasion, ainsi que pour la récupération du LEM, les techniques d'amarrage de deux vaisseaux doivent être mises au point et maîtrisées. Les sorties extravéhiculaires doivent aussi être apprises, ainsi que bon nombre d'autres objectifs. Une fois tous ces éléments en place, la NASA put débiter le programme Apollo en 1966.

2) Le programme pré-Apollo 11

Grâce aux succès et aux acquis des programmes Mercury et Gemini, le programme Apollo débute réellement en 1966. Mais il ne se tourne pas directement vers la lune. En effet, de nombreuses étapes doivent encore être franchies avant de voir un Homme poser le pied sur le satellite. Les premières missions du programme sont donc consacrées au développement de la fusée lunaire, du vaisseau Apollo, des techniques de vol, et cætera... Le programme connaît malheureusement une tragédie lors de l'incendie d'Apollo 1 qui coûte la vie aux trois astronautes lors d'un essai au sol dans la capsule. Cet accident dramatique met en lumière des défauts de conception dans la capsule et entraîne des changements dans sa conception. Par la suite, les tests en vol débutent réellement. Des vols inhabités sont d'abord effectués par des fusées Saturn IB afin de tester le vaisseau Apollo. Apollo 4 et 6 voient pour les premières fois Saturn V s'envoler, tandis qu'Apollo 5 est un test du module lunaire, lancé par une fusée Saturn IB. A partir d'Apollo 7 en octobre 1968, les vols sont habités et se rapprochent de plus en plus de l'objectif final. Ainsi Apollo 8 se place en orbite lunaire, et Apollo 9 teste l'ensemble des éléments et procédures de la mission. Apollo 10 simule un alunissage, afin d'assurer la maîtrise de toutes les étapes précédant, et succédant cette étape.

2/ Les véhicules]

1) Le vaisseau Apollo

Mis à part son caractère extrêmement ambitieux, le programme Apollo se démarque de ses deux prédécesseurs par la complexité des technologies qu'il met en œuvre. En effet, les programmes Mercury et Gemini, bien que très complexes et impressionnants, restaient au maximum en orbite basse pour quelques jours, et ce avec un à deux astronautes dans les missions habitées. Apollo quant à lui prévoit d'amener 3 hommes en orbite lunaire, d'en faire descendre deux à la surface puis de leur permettre de remonter en emportant avec eux des échantillons collectés à la surface. Il faut ensuite que ces deux astronautes puissent rejoindre leur camarade, pour finalement effectuer un retour vers la Terre avec une rentrée atmosphérique contrôlée. Pour remplir toutes ces étapes clé, il a été choisi d'adopter une architecture en trois modules.

a) Le module de service

Ce grand tronçon cylindrique inhabité abrite des systèmes vitaux durant la mission. Il est divisé en plusieurs « secteurs ».

L'alimentation électrique y est assurée par 3 piles à combustible fonctionnant avec dioxygène et dihydrogène. Elles produisent de l'électricité et de l'eau, ainsi que de la chaleur que les radiateurs permettent de dissiper. Chaque pile délivre une puissance nominale de 1,4 kW. L'énergie fournie par les piles à combustible est stockée dans des batteries. Ce système gérant l'alimentation électrique est appelé EPS pour *Electrical Power System*, et était situé dans le secteur 4.

L'essentiel de la masse de ce module est cependant représenté par le système de propulsion, appelé SPS (*Service Propulsion System*). Le moteur développé par Aerojet est le AJ10-137, une variante de l'AJ-10 dont une version est alors utilisée sur l'étage Transtage des lanceurs Titan. Il consomme un mélange hypergolique, ce qui signifie que les deux ergols entrent en combustion spontanément une fois mis en contact. Cela permet d'avoir un moteur plus simple et fiable. Le SPS fournit une poussée de 9,1 Tonnes (non modulable), ce qui est nécessaire à l'injection en orbite lunaire, au retour, ainsi qu'à des corrections de trajectoire. L'ensemble doit supporter un minimum de 36 mises à feu pour faire face à toute éventualité et fonctionner sur une durée cumulée de 750 secondes.

Le carburant et comburant sont stockés dans de grands réservoirs principaux situés au cœur du module. L'ensemble du SPS représente une masse de 18,5 Tonnes au décollage et occupe les secteurs 2, 3, 5, et 6.

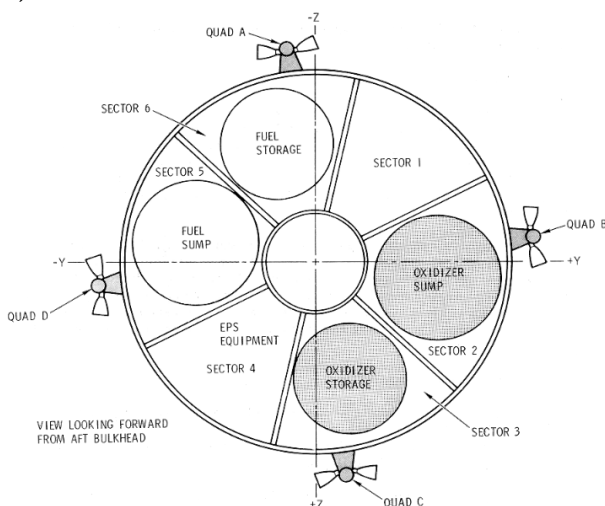


Figure 1 - Schéma en coupe du module de service

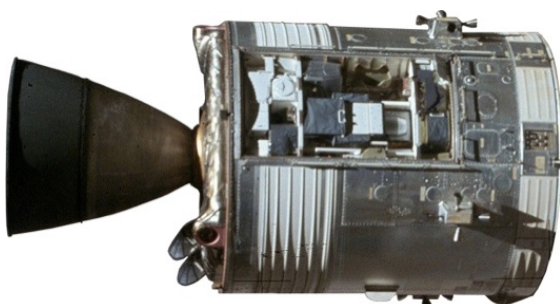


Figure 2 - Le module de Service Apollo

Autre système embarqué : le RCS (*Reaction Control System*). Il permet le contrôle de l'attitude du vaisseau sur 3 axes et la réalisation de déplacements en translation, indispensables lors de procédures de docking. Il repose sur quatre groupements de 4 propulseurs disposés autour du module, qui sont tous contrôlés et alimentés indépendamment.

Le module de service assure aussi le renouvellement de l'oxygène et le maintien d'une atmosphère contrôlée dans le module de commande.

Sur les dernières missions du programme Apollo, le secteur 1 du module était utilisé pour abriter des appareils scientifiques.

Le Module de Service restait attaché solidement au module de commande durant l'entièreté de la mission et n'était séparé qu'au moment d'entamer la rentrée atmosphérique. A ce moment-là, les connexions ombilicales sont rompues, et le module s'écarte avant de se consumer dans l'atmosphère.

L'ensemble affiche au décollage une masse d'environ 25 tonnes.

b) Le module de commande

Ce module conique posé au sommet du module de service est la pièce à vivre du vaisseau Apollo. Il est constamment occupé par un à trois membres d'équipage du décollage au splashdown. Lui aussi abrite de nombreux systèmes vitaux, tels que les systèmes d'atterrissage, l'ordinateur de vol, etc.

Les trois astronautes dans le module avaient face à eux les panneaux de contrôle permettant de maîtriser l'ensemble des paramètres liés au vol tels que la vitesse, l'altitude, les jauges de carburant, d'oxygène, etc... La nécessité de contrôler à la perfection tous ces paramètres explique la complexité des panneaux de contrôle et le nombre hallucinant de boutons et voyants montés dessus. Les trois sièges étaient assignés et chaque astronaute avait son rôle précis. Le commandant est à gauche, le pilote du module de commande au centre, et le pilote du LEM à droite, lorsque l'on se place face au panneau.

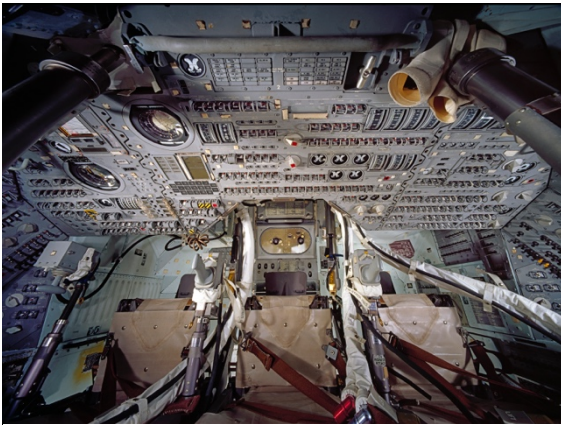


Figure 3 - Intérieur du module de commande



Figure 4 - Vue en 3D de l'intérieur du module

Afin de réaliser des observations, des photographies, et pour avoir un contact visuel avec la cible lors des procédures de rendez-vous et amarrages, le module était équipé de 5 hublots. Chaque hublot était composé de verre trempé ou recuit, ce qui permettait de diminuer énormément les contraintes physiques et augmentait la solidité globale de la pièce en verre. Chaque fenêtre était composée de deux plaques en verre d'aluminosilicate trempé de 6,5 millimètres d'épaisseur, séparées par une couche d'azote. Une plaque à base de silice de 17,8 millimètres venait couvrir les deux couches précédentes pour constituer à la fois une protection contre les micro-météorites, et une partie du bouclier thermique. Le défi était de mettre au point des ouvertures résistantes et suffisamment grandes. Il s'agit en effet d'un point critique dans la structure du module et nécessite donc une précision et une fiabilité très particulière. Cette conception est, à quelques différences près, commune aux cinq hublots.

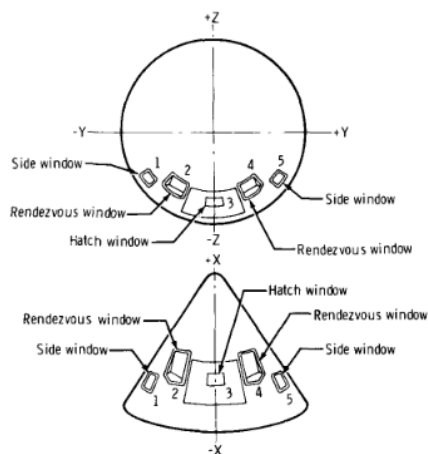


Figure 5 - Disposition des hublots sur le module

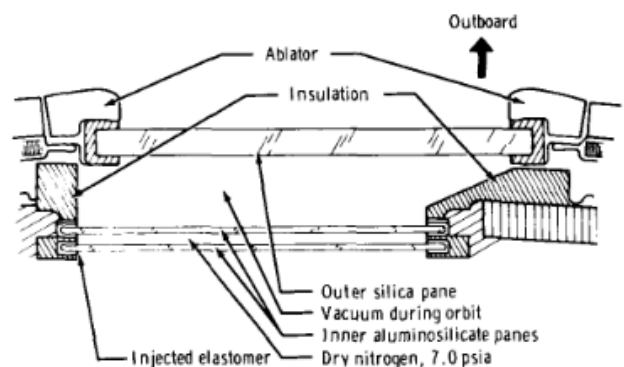


Figure 6 - Structure d'un Side Window (1 et 5 sur la Fig 5)

Deux écoutilles étaient aménagées pour permettre la circulation des astronautes. La première à être utilisée est l'écoutille latérale. Elle mesure environ 73,5 par 86 centimètres, se situe derrière les sièges de l'équipage et est percée par l'un des 5 hublots. C'est elle qui permet l'accès à la capsule avant le décollage, l'extraction des astronautes après le Splashdown, ainsi que le passage d'un membre d'équipage dans le cadre d'une sortie extra véhiculaire. A l'origine, elle était constituée d'un assemblage de deux plaques qui se fixaient séparément, l'une constituant la partie intérieure et l'autre la partie extérieure de l'écoutille. Une troisième porte plus légère couvrait le tout et faisait partie de la structure protectrice de la tour de sauvetage. L'ensemble prenait plus d'une minute à ouvrir de l'intérieur. Cependant, la tragédie d'Apollo 1 mit en lumière la faiblesse de cette conception et la nécessité de créer une ouverture rapide dans le cadre d'une évacuation du module. La conception de l'écoutille principale fut revue totalement, avec l'objectif de permettre une ouverture et une évacuation en moins de trente secondes. La nouvelle écoutille réunit les deux parties en une seule, et la couche externe de protection (la troisième épaisseur auparavant) demeure peu changée.

Désormais, la porte est scellée par 15 loquets actionnés par une poignée simple, qui actionne également l'ouverture de la couche externe. En cas de blocage du mécanisme d'ouverture, il peut être déconnecté pour que les loquets soient ouverts individuellement. Enfin, une fois le mécanisme ouvert, de l'azote sous pression est envoyé dans un piston pour forcer l'ouverture de la porte rapidement et la maintenir en position.

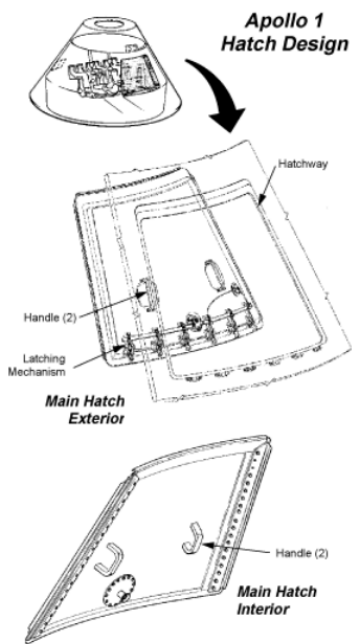


Figure 7 - L'écoutille avant l'incendie d'Apollo 1

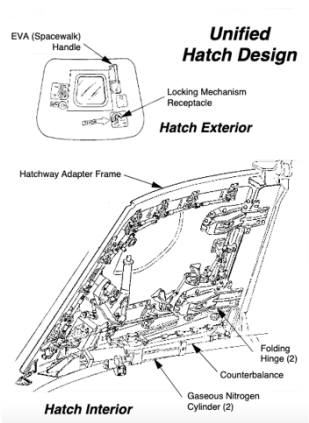


Figure 8 - Ecoutille principale après les modifications



Figure 9 - L'écoutille du CM d'Apollo 11

La seconde écoutille est située au sommet de la capsule. Celle-ci est circulaire, d'un diamètre de 76 centimètres et permet aux astronautes de passer du module de commande au LEM, une fois ce dernier arrimé solidement à la capsule. Elle est bloquée par 6 loquets et est encore une fois contrôlée avec une poignée. Au centre de l'écoutille se trouve une valve permettant d'égaliser la pression entre les deux parties reliées, avant de l'ouvrir. L'ingéniosité du système réside dans sa capacité à allier mécanisme de docking et passage entre les deux vaisseaux.



