

Habiter la Lune, avenir ou fiction ?

La base lunaire « idéale » ?



HENNARD Benjamin

Directeur du mémoire : DUFRASNES Emmanuel

ENSAS 2019

Habiter la Lune, avenir ou fiction ?

La base lunaire « idéale » ?

HENNARD Benjamin

Directeur du mémoire : DUFRASNES Emmanuel

ENSAS 2019

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, Jean-Paul Wetzel, Sandro Varano et tout particulièrement Emmanuel Dufrasnes pour avoir encadré ce mémoire et m'avoir guidé pendant ces trois semestres.

L'ISU qui m'a permis d'avoir accès à son fond bibliothécaire, mais aussi aux étudiants et aux enseignants pour le temps et les renseignements qu'ils m'ont fournis lors du Moon Village Association Workshop et de la Moon Habitation ARCHES Master Class auxquels j'ai eu la chance de participer dans le cadre de ce mémoire. Et en particulier Danijela Stupar qui a été d'une aide capitale tout au long de ce travail.

Un grand merci à Ondrej Doule, Walter Olivier et Serge Gracieux qui ont pris de leurs temps pour discuter avec moi et me transmettre des références et des pistes de recherches, merci pour leur sympathie et leur rapidité de réponse.

Enfin, une pensée à mes amis qui m'ont relu et qui m'ont permis de renforcer la qualité de cet écrit.

Sommaire

Introduction.....	1
1 Etat de l'art.....	2
1-1 Motivations pour retourner sur la Lune ?.....	2
1-1-1 Besoins scientifiques.....	3
1-1-2 Coopération internationale.....	4
1-1-3 Exploration et colonisation de l'espace.....	7
1-1-4 Bénéfices sur Terre.....	8
1-2 La Lune et son environnement: avantages et inconvénients.....	9
1-2-1 La distance Terre-Lune.....	10
1-2-2 L'environnement lunaire.....	11
1-2-3 Le sol lunaire: le régolithe.....	14
1-3 La place de l'architecte sur la Lune.....	16
1-3-1 La lune domaine des ingénieurs.....	17
1-3-2 Des architectes se sont déjà penchés sur la question.....	18
1-3-3 L'architecture sera de plus en plus présente sur la Lune.....	22
2 Etude de cas.....	23
2-1 Méthode employée dans l'étude de cas.....	24
2-2 Critères de sélection.....	25
2-3 Analyse par critères et extraction des meilleures solutions.....	26
2-4 Résultats de l'étude.....	44
3 Perspectives futures.....	45
3-1 Proposition de la base idéale.....	46
3-2 Limites attendues de la base idéale.....	50
3-3 Conséquences pour la Terre.....	51
Conclusion et recommandations.....	53
Liste des abréviations.....	54
Bibliographie.....	55
Annexes.....	61

Introduction

Le dérèglement climatique, l'effondrement de la biodiversité, la propagation des déchets plastiques, la multiplication des zones mortes, la raréfaction de terres arables et des espaces naturels, la crise démocratique et l'accroissement des inégalités sont quelques-uns des défis qui rendent le futur de notre civilisation incertain. Alors que la Terre, c'est à dire, l'écosystème qui permet aux êtres humains de vivre semble de plus en plus voué à la destruction. Nous voyons apparaître dans le même temps des projets sérieux et de plus en plus faisable d'habitat plus ou moins autonome sur d'autre corps célestes. L'exploration et la colonisation humaine se sont toujours effectuées en trois phases successives. On peut considérer que la première phase d'exploration et d'habitat temporaires et d'ors et déjà achevée pour la Lune. La deuxième phase d'exploration approfondie et de mise en place d'avant-poste est sur le point de débiter. La troisième phase étant bien sûr l'installation d'une présence humaine permanente et autonome qui commerce avec la Terre. Il nous faut cependant être encore un peu patient puisqu'aucune mission habitée n'est prévue à ce jour et que des avancées technologiques sont encore nécessaires avant notre installation permanente. Peut-être que nous ferons sur cette voie des découvertes permettant d'inverser le cours des événements sur Terre. Mais il se peut aussi que devenir une espèce multi-planétaire soit le seul moyen pour l'espèce humaine de subsister au désastre écologique qui s'avance.¹

Etudions tout d'abord les raisons qui nous poussent à retourner sur la Lune dans l'objectif d'y établir une présence humaine permanente. Nous détaillerons par la suite sur les caractéristiques de la Lune, sur ses contraintes et ses avantages avant de nous poser la question de la place de l'architecture sur la Lune. Nous allons ensuite nous pencher sur des projets de base lunaires récents et tenter d'en tirer des leçons sur les méthodes à adopter et celles qu'il nous faut rejeter parce qu'elles sont soit inefficaces soit contre productives. Enfin, ces enseignements seront condensés en un projet de base lunaire idéale et nous détaillerons aussi les limites de cette base et les conséquences possibles pour la Terre de la mise en œuvre d'un tel projet.

Nous répondrons donc aux questions suivantes : Dans quelle mesure l'architecte a-t-il sa place sur la Lune ? Dans quelle mesure l'architecture peut-elle se déployer dans la construction lunaire ? A quoi ressemblera la base lunaire du futur ? Existe-il une base lunaire idéale ? L'objectif est de faire un mémoire utile pour les architectes, une sorte de mode d'emploi de la construction lunaire, afin que les architectes qui s'intéressent au sujet puissent en comprendre les enjeux, les contraintes et les différentes solutions.

¹ Servigne (Pablo), Stevens (Raphaël). Comment tout peut s'effondrer. 2015.

1 Etat de l'art (Dans quelle mesure l'architecte a-t-il sa place sur la Lune ?)

1-1 Motivations pour retourner sur la Lune ?

Commençons par nous poser la question du sens et de l'intérêt de retourner sur la Lune. C'est en effet une question qui revient souvent dans le grand public : A quoi bon dépenser tant de milliards dans l'espace alors que l'on peine à faire face sur Terre à des crises sociales, environnementales, humanitaires et démocratiques ? Cette question est juste et chacun peut l'entendre.

C'est pourquoi nous allons aborder ici les raisons qui poussent l'humanité à vouloir retourner sur la Lune. Il s'agit d'identifier les secteurs qui pourraient être directement impacté par des investissements et des avancées dans le domaine spatial. Mais aussi de considérer des enjeux plus globaux et de long terme comme la géopolitique mondiale. Libre à chacun de juger ensuite si l'investissement massif nécessaire à la colonisation de la Lune en vaut la peine.

1-1-1 Besoins scientifiques

La première phase d'exploration lunaire a été riche en avancées scientifiques. En effet, une masse énorme de recherche a dû être effectuée afin d'envoyer des hommes sur la Lune. Ces avancées ont permis en juillet 1969 à la mission Apollo 11 de déposer les deux premiers hommes sur la Lune. Mais la course à l'espace qui a précédé cet exploit a permis des avancées dans de nombreux domaines autres que le spatial. De plus, l'exploration de la Lune et dans une plus grande mesure la Station Spatiale Internationale (ISS) ont été des occasions de mener des expériences inédites qui ont permis de grands progrès dans des domaines aussi variés que la géologie, astronomie, la physique, la biologie, etc.

Dans ce cas pourquoi y retourner si l'on a déjà mené des expériences sur la Lune et si l'on en fait même actuellement à bord de l'ISS ? Il se trouve que les missions habitées sur la Lune ont été assez courtes puisque les missions Apollo 11 ,12 ,13 et 14 ne sont restés sur la Lune qu'un jour et demi et les missions Apollo 15 , 16 et 17 ont pu rester 3 jours chacune sur la sol Lunaire. Le record de durée sur la Lune hors du véhicule (EVA) est détenu par Eugene Cernan et Harrison Schmitt membre de Apollo 17 pour une durée de 22 heures 03 minutes et 57 secondes en trois sorties. Il reste donc énormément de choses à apprendre sur la Lune d'autant plus que les instruments scientifiques se sont améliorés sans cesse depuis la fin des missions lunaires en 1972. ²

De plus, l'Homme n'a jamais exploré la face cachée de la Lune. Or des scientifiques du monde entier s'intéressent maintenant à ce lieu pour la simple et bonne raison que cette face de la Lune qui tourne le dos continuellement à la Terre est par nature protégée des émissions d'onde en provenance de celle-ci. Cela permettra donc d'observer l'univers avec une précision et une netteté inégalable sur Terre. Cela peut s'avérer très intéressant pour les astronomes puisque c'est par l'observation de l'univers qu'ils tentent d'en percer les mystères. De plus, avoir un laboratoire sur la Lune permettra d'effectuer une quantité formidable d'expériences en condition de gravité réduite. Que ce soit des expériences sur la biologie, l'agronomie, l'ergonomie, la construction lunaire, la psychologie, la physiologie, la sociologie etc.³

² NASA. Garcia Mark . "About the Space Station: Facts and Figures".[en ligne]. [Consulté le 19 octobre 2017].

³ About MVA. Moon Village Association [en ligne]. [Consulté le 13 novembre 2017].

1-1-2 Coopération internationale

L'histoire de l'exploration spatiale débute par une compétition féroce entre le bloc de l'Ouest et le bloc de l'Est durant la guerre froide. C'est cette rivalité qui a poussé les gouvernements à investir massivement dans la course à l'espace. Le bloc de l'Est a envoyé le premier homme dans l'espace, Youri Gagarine le 12 avril 1961. Le bloc de l'Ouest réplique le 21 juillet 1969 avec Neil Armstrong devenant le premier Homme à marcher sur la Lune. Cependant depuis la fin de la guerre froide, la compétition n'est plus le moteur principal même si des puissances émergentes commencent à entrer sur le marché.⁴

Désormais la coopération entre les états est nécessaire à l'exploration spatiale. Ces investissements sont en effet très lourds et si les retombées technologiques et économiques sont très attendues, les accidents sont fréquents et très coûteux. Il faut donc mutualiser les moyens afin de permettre la pérennité des missions spatiales. La Station Spatiale Internationale (ISS) est un bon exemple de cette entraide internationale. Les modules assemblés qui forment l'ISS proviennent des agences spatiales des Etats Unis, de Russie, du Japon, du Canada et de l'Europe. Les astronautes qui y ont séjournés viennent de 17 pays différents. Les fusées qui assurent son ravitaillement sont russes, américaines et japonaises. Cette coopération crée des intérêts communs entre les différentes nations qui ont alors de bonnes raisons de s'entendre avec diplomatie les uns avec les autres sous peine de détruire leur investissement commun. On peut donc dire que la coopération internationale imposée par l'échelle du spatial et ses couts exorbitants participe à la paix mondiale même modestement.

Le défi actuel est d'intégrer les nouveaux acteurs de l'espace, les compagnies privées tel que Space X, Orbital, Blue Origin, Boeing, Bigelow Aerospace, Virgin Galactic et bien d'autres. Ces nouveaux acteurs ne sont pas du goût de tout le monde puisque es agences publiques voient là un risque pour leur pérennité. Ces acteurs sont cependant peut-être la solution aux défis actuels. En effet, l'installation d'une base sur la Lune est une entreprise gigantesque que les agences spatiales publiques repousse à plus tard par manque de moyens et de recherche. Or ces nouvelles agence spatiales privées ont des moyens importants et investissent beaucoup d'argent dans la recherche. Il faut donc créer des passerelles entre le publique et le privé et trouver de nouvelles formes d'organisation qui pourrai permettre aux divers acteurs de travailler ensemble dans un but commun.