Figure 11 - Vue en 3D de l'intérieur du module et du tunnel avec l'écoutille

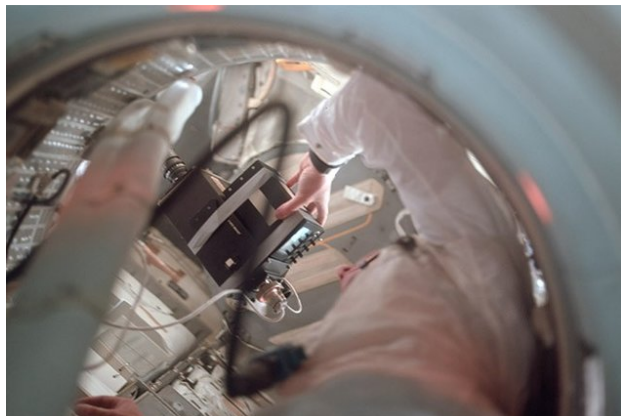


Figure 10 - Passage du Command Module au LEM sur Apollo 11

Le mécanisme de docking en question est donc particulier. Il est en deux parties amovibles. La première partie est appelée Probe Assembly, et elle est fixée au sommet du module de commande, derrière l'écotille. Elle prend la forme d'une pointe. De l'autre côté, sur le LEM, se trouve la pièce appelée Drogue Assembly. Elle prend la forme d'un cône et se situe juste avant l'écotille. Lors de la procédure de Docking, la pointe du probe assembly rentre dans le cône. Douze loquets permettent ensuite le verrouillage de l'assemblage. Une fois la connexion faite, les astronautes peuvent égaliser la pression du module de commande avec la pression du tunnel. Ensuite, après inspection du mécanisme, il est enfin possible de connecter électriquement le LEM. Plus tard dans la mission, Les deux pièces de docking sont retirées et les deux écotilles sont ouvertes. Deux astronautes peuvent alors pénétrer dans le second véhicule...

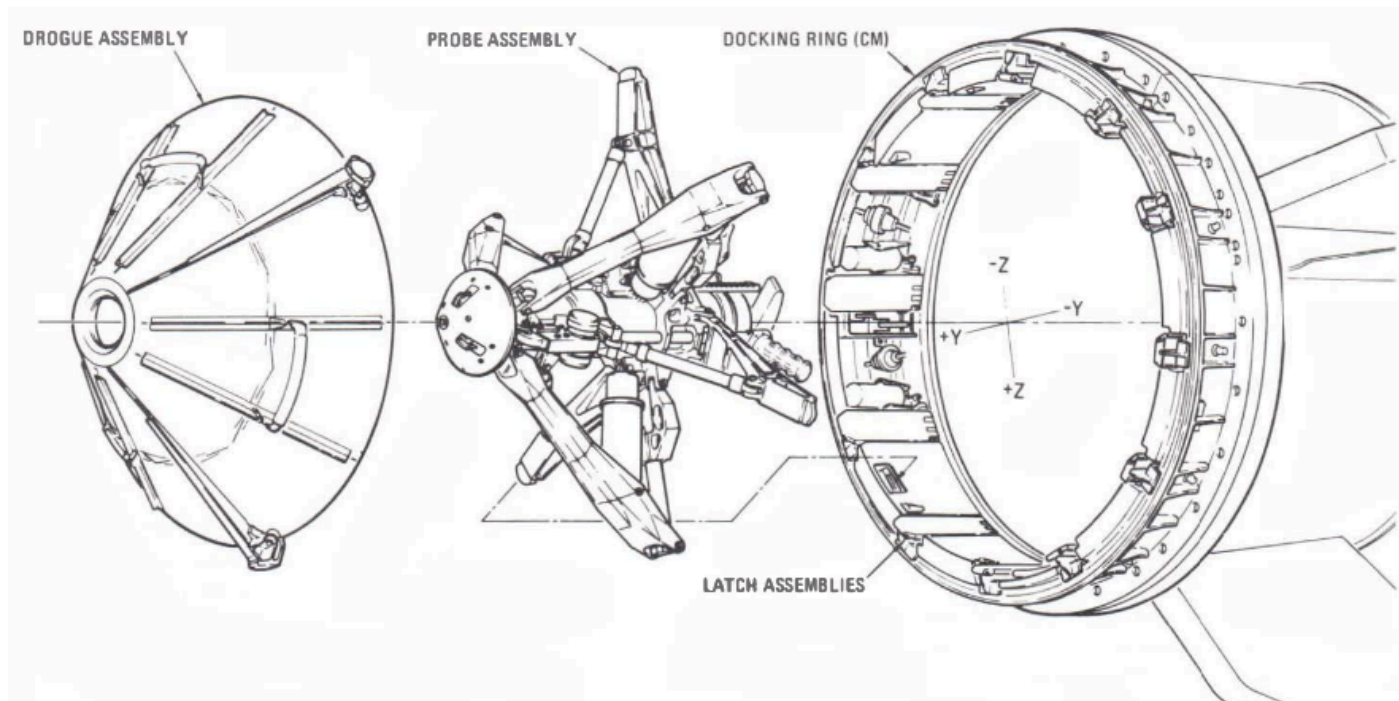


Figure 12 - Les mécanismes de docking

Le module contient également des emplacements de stockage, pour les affaires des astronautes, la nourriture, les appareils, etc. Ceux-ci étaient placés contre les parois de la capsule ainsi que sous les sièges des astronautes.

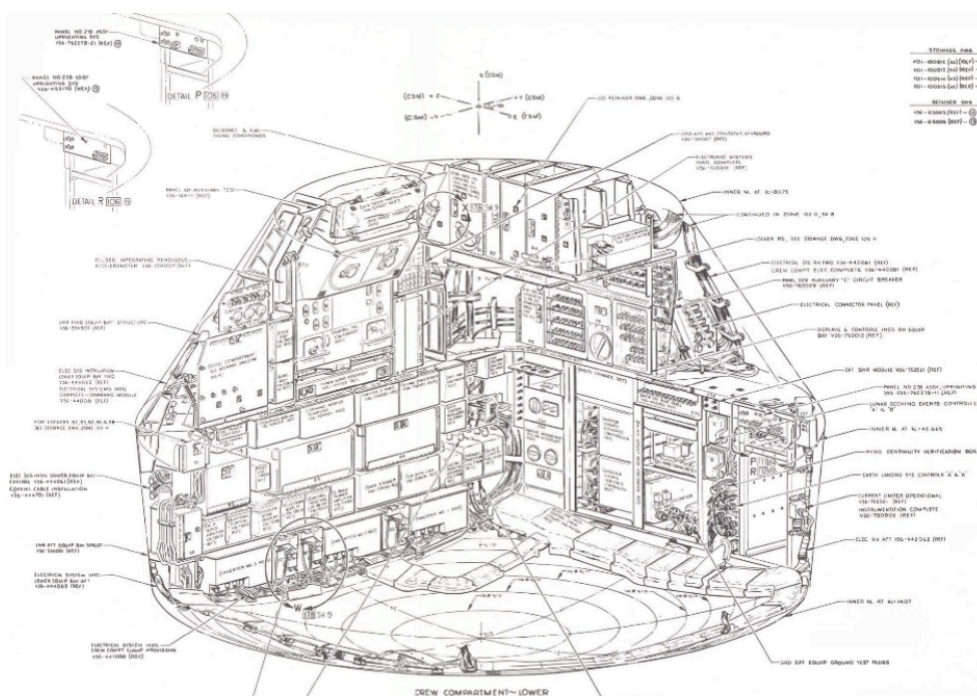


Figure 13 - La complexité du module de commande

L'atmosphère de la capsule était composée de dioxygène pur, amené depuis le module de service via la connexion ombilicale. Pour filtrer le dioxyde de carbone rejeté par l'équipage, des filtres à l'hydroxyde de lithium étaient placés. L'eau et l'électricité d'un autre côté étaient produites par les piles à combustible du module de service, l'eau étant un sous-produit de ces dernières. La capsule était également dotée de réservoirs d'eau qui venaient soutenir les piles à combustible en cas de haute demande ou en cas de panne de ces dernières. L'autonomie de la capsule durant la rentrée atmosphérique était assurée par trois batteries principales Argent/Zinc, ainsi que deux petites batteries auxiliaires. Ces dernières permettent le fonctionnement des appareils, de la régulation d'atmosphère, et l'ouverture des parachutes, entre-autre. Finalement, un réservoir d'oxygène est intégré à la capsule.

Lors des programmes Gemini et Mercury, les rentrées atmosphériques de vaisseaux en provenance de l'orbite basse s'effectuaient à des vitesses d'environ 8 000 m/s. Lors du programme Apollo, les module de commande de retour de la lune entamaient leur retour dans l'atmosphère à des vitesses avoisinant les 11 000 mètres par seconde. A titre d'exemple, Apollo 4 a pénétré l'atmosphère à 11 140 m/s. Une telle augmentation nécessite donc un système de protection encore plus poussé. Sur le module de commande, ce que l'on appelle Bouclier Thermique est en fait une protection composée de plusieurs types de pièces. L'épaisseur, la masse, ainsi que la composition du système de protection varient en effet en fonction de l'exposition de la pièce en question aux contraintes. Comme présenté sur la *Figure 14*, la base du cône était protégée par quatre couches différentes, formant une épaisseur de presque deux fois celle du bouclier sur la partie moins exposée du module

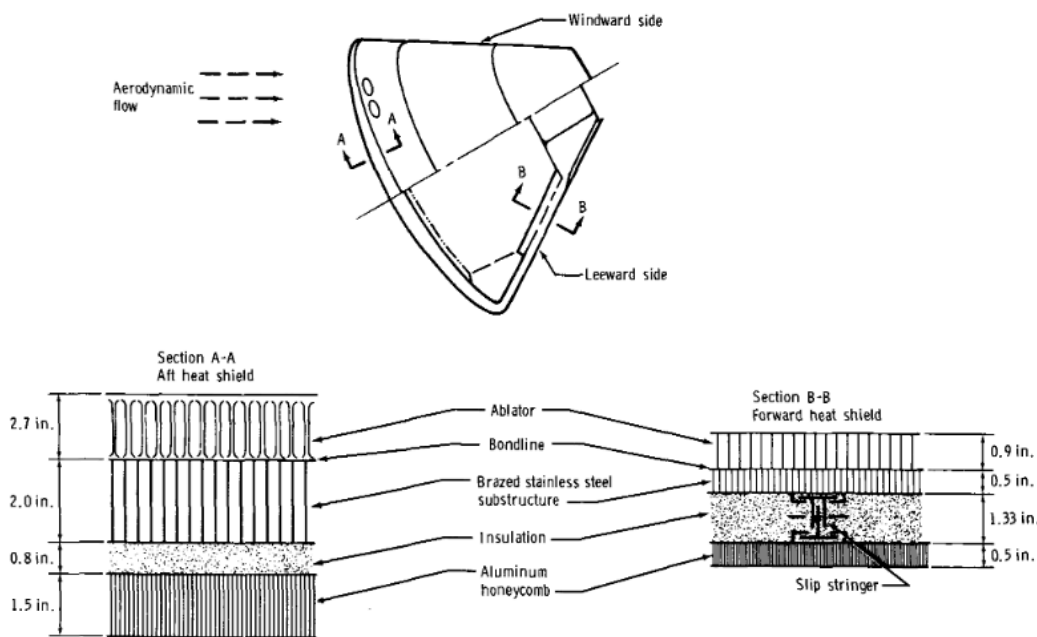


Figure 14 - La composition du bouclier

Durant cette phase, la température en certains points du bouclier pouvait atteindre 3000K, comme c'est visible sur la *Figure 15*.

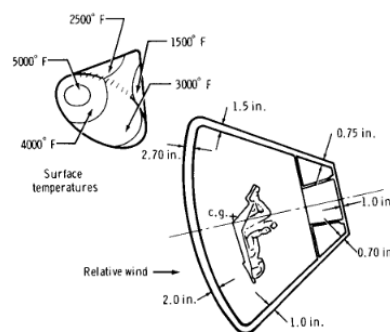


Figure 15 - Les températures et la disposition du module durant la rentrée

Une fois la vitesse suffisamment basse, les parachutes s'activent tour à tour. Le module de commande en compte 2 sortes :

- Les parachutes de stabilisation.

Ces deux parachutes de cinq mètres de diamètre sont les premiers à se déployer, à une altitude de sept kilomètres. Ils sont éjectés par des mortiers, ce qui permet de s'affranchir de parachutes extracteurs. Ils sont utilisés afin de redresser et stabiliser le module de commande, et surtout de le freiner dans sa chute jusqu'à une vitesse de 250 km/h. Là, ils sont largués pour laisser la place aux suivants.

- Les parachutes pilotes et les parachutes principaux

Ils prennent le relai des parachutes de stabilisation, et fonctionnent ensemble. D'abord, après la séparation des parachutes de stabilisation, les parachutes pilotes, au nombre de 3, sont éjectés par des mortiers. Ces petits parachutes de 2 mètres de diamètre sont déployés pour extraire et ouvrir les parachutes principaux. Les parachutes trois parachutes principaux sont les trois gros parachutes blancs et oranges de 25,5 mètres de diamètre. Ils sont ouverts à 3 kilomètres d'altitude et viennent finir de ralentir la capsule, jusqu'à une vitesse de 35 km/h pour un amerrissage en sécurité. En cas de défaillance d'un des trois parachutes, les deux derniers sont tout de même capables de ralentir assez la capsule, bien que l'amerrissage soit plus violent.

Après le contact avec l'eau, trois ballons de redressement sont gonflés au sommet de la capsule pour la placer dans une position optimale et l'empêcher de se retourner dans l'eau.