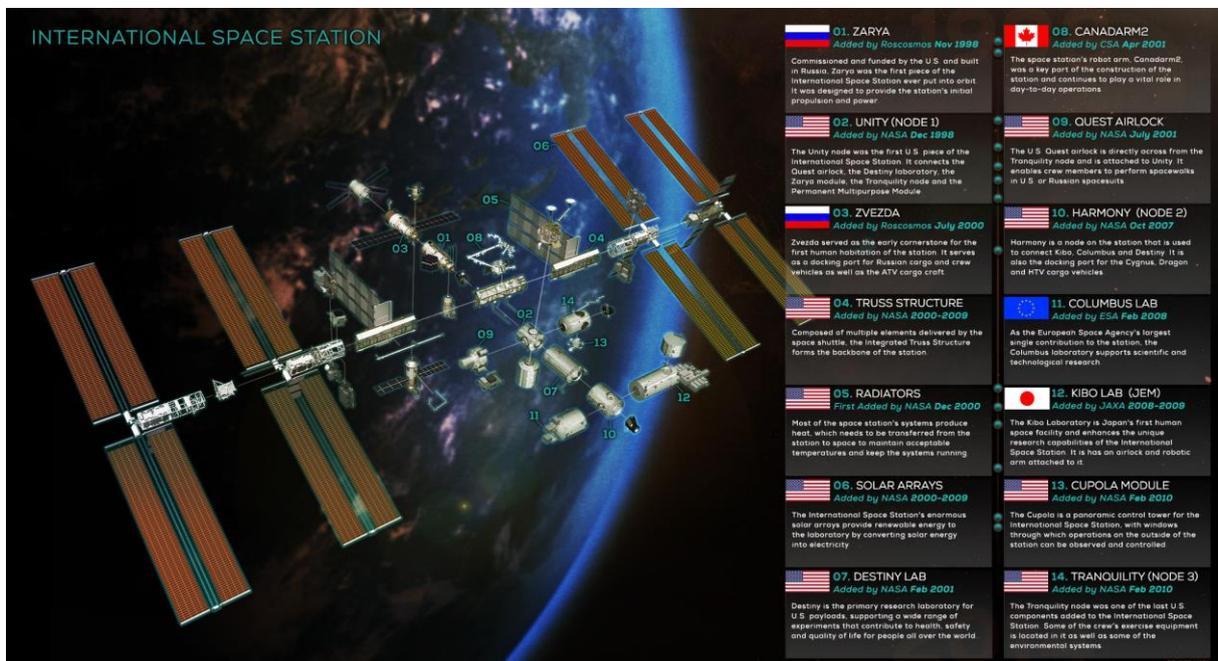
⁴ Clervoy (Jean-François), Lehot (Frank), Histoire de la conquête spatiale, Paris, 30 mai 2017

C'était justement le sujet de l'Internationale Moon Village Workshop auquel j'ai participé en 2017 à l'ISU de Strasbourg. Cet événement organisé par la Moon Village Association regroupe des acteurs du monde entier qui s'intéresse à la mise en œuvre d'une base humaine permanente sur la Lune. On pourrait penser à priori que ce forum serait l'occasion d'échanger sur les nouvelles technologies qui pourrait permettre de réaliser cet utopie. Cependant, même si quelques intervenants ont présenté leurs inventions et les résultats de leurs expérimentations, l'essentiel n'était pas là. Il s'agissait plus de réunir au même endroit et en même temps des professionnels passionnés par le sujet afin de tisser des relations. En effet, le but de ce workshop n'était pas de réaliser un design de base spatiale mais de se faire rencontrer les différents acteurs afin qu'ils puissent s'entraider dans leur entreprise commune: coloniser la Lune. Il s'agit donc d'échanger des savoirs faires entre des entreprises et des institutions comme la NASA et l'ESA et de les mettre au service d'une cause commune.⁵

⁵ About MVA. Moon Village Association [en ligne]. [Consulté le 13 novembre 2017].



Nombre d'astronautes envoyés dans l'ISS par pays depuis sa création. NASA



Origine des différents modules de l'ISS. National Geographic

1-1-3 Exploration et colonisation de l'espace

L'idée d'explorer l'inconnu est vieille comme le monde mais c'est en Europe qu'elle s'est développée tel qu'on la connaît aujourd'hui. Avec la découverte du nouveau monde et sa colonisation, des cartes de plus en plus précises de la Terre voient le jour. L'exploration et surtout la colonisation devient alors une activité rentable qui constitue même d'énormes fortunes. C'est encore dans cette optique du profit que les agences spatiales privées fonctionnent actuellement.

En effet, aujourd'hui, la Terre est entièrement cartographiée et il ne reste que très peu d'espaces vierges de la présence de l'Homme. Il n'y a plus de nouvelles terres à exploiter et à coloniser. Or le modèle actuel de surconsommation est toujours plus gourmand en ressources d'autant plus que la population mondiale augmente et pourra atteindre 11 milliards en 2100. De plus, le modèle de surproduction et de surconsommation se répand partout sur le globe et particulièrement dans les pays émergents. Cette surconsommation des ressources associée à la pollution n'est pas sans conséquences. Le terme de "dette écologique" apparaît en 1985 et désigne ce qui a été prélevé à la nature et qu'elle ne peut reconstituer. En 2018 le « jour du dépassement de la Terre » ou « Earth overshoot day » en anglais était le 8 août. C'est à dire qu'après cette date tout ce qui est prélevé sur la nature ne sera pas régénéré l'année suivante. L'humanité consomme donc aujourd'hui l'équivalent de 1,6 planète. A cause de la croissance démographique, nous aurons besoin en 2050 de 2 planètes si l'on garde nos habitudes de consommation.⁶

L'écosystème de la planète Terre ne survivra pas à cette surexploitation très longtemps. Il nous faut donc d'urgence réduire notre impact sur l'environnement mais cela risque de ne pas s'avérer suffisant. Une possibilité reste de coloniser de nouveaux territoires en dehors de la planète Terre. Même si cela peut encore sembler utopique, il se peut qu'un jour cette solution soit adoptée afin de permettre l'expansion de l'humanité tout en préservant la Terre. Il faut tout de même que les bases extraterrestres soient autonomes et puissent se développer sans aide de la Terre si l'on veut que cette méthode soit efficace. On peut même imaginer que des ressources soient extraites des corps célestes à proximité de la Terre puis ramener à sa surface afin d'être utilisés. Ces projets, tout comme la colonisation de l'espace restent des projets à très long terme car le prix des transports spatiaux est actuellement bien trop élevé pour pouvoir réaliser quoi que ce soit à grande échelle.

⁶. Servigne (Pablo), Stevens (Raphaël). Comment tout peut s'effondrer. 2015.

1-1-4 Bénéfices sur Terre

Tout d'abord, l'humanité bénéficie déjà de nombreuses avancées issues de la recherche dans le domaine spatial. Parmi les exemples qui sont entrés dans l'histoire on retrouve évidemment la communication par satellites qui a largement contribué à démocratiser l'usage d'internet et du téléphone portable, surtout dans les pays en développement. Le GPS, mis en place par les américains dans les années 70 à des fins militaires, a aussi été un apport précieux pour l'humanité lors de sa démocratisation dans les années 1980. La climatologie, la météorologie et la cartographie ont connu des avancées considérables grâce à l'arrivée des satellites. De nombreux matériaux ont également été développés du moins en partie pour l'exploration spatiale. On peut penser à l'exemple désormais célèbre des couvertures de survie, initialement conçu pour contrôler les différences thermiques pour les vaisseaux spatiaux, on s'en sert maintenant pour les humains en cas de déperdition de chaleur. Les panneaux solaires existaient avant le début de l'ère spatiale mais l'intérêt du secteur spatial pour la production d'énergie à partir de rayonnements solaires a considérablement accéléré la recherche et les panneaux solaires les plus performants sont aujourd'hui produits pour le secteur spatial.⁷

Cette perméabilité technologique entre le domaine spatial et les besoins terrestre a perduré jusqu'à aujourd'hui. Les enjeux actuels nous poussent à chercher des solutions nouvelles et le domaine spatial pourra bien y contribuer. En effet, les champs de recherche actuels du domaine spatial et environnemental s'entrecroisent sur des sujets clés comme la compréhension et la reproduction d'écosystèmes stables et autonomes. Les sciences de la vie et l'écologie investissent cette question depuis leur apparition mais la recherche spatiale s'y intéresse de plus en plus avec pour objectif de créer un système de survie bio-régénératif ce qui permettrait d'étendre la durée des missions et à terme la mise en place d'une base autonome sur la Lune. L'impression 3D est également un domaine d'étude qui intéresse autant le domaine spatiale que le reste du monde. Même si cette technologie est aujourd'hui rudimentaire, elle pourrait permettre à terme de remplacer une grande partie de la main d'œuvre du secteur industriel mais aussi la construction d'habitat sur la Lune où l'impression de pièces de rechange en cas de problème technique. Les apports pour la Terre sont donc déjà présents dans tous les aspects de notre vie et les découvertes futures ont le potentiel de changer encore plus radicalement le destin de l'humanité.⁸

⁷ Clervoy (Jean-François), Lehot (Frank), Histoire de la conquête spatiale, Paris, 30 mai 2017

⁸ Meyer (Claire). Architecture extra-terrestre et ses apports pour nos villes sur Terre. Ecole Nationale, Supérieure d'Architecture de Strasbourg, 2017

1-2 La Lune et son environnement: avantages et inconvénients

La lune est un environnement hostile à toute forme de vie connue. L'Homme est le seul être vivant à l'avoir visité et habiter, même temporairement. C'est aussi l'espèce qui s'adapte le mieux aux environnements extrêmes sur Terre. Seulement, survivre dans ces conditions n'est pas une mince affaire, d'autant plus s'il s'agit d'y habiter de façon permanente.

Cependant cet environnement, si inhospitalier soit-il, possède des caractéristiques qui, si nous les exploitons, peuvent nous permettre de vivre sur place.

Etudions maintenant l'environnement lunaire afin d'en déterminer les contraintes auxquelles il va falloir se soumettre et les possibilités qu'il va falloir exploiter si l'on veut coloniser ce corps céleste.

1-2-1 La distance Terre-Lune

La première contrainte à l'installation de l'Homme sur la Lune est la distance qui nous sépare de notre satellite naturel. Elle varie entre 356 700 km au périhélie et 406 300 km à l'apogée. C'est certes le corps céleste le plus proche de la Terre dans le système solaire mais cette distance reste considérable si on la compare au diamètre de la Terre: 12 742 km. La durée du trajet n'est pas vraiment un problème comme pour Mars, la plus grande difficulté est la quantité d'énergie qu'il faut fournir pour quitter l'orbite terrestre. En effet, pour atteindre la Lune, il faut déjà quitter la Terre. Or, la gravité terrestre étant importante, il faut dépenser une énorme quantité d'énergie pour la quitter et atteindre une orbite lunaire. Cela explique que près de 80% de la masse d'une fusée lui sert à quitter l'orbite terrestre. Le coût pour envoyer 1kg d'équipement dans l'espace est aujourd'hui d'environ 200 000 €. ⁹ C'est le principal frein à l'exploration spatiale même si SpaceX a réussi ses premiers test pour des lanceurs réutilisables ce qui devrait permettre de réduire les coûts à moyen terme. Ces fusées utilisent toutefois le même principe que les précédentes et consomment aussi une très grande quantité d'énergie pour décoller.

Cette contrainte peut sembler insurmontable puisque la distance qui nous sépare de la Lune n'est par essence pas modifiable. De plus la propulsion des lanceurs qui nous permettent de quitter la Terre n'ont pas connu de bond technologique ces dernières années. Il existe cependant des projets qui résolvent en partie le problème du coût du transport. La création d'un ascenseur spatial nous permettra en théorie d'acheminer des cargaisons en orbite terrestre pour une fraction du coût actuel. Ce projet reste cependant utopique car même si en théorie on peut relier la Terre à un satellite artificiel en orbite grâce à un câble, aucun matériau connu ne pourrait supporter son propre poids sur une telle distance. De plus, les conséquences en cas de chute du câble seraient catastrophiques. Enfin, l'investissement de départ est énorme et peu de pays pourra se permettre une telle dépense même si les retombées économiques semblent très prometteuses.

⁹ Doule (Ondrej), Architecture universelle série éducative, Space Innovations L.L.C. Melbourne. 2017

1-2-2 L'environnement lunaire

Le cycle solaire sur la Lune dure 4 semaines à savoir 2 semaines de jour puis 2 semaines de nuit. Si bien que le solaire serait une source d'énergie assez mal adaptée puisqu'il faudrait la stocker pendant 2 semaines. Cependant, il existe des montagnes près des pôles qui ne sont quasiment jamais dans le noir et que l'on appelle des pics de lumières éternelles. S'y installer permettrait donc de profiter d'un ensoleillement quasiment constant et donc d'une énergie solaire constante.¹⁰

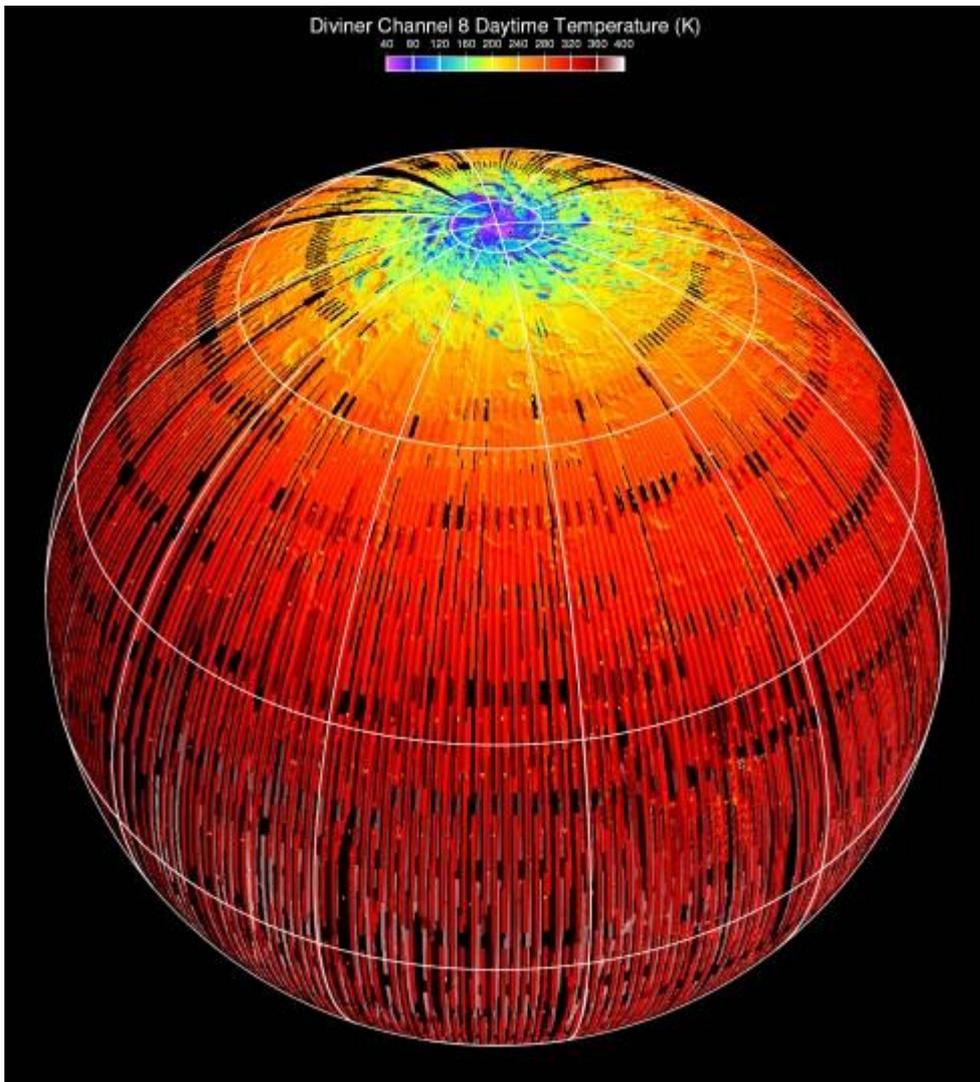
Les températures observées sur la Lune sont extrêmes au vu du climat sur Terre. En effet, la Lune ne possédant pas d'atmosphère, elle est exposée au vide spatial et aux rayonnements directs du soleil. Cela entraîne des écarts importants de température entre les zones exposées aux rayonnements solaires et celles qui sont dans l'ombre. Cet écart est généralement compris entre -173°C et $+127^{\circ}\text{C}$. La technologie dont nous disposons actuellement résiste jusqu'à -50°C or la Lune possède près de ses pôles des cratères qui ne sont jamais exposés au soleil. Ils connaissent parmi les températures les plus froides de notre système solaire à savoir -250°C .¹¹