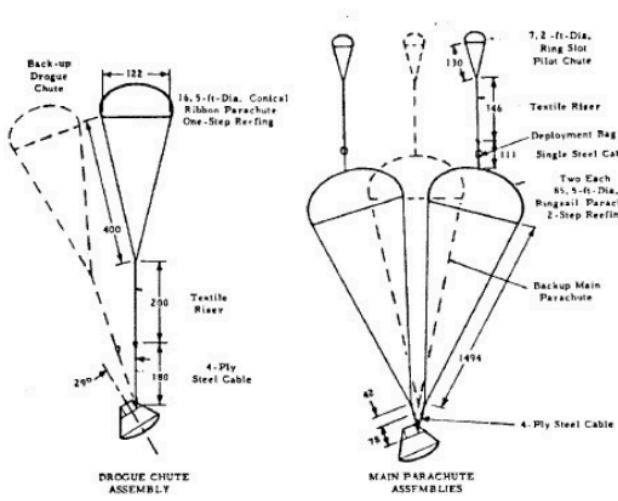


Figure 16 - Le déploiement des huit parachutes

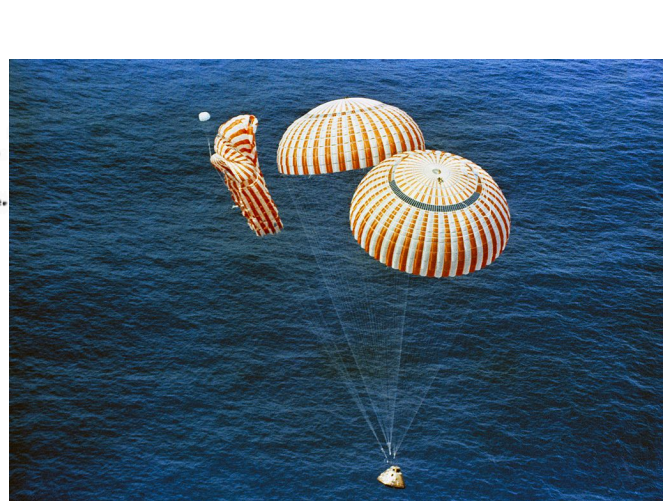


Figure 17 - Splashdown d'Apollo 15. L'un des parachutes s'est mal déployé

Le module de commande offrait un espace habitable de 6,2 mètres cubes. Avec le module de Service, l'ensemble CSM affichait une masse de 30 Tonnes au décollage.

c) Le KSM

Et sur Kerbal ? On a exploré le Command and service Module des vraies missions Apollo, voyons maintenant comment notre Kommand-Service-Module se porte ! D'abord un petit tour d'horizon, ensuite quelques images et infographies pour montrer les composants à l'intérieur.

Côté dimensions, l'ensemble de la construction sur kerbal est grosso-modo un peu plus grand qu'à l'échelle 1:2, mais le CSM échappe un peu à la règle. La masse n'est forcément pas la moitié de la masse réelle, ce que vous aurez l'occasion de constater.

Pour commencer : Le Pod. Rien de plus simple ! Presque tout ce que nous avons vu sur le module de commande se retrouve en un seul pod, et c'est le pod MK1-3.

D'aspect extérieur, on retrouve un module en tronc de cône, de 2.5 mètres de diamètre à la base. Celui-ci est équipé de deux écoutilles, l'une au sommet et l'autre sur le côté. On retrouve également un

hublot percé au milieu de cette dernière ainsi que deux hublots latéraux et deux pointés vers le port d'amarrage. Toutefois, à la différence du module de commande, notre pod est blanc, ce qui n'est pas sans rappeler la peinture utilisée sur la moitié du module lors des missions Skylab.



Figure 18 - Le Pod MKI-3 à côté d'un module de commande Apollo ayant subi une rentrée atmosphérique

Au niveau fonctionnel, ce pod est équipé comme le vrai de système d'orientation RCS, dont il embarque la réserve de carburant. Il est en plus équipé d'un système de roues à réaction puissantes, dont nous n'avons pas besoin tout le temps. Par contre, il n'est pas équipé de parachutes, de port d'amarrage, ni de bouclier thermique. Finalement, ses batteries sont de faible capacité. Pour remédier à cela, un bouclier thermique est posé à la base du tronc de cône et on reconstruit la partie supérieure. Pour ça, deux petits parachutes de stabilisation, trois parachutes principaux ainsi que des petites batteries sont posées sous un petit tronc de cône éjectable. On surmonte le tout d'un petit port d'amarrage et le module de Kommande est prêt.



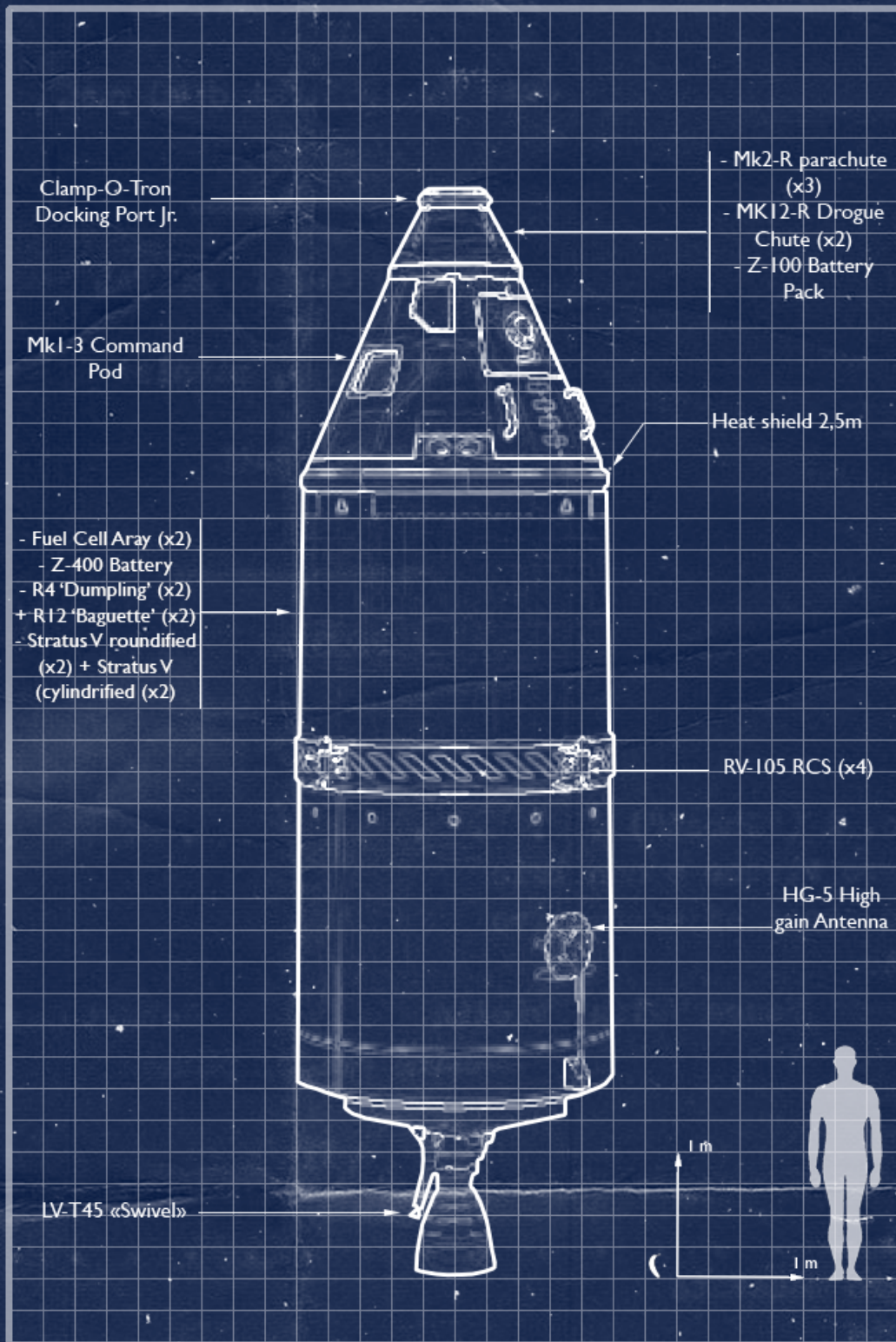
Figure 19 - Le module de Kommande

Pour le module de Service Kerbalisé, on reprend les éléments principaux que l'on a évoqué plus haut. Un système de RCS avec quatre grappes de quatre propulseurs, une alimentation électrique avec piles à combustible, une antenne, un système moteur inclinable, etc... Comme c'est moche (et pas faisable en vrai, il faut le dire) de cacher batteries, piles, et petits réservoirs dans les gros réservoirs, un semblant de baie de service est créé à l'aide d'une coiffe (qui n'est jamais déployée) placée au-dessus d'un petit réservoir. Dedans sont placés les réservoirs pour le RCS, du carburant supplémentaire pour le moteur, des batteries, ainsi que deux piles à combustible. On a ainsi tous les éléments du module de service, agencés un peu plus proprement dans cet espace. Cela permet également d'accéder aux piles à combustibles pour en contrôler le fonctionnement.

Donnée	CSM	KSM
Masse	30 tonnes (25 + 5)	18,4 Tonnes
Dimensions	10,7 mètres de haut	8,80 mètres
	Ø 3,9 mètres	Ø 2,5 mètres
Équipage	3 astronautes	3 Kerbonautes
Alimentation électrique	3 piles à combustible	2 piles à combustible
Propulsion	Moteur unique Gimbal, poussée non modulable	Moteur unique Gimbal, poussée modulable
Contrôle d'attitude	RCS	RCS
	C'est tout	Roue à réaction (pour la rentrée)
Systèmes pour le retour	8 parachutes	5 parachutes
	Un bouclier thermique	Un bouclier thermique
	Les hublots assurent une protection correcte	Pas de problème au niveau des hublots
Système d'amarrage	Un port mâle	Un port androgyne
	Amovible	Les Kerbals se débrouillent
Alimentation en nourriture/eau et oxygène	Réserves, production des piles à combustible	Les Kerbals sont manifestement des êtres autonomes

Tableau 1 - Brève comparaison du CSM avec le KSM

Le KSM



 18 380 kg

 9 440 kg

 215 kN

Figure 20 - Blueprint légendé du KSM complet

d) Le module Lunaire

De loin l'un des éléments les plus emblématiques du programme Apollo, il a le rôle capital de faire descendre en toute sécurité deux astronautes sur le sol lunaire, et, évidemment, de les faire remonter dans le même état.

Ce que l'on appelle Module Lunaire est en fait un assemblage de deux modules.

- Le module de descente

C'est la partie octogonale à la base du véhicule, reconnaissable à son revêtement doré. Il est presque entièrement dédié à la propulsion du LEM lors de la décélération au moment de l'alunissage, mais il peut jouer d'autres rôles. Son moteur est également un moteur consommant un mélange hypergolique, ici du peroxyde d'azote et de l'aérozine 50. Pour une descente contrôlée, le moteur est orientable et sa poussée est modulable. La structure interne de l'étage est séparée en 9 compartiments. Le central accueille le moteur, tandis que les quatre gros compartiments carrés sont occupés par les réservoirs d'ergols. Le LEM ne dispose pas comme le module de service de piles à combustible, et fonctionne donc entièrement sur ses batteries. Dans les quatre autres compartiments, sont embarquées cinq batteries, le matériel scientifique, des réservoirs d'eau et d'oxygène, et, sur les dernières missions, le rover lunaire.

Sur l'étage sont construits quatre trains d'atterrissage déployables. Le nombre de quatre n'est pas choisi au hasard. Dans un souci de redondance, il fallait plus de trois pieds, pour que le module puisse toujours tenir en cas de défaillance majeure (casse, blocage...) au niveau de l'un d'eux. Le nombre de quatre trains d'atterrissage permet de trouver l'équilibre entre fiabilité et optimisation de la masse. A la base de chaque train est placé un pied circulaire de 95 centimètres de diamètre assurant la stabilité du véhicule posé et limitant l'enfoncement dans un sol dont on ne connaissait pas totalement la dureté. Sous les pieds étaient montés des perches de 1,7 mètres de long qui étaient les capteurs de contact, pour prévenir le pilote de la proximité du sol et indiquer le moment pour couper le moteur. Ces capteurs étaient présents sur trois des quatre pieds. Par mesure de sécurité, il a en effet été jugé préférable de ne pas en équiper sur le pied doté de l'échelle, par peur que la tige cassée ressorte et endommage la combinaison d'un astronaute.

En plus de servir lors de la descente sur le sol lunaire, le module de descente sert aussi de plateforme de décollage pour le module de remontée. Ce dernier se sépare du premier et décolle d'une base stable pour rejoindre l'orbite. Ainsi, les étages de descente des six modules ayant touché le sol lunaire sont encore en place, et n'ont pas bougé.

Finalement, l'étage de descente peut également servir en orbite pour propulser le module de commande et de service en cas d'endommagement du SPS. C'est le cas sur la mission Apollo 13. Avec les dégâts causés par l'explosion dans le module de service, il n'était pas possible de savoir les conséquences que pourraient avoir la mise à feu du moteur. La décision fut alors prise d'utiliser l'autre moteur disponible, celui de l'étage de redescende, pour effectuer les corrections de trajectoire nécessaires au retour des astronautes.

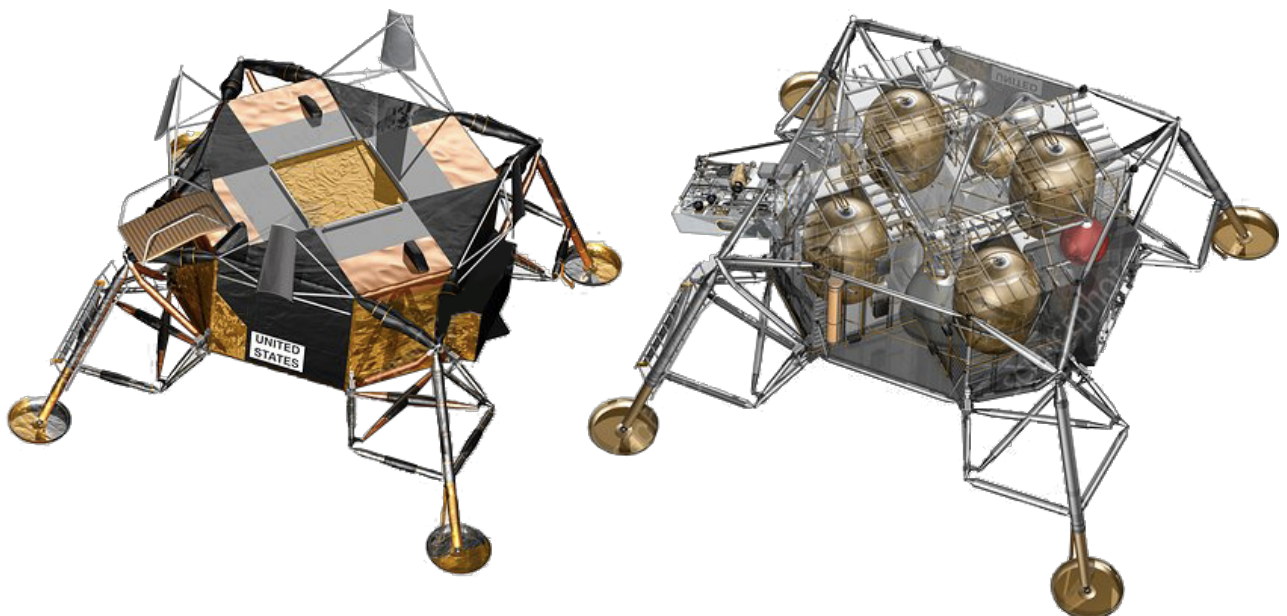


Figure 21 - L'étage de descente du LEM

- L'étage de remontée

Il est placé sur l'étage de descente et est l'habitacle du LEM. C'est ici que les astronautes pilotent le module lunaire, qu'ils se reposent après les sorties extravéhiculaires, etc. Petit véhicule à part entière, il est composé de nombreux éléments importants.