La gravité est un concept qui englobe 4 types de gravité observable. La gravité terrestre notée G et que l'on exprime par une accélération de $9,81\text{ m/s}^2$ est le premier type de gravité. Viens ensuite la microgravité, notée mG , qui correspond à une chute libre ou à l'apesanteur. L'hypogravité, hG , se situe entre la gravité terrestre et la microgravité. L'hypergravité survient lorsque G est supérieur à $9,81\text{ m/s}^2$. La surface lunaire se situe en hypogravité puisque la force s'y applique et de $1/6 G$. L'hypogravité peut avoir des effets néfastes pour les astronautes à long terme. On sait d'ores et déjà grâce notamment aux expériences menées dans l'ISS que l'absence ou la diminution de la gravité entraîne une perte musculaire et une décalcification accélérée des os. Il y a également des risques pour les astronautes qui reviennent ensuite sur Terre. Ils sont généralement très affaiblis malgré les 2 heures de sport quotidiens et l'augmentation soudaine de la pression dans le cerveau peut entraîner des troubles de la vision pendant plusieurs mois. Cependant, l'hypogravité signifie aussi que les structures que nous construirons sur la Lune peuvent être beaucoup plus légères que sur Terre et donc plus économes en matériaux. Enfin l'hypogravité nous impose de repenser complètement notre rapport au corps dans l'architecture.¹²

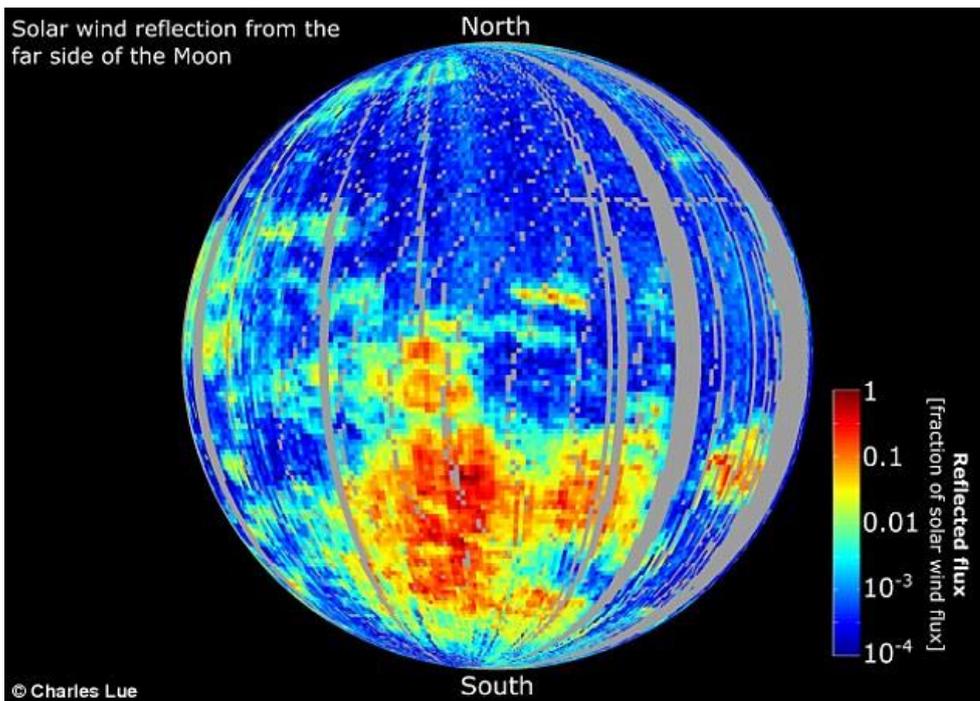
¹⁰ ESA, Lunar Resources, Illumination [page consultée le 23 octobre 2017]

¹¹ Aranya (S.) et al, Moon, Badescu (Viorel), 2012

¹² Doule (Ondrej), Architecture universelle série éducative, Space Innovations L.L.C. Melbourne. 2017



Carte thermique globale de la lune pendant la journée. NASA



Carte de réflexion du vent solaire sur la face cachée de la Lune. NASA

Tous les standards qui peuvent s'appliquer sur Terre ne marchent pas forcément sur la Lune. Les escaliers par exemple ne peuvent être dimensionnés de la même manière en 1 G et en 1/6 G. Même si certaines vidéos des missions Apollo nous ont permis d'étudier la marche et la course en 1 /6 G, aucun architecte n'a pour l'instant vécu sur la Lune et il nous reste beaucoup à découvrir sur l'ergonomie et l'architecture en hypogravité.¹³

Un autre problème spécifique à la Lune est le vent solaire. En effet les particules provenant du soleil ne sont filtrés par aucune atmosphère, du fait de la trop faible gravité sur la Lune, et "courent" à la surface de la Lune pouvant occasionner des dommages temporaires à permanent dans les circuits électriques. Ces radiations sont également nocives pour l'Homme à long terme. A ces particules s'ajoute le rayonnement direct de l'univers qui nous parvient des autres systèmes solaires. Ces radiations sont à la fois dangereuses pour les humains mais pourrait nous permettre de fabriquer de l'énergie à bas coût grâce à des panneaux photovoltaïques ou à des centrales thermiques solaires qui exploitent la chaleur de ces rayonnements

L'absence d'atmosphère a également pour conséquence la chute fréquente de corps célestes sur la Lune, ce qui a modelé son paysage jusqu'à aujourd'hui. Même les plus petits éléments comme les micros météorites parviennent à atteindre la surface de la Lune alors que sur Terre, la plupart de ces météorites sont désintégrés dans l'atmosphère donnant lieu à des étoiles filantes puis à des débris que l'on retrouve un peu partout à la surface du globe. Ces corps céleste, même de petite taille se déplacent avec une vitesse telle qu'ils libèrent une énergie immense à l'impact. Une simple micrométéorite peut, si elle entre en collision avec une construction lunaire, créer une brèche dans la base et donc amener à une dépressurisation du module touché. Cependant, ces impacts fréquents ont également un aspect positif puisqu'ils sont responsables de la présence de la plupart des matériaux rares à la surface lunaire. De plus, il est possible de se prémunir des micrométéorites soit en installant une base dans un tunnel de lave qui nous protège alors à la fois des météorites et des radiations soit en recouvrant la base d'une épaisse couche de régolithe.¹⁴

¹³ Doule (Ondrej), Architecture universelle série éducative, Space Innovations L.L.C. Melbourne. 2017

¹⁴ Aranya (S.) et al, Moon, Badescu (Viorel), 2012

1-2-3 Le sol lunaire: le régolithe

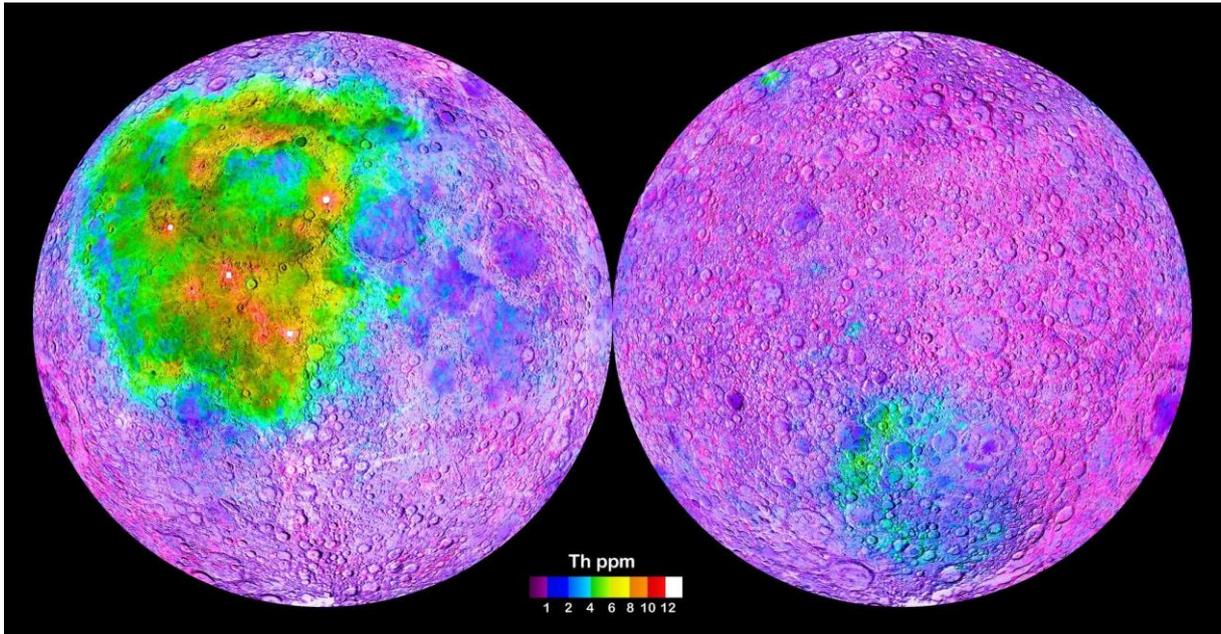
Etant donné que la Terre et la Lune étaient avant un seul même corps astral, ils partagent à peu de choses près les mêmes éléments. Toutefois D'après le professeur Crawford "la minéralogie de la lune est plus simple que sur Terre [...] pas d'eau, de biologie, de tectonique des plaques"¹⁵. Il identifie clairement deux types de sol Lunaire: les zones claires constituées d'anorthosite dont le principal minéral est le plagioclase (Ca,Al,Si,O) et les zones sombres composé de roches dont les minéraux sont l'olivine et le pyroxène (Mg,Fe,T). On trouve également sur la Lune du calcium (K), des éléments du groupe des terres rares et du phosphore (P) qui l'on désigne sous le terme Krep. On y inclut le calcium, le phosphore mais aussi l'uranium et le thorium. Le Krep est inégalement réparti sur la surface Lunaire et on le trouve essentiellement sur la partie ouest de la face visible de la Lune. Le professeur Crawford fait également allusion à la présence de météorites riches en fer, en titane et autres éléments rares à la surface de la Lune.¹⁶

Ce mélange hétérogène d'éléments qui constituent la croûte Lunaire est appelé régolithe. Elle est recouverte par de la poussière Lunaire qui est constituée de très petits éléments très abrasifs, qui peuvent être chargés. Cette poussière est soulevé à chaque mouvement à la surface de la Lune et peuvent rester en suspension très longtemps du fait de l'hypogravité. Ces particules endommagent les tenues des astronautes et toutes les surfaces qui y sont exposées. Elles sont électriquement chargé par les particules solaires et sont très sensible aux champs électromagnétiques. Les solutions qui ont été trouvées pour l'instant sont l'utilisation de serviettes humides, de gaz soufflé ou encore d'un système électrique antiadhésif afin de limiter au maximum la contamination de l'espace de vie par ces poussières.