Lors des phases de propulsion, les astronautes pilotent le LEM ici. Ils se tiennent debout, maintenus par des harnais, devant les panneaux de contrôle. Ils gèrent alors la poussée du moteur, l'attitude du module, etc...

Le moteur de l'étage de remontée est plus simple que celui de l'étage de redescende. Encore une fois, il consomme du peroxyde d'azote et de l'Aerozine 50. Mais il n'est pas inclinable et sa poussée n'est pas modulable. Les corrections sont alors réalisées par le Reaction control system, composé ici aussi de quatre grappes de propulseurs. Chose intéressante, les flammes en sortie de la tuyère du moteur sont presque invisibles, ce qui a poussé certains à crier au complot. C'est en fait l'une des caractéristiques de ce mélange hypergolique !

Comme le module de commande le LEM est équipé de deux écoutilles.

L'écoutille principale est de forme à peu près carrée d'environ 80 centimètres de côté et fonctionne selon le même principe que les écoutilles précédemment évoquées. Lorsque le LEM était pressurisé, la pression plaquait la porte contre la paroi et aidait au maintien d'une étanchéité parfaite. Elle n'est pas équipée de sas car cela représenterait une masse et un encombrement bien trop importants. Au lieu de ça, les astronautes faisaient le vide dans la capsule avant d'ouvrir le passage vers l'extérieur. L'écoutille supérieure fonctionne avec l'écoutille supérieure du module de commande et adopte le même principe.

Encore comme le module de commande, le LEM emporte, en plus des deux écoutilles, des hublots. Ici, ils sont au nombre de trois : un hublot triangulaire par astronaute pour une vue dégagée sur le sol lunaire et un hublot supérieur pour le docking avec le CSM. Les deux hublots triangulaires ont des côtés d'environ 60, 61 et 70 centimètres de long, ce qui permet aux astronautes d'avoir un bon champ de vision à l'approche de la surface. La fenêtre de docking était rectangulaire de 12,5 par 33 centimètres. Les trois étaient composées de deux épaisseurs. La couche extérieure est une couche de verre recuit qui constitue la protection principale du hublot contre les micrométéorites. La couche interne est faite en verre trempé. Le matériau pour cette couche a été choisi compte tenu de sa résistance aux chocs thermiques, aux impacts à faible vitesse, et de ses bonnes qualités optiques. Les deux couches de verres sont protégées en plus par deux couches de polycarbonate.

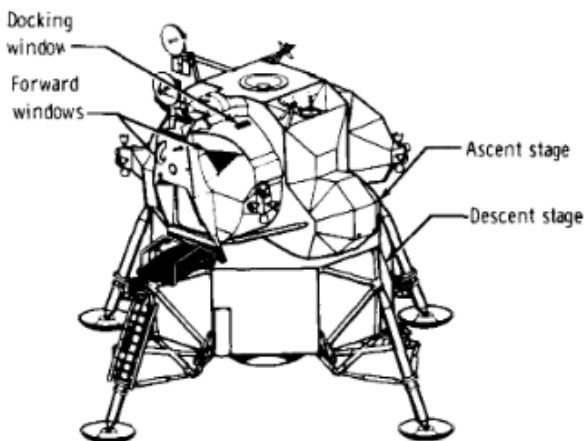


Figure 22 - Disposition des vitres du LEM

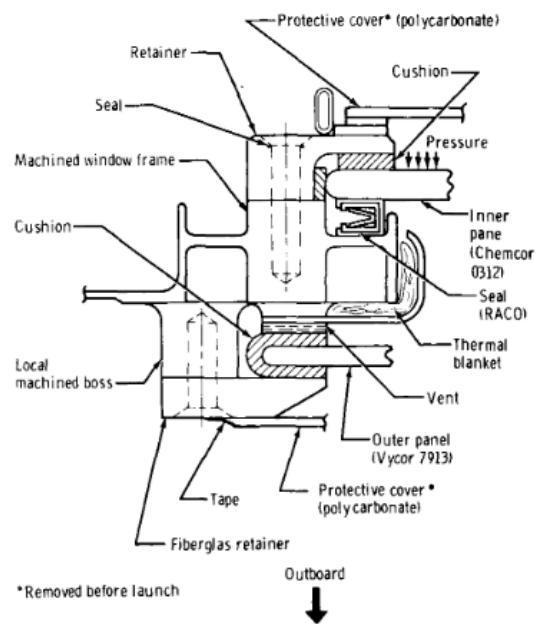


Figure 23 - Coupe d'un Hublot

Et lorsque ce n'est pas vide et que les astronautes sont dans la cabine, tout est équipé pour qu'ils puissent vivre. Des réserves d'eau, d'oxygène, de nourriture sont présentes, les systèmes sont globalement les mêmes que dans le module de commande.

Pour dormir, les astronautes ont des « hamacs » qui peuvent être mis en place dans le LEM.

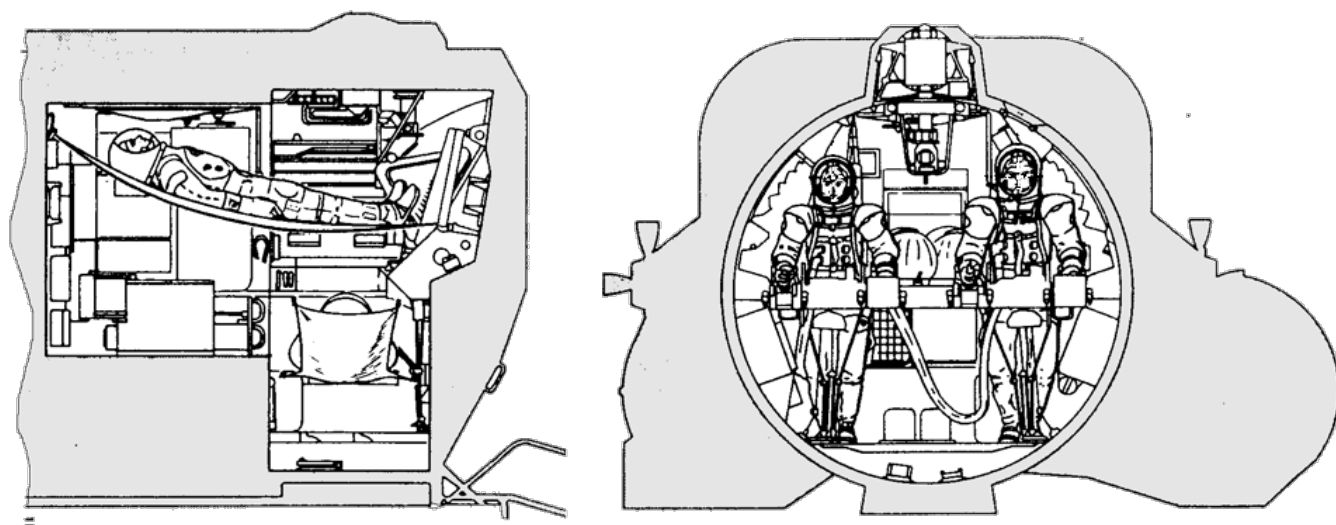


Figure 24 - L'espace de vie des astronautes

e) Le KLM

Encore une fois, voyons comment cela se passe côté KSP avec le Kerbal Lunar Module (L'acronyme a l'air un peu plagié, (c'est peut-être volontaire) oups).

Pour le coup, pas de solution magique comme pour le module de commande avec le pod MK1-3. Et pour être honnête, c'est ce module qui sera le moins ressemblant dans la mission. D'abord, c'est assez compliqué à reproduire. Ensuite, pour garder un module pas trop lourd et avec un centre de masse bien placé. Finalement, parce qu'étant donné la forme complexe du module, en faire une reproduction réaliste nécessite beaucoup de pièces, ce que j'ai voulu limiter un peu pour préserver mon ordinateur (vous verrez plus bas qu'il y'en a déjà beaucoup, des pièces). Mais pas grave, il est fonctionnel !

Il conserve la même architecture, en deux modules avec les mêmes fonctionnalités, mais la forme diffère.

Ainsi dans l'étage de descente sont situés la plus grande partie des batteries, ainsi que le système de propulsion dédié à la descente. Le moteur est un moteur à simple tuyère orientable et à poussée modulable. Pour l'alimentation électrique, les batteries sont rangées dans une petite baie de stockage montée en haut de l'étage. L'étage a également quatre pieds déployables pour l'alunissage, avec une échelle le long d'un des quatre.

Pour l'étage de remontée, un des pods du jeu est destiné particulièrement à la conception d'atterrisseurs, et c'est celui choisi ici. Il peut emporter deux kerbals et leur donner contrôle sur le vaisseau. Une écoutille latérale est placée pour les sorties extra véhiculaire, et un passage au-dessus permettra de rejoindre le module de commande. Pour les hublots, ici peu de ressemblance avec ceux du module lunaire Apollo, puisque le pod dispose d'une grande verrière pour le plus grand plaisir des pilotes. Au niveau de la forme aussi, notre pod s'éloigne encore une fois bien du vrai puisqu'il est circulaire. Finalement, il a deux baies de service qui permettent de ranger des batteries, du carburant, etc...

En complément de ce qui est apporté par le pod : Ajout d'un moteur à simple tuyère sous le module. Ajout de réservoirs de carburant. Ajout de batteries, d'antennes. Ajout d'un reaction control system en quatre grappes et d'une roue à réaction. Un port d'amarrage androgyne est placé au-dessus du module avec des feux de position.

Les deux étages sont liés par un séparateur, et une jupe est faite avec une coiffe qui s'éjecte au moment de la séparation et de la mise à feu du second moteur.

Donnée	LEM	KLM
Masse	15 tonnes (10 + 5)	10,2 tonnes (5,7 + 4,5)
Dimensions	7 mètres de haut	5,5 mètres de haut
	4,25 mètres (base)	Ø 2,5 mètres
Équipage	2 astronautes	2 Kerbonautes
Vitrage	2 hublots avants triangulaires	Une verrière
	1 hublot de docking	Un hublot, obstrué
Alimentation électrique	Batteries	Batteries
Propulsion	Deux moteurs séparés	Deux moteurs séparés Gimbal, poussée modulable
Contrôle d'attitude	RCS	RCS
	C'est tout	Roue à réaction
Système d'amarrage	Un port femelle	Un port androgyne
	Amovible	Les kerbals peuvent passer
Alimentation en nourriture/eau et oxygène	Réserves	Les Kerbals sont quand même peu exigeants

Tableau 2 - Comparaison du LEM avec le KLM

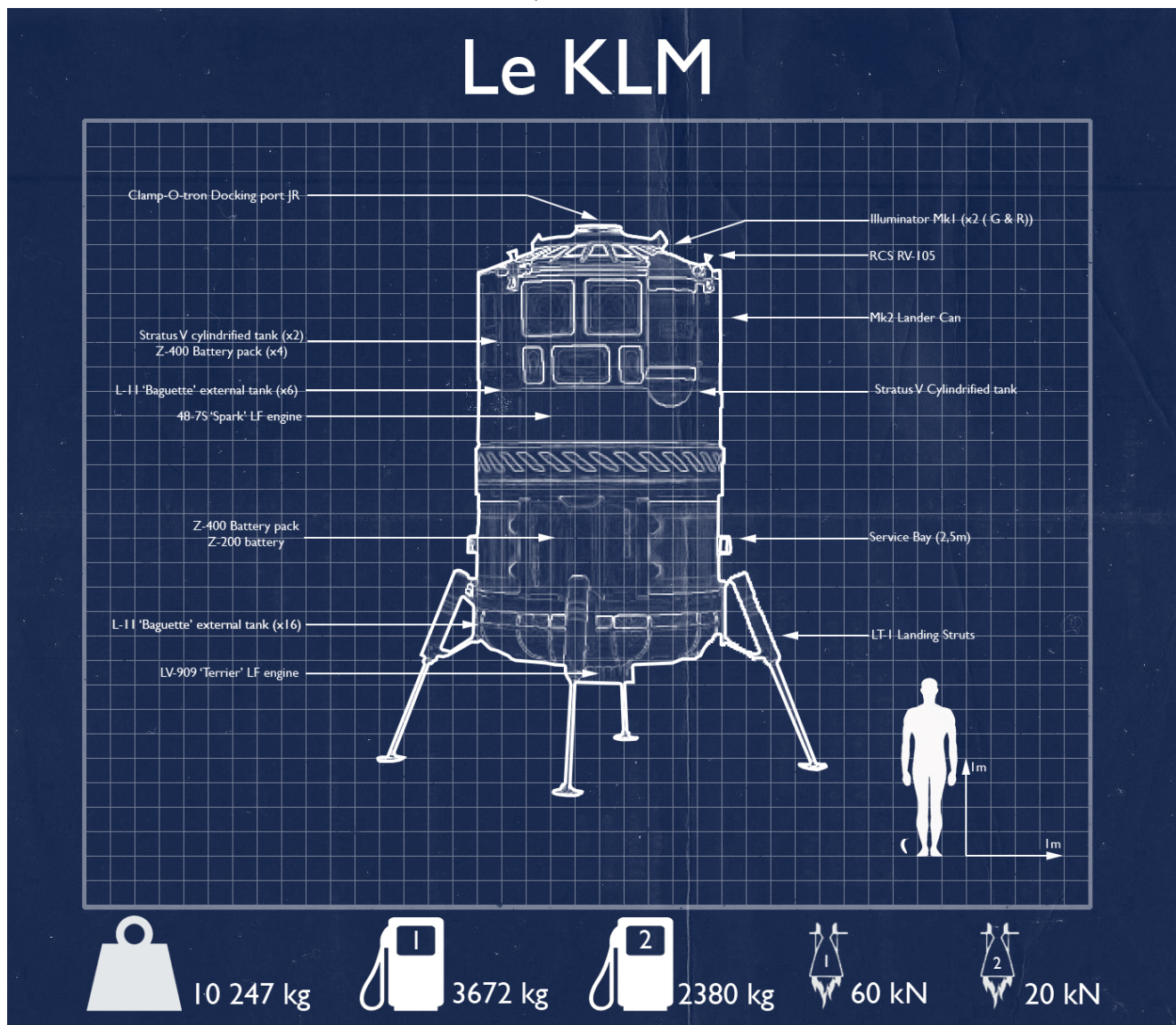


Figure 25 - Blueprint légendé du KLM complet

2) Un lanceur à la mesure du vaisseau, vue détaillée

Pour emporter 45 tonnes en orbite lunaire, des missiles intercontinentaux modifiés ne suffisaient plus. Il fallait un lanceur d'une toute autre échelle, et Kennedy l'avait bien spécifié dès 1962 à l'université de Rice, Houston : "Mais si je vous disais, mes chers concitoyens, que nous allons envoyer sur la lune, à 385 000 kilomètres du centre de contrôle de Houston, une fusée géante de plus de 100 mètres de haut, la longueur de ce terrain de football, faite de nouveaux alliages de métaux, certains n'ayant même pas encore été inventés, capable de supporter une chaleur et des contraintes plusieurs fois supérieures à ce qui a jamais été fait, assemblés ensemble avec une précision plus haute que sur la meilleure des montres, en emportant les équipements nécessaires pour la propulsion, l'orientation, le contrôle, les communications, la nourriture et les vivres, dans une mission jamais réalisée vers un corps céleste inconnu, et ensuite la ramener intacte sur Terre, après une rentrée dans l'atmosphère à des vitesses de plus de 40 000 kilomètres par heure, générant des températures avoisinant la moitié de la température du soleil – presque aussi élevées que la température qu'il fait aujourd'hui (rires dans l'assistance) - et faire tout ça, et le faire bien, et le faire en premier avant la fin de cette décennie; alors nous devons faire preuve d'audace."... Une longue phrase, qui résume bien la complexité et la folie des missions lunaires. C'est donc dans ce contexte, et pour remplir ce programme chargé, que le monstre Saturn V est né. Monstre est le mot, oui. Faisons une visite étage par étage de ce lanceur hors du commun, encore inégalé cinquante ans après.

a) Le S-IVB

Allons de haut en bas. Malgré ce que son nom laisse penser, le S-IVB est le troisième et dernier étage de la Saturn V. Il tire son nom de la fonction qu'il aurait eu dans un autre projet. Il était en effet destiné à être le quatrième étage d'une fusée n'ayant pas vu le jour, la Saturn C4.

Ses dimensions sont hors normes : 6.6 mètres de diamètre, presque 18 mètres de haut. A titre de comparaison, la fusée Mercury-Redstone qui permit à Alan Shepard d'effectuer son premier vol mesurait 24.5 mètres de haut, pour 1,8 mètres de diamètre. Le S-IVB affiche sur la balance une masse de 124 tonnes au décollage, soit quatre fois plus que le petit lanceur suborbital

Il est propulsé par un unique moteur J-2. Conçu par Rocketdyne, c'est un moteur à haute efficacité prévu pour fonctionner dans le vide. Son impulsion spécifique est de 424 secondes et sa poussée de 1000 kN. Il est inclinable pour permettre le contrôle de l'attitude de l'étage. Il brûle de l'hydrogène et de l'oxygène liquide. Ce qui fait la particularité et l'intérêt de ce moteur, c'est qu'il est l'un des premiers moteurs puissants à utiliser ces ergols, et le fait qu'il peut être rallumé. En effet, le J-2 du troisième étage devait pouvoir fonctionner deux fois : une première fois pour finaliser l'injection en orbite terrestre avec un burn d'un peu plus de 2,5 minutes. Puis, il est rallumé plus tard pendant 5,2 minutes pour l'Injection Trans Lunaire (TLI).

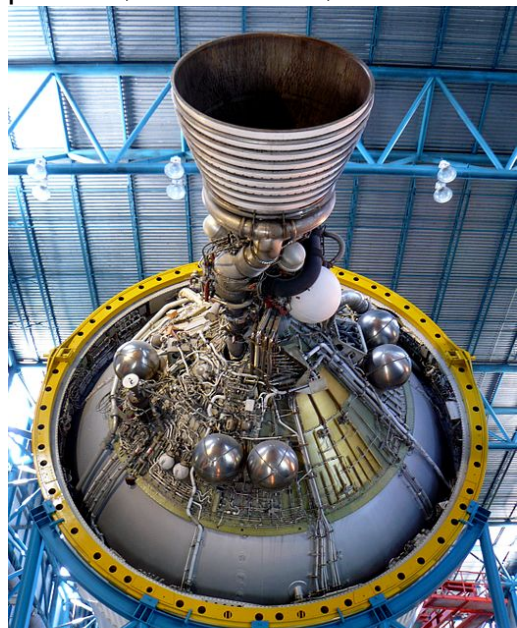


Figure 26 - Un moteur J2 de S-IVB

Une version plus puissante du J-2, le J-2X a été développée depuis 2007 pour propulser l'étage supérieur des fusées Ares du défunt programme constellation. Il est maintenant prévu d'utiliser cette variante sur le successeur de constellation : le futur lanceur lourd SLS de la NASA.

L'essentiel de la masse de l'étage est représenté par les ergols. A vide l'étage affiche une masse de 13,5 tonnes, soit un peu plus 10% de la masse totale avec les ergols. Il est relié au deuxième étage par une jupe inter étage.

Le troisième étage est surmonté d'une grande coiffe qui s'ouvre en quatre panneaux et qui abrite le LEM. Le module de service est placé au sommet de la coiffe. Quand vient le moment de récupérer le module, les panneaux s'ouvrent, le CSM se détache. Là, il se retourne (grâce aux propulseurs du RCS) et vient s'arrimer au LEM. Il est alors détaché et le S-IVB est envoyé vers la surface lunaire... normalement.

b) L'étage de tout en haut

Comme pour les morceaux du vaisseau Apollo, le S-IVB trouve son équivalent Kerbal. Il n'est pas très compliqué, et est composé de deux réservoirs, avec un unique moteur qui joue le rôle du J-2. Pour le style et pour tenter de garder un minimum de ressemblance avec le véritable troisième étage, les deux réservoirs sont des pièces de petite taille qui ont été agrandies avec Tweak scale : Un petit réservoir gris et un petit réservoir blanc. L'étage est surmonté de la coiffe qui protège le KLM, découpée en quatre panneaux.

Un petit tableau vaudra mieux que deux paragraphes pour tout résumer sur cet étage, au vu de sa simplicité.

Donnée	S-IVB	Tout en haut
Masse	124 Tonnes	48,603 Tonnes
	13,5 Tonnes à vide (10%)	8,1 Tonnes à vide (16,7%)
Dimensions	18 mètres de haut	7 mètres de haut
	Ø 6,6 mètres	Ø 3,75 mètres
Propulsion	Moteur unique	Moteur unique
	1 000 kN	650 kN
Contrôle d'attitude	Gimbal	Gimbal
Fonctionnement	Mise en orbite terrestre, injection trans-lunaire	Injection trans-lunaire

Tableau 3 - Comparaison du S-IVB avec l'étage de tout en haut

c) Le S-II

Cette fois ci le nom ne prête pas à confusion, le S-II est évidemment le deuxième étage du lanceur géant. Ses dimensions sont encore plus folles que celles du S-IVB. Après la jupe inter-étage reliant le deuxième et le troisième étage, le lanceur atteint le diamètre gigantesque de 10 mètres. Le S-II affiche donc humblement une masse de 480,9 tonnes, et mesure 25 mètres de haut pour 10 mètres de diamètre. Pour comparer, le lanceur Vega de l'ESA fait 30 mètres de haut pour un diamètre de 3 mètres au niveau du premier étage et une masse de 136 tonnes. Il est propulsé par cinq moteurs J-2, les mêmes que sur le troisième étage.

Ici, les quatre moteurs extérieurs sont mobiles pour assurer le contrôle de l'étage, tandis que le moteur central est fixe. L'ensemble du bloc moteur fournit une poussée de 5100 kN pendant une durée de 360 secondes. Il est allumé aux alentours de 67 kilomètres d'altitude, juste après la séparation du premier étage, et amène le reste du lanceur jusqu'à une altitude de 185 kilomètres et une vitesse de 24 600 km/h, soit relativement proche des 28 000 km/h nécessaires pour la mise en orbite. Il fonctionne sans interruption et est détaché tout de suite après son extinction, allant s'écraser dans l'océan atlantique à environ 4 000 kilomètres du pas de tir. Ici, une carte indiquant les positions connues de certains S-II dans l'océan atlantique.



Figure 27 - Impacts recensés des étages S-II

Vous pouvez consulter cette carte et obtenir plus d'informations sur les lieux d'impacts ici : <https://drive.google.com/open?id=1XGI2TzM9QxmraAIK2GnNjUZQQXIsDSTi&usp=sharing>

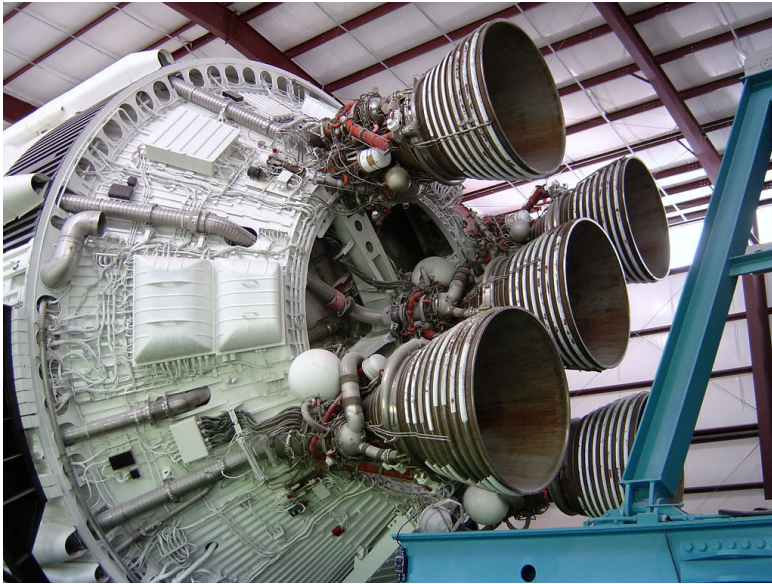


Figure 28 - Les moteurs du S-II

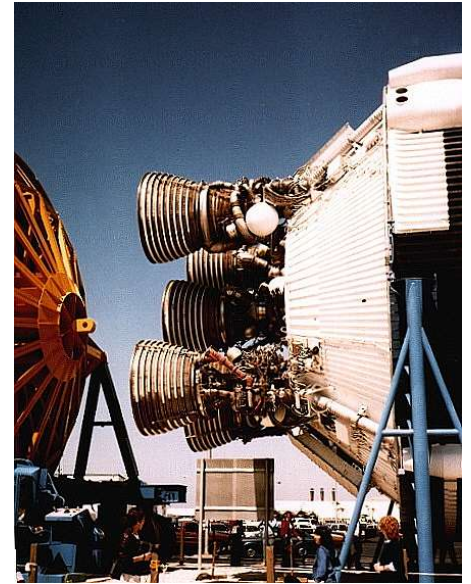


Figure 29 - La base du S-II

On retrouve à la base de l'étage ce que l'on appelle les moteurs d'ullage. Ce sont des petites rétrofusées à poudre qui sont mises à feu avant les cinq J-2. Leur rôle est de tasser au fond des réservoirs le carburant qui se ballade librement afin de permettre une alimentation optimale des moteurs principaux au moment de la mise à feu

d) Le deuxième étage

Comme pour l'étage de tout en haut, celui-ci n'est pas très compliqué à assembler. Il est composé de deux réservoirs : un petit réservoir blanc, et un réservoir rayé noir et blanc de moyenne taille, encore une fois agrandis avec tweeksacle pour un meilleur rendu. Sa propulsion est assurée par cinq moteurs, identiques à celui de l'étage supérieur. Pour placer les moteurs, on pose le central directement sous l'étage. Ensuite, on place par symétrie quatre 'cubic octagonal strut' qui serviront de bases aux moteurs périphériques. Le gimbal du moteur central est coupé.

La jupe inter étage conique entre le deuxième étage et l'étage d'en haut est faite au moyen d'une coiffe pointée vers le bas à laquelle on applique le skin rayé noir et blanc. Comme d'habitude, voici un tableau qui compare avec la réalité :

Donnée	S-II	Deuxième étage
Masse	481 Tonnes	195 T
	36 Tonnes à vide (7,5%)	35 Tonnes à vide (17,9%)
Dimensions	25 mètres de haut	11 mètres de haut
	Ø 10 mètres	Ø 5 mètres
Propulsion	Cinq moteurs J-2	Cinq moteurs
	5100 kN	3250 kN
Contrôle d'attitude	Gimbal (4 moteurs)	Gimbal (4 moteurs)
Fonctionnement	Ascension, largage avant orbite	Mise en orbite

Tableau 4 - Comparaison du S-II avec le Deuxième étage

e) Le S-IC

A la base du lanceur géant se trouve le colossal premier étage S-IC. Tout simplement plus grand qu'un immeuble, il mesure 42 mètres de haut pour 10 mètres de diamètre et une masse de plus de 2200 Tonnes. Encore à titre de comparaison, le premier étage de la Falcon 9 de Space X mesure également 42 mètres de haut, pour un diamètre de 3,6 mètres, et une masse de 411 Tonnes. A vide, le S-IC pèse 136 tonnes, soit autant que Vega au décollage...