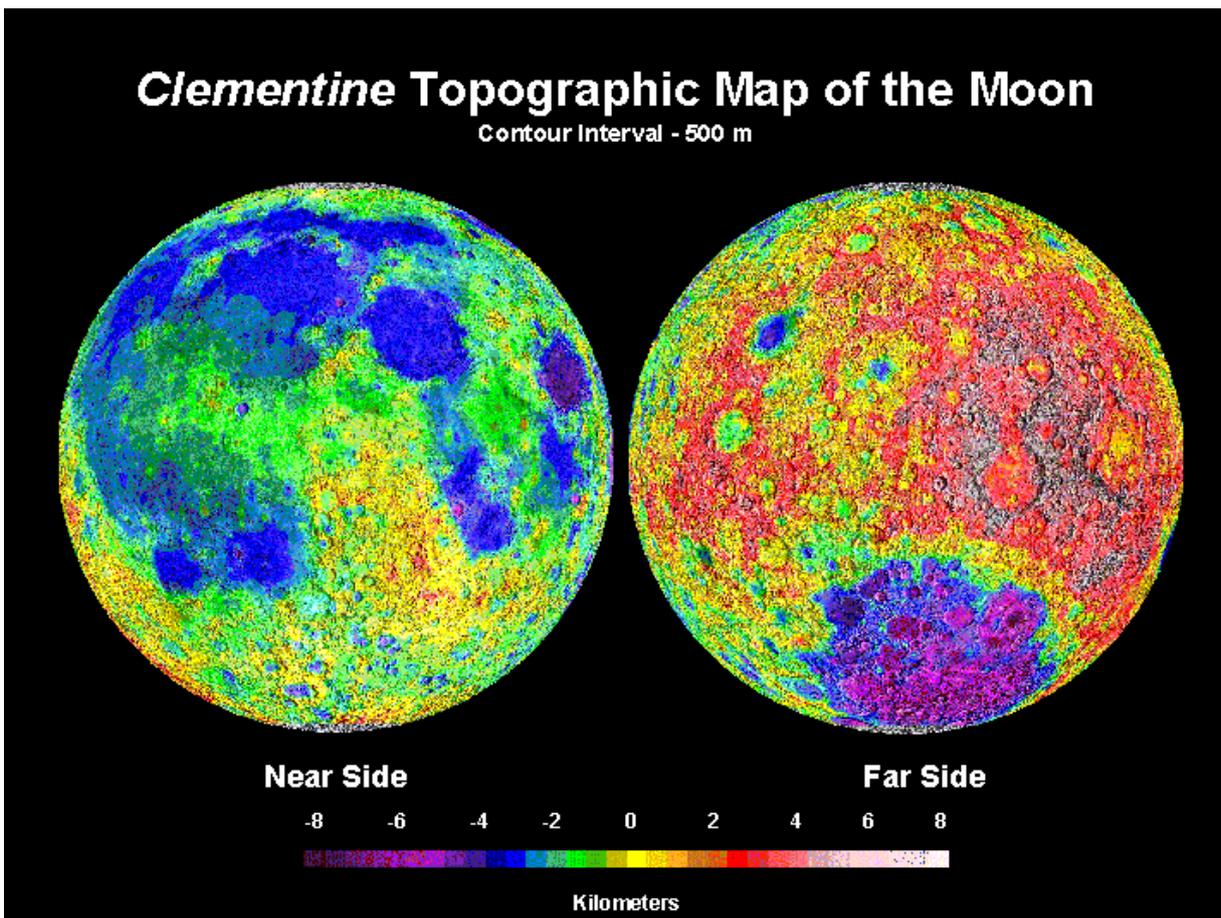
Comme on l'a vu précédemment, on peut se servir du régolithe pour protéger une éventuelle base lunaire des radiations et des micrométéorites en la recouvrant d'une épaisse couche de ce matériau qui absorbe la plupart des radiations. Mais il est également possible de construire des bâtiments à partir de régolithe grâce à la technologie de l'impression 3D. Il a déjà été démontré qu'il est possible de fabriquer du béton à base de régolithe et la présence de métaux dans le régolithe laisse entrevoir un avenir où il serait possible d'imprimer en 3D avec des matériaux locaux tous les objets et outils nécessaire à la vie sur la Lune.

¹⁵ Traduit par l'auteur

¹⁶ ESA, Lunar Resources, Metals and rare Earth elements, [page consultée le 21 octobre 2017]



Concentrations de KREEP sur la Lune, cartographiées par Lunar Prospector.



Carte topographique de la Lune. Lunar and Planetary Institute

1-3 La place de l'architecte sur la Lune.

La Lune et le spatial sont des domaines où la place de l'architecte ne va pas de soi. Traditionnellement, c'est le terrain d'action des scientifiques, des ingénieurs et des auteurs de sciences fiction. Les architectes qui se sont intéressés à la question ont souvent été taxés d'idéalistes ou de doux rêveurs.

Cependant, comme vu précédemment, l'Homme a de bonnes raisons de retourner sur la Lune et il y a fort à parier qu'une présence humaine permanente sera établie sur la Lune d'ici la fin du siècle. L'Homme va donc habiter la Lune et, dès lors, l'architecture lunaire prendra de l'importance. Il n'est plus question aujourd'hui de fiction mais bien de préparer l'avenir afin de répondre le plus efficacement possible aux défis que pose la colonisation lunaire.

Nous verrons tout d'abord en quoi la Lune est toujours à ce jour le domaine de prédilection des ingénieurs. Puis étudierons l'évolution de l'habitat spatial et lunaire de façon chronologique d'Apollo à l'ISS. Enfin, nous verrons en quoi l'architecture sera de plus en plus présente sur la Lune dans les années à venir au travers de la prolifération de propositions de bases lunaires et de théories architecturales lunaires.

1-3-1 La lune domaine des ingénieurs

Dans le domaine spatial en général, les ingénieurs ont une place prépondérante du fait de leur capacité à identifier et résoudre des problèmes techniques. Les ingénieurs sont en effet parfaitement formés pour pouvoir concevoir un lanceur ou un satellite. Il faut bien sûr également des techniciens et des ouvriers d'un très haut niveau de formation pour les construire réellement. La profession d'architecte quant à elle n'est que très rarement sollicitée puisque très peu de projets d'habitats spatiaux ou lunaires sont construits à l'exception de module d'expérimentation comme le SHEE.

De plus, le spatial est un domaine très technique qui nécessite une transdisciplinarité dans de nombreux domaines. En effet, l'espace n'est pas un environnement propice à la vie et il est donc très complexe d'y faire vivre des êtres humains. L'accumulation des contraintes techniques a conduit à ce que l'humain devienne la variable d'ajustement des machines qui garantissent sa survie. La grande majorité des recherches effectuées sur l'habitat lunaire se font dans des domaines scientifiques très pointus à destination d'experts dans le domaine concerné.

L'absence des architectes dans le domaine spatial peut également s'observer par le langage. Dans le domaine spatial, on entend souvent architecture comme architecture de système qui est un domaine d'ingénierie et d'informatique. Cet abus de langage est révélateur du faible poids de l'architecture dans l'exploration spatiale.

1-3-2 Des architectes se sont déjà penchés sur la question

Des habitats extra-terrestres ont déjà été construits dans le passé et certains d'entre eux ont même été pensés, du moins dans leur agencement intérieur par des architectes. Dressons un rapide historique de l'évolution de l'habitat spatial et lunaire d'Apollo à l'ISS.

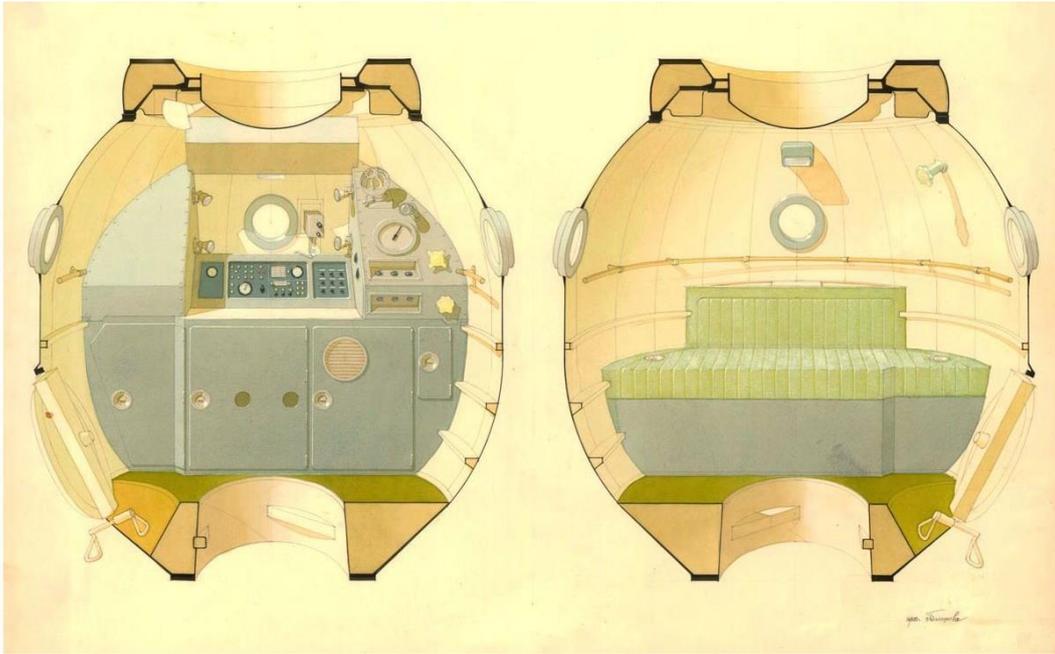
Le premier habitacle extra-terrestre habité par un humain, Youri Gagarine, le 12 avril 1961 fut Vostok. C'est tout simplement le cockpit de la fusée qui sert d'habitable temporaire.

La mission Apollo parvient le 21 juillet 1969, avec Neil Armstrong, à poser le premier Homme sur la Lune. C'est encore une fois le cockpit du module lunaire qui sert d'habitat avec toutefois l'apparition de sanitaires rudimentaires et de hamacs déployables servant de couchage.

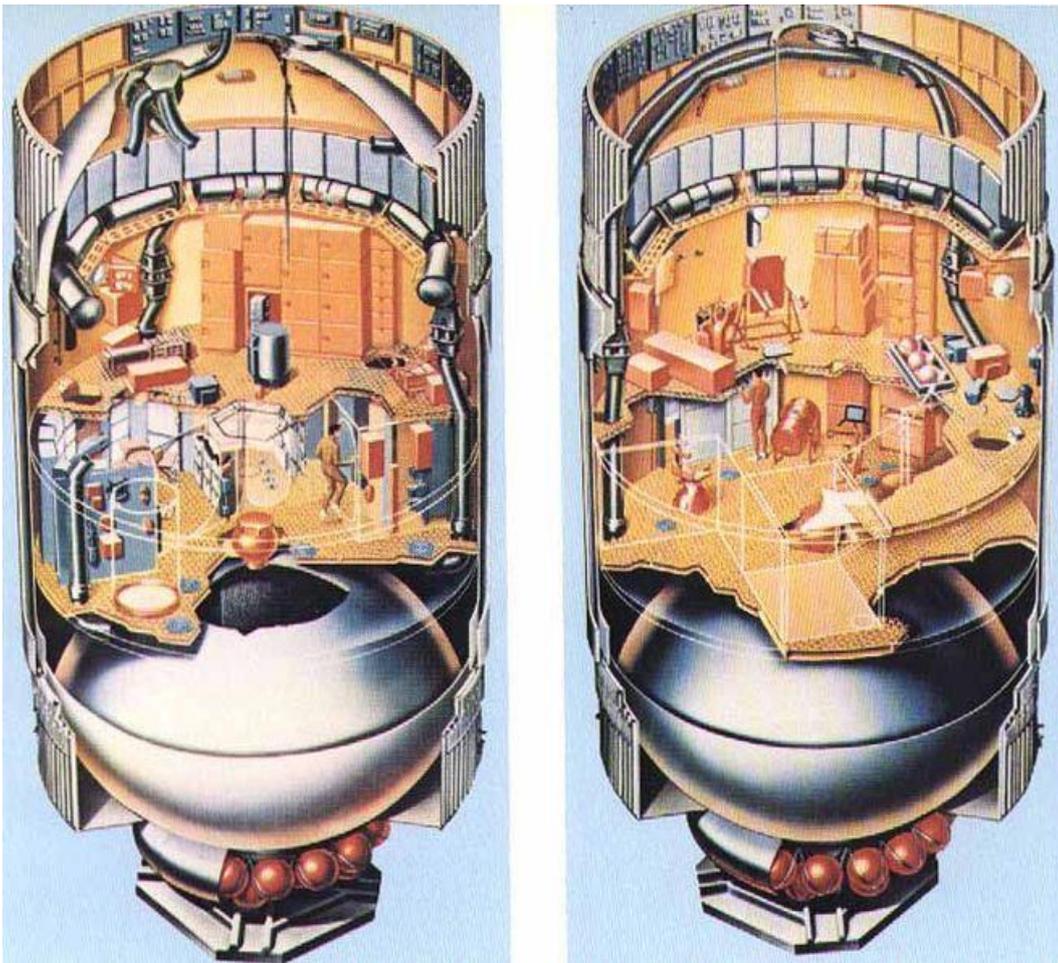
Puis, de 1971 à 1991, l'URSS met en place Saliout, un programme de station spatiale habitée en orbite terrestre basse avec un but tantôt militaire, tantôt civil. Au total, 7 stations Saliout seront déployées sans changements majeurs dans la conception. Les stations avaient une capacité de 3 astronautes dans un module cylindrique d'environ 23 m sur 4 m de diamètre pour un poids entre 20 et 25 tonnes. Une attention toute particulière est donnée à l'agencement intérieur. Il est confié à Galina Balashova, une architecte russe formée à l'Institut d'architecture de Moscou. Elle s'attache à recréer dans son design un sens du sol et du plafond. Elle réalise des vues en aquarelle de ses intérieurs où se mêlent futurisme et impression de quotidien terrestre. Les parois sont peintes de couleurs pastel et le sol est toujours plus foncé que le plafond dans le but de faciliter l'orientation.¹⁷

Les Etats-Unis rattrapent leur retard en 1973 avec la station Skylab qui sera opérationnelle jusqu'en 1979. Cette station est plus volumineuse que les stations Saliout avec des dimensions cylindriques de 26 mètres sur 6.6 mètres de diamètre pour un poids de 77 tonnes. L'agencement intérieur est confié à Raymond Loewy, designer industriel. Il implémente pour la première fois une différenciation des espaces dans la station avec des cabines de repos individuels, un espace dédié à l'hygiène, un espace de travail et un lieu de vie où l'on prend les repas. L'intérieur est moins coloré que celui des Saliout et l'orientation est donnée plus par le mobilier que par un code couleur.

¹⁷ Meyer (Claire). Architecture extra-terrestre et ses apports pour nos villes sur Terre. Ecole Nationale, Supérieure d'Architecture de Strasbourg, 2017



Galina Balashova : Schéma de couleur pour l'intérieur de Soyuz Orbital 1969



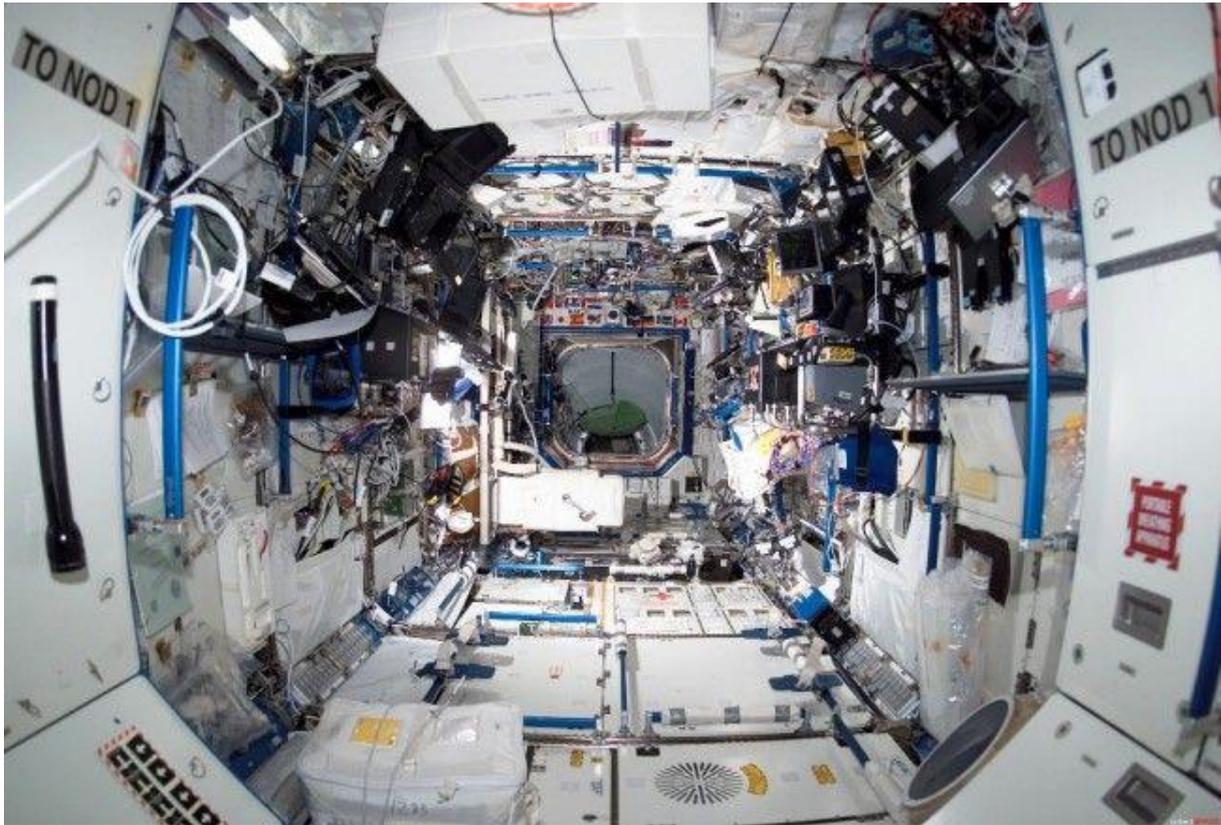
NASA : Schéma de couleur pour l'intérieur de Skylab 1972

La station MIR Mise fut assemblée en orbite entre 1986 et 1996 et détruite volontairement le 23 mars 2001. Tout d'abord station soviétique puis première station spatiale internationale après 1991, Mir a été la première station spatiale composée de plusieurs modules. Initialement prévu pour 2 astronautes, la station dispose de deux « chambres » alors qu'elle accueillera jusqu'à 6 membres d'équipage. La station complète est composée de 6 modules assemblés en T offrant un volume utile d'environ 380 m² pour un poids de 135 tonnes. L'intérieur mêle couleurs pastel et mobilier futuriste avec une différenciation des espaces comme dans Skylab.

En 1998 débute la construction de l'ISS (International Space Station) ou SSI en français (Station Spatiale Internationale). La construction de cette station orbitale regroupe alors seize nations : les États-Unis, onze États européens, le Canada, le Japon, le Brésil, la Russie. Avec un total de 6 modules et trois nœuds pour un volume de 900 m³ et une masse d'environ 400 tonnes, l'ISS est le plus grand satellite artificiel construit par l'Homme. Sur les 6 modules, seulement 2 ont des fonctions de vie et les 4 autres sont des laboratoires. La conception de l'aménagement intérieur débute en 1983 au centre spatial Johnson où un groupe interdisciplinaire est créé. Leur rôle est de créer un intérieur le plus ergonomique possible tout en permettant une mise à niveau des équipements et l'entretien des modules. La durée de vie de la Station est estimée à l'époque à 30 ans. Il faut donc que les équipements et les « meubles » puissent être changés facilement ce qui suppose une certaine modularité et la mise en place de standards de taille. Plusieurs dispositions sont étudiées avec les équipements rassemblés au centre, ou disperser le long des parois de façon plus ou moins symétrique. La solution finalement adoptée présente des modules tous de taille identiques répartis symétriquement sur les parois laissant un carré central libre pour la circulation. Les gaines sont situées dans les coins en triangle entre les équipements et la coque. La Cupola est l'un des derniers modules à avoir été ajouté à l'ISS il est lancé le 8 février 2010 et attaché au module Tranquility. La fenêtre principale de 80 cm de la coupole est la plus grande jamais utilisée dans l'espace à ce jour. Celle-ci est entourée de 6 fenêtres de plus petites dimensions Le module est équipé de stations de travail et de volets pour protéger ses fenêtres des dommages causés par les micrométéorites. C'est d'après les astronautes qui y ont séjourné la meilleure place dans l'ISS et c'est à cet endroit qu'ils passent l'essentiel de leur temps libre.¹⁸

Au fil du temps, les habitats spatiaux ont gagné en taille en autonomie, en ergonomie mais aussi en confort même si celui reste limité aujourd'hui même dans l'ISS où l'abondance d'instruments scientifiques rend difficile la lecture de l'espace.

¹⁸ Clervoy (Jean-François), Lehot (Frank), Histoire de la conquête spatiale, Paris, 30 mai 2017



Vue intérieur de l'ISS, ESA, 2014



Tracy Caldwell Dyson regardant la Terre depuis la Cupola de l'ISS, ESA, 2010

1-3-3 L'architecture sera de plus en plus présente sur la Lune

Comme nous l'avons vu précédemment, la Lune est à nouveau au centre de l'attention de nombreux acteurs du domaine spatial mais pas que. De plus en plus d'architectes se mettent à explorer la question de l'architecture hors des limites terrestres que ce soit par une approche théorique ou pratique.

La pensée et la littérature sur l'architecture spatiale ne date pas d'hier mais leur actuelle prolifération est révélatrice d'une nouvelle ère de l'exploration spatiale qui arrive. Des architectes tel que Susmita Mohanty élaborent de nouvelles théories architecturales concernant l'espace. Elle a mis au jour une nouvelle discipline architecturale appelée Trans-gravity. L'architecture spatiale se décline pour elle en 3 genres. Le premier genre est le Voyage de l'esprit qui correspond aux utopies, à la science-fiction que l'on peut voir dans la culture populaire. Le deuxième genre est l'architecture Man-in-a-can qui correspond aux habitats extraterrestres qui ont été construits jusqu'ici et que nous avons étudiés dans la sous-partie précédente. Il s'agit en réalité plus de compartiments de fusées habitables que d'habitats à proprement parler. Les stations sont certes devenues plus volumineuses mais le principe d'agencement et le programme d'architecture sont restés largement inchangés. Le troisième genre, Trans-gravity, est celui qui commence à émerger depuis quelques années. On peut résumer cette approche comme la compréhension de l'architecture spatiale comme la continuité de l'architecture terrestre. Cette approche est développée par des architectes qui n'ont pas forcément de diplômes dans le domaine spatial mais qui investissent ce sujet avec les mêmes méthodes de travail et d'analyse que sur Terre. Ce rapprochement est aussi rendu possible par la versatilité des architectes contemporains et par les thématiques communes entre les villes sur Terre et dans l'espace. On peut par exemple penser à la recherche d'une plus grande autonomie et résilience qui est nécessaire dans l'espace et qui sera bientôt impératif sur Terre pour faire face aux conséquences du dérèglement climatique.

Cette mouvance est portée par de grandes agences d'architecture telle que Foster + Partners qui conçoit le projet Lunar Habitation en collaboration avec l'ESA en 2012. Xavier De Kestelier, associé et responsable du groupe de modélisation, revient ici sur leur conception de l'architecture lunaire : « En tant qu'agence [d'architecture], nous sommes habitués à concevoir pour des climats extrêmes sur Terre et à exploiter les avantages environnementaux liés à l'utilisation de matériaux locaux et durables - notre habitation lunaire suit une logique similaire. »¹⁹

¹⁹ « Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », Press of Foster & Partners, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne]. [Consulte en avril 2017],

2 Etude de cas (A quoi ressemblera la base lunaire du futur ?)

Nous avons jusqu'à présent dressé un portrait rapide de l'architecture spatiale et lunaire au travers des trois questionnements qui nous ont guidés jusqu'ici : Pourquoi retourner sur la Lune ? Quels sont les avantages et inconvénients de l'environnement lunaire ? Quel est la place de l'architecte sur la Lune ?

Penchons-nous maintenant sur des cas plus précis de projets de bases lunaires. Cette étude de cas repose sur l'étude comparée de 18 projets récents de bases lunaires qui ont été présélectionnés en fonction de la disponibilité des informations et de la pertinence des projets. Tous ces projets ont déjà beaucoup à nous apprendre individuellement mais l'enjeu de cette étude est de chercher à montrer qu'en les comparant on peut mettre à jour des nouvelles connaissances. La plupart de ces projets n'ont jamais été réalisés et proviennent de concours ou de workshop étudiants. Malgré une volonté d'homogénéiser la sélection de projets afin de pouvoir plus facilement établir des parallèles entre ceux-ci, les 18 projets restent assez hétéroclites et tous n'ont pas le même programme ou le même calendrier.

(cf Annexes pour les fiches de projets)

2-1 Méthode employée dans l'étude de cas

La méthodologie choisie est d'effectuer un travail de recherche et d'analyse de concepts de base lunaires pour trouver les points positifs et négatifs de chacun des projets afin d'identifier les bonnes idées et celles qui sont soit contre-productive soit inefficace.

Il s'agit donc de faire des fiches par projet qui permettent une comparaison transversal des éléments constitutifs du projet. Les fiches sont ensuite condensées en un tableau qui évalue ces éléments en fonctions de critères les plus objectifs possible. Les critères sont alors analysés indépendamment afin de trouver la ou les meilleures solutions aux problèmes donnés. Ces fiches sont disponibles en annexe.

Le but n'est pas d'élire le meilleur projet mais de trouver les idées à conserver et celles à rejeter ou à améliorer pour la création d'une base permanente sur la Lune. Les critères d'évaluation ne sont donc pas basés sur les différentes facettes d'un projet d'un point de vue architectural mais sur les éléments qui le constitue et la manière dont ils sont agencés et traités dans le détail.

Ces solutions seront ensuite réunies en un projet de base lunaire idéale qui prodiguera à la fois sécurité et redondance des systèmes mais aussi un lieu de vie agréable, un véritable foyer. Cette base est pensée pour être déployé à court voir moyen terme dans la seconde phase de colonisation de la Lune.