Le premier étage de Saturn V est allumé du décollage à T+135 s. Là, il est détaché et retombe à environ 630 kilomètres du pas de tir. Comme pour le S-II, voici une carte qui répertorie les lieux d'impacts des S-IC :

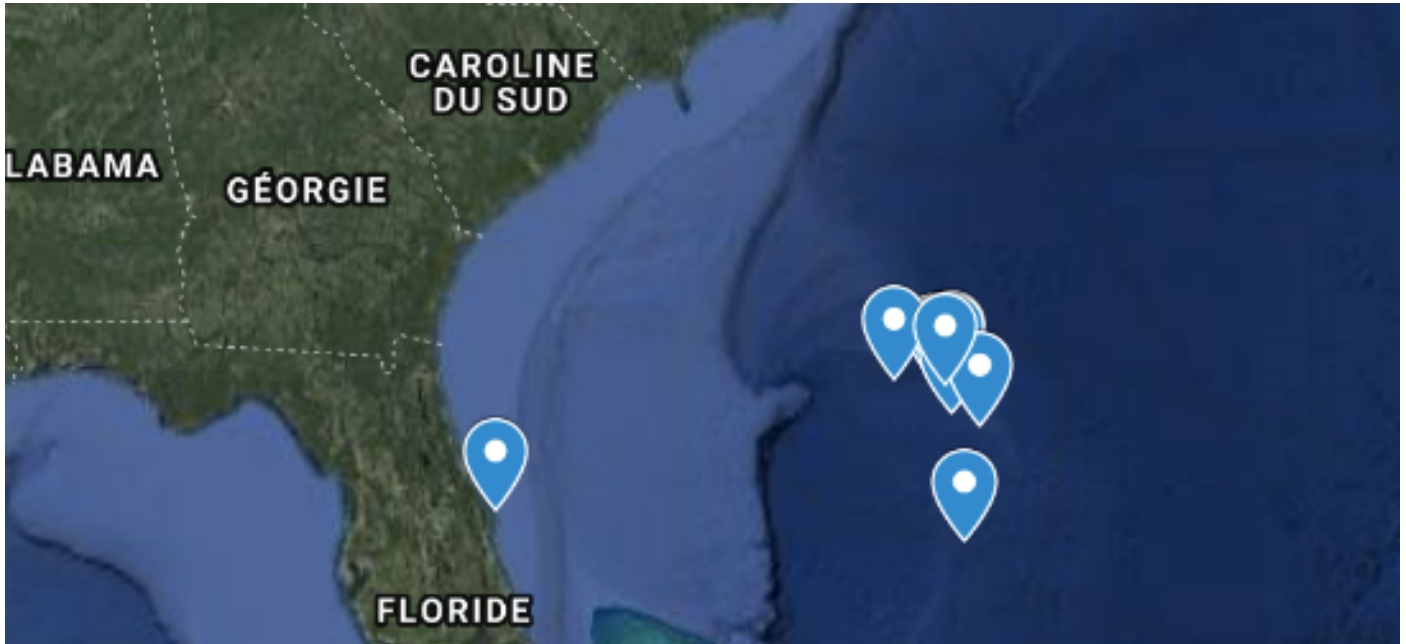


Figure 30 - Les impacts recensés de S-IC

Encore une fois, la carte peut être consultée pour plus de détails à cette adresse : <https://drive.google.com/open?id=1nrrrAfI-9xVg3tJ3sgFjcIvGyJtpBjji&usp=sharing>

La propulsion de cet étage est assurée par cinq moteurs 'F-1'. Ce sont les moteurs à simple chambre de combustion les plus puissants jamais développés. Individuellement, ils peuvent fournir une poussée de 680 Tonnes soit une poussée de 3400 tonnes ou 33,4 MN au décollage au total pour l'étage. Chacun de ces moteurs mesure 6 mètres de haut et presque 4 mètres de diamètre.

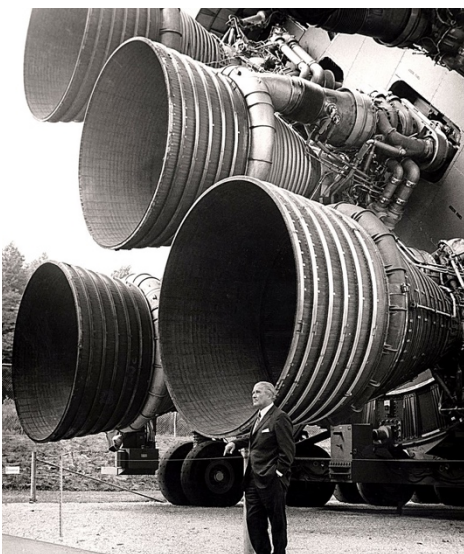


Figure 32 - Wernher Von Braun à côté de ses moteurs F-1



Figure 31 - Un S-IC

Ce moteur se démarque en fait principalement par sa démesure. Pour alimenter un tel engin, il fallait un débit d'ergols le plus haut possible. Chaque moteur consommait ainsi individuellement 2,72 tonnes d'ergols à chaque seconde. Pour les alimenter, les conduites d'oxygène liquide passaient directement à travers le réservoir de Rp-1 (dérivé du Kérosène), car un coude aurait limité le débit.

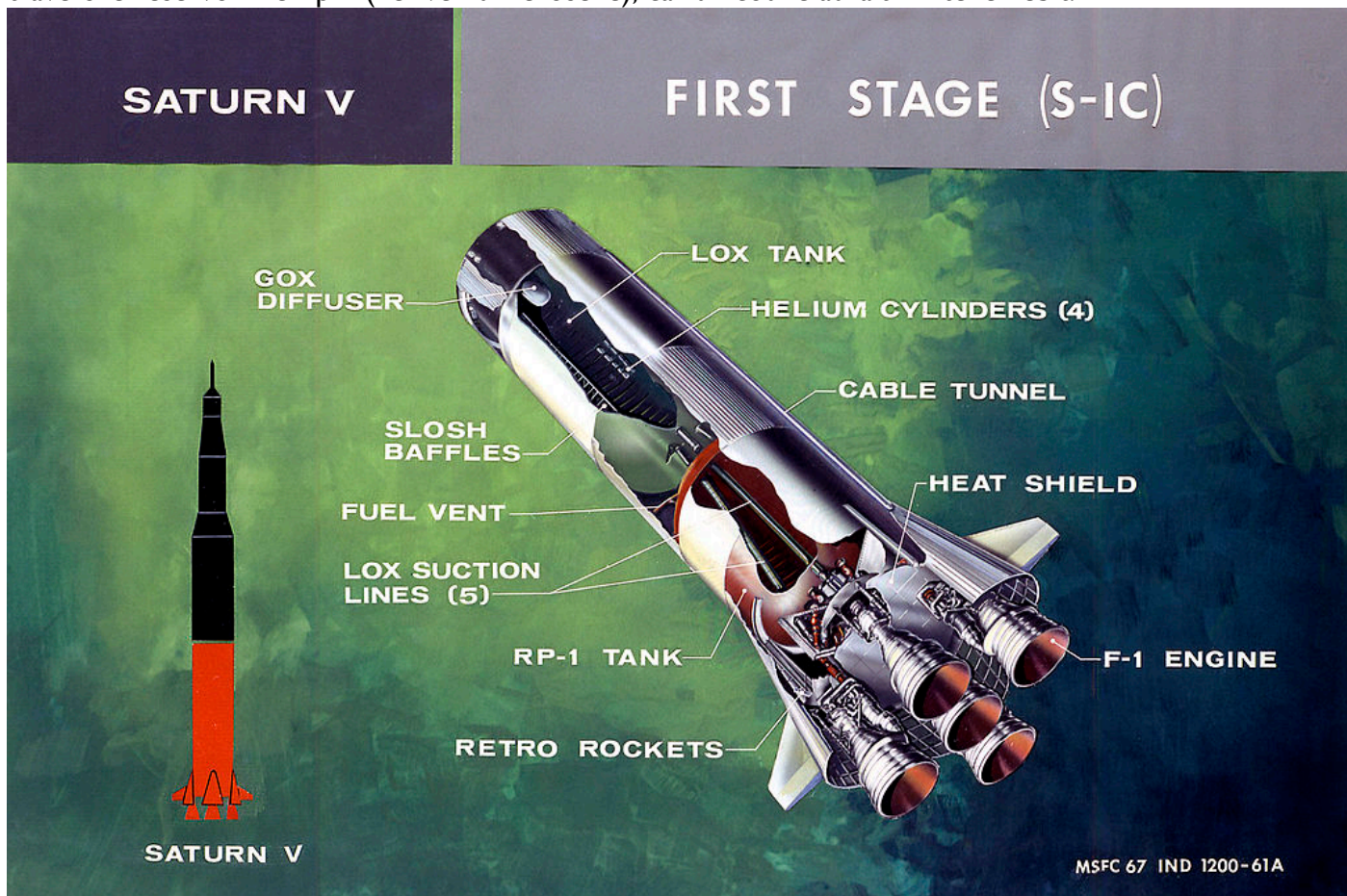


Figure 33 - Schema du S-IC montrant la structure interne

En sortie de tuyère, les gaz étaient éjectés à près de 2600 mètres par seconde et à une température de plus de 3200 degrés Celsius. Pour éviter que de telles conditions n'endommagent la structure de la tuyère, les gaz imbrûlés ayant circulé dans le moteur sont réinjectés dans la tuyère à une température de 650 °C, afin de créer une couche de protection entre la paroi en acier et les gaz chauds.

Les structures cannelées sur le premier étage sont des renforts structurels. Les réservoirs étaient pressurisés, mais pas la liaison inter-étage, ce qui en faisait un point faible. Cette zone plus fragile est ainsi cannelée, pour renforcer la rigidité, comme dans.... Un morceau de carton ! C'est le même principe !

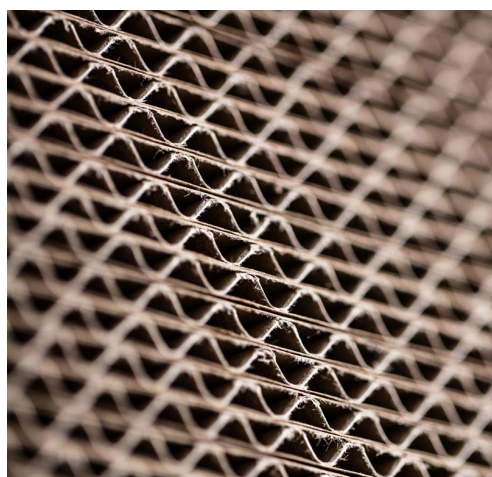


Figure 35 - Les ondulations du carton lui confèrent sa rigidité

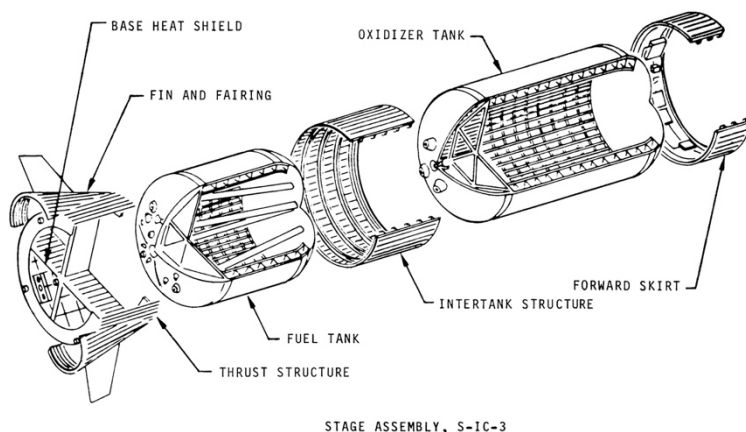


Figure 34 - Les ondulations de l'inter-étage visibles

f) ... Moar thrust !

Sur KSP aussi, le premier étage doit être puissant ! Au niveau de son design, il est comme pour les autres étages constitués de petits réservoirs agrandis à la taille de 5 mètres de diamètre. A la base du lanceur, cinq moteurs Vector dont la taille a été augmentée avec TweakScale pour supporter le lanceur. Le choix de ces moteurs est justifié par leur impulsion spécifique et poussée élevées Comme sur le vrai S-IC et comme sur le deuxième étage, le gimbal du moteur central est bloqué tandis que les moteurs périphériques sont mobiles pour aider le contrôle de la fusée en plus des quatre ailerons. Le grand tuyau en pièces structurelles qui court le long de l'étage représente la graine de câbles électriques qui est construite sur le vrai lanceur. Comme d'habitude, voici un tableau comparatif :

Donnée	S-IC	Moar Thrust !
Masse	2200 T	371,5 T
	136 Tonnes à vide (6,2%)	79,6 Tonnes à vide (21,4%)
Dimensions	42 mètres de haut	19,6 mètres de haut
	Ø 10 mètres	Ø 5 mètres
Propulsion	Cinq moteurs F-1	Cinq Moteurs Vector
	33,4 MN	10,4 MN
	TWR de 1,16 (décollage)	TWR de 1,61 (décollage)
Contrôle d'attitude	Gimbal (4 moteurs)	Gimbal (4 moteurs)
Fonctionnement	Ascension, largage avant orbite	Ascension, largage avant orbite

Tableau 5 - Comparaison du S-II avec le Deuxième étage

g) La tour de sauvetage

Au sommet du vaisseau, juste au-dessus du module de commande, se trouve la tour de sauvetage que nous avons déjà évoquée. Elle joue le même rôle pour les astronautes que le siège éjectable dans un avion de chasse. Si une urgence nécessite l'abandon du véhicule, la tour de sauvetage est déclenchée. C'est en fait une mini-fusée placée sur la capsule. Si elle est mise à feu, elle arrache la capsule au lanceur, et doit l'envoyer le plus loin possible. Il faut d'abord atteindre une altitude suffisamment élevée pour permettre l'ouverture complète des parachutes, et également une distance de sécurité avec le lanceur toujours en fonctionnement qui risquerait d'exploser.

Pour arracher les cinq tonnes du module de commande à un lanceur comme Saturn V, il fallait une tour de sauvetage de très grande puissance. Celle du vaisseau Apollo mesure donc 10 mètres de haut, et fournit une poussée de 650 kN durant 4 secondes. La tour de sauvetage est éjectée après l'allumage du second étage.