2-2 Critères de sélection

Les critères de sélection ont été déterminés en fonction des trois sources de contraintes pour l'habitat lunaire : l'environnement lunaire, les besoins humains et la faisabilité technique, financière et politique. Les critères couvrent les principaux défis auxquels les architectes devront faire face sur la Lune. Cette liste ne prétend pas refléter la complexité de l'habitat lunaire dans son intégralité et certains sujets comme la production d'énergie, la gestion des déchets et autres ne sont pas abordés dans cette étude pour des raisons de manque d'information sur la plupart des projets et aussi par leur faible impact du point de vue architectural. Voici la liste non exhaustive des principaux critères que j'ai pu identifier:

- type de projet (surface, enterrer, surélever, semi-enterré, mobile,)
- durabilité (court, moyen ou long terme)
- volume disponible (modules gonflables, déployables, rigides, extensions,)
- organisation (organigramme, facilité d'accès, intimité,)
- faisabilité (financière, technique, ...)
- autonomie (durée limitée, permanente, ...)
- végétation (autonomie, bien être,)
- sensation d'espace (enfermement, monotonie, variations, ouvertures,)
- redondance (risque d'incendie, de dépressurisation,)
- ISRU (régolithe pour la protection ou la construction, eau, métaux rares,)

2-3 Analyse par critères et extraction des meilleures solutions

Nous allons maintenant nous attarder critère après critères aux principaux enseignements qui peuvent être tirés de l'analyse comparative. La liste des critères est comme dit précédemment non exhaustive et classé du plus général au plus particulier et non par ordre d'importance.

- type de projet

Par type de projet, on entend la façon avec laquelle le projet s'intègre dans l'environnement. On peut dénombrer cinq types de projets : surface, enterrer, surélever, semi-enterré, mobile, tunnel de lave. La contrainte déterminante pour ce critère est le risque d'impact de corps céleste et d'exposition aux radiations.

Pour cette raison, les bases mobiles comme *SHEE*²⁰, *Sphere Station*²¹ ou *Project Boreas*²² sont parmi les plus vulnérables. En effet, leurs parois n'offrent qu'une protection limitée car elles doivent être légères pour que la base soit mobile. Cependant, la mobilité peut aussi être un atout puisqu'on peut alors déplacer la base en cas de danger.

Les bases enterrées tel que *Down To Earth*²³ ont certainement la meilleure protection contre les corps célestes et les radiations mais des recherches sont encore nécessaires pour déterminer la faisabilité de travaux de forage sur la Lune. De plus, dans le cas d'une base enterrée, aucune ouverture vers l'extérieur n'est possible et l'on peut au mieux amener de la lumière naturelle à l'aide de câbles de fibre optique. Or la lumière naturelle et l'ouverture sur l'extérieur sont des éléments essentiels de la bonne santé psychologique des astronautes.

²⁰ <http://www.shee.eu>

²¹ ²⁸ <http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>

²² Schmitt (Harrison H.) et al, Lunar Settlements, Rutgers University, Benaroya (Haym), 2010.

²³ ²⁶ ²⁷ Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

Les bases en surface, par exemple *Lunar Habitation*²⁴, *Luna Gaia*²⁵ ou *Cyclops HUB*²⁶, et les bases surélever comme *Touch the Moon Slightly*²⁷ et *Architecture on the Moon*²⁸ ont toutes les deux l'avantage d'être facilement déployables même si la dernière peut en plus s'adapter à un terrain accidenté. Celle-ci est cependant plus vulnérable qu'une base simplement posé sur le sol lunaire puisqu'on ne peut pas la couvrir de régolithe. Or c'est cette solution qui est utilisé dans la plupart des projets en surface pour les protéger des météorites et des radiations.

Une des solutions les plus convaincantes et l'implantation d'une base semi-enterrée comme *Resistance/Résidence under cover*²⁹ ou *Aymara*³⁰. En effet, la partie enterrée de la base peut servir de refuge en cas de danger et la celle-ci reste facile d'accès avec des possibilités d'ouverture à l'extérieur et de lumière naturelle.

Une autre variante de cette solution est l'implantation de la base dans un tunnel de lave tel que *Modulpia*³¹. Découverts récemment sur la Lune, ces tunnels se seraient formés lorsque la Lune possédait encore une activité volcanique intense. La Lune s'est depuis refroidie et certains tunnels d'écoulement de la lave restent accessibles. Ceux-ci pourraient servir de protection à une base lunaire contre les radiations et les météorites. Cette solution à l'avantage d'assurer une bonne protection tout en étant facile à mettre en œuvre puisqu'il ne nécessite aucun travail de terrassement. De plus cette option permet aussi d'avoir des vues sur l'extérieur tout en étant protéger des rayons directs du soleil. Ces tunnels pourraient aussi servir de garage pour abriter les véhicules lunaires lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

- durabilité

Par durabilité d'un projet c'est principalement la durée de vie du projet dont il est question, sa résistance aux dégâts que peut occasionner l'usage et l'environnement au fil du temps. Or cette capacité à durer dans le temps est en étroite relation avec la mission du projet.

²⁴ « Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », Press of Foster & Partners, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne]. [Consulte en avril 2017],

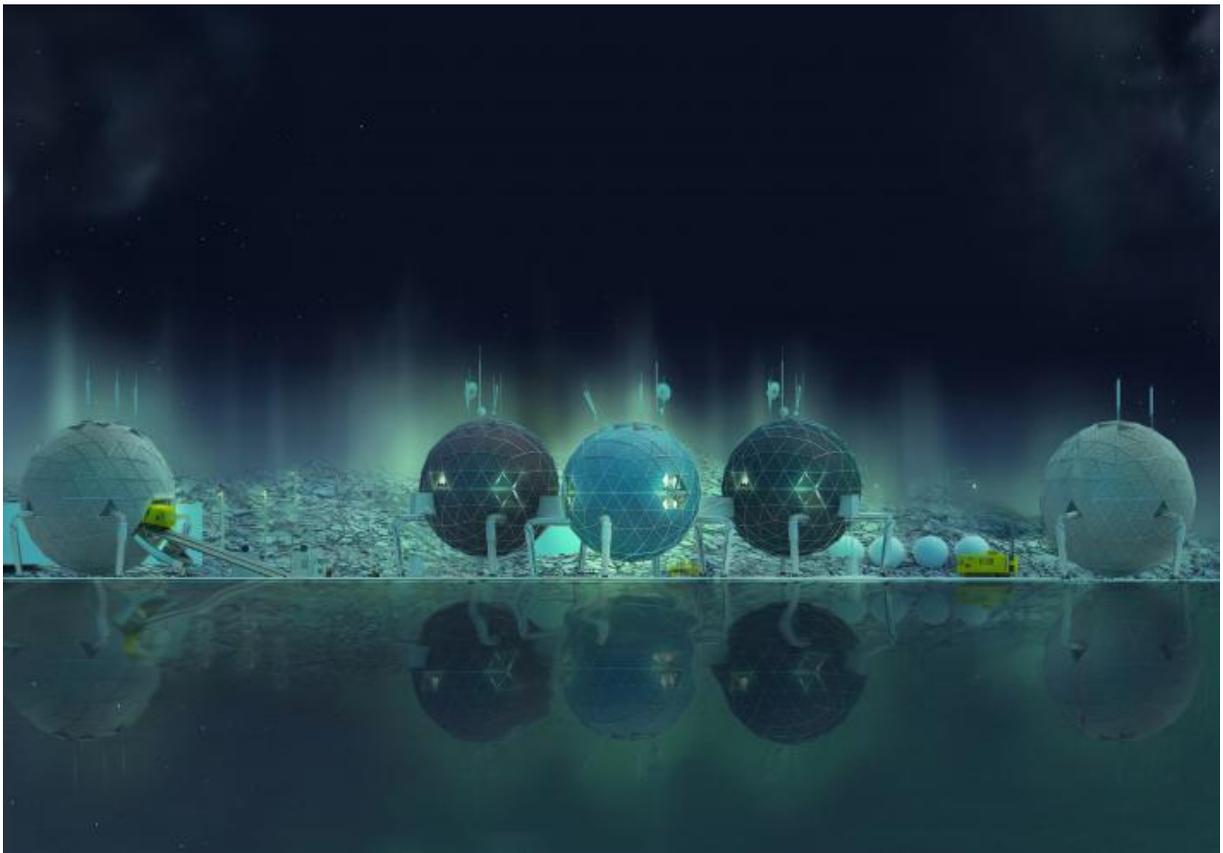
²⁵ ISU SSP 2006 Team Project, LUNA GAIA A closed-loop habitat for the moon executive summary, Illkirch-Graffenstaden, ISU, Aout 2006

²⁹ ³⁰ Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

³¹ Nine Visions of MOONTOPIA. Eleven Magazine [en ligne]. [Consulté le 18 septembre 2018]



Vue du module SHEE sur Mars coordonné par l'ISU. 2013-2015



Vue de Sphere Station par Ekaterina Bondareva. 2016

En effet, certains projets comme *SHEE*³² ont été conçu pour répondre à un besoin urgent et ponctuel d'habitat en milieu extrême. Il est donc acceptable que cette base de vie avancée ne soit pas conçue pour durer des décennies. D'autres projets, tout au contraire se concentrent sur la création d'éléments architecturaux capable de perdurer dans le temps même après que la base ait changé de fonction comme *Selenolith*³³. La plupart des projets analysés se donnent pour mission d'établir une base permanente à des fins scientifiques qui servirait de précurseur pour une durée de vie de 5 à 30 ans. Certains projets voient plus loin et intègre dans leur design une progression de la base avec la possibilité de l'étendre grâce à une organisation modulaire.

Cependant, on peut tout de même identifier les éléments d'un projet qui sont les plus susceptibles de dysfonctionner au fil du temps. On sait par exemple que les modules gonflables sont très efficaces en termes de gain de place mais que ceux-ci restent vulnérables aux radiations qui peuvent dégrader les matériaux. C'est pour cette raison que cette solution est souvent couplé à un recouvrement de la base par du régolithe afin de protéger la membrane du module gonflable. On sait également que la poussière lunaire est extrêmement abrasive ce qui signifie que les surfaces vitrés qui seraient exposés à ces poussière seraient rayés au fil du temps. On peut en dire de même pour tous les éléments qui constituent le projet et qui seraient exposés aux poussières. La présence d'une piste d'atterrissage et de route peut être une solution pour limiter la propagation de poussières.

- volume disponible

Le volume disponible est un enjeu important de l'habitat lunaire. Transporter du matériel sur la Lune coute extrêmement chère et les lanceurs sont limités aussi bien en charge qu'en volume utile. Il est donc important d'être économe en volume et tous les moyens sont bons pour optimiser de l'espace. On peut diviser les différentes approches à cette question en quatre catégories : modules rigides, déployables, gonflables et extensibles.

Les modules rigides comme dans le projet *Sphere Station*³⁴ ont un volume déployé identique au volume envoyé depuis la Terre. Ils n'ont donc pas d'avantage si ce n'est la certitude que le déploiement du module ne va pas dysfonctionner comme ça pourrait être le cas pour un module déployable ou gonflable.

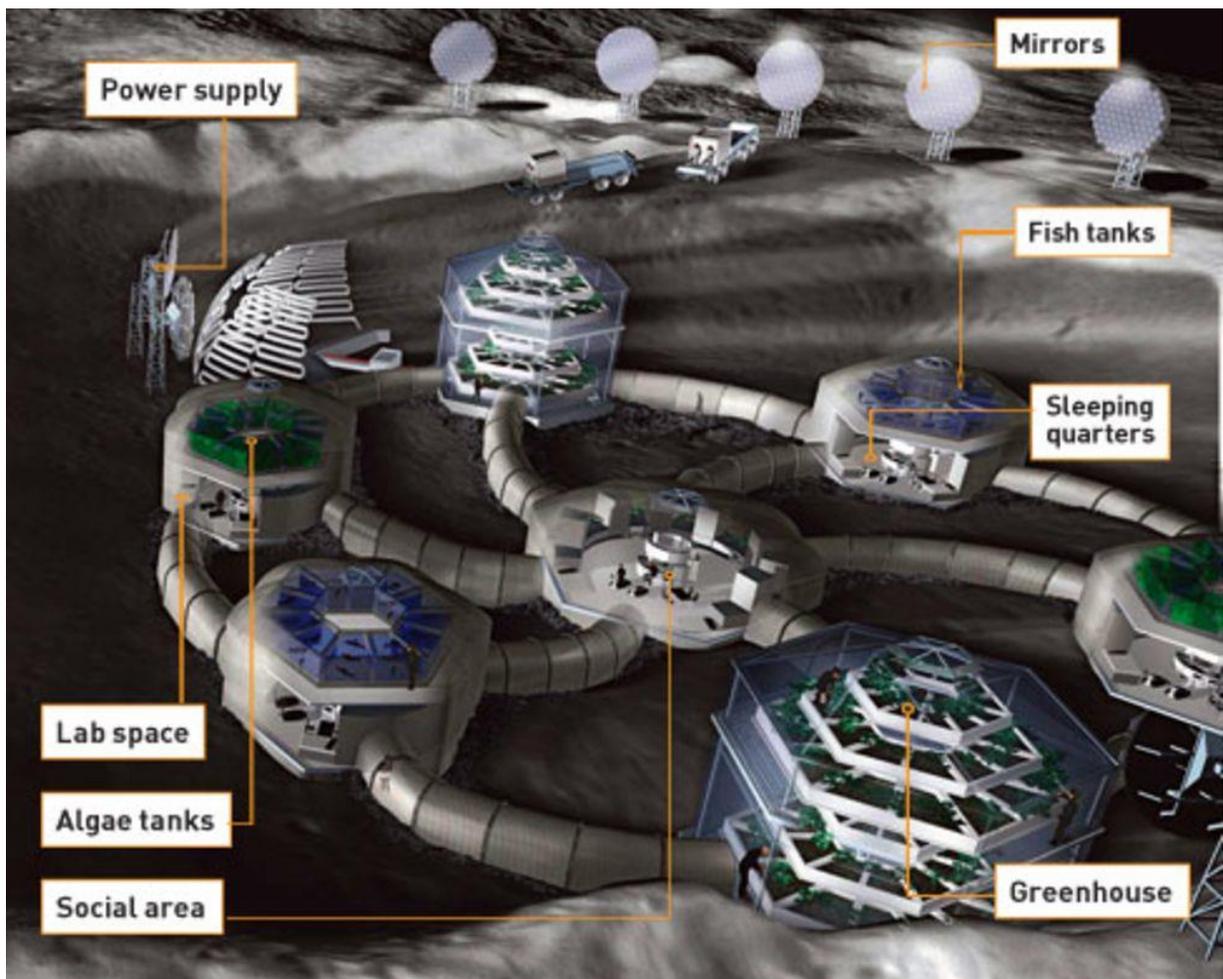
³² <http://www.shee.eu>

³³ <http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>

³⁴ <http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>



Vue de Lunar Habitation par Foster + Partners, 2012



Vue de Luna Gaia coordonné par l'ISU, 2006

Les modules déployables sont eux aussi rigide comme *SHEE*³⁵ mais certaines parties sont mobiles. Celles-ci se déploient et augmentent ainsi le volume utilisable à l'intérieur du module. Ce gain d'espace est d'environ un doublement du volume déployable.

Les modules gonflable sont comme dit précédemment plus sensibles aux radiations et à la poussière lunaire et sont donc en général recouvert de régolithe. *Lunar Habitation*³⁶ est un bon exemple de ce type de projet qui grâce à ce procédé augmente le volume habitable par un ratio de 3 à 4 entre le volume rétracter et le volume gonflé. La protection contre les radiations, la poussière lunaire et les météorites est alors assurée par le régolithe trouvé sur place. C'est sans doute la manière la plus efficace de gagner en volume à l'heure actuelle.

Enfin, certains projets comme *Modulpia*³⁷ résolvent le problème du volume en fabriquant les modules directement sur la Lune à partir de régolithe trouvé sur place. De cette manière, on peut arriver à développer un très grand volume habitable avec un volume de départ qui pourrait tenir dans un seul lanceur. Cette solution radicale a néanmoins le désavantage de nécessité du temps pour expérimenter, tester puis enfin construire les modules de vie.

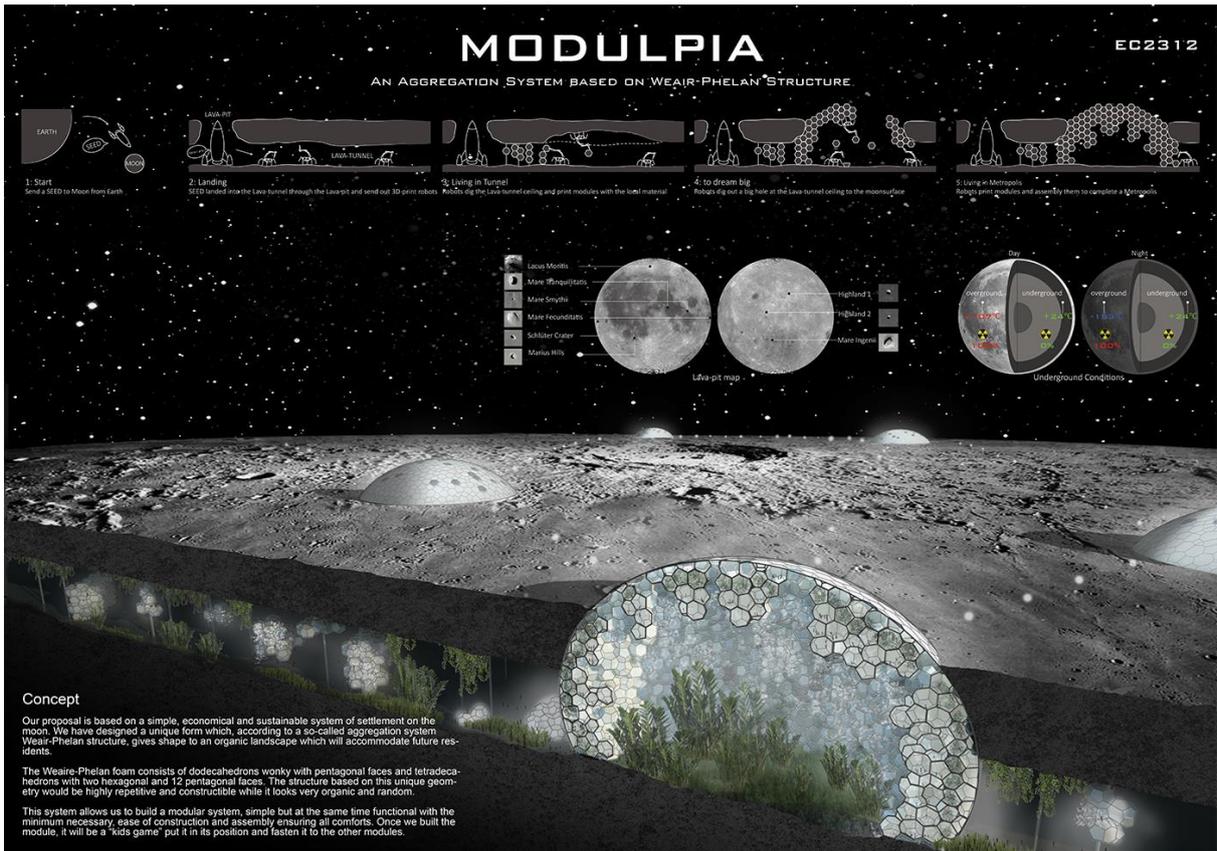
- organisation

L'organisation d'un projet est jugée sur son plan ou son organigramme. Les critères requis sont la facilité d'accès à toutes les parties du projet, circulations variées entre les espaces et la préservation de l'intimité. Certains projets comme *T:W:I:S:T* pèchent par une trop grande complexité spatiale induite par la forme en spirale de module. De plus, ceux-ci sont connectés de façon linéaires ce qui signifie qu'une seule circulation intérieur est possible et que toute la vie de la base se fera autour du même espace de circulation. Enfin, cette base est séparée en deux parties puisque le laboratoire se situe au fond d'un cratère alors que le module de vie se situe sur sa crête. Cela complique donc l'accès au laboratoire qui doit pourtant se faire quotidiennement.

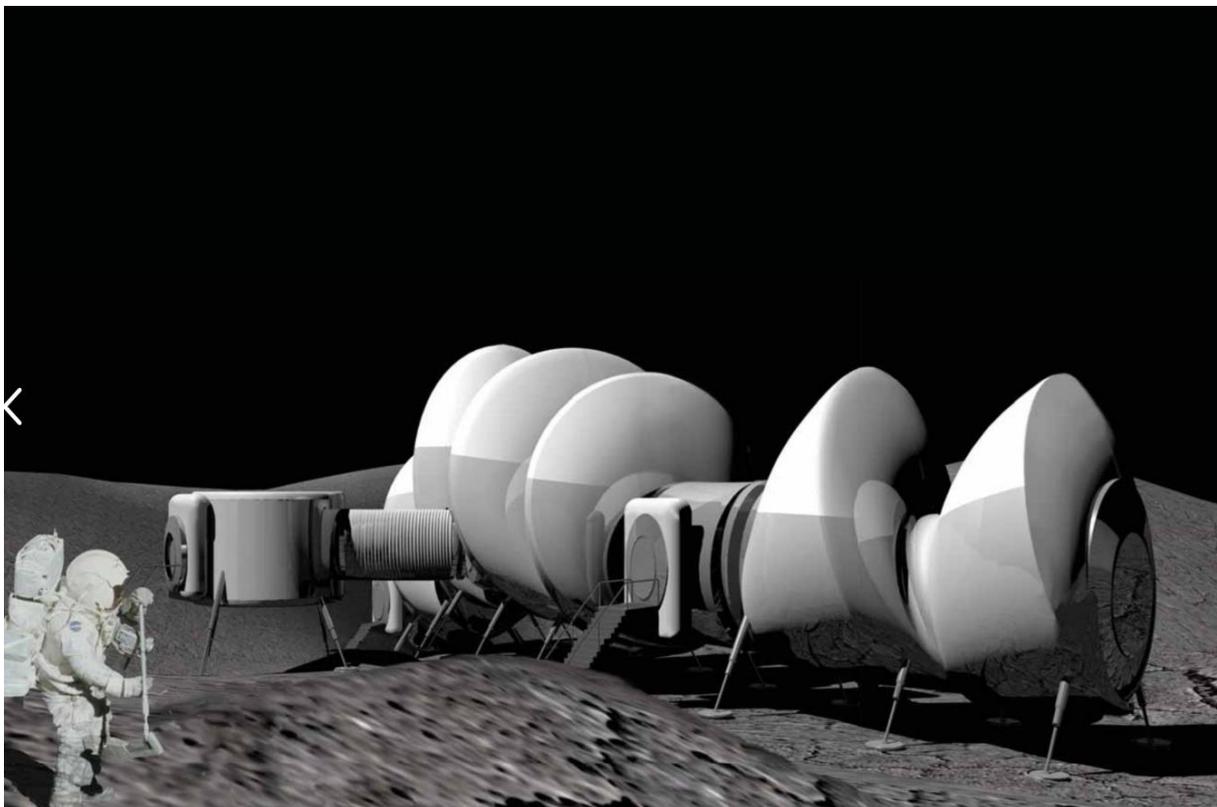
³⁵ <http://www.shee.eu>

³⁶ « Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », Press of Foster & Partners, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne]. [Consulte en avril 2017],

³⁷ Nine Visions of MOONTOPIA. Eleven Magazine [en ligne]. [Consulté le 18 septembre 2018]



Vue de Modulpia par A. Giorgi, C. Feng, S. Pan & E. Analuiza. 2017



Le projet *Project Boréas* répond mieux à nos critères grâce à sa configuration en étoile qui permet une fluidité et une facilité d'accès à toutes les parties de la base. De plus plusieurs cheminements sont possible pour accéder d'un module à l'autre cela peut permettre de recréer de la diversité dans le quotidien tout en permettant une meilleure redondance en cas de défaillance d'un module. Enfin la disposition de éléments dans le plan est astucieuse puisque le module de production agricole est placée au centre du dispositif en étoile ce qui signifie que ce sera le module le plus emprunter par les habitants pour aller d'un espace à un autre. Or on sait que la présence de végétation est bénéfique pour la santé humaine il est donc ingénieux de placé le module qui contient la végétation au centre du système de circulation.

- faisabilité

La faisabilité d'un projet dépend aussi en grande partie de la mission et du phasage prévu pour ce dernier. Généralement, les projets les plus utopistes ou les moins faisables se situent les plus loin dans le temps. En effet, le futur est de plus en plus incertain à mesure que l'on s'éloigne du présent. Certains projets reposent donc sur des hypothèses de futures possible. Parmi ces projets on peut citer *Selenolith*³⁸, *Touch the Moon Slightly*³⁹, ou encore *Modulpia*⁴⁰.

D'autres projets comme *SHEE*⁴¹, ont tout simplement déjà été construit en taille réel. On peut d'ailleurs observer l'un des modules construits à l'ISU d'Illkirch. Il est donc parfaitement faisable techniquement à l'heure actuelle même si le prix d'un module reste très élevé ce qui explique que si peut ait été construits.

Enfin, il existe des projets qui peuvent sembler difficilement réalisable dans la durée impartie par le phasage mais ceux-ci n'ont pas été sélectionnés pour cette analyse.

- autonomie

La question de l'autonomie est primordiale dans l'architecture lunaire. En effet, la distance qui nous sépare de la Lune complique et rend très onéreux tout transfert depuis la Terre. Il faut donc limiter les réapprovisionnements au maximum. Pour parvenir à maintenir un environnement vivable hors de la Terre deux solutions sont possible.

³⁸ <http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>

³⁹ Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), *Destination Moon*, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

⁴⁰ *Nine Visions of MOONTOPIA*. *Eleven Magazine* [en ligne]. [Consulté le 18 septembre 2018]

⁴¹ <http://www.shee.eu>



Vue de Selenolith par Anton Rakov. 2015



Vue de Touch the Moon Slightly par P. P. Nagy, S. Yin. 2012

Une première solution est celle employée depuis les débuts de l'exploration spatiale jusqu'à nos jours et qui repose sur des réactions physiques et chimiques pour purifier l'air et l'eau. La nourriture est envoyée avec les astronautes sous forme déshydratée. Cette solution offre une autonomie limitée puisque toute la nourriture doit être importée et les systèmes de purification de l'air et de l'eau ont aussi besoin d'être rechargés régulièrement. Un bon exemple de ce type de système est l'ECLSS (Environmental Control and Life Support System) qui assure un environnement vivable dans l'ISS. Le principe est similaire à celui mis en œuvre dans la plupart des projets analysés comme *Lunar Habitation*⁴² ou *SHEE* par exemple.