Sur KSP, notre tour est réalisée avec des pièces structurelles auxquelles on ajoute 3 groupes de 8 sépratrons. En cas d'urgence, ces 24 propulseurs s'allument pour une durée de 5 secondes et la capsule se détache du lanceur. Le TWR est de 6,39, ce qui permet d'arracher le module de kommande au lanceur qui se trouve en dessous. Pour déplacer le module, deux petites ailes sont placées au sommet de la tour et se déploient au déclenchement de la procédure d'urgence. Les tests montrent que l'équipage prend en moyenne 7 à 8 g durant la procédure de sauvetage avec un maximum à 10.

3) Vue d'ensemble sur Saturn V

a) Saturn V

Si l'on résume beaucoup, Saturn V est l'assemblage de tous ces éléments. Ils constituent ensemble le lanceur le plus gros, le plus puissant, le plus grand, le plus lourd, et bien d'autres records encore, à avoir été opérationnel à ce jour. Seule la N-I soviétique, elle aussi destinée au même objectif, la concurrençait voire la dépassait avec un diamètre maximum de 17 mètres et une poussée de plus de 4600 tonnes, mais elle n'atteint jamais l'orbite et son histoire prit fin après 4 échecs au lancement.

Au total, Saturn V mesure 110 mètres de haut, 10 mètres de diamètre au maximum, et pèse 3000 Tonnes au décollage. Ses moteurs fournissent au décollage une poussée de 33,4 mN, soit environ 3400 tonnes de poussée. Avec ses trois étages, le lanceur peut mettre sur orbite lunaire les 45 tonnes du vaisseau Apollo, ou 140 Tonnes en orbite terrestre. Au décollage, les vibrations étaient ressenties à 80 km autour du pas de tir alors au lancement les témoins se tenaient à plusieurs kilomètres. Voici des images du lancement d'Apollo 17 prises à 4.5 kilomètres du pas de tir, pour se donner une idée de la puissance du lanceur : <https://www.youtube.com/watch?v=7ylvOYFOM6c> ...



Figure 36 - La Saturn V sur son pas de tir

Pour mettre au point un tel lanceur, la NASA fit appel à de nombreux sous-traitants tels que Boeing, North American Aviation, IBM, Rocketdyne, Pratt & Whitney, et bien d'autres, mais surtout à des dizaines de milliers de personnes exerçant des centaines de professions. Chacune de ces personnes avait son rôle à jouer du développement à l'assemblage de la fusée. L'assemblage final était effectué dans le vehicle assembly building, à cinq kilomètres à vol d'oiseau du pas de tir. De nombreux lanceurs, comme Soyouz ou Falcon 9 sont assemblés couchés et mis à la verticale après leur arrivée sur le lieu de lancement. Mais pour les 3000 tonnes de Saturn V, cette solution était trop compliquée. Il fut donc décidé de construire la Saturn V sur sa structure de lancement et de déplacer le tout jusqu'au pas de tir. Le vehicle assembly building mesure 160 mètres de haut ce qui en fait le bâtiment à un seul étage le plus grand du monde. Les portes pour laisser passer la fusée et sa table sont également les plus grandes portes du monde, chacune haute de 139 mètres de haut. Elles mettent 45 minutes pour s'ouvrir complètement.

La structure mobile sur laquelle est construite la fusée s'appelle le Crawler. C'est un immense véhicule sur chenilles de 2700 tonnes capable de supporter le lanceur et sa tour de lancement.

Dans son histoire, Saturn V effectua 13 vols, dont 12 missions Apollo. Elle ne connut qu'un échec partiel avec Apollo 6, mission durant laquelle une défaillance des moteurs J-2 a empêché le lanceur d'atteindre la bonne orbite. Elle a volé pour la dernière fois, sans son S-IVB, en 1973 avec le lancement de la station spatiale Skylab en orbite basse. L'architecture de cette première station spatiale américaine qui pèse plus de 90 tonnes est basée sur un S-IVB aménagé.

b) Kerturn V

Sur kerbal aussi, le lanceur est assez impressionnant. L'utilisation du mod Tweak-Scale a permis d'avoir des pièces de trois diamètres différents tout en rendant possible le voyage de trois Kerbonautes vers la lune. Il a également permis de s'approcher un peu du rendu visuel, notamment au niveau des peintures noires et blanches. On obtient Kerturn V en ajoutant tous les éléments évoqués plus haut... et quelques struts. La rigidité de la structure était importante mais compliquée à obtenir, surtout au niveau de la tour de sauvetage. Cette dernière avait tendance à balloter et à entrainer toute la fusée dans son mouvement, allant dans certains cas jusqu'à la rupture brutale du lanceur. C'est pourquoi de nombreux struts sont plus ou moins dissimulés entre les différents éléments.

Sans plus attendre, voici un autre tableau comparatif :

Donnée	Saturn V	Kerturn V		
Masse	3000 T	658,7 T		
Dimensions	110 mètres de haut	58 mètres de haut		
	Ø 10 mètres (S-IC, S-II)	Ø 5 mètres (1, 2)		
	Ø 6,6 mètres (S-IVB)	Ø 3,75 mètres (3)		
	Ø 4 mètres (CSM)	Ø 2,5 mètres (KSM)		
Moteurs	14 moteurs			
	5 F-1	5 J-2	5 Vector	5 Skipper
	1 J-2	1 AJ-10	1 Skipper	1 Swivel
	1 DPS	1 APS	1 Terrier	1 Spark
Ergols	RPI + LOX LH2 + LOX Peroxyde d'Azote + Aerozine 50	Liquid fuel + Oxydizer		
Etages	3 étages	3 étages		

Tableau 6 - Comparaison de Saturn V et Kerturn V

La Kerturn V

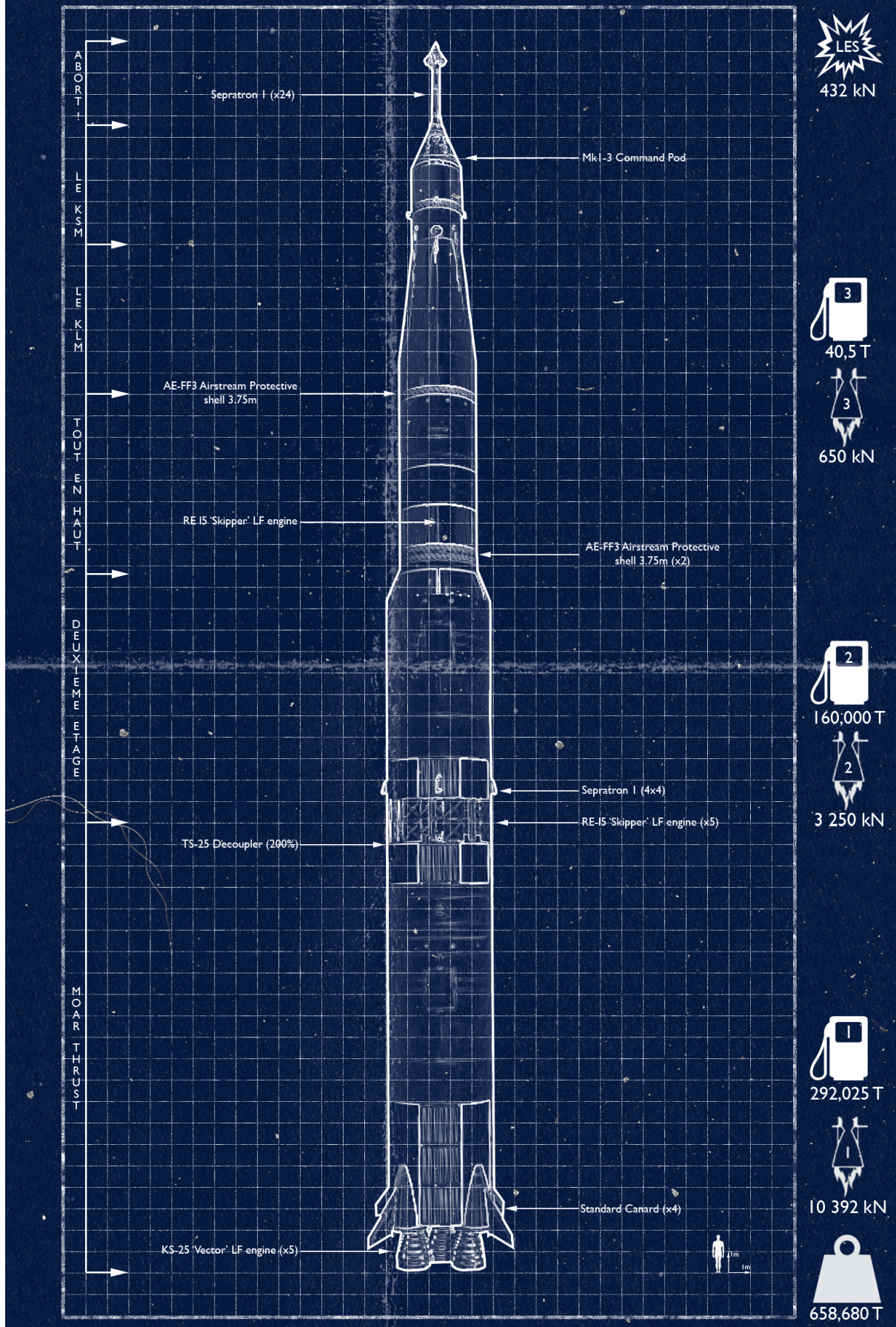


Figure 37 - Blueprint légendé de Kerturn V

Objectif : Lune

110 m

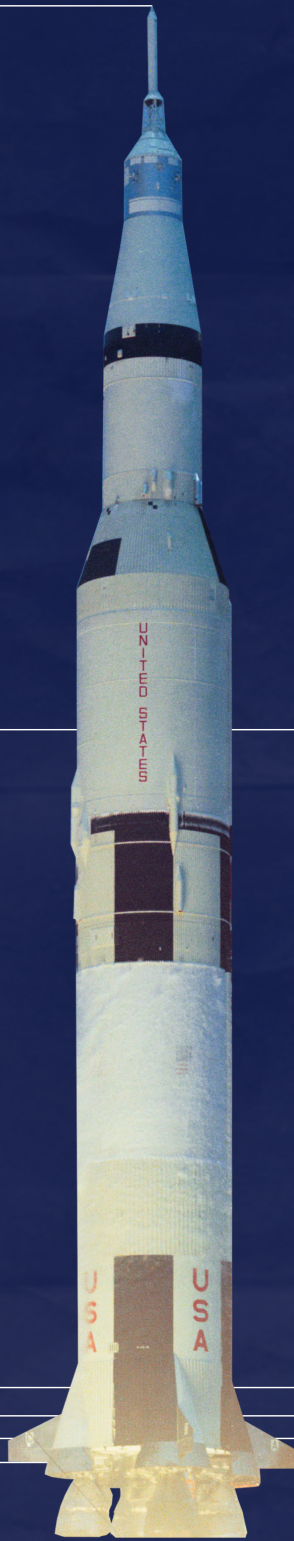
58 m

10,7 m

8,8 m

7 m

5,5 m



Saturn V



Kerturn V



CSM



KSM



LEM



KLM

3 / Quelques questions]

Après avoir lu tout ce qui précède, on peut se poser quelques questions. Celles-ci peuvent paraître bêtes, mais ce n'est pas le cas et la réponse est toujours intéressante ! Voici donc un tour de quelques questions que l'on peut se poser au sujet du programme Apollo, du lanceur Saturn V ou du vol spatial en général !

- Pourquoi la fusée ne part elle pas à la verticale ?

Pour répondre à cette question, il faut d'abord comprendre comment une orbite fonctionne. Imaginons un objet d'une masse de 1000 kilogrammes, placé en orbite à une hauteur de 300 kilomètres. S'il ne retombe pas au sol, ce n'est pas parce que plus rien ne l'attire sur Terre. La force de gravitation exercée par la Terre sur notre objet est encore bien présente. Ce qui fait qu'il ne retombe pas le sol, c'est sa vitesse.

Lancez une balle, droit devant vous. Elle retombe vers le sol, en décrivant une sorte de courbe (1 sur la fig 39). Ramassez là, et relancez là plus fort dans la même direction (2). Elle retombe plus loin, en décrivant une courbe plus grande. Imaginez-vous maintenant dotés d'une force surhumaine, et placez-vous à une altitude suffisamment élevée pour que votre balle ne rencontre aucun obstacle. Relancez, fort. Si vous la lancez assez fort, la balle suivra un peu la courbe de la Terre (qui est sphérique ☺) avant de toucher le sol (3 et 4). Maintenant, si vous lancez de toute vos forces, la balle partira peut-être suffisamment vite pour suivre complètement la courbure de la Terre (5). Et si rien ne la freine, elle continuera comme ça indéfiniment. C'est l'expérience de pensée du canon de Newton. Elle décrit bien le principe d'une mise en orbite.



Figure 40 - L'expérience de pensée du Canon de Newton

Notre objet de 1000 kilogrammes en orbite est en fait toujours attiré par la Terre, et tombe même continuellement vers elle, sans jamais l'atteindre car le sol se dérobe sous lui.

Pour mettre un objet en orbite, une fusée doit donc lui donner de la vitesse tangentielle. Mais elle ne peut pas faire ça directement depuis le sol, car on aimerait bien éviter d'être freinés par un immeuble ou par l'atmosphère terrestre. Elle monte d'abord à la verticale puis s'incline progressivement tout au long de son ascension, jusqu'à être à l'horizontale. Ce changement progressif d'inclinaison est effectué grâce à la gravité, c'est pourquoi on appelle cette procédure le Gravity Turn. Il permet d'effectuer des mises en orbite bien plus optimisées et moins coûteuses en carburant.

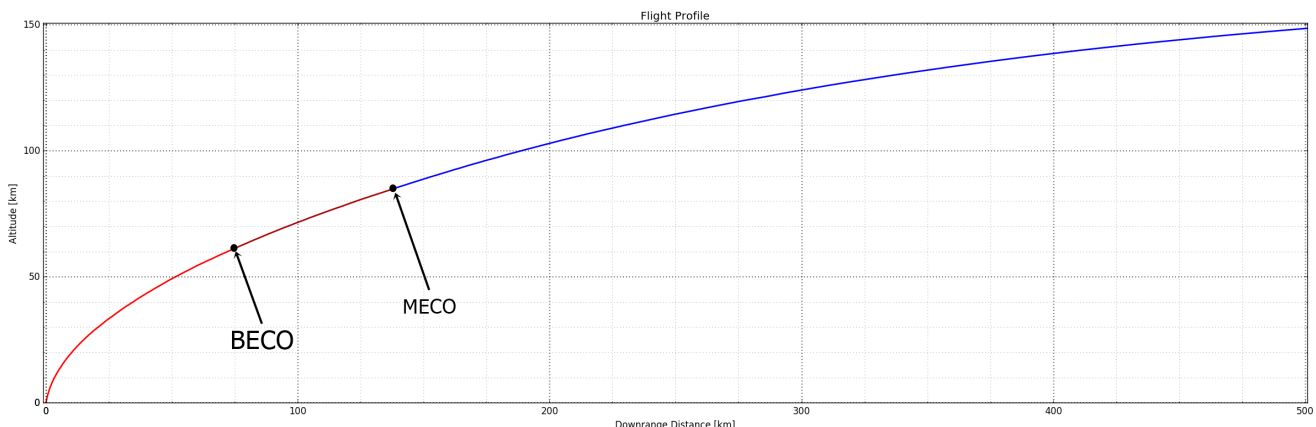


Figure 39 - Le profil de vol de Falcon Heavy

- *Pourquoi Saturn V est-elle bicolore comme la fusée de Tintin ?*

Si les motifs noirs et blancs de la fusée lunaire Américaine peuvent évoquer les couleurs de la fusée de Tintin, ou même du missile Allemand V2, c'est qu'il y a une raison fonctionnelle derrière. Pour la comprendre, il faut savoir ce que fait une fusée fait au décollage. Si l'on écoute les communications lors du décollage d'Apollo 11 par exemple, on entend à T+13s Armstrong annoncer un programme de roulis, puis 20 secondes plus tard la fin du programme de roulis et le début du tangage. La fusée doit en fait rouler sur son axe rapidement après le décollage pour se placer dans la bonne direction et ainsi faciliter la réalisation du gravity turn. Les bandes noires sur la fusée servent alors à contrôler visuellement depuis le sol la bonne exécution de la manœuvre de roulis.

Seulement, à la différence de la fusée de Tintin, les motifs ne couvrent pas l'intégralité de la Saturn V, car la couleur noire faisait monter en température les réservoirs en dessous, qui devaient être maintenus à des températures très basses. Elles couvraient donc le minimum de la surface.

- *Pourquoi la fusée a-t-elle plusieurs étages et pourquoi les jette elle ?*

Si Saturn V et toutes les autres fusées orbitales ont plusieurs étages, c'est pour faire des économies de carburant. En effet, pendant que les ergols sont consommés, la structure des réservoirs et de l'étage garde la même masse. Cela fait donc une masse inutile assez conséquente que la fusée emmène avec elle. C'est pourquoi il est bien plus pratique de se débarrasser régulièrement de cette masse morte pour que le lanceur reste efficace. En plus de ça, changer d'étage permet de changer de moteurs. Selon sa conception, un moteur est adapté à une pression extérieure particulière, et est beaucoup moins efficace lorsqu'il est utilisé dans un milieu différent. C'est pour cela que les moteurs atmosphériques sont généralement peu efficaces : sujets à de grands changements de pression au cours de l'ascension, ils sont adaptés à une pression « moyenne ». A l'inverse, les étages supérieurs utilisent des moteurs adaptés au vide qui fonctionnent donc tout le temps ou presque au maximum de leur efficacité.

- *Pourquoi le LEM est-il en deux parties et pourquoi utiliser deux vaisseaux pour la mission ?*

Pour l'étage du LEM, la réponse est la même que pour les étages de la fusée. L'utilisation de deux vaisseaux est encore une fois une question d'économies de carburant. Au début des études, 3 scénarii étaient proposés :

1. L'ascension directe : Utiliser un seul vaisseau, qui sert pour se poser sur la lune ainsi que pour le retour et la rentrée atmosphérique. C'est une sorte de fusion du CSM et du LEM.

2. Le rendez-vous en orbite terrestre : Il consiste à lancer plusieurs fusées pour assembler les éléments en orbite terrestre, un peu comme dans le film *Seul sur Mars* (Sauf qu'ils vont sur Mars...)

3. Le rendez-vous en orbite lunaire : Les deux vaisseaux sont envoyés en un seul lancement, mais se séparent pour que l'un descende sur le sol lunaire tandis que l'autre attend en orbite.

C'est le troisième scénario qui a finalement été choisi, pour faire des économies. Le deuxième serait évidemment très cher, car il faudrait construire et tirer plusieurs lanceurs par mission. Le premier, bien que souvent réalisé lors des débuts sur Ksp, est compliqué. Il nécessiterait un vaisseau très lourd car ce dernier devrait pouvoir alunir, remonter en orbite lunaire, et repartir sur Terre. Un vaisseau très lourd implique évidemment plus de carburant, et demande un lanceur très puissant.

- *Pourquoi n'est-on pas retourné sur la Lune depuis Apollo 17 ?*

Dès la fin de la mission Apollo 11, l'intérêt du grand public pour le programme Apollo commence à diminuer, les américains ayant gagné la course à la Lune contre l'URSS. Il va de même pour le congrès Américain, qui est de moins en moins convaincu par les propositions de suites du programme Apollo. Parallèlement, les priorités du gouvernement de Lyndon B Johnson ainsi que la guerre du Viêt-Nam prennent des parts de plus en plus grandes du budget américain. Cela entraîne une réduction du budget de la NASA qui cause l'annulation des missions Apollo 18, 19 et 20. Le programme Apollo prend donc fin avec Apollo-Soyuz en 1975, après les derniers pas sur la lune en 1972 (Apollo 17). La NASA se concentre alors sur son

projet de navette spatiale, en espérant diminuer les coûts de l'accès à l'espace en construisant un véhicule réutilisable de grande capacité.

Aujourd'hui l'intérêt porté vers la Lune remonte, du côté des acteurs publics comme privés. Des projets naissent régulièrement et différentes agences spatiales espèrent un retour de l'homme sur le sol lunaire dans les prochaines années.

- *Pourquoi utiliser une tour de sauvetage au lieu de sièges éjectables ?*

Même si l'idée est amusante voir plausible sur KSP (Jeb peut même évacuer un lanceur par l'écouille), elle est dangereuse dans la vraie vie. La tour de sauvetage peut être déclenchée durant les premières phases du vol, avant la mise en orbite. A ce stade-là de la mission, les réservoirs du lanceur sont encore très remplis, et le risque d'explosion en cas de défaillance encore très élevé. Il faut donc pouvoir évacuer l'équipage le plus loin possible du lanceur défectueux, pour les mettre en sécurité rapidement, ce que des sièges éjectables ne pourraient pas faire tant l'explosion du lanceur est puissante (surtout pour Saturn V). De plus, une tour de sauvetage a l'avantage d'être éjectable, alors que des sièges doivent être conservés toute la mission. La tour permet alors de diminuer la masse du module de commande ainsi qu'une augmentation du volume habitable de celui-ci.

CONCLUSION

Et... Et oui, ça s'arrête ici. Pas de mission donc... Enfin, pas ici ! La mission est condensée en vidéo, accessible sur YouTube ou en pièce jointe dans le dossier.

J'aimerais, avant de conclure et de montrer la vidéo, expliquer ma démarche lorsque j'ai réalisé ce dossier. On peut légitimement se demander l'intérêt de décrire des éléments tels que la composition des hublots et écoutes du vaisseau Apollo. La raison est finalement assez simple. Je suis très curieux et j'aime beaucoup comprendre comment fonctionnent et sont faites les choses. J'adore également la conquête spatiale, et forcément le programme Apollo. Quand le défi a été annoncé et que j'ai décidé de m'attaquer à cette reconstitution kerbalesque plus ou moins fidèle, je me suis pris au jeu. J'ai fait des recherches pour faire dans le jeu quelque chose qui se rapproche un peu de la réalité. Et puis en se renseignant sur un petit élément pour une simple comparaison visuelle, on finit par tomber sur un document sympa. Et là c'est le tourbillon et on finit par tomber sur un papier beaucoup trop intéressant pour être ignoré. Je crois que tout le monde voit de quoi je parle. C'est comme ça que j'ai trouvé des scans de documents sortis de la machine à écrire qui décrivent en détails la composition des hublots et la raison derrière ces choix techniques, et autres informations du même genre. J'ai donc pas pu m'empêcher d'ajouter ça au dossier, pour faire des comparaisons IRL-Kerbal (sur la disposition des écoutes, par exemple) puis pour mettre l'accent sur le côté génial de ces éléments. Derrière chaque sous assemblage impliqué dans le programme Apollo, il y a le travail d'ingénieurs et d'équipes qui ont tout fait pour produire le vaisseau le plus fiable et efficace afin de remplir tous ensemble un but unique et fantastique.

Ces informations n'ajoutent au final peu, et on peut juger qu'elles sont superflues. Mais éplucher ces documents a été une part importante de ma participation au challenge (on peut dire que je procrastine en les lisant au lieu d'écrire, mais j'ai appris des trucs intéressants. Ça compte ?) et j'ai vraiment apprécié le faire. Comme je l'ai dit plus haut j'aime bien décortiquer les trucs qui m'entourent plus ou moins (là, ça ne m'entoure pas, ok) pour les comprendre, alors ces docs étaient des mines d'or ! Je tiens dans ce dossier à montrer ce que j'ai fait dans le cadre du défi, et j'estime donc qu'étant une partie importante de mes activités liées à ce dernier, je me dois de vous les partager ! De plus, j'espère que je peux apprendre ne serait-ce qu'un tout petit truc à quelqu'un lisant ce dossier, sait-on jamais...

Vous pouvez visionner la vidéo à l'adresse suivante : <https://youtu.be/8-jkvjMwOR8> . Vous pouvez choisir de lire ce qui va suivre avant, ou après la vidéo, l'ordre a peu d'importance.

/ Bilan de la mission

La mission est un succès ! Les trois kerbonautes ont réalisé entièrement la mission sans encombre, et le cahier des charges est intégralement rempli. Aucun accident n'est à déplorer... A part l'explosion du module de descente au redécollage de la lune, que je n'explique pas ! La rentrée s'est déroulée à la perfection et l'équipage a pu profiter d'un petit bain dans l'océan. Il m'aura fallu plus d'une dizaine d'heures pour finir la mission, en comptant les prototypes que j'ai fait avant de construire le véritable craft de 380 parts.

Cependant, même si la mission est un succès, il y'a des choses à corriger. Le plus évident, c'est l'optimisation de mes crafts. Là, la Saturn V était surdimensionnée et les étages globalement trop-pleins, ce qui aurait pu être évité avec plus de temps et d'expérience. Mes trajectoires aussi peuvent être améliorées même si j'ai fait de bons progrès récemment. Le mot d'ordre, c'est donc l'optimisation, et c'est ce que je vais m'efforcer de travailler lors de mes prochaines heures sur KSP. Pour l'avoir expérimenté quelques fois, c'est très satisfaisant de finir avec les dernières goûtes de carburant, et c'est plus réaliste.

/ Bilan personnel

J'ai beaucoup apprécié participer à ce Challenge, pour pas mal de raisons que je vais essayer d'évoquer. D'abord, évidemment le thème tombe à pic puisque le défi a été lancé 50 ans pile après le décollage de la mission Apollo I I. Même si je l'ai fait avec une semaine de décalage, c'était l'occasion de jouer le jeu et d'être de rester dans l'ambiance de cet anniversaire particulier. Ce challenge était aussi relativement particulier, puisqu'à la différence des précédents, il visait un objectif assez accessible : la Lune. Pour ma part

c'est une destination que j'ai pu explorer à de nombreuses reprises (que ce soit pour Mun, ou pour la Lune d'ailleurs). Forcément, j'y avais aussi envoyé des missions reprenant l'architecture des missions Apollo. Mais ici, c'était une invitation à refaire ce genre d'expédition, qui est très agréable et plaisante, en poussant un peu plus. Cette fois-ci j'ai donc essayé de mettre l'accent sur le travail fait sur mes crafts, pour me rapprocher encore plus de la réalité. Construire des vaisseaux sur KSP est quelque chose que j'apprécie, et j'ai pu ici m'amuser à le faire, comme environ 80% de mon temps de jeu sur ce défi était dans le VAB.

J'ai aussi beaucoup apprécié ce qui entoure le challenge, à savoir discuter avec d'autres participants, et échanger à propos de nos soucis ou de nos progrès, partager quelques screens. J'ai également pu demander de l'aide quand j'ai eu quelques problèmes avec les mods, et essayer d'aider quand d'autres avaient des problèmes de fusée... L'ensemble était très agréable, et cela a son rôle dans le plaisir que j'ai eu à participer.

Finalement, KSC4 a été l'occasion d'apprendre beaucoup de choses pour moi. D'abord, au niveau de la recherche documentaire, mais aussi au sujet de tout ce que j'ai produit pour rendre ce dossier et cette vidéo. J'ai adoré utiliser Photoshop, que je n'avais utilisé que partiellement auparavant pour traiter des photos. C'était vraiment très plaisant de composer les infographies, et surtout d'apprendre à utiliser Photoshop pour le faire. J'ai maintenant très envie de continuer, comme je sais que j'ai à peine commencé à découvrir la puissance du logiciel. Pour la vidéo, j'ai aussi appris les bases du montage vidéo ! N'ayant jamais fait de vraie vidéo par le passé, c'était pour moi une découverte totale ! Aussi, j'ai adoré composer ce document qui m'a pris la vaste majorité du temps consacré au défi. C'est quelque chose que j'aime faire, et je l'ai fait à fond ! Et finalement, la traduction de cette longue phrase de JFK était très intéressante à faire.

Merci d'avoir lu de long dossier ! Comme je l'ai dit plus haut, j'essaie de vous transmettre au mieux mon expérience et j'espère vraiment que vous avez pu apprendre quelque chose en le lisant, même un tout petit détail ;).

Vous trouverez en annexe les sources avec quelques dizaines de liens variés. Pour vous guider si jamais vous souhaitez vous y plonger, j'y applique un petit code. Les pastilles orange indiquent la présence d'un document scanné, les pastilles noires accompagnent les autres sources. Deux lettres suivant la pastille indiquent la langue du document. Finalement, les images sont listées en Annexe 2.

Merci pour votre attention,

Méduse Spatiale, le 9 août 2019.