La deuxième solution, BLSS (Bioregenerative Life Support System), est plus expérimentale et n'a jamais été utilisé dans l'espace. Il s'agit de recréer un écosystème dans l'espace qui puisse à la fois purifier l'air et l'eau mais aussi consommer les déchets organiques et produire de la nourriture. Cette solution permet grâce aux cycles biologiques et à la synergie entre différentes espèces d'améliorer l'autonomie d'une base puisque la quantité d'intrant nécessaire au bon fonctionnement du cycle est fortement réduite. Le projet *Luna Gaia*⁴³ donne à voir un exemple assez détaillé de ce que pourrait être un tel système puisqu'ils mêlent trois systèmes actuellement en expérimentation pour arriver à une autonomie de 98 %. Cela signifie que le cycle de régénération biologique est quasiment entièrement autonome et ne nécessite que très peu d'intrants.

- végétation

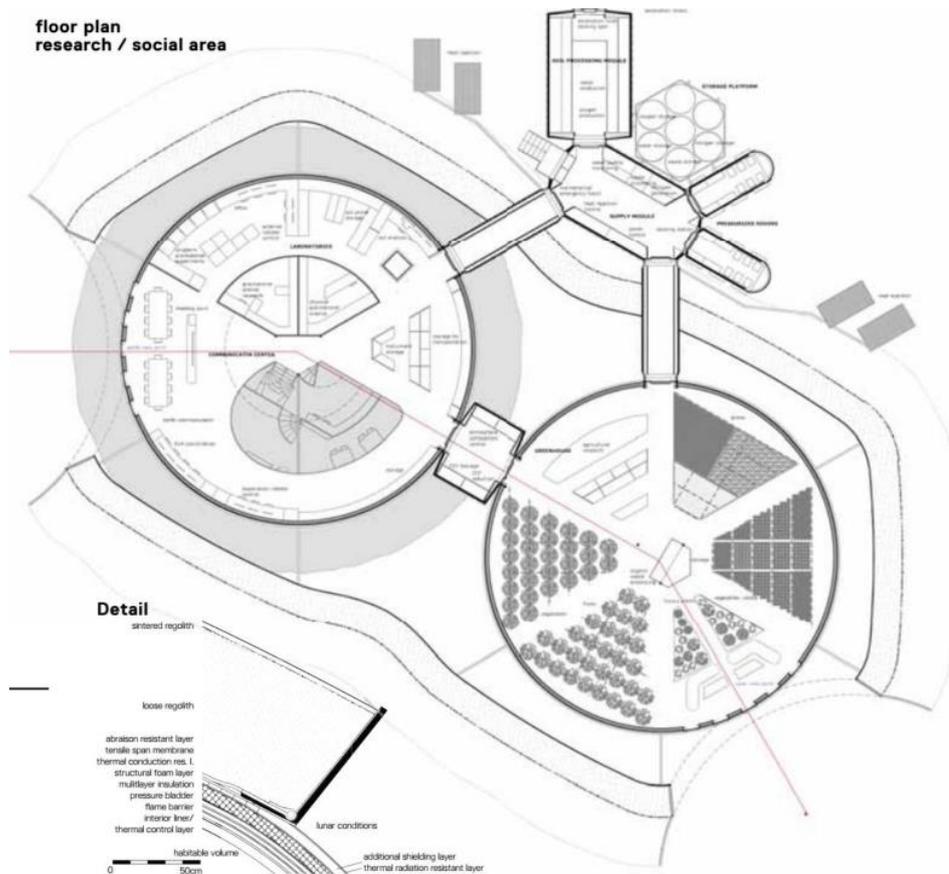
Directement relié à la question de l'autonomie, mais pas que, la présence de végétation est un des critères clés pour les missions de longues durées. En effet, la végétation peut servir à absorber le CO₂, à produire de l'oxygène, de la nourriture et de l'eau propre à la consommation comme nous l'avons vu un peu plus haut. Mais ce n'est pas le seul rôle de la végétation. Il a en effet été prouvé que la présence de végétation est bonne pour la santé mentale des habitants, sur Terre ou dans l'espace. Il semblerait que la vision de fractales naturelles, soumises à la règle d'or peut aider à réduire le stress et à améliorer le bien-être.

⁴² « Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », Press of Foster & Partners, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne]. [Consulte en avril 2017],

⁴³ ISU SSP 2006 Team Project, LUNA GAIA A closed-loop habitat for the moon executive summary, Illkirch-Graffenstaden, ISU, Aout 2006



Vue de Cyclops Hub par O. Benesch, D. Galonja, T. Milchram, V. Rossetti. 2012



Vue de Resistance/Residence under Cover par Stefan Kristoffer. 2012

La plupart des projets analysés incorporent de la végétation dans leur design, à l'exception de *SHEE*⁴⁴, *Selenolith*⁴⁵, *Sphere Station*⁴⁶, *Cyclops Hub*⁴⁷ et *Lunar Habitation*⁴⁸. Parmi les projets qui exploitent le mieux la présence de végétation, on peut citer *Project Boreas*⁴⁹ qui place la serre au centre des circulations, augmentant ainsi les interactions des astronautes avec la végétation. *Resistance/Residence under Cover*⁵⁰ consacre presque autant de surface pour les quartiers d'habitation et les laboratoires réunis que pour la serre agricole. Ce vaste espace dispose d'une grande ouverture sur l'extérieur recouvert par une casquette de régolithe ce qui en améliore grandement la qualité spatiale. De plus cet espace est mis à profit pour réaliser des travaux de bricolage et on y trouve aussi un espace de socialisation qui fait face à la baie vitrée. On peut également noter le traitement de la végétation dans *Modulpia*⁵¹ où une serre géante est créée par l'assemblage des modules. Cette serre est ensuite plantée et une véritable forêt se développe au cœur du projet. La disposition de modules permet à tous les astronautes d'avoir une vue sur cette végétation depuis leur espace personnel ce qui est assez unique dans les projets lunaires.

Certains projets incorporent de la végétation mais de manière plus parsemée ce qui résulte quelques fois à avoir quelques bacs à salade ci et là. Comme dans *Myo*⁵² et *T:W:I:S:T*⁵³ où le manque de place limite la présence de végétation au strict minimum. Dans ces cas, les effets psychologiques sont sans doute moindres et l'autonomie de la base ne peut être assurée uniquement par la végétation.

- sensation d'espace

La sensation d'espace est sans doute le critère le plus subjectif puisqu'il s'agit ici d'une approche sensible de l'espace habitable. On peut toutefois se baser sur certains critères comme la présence de couleurs, d'ouvertures et bien sur la qualité de l'espace en lui-même. Le critère principal dans ce domaine est bien sur la condition humaine et la santé psychologique des astronautes.

⁴⁴ <http://www.shee.eu>

⁴⁵ ⁴⁶ <http://www.jacquesrougieriedatabase.com/Projects/space>

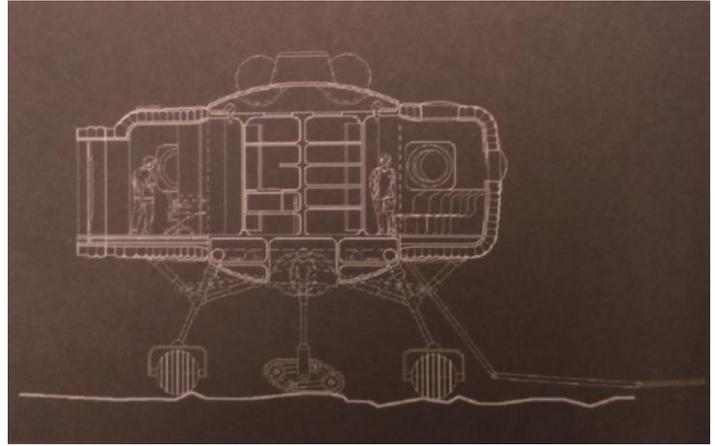
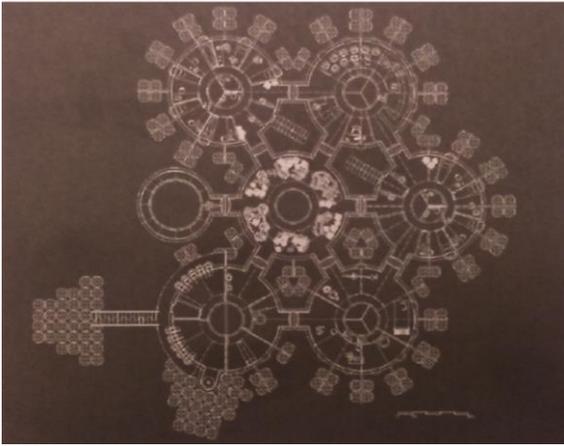
⁴⁷ ⁵⁰ Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

⁴⁸ « Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », Press of Foster & Partners, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne]. [Consulte en avril 2017],

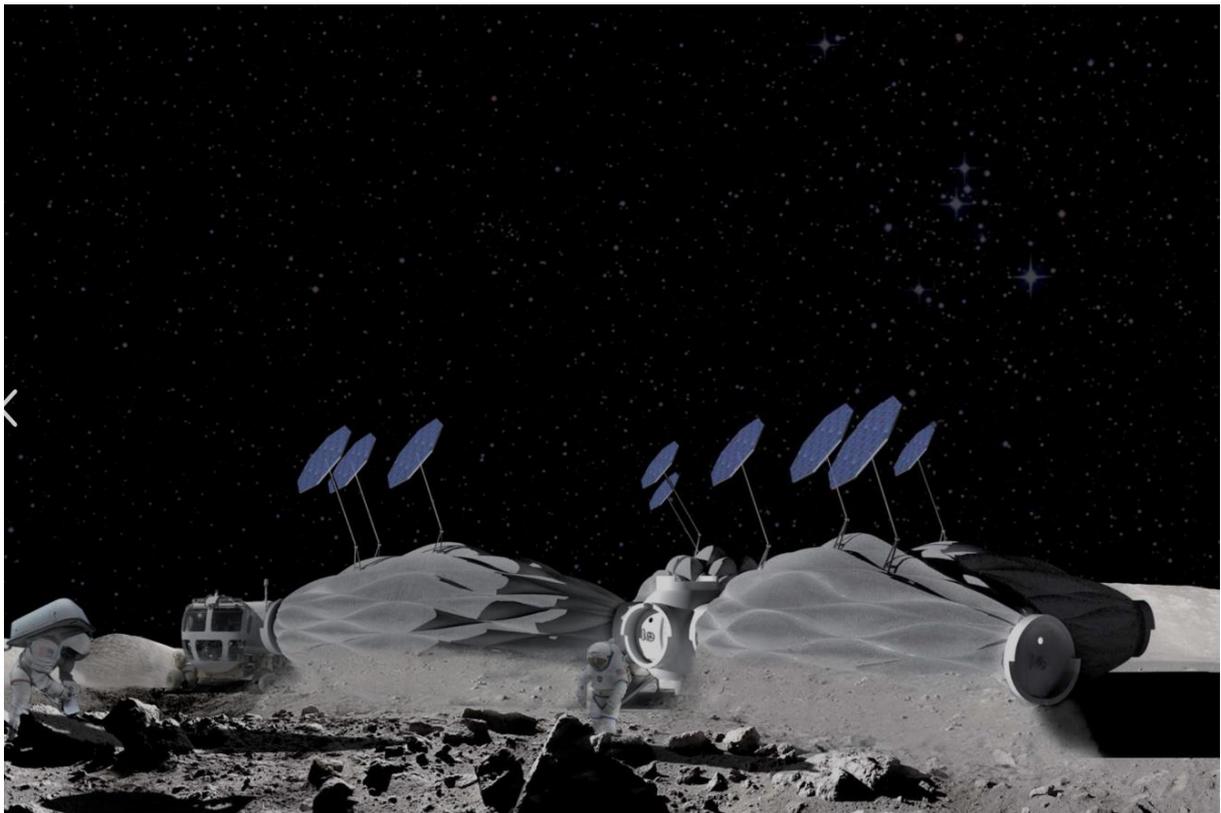
⁴⁹ Schmitt (Harrison H.) et al, Lunar Settlements, Rutgers University, Benaroya (Haym), 2010.

⁵¹ Nine Visions of MOONTOPIA. Eleven Magazine [en ligne]. [Consulté le 18 septembre 2018]

⁵² ⁵³ Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012



Vue de Resistance/Residence under Cover par Stefan Kristoffer. 2012



Vue de Resistance/Residence under Cover par Stefan Kristoffer. 2012

On sait d'ores et déjà les effets de l'enfermement à long terme de groupes de chercheurs dans des environnements isolés et hostiles. Il faut éviter les intérieurs monotones et monochromes qui ont tendance à créer de l'ennui et de l'anxiété chez les habitants, surtout sur la Lune dont le paysage est quasi intégralement noir et blanc et souvent sans notion d'échelle pour l'œil humain. Afin de limiter l'ennui, il vaut donc mieux varier les couleurs et les matières à l'intérieur. La végétation comme nous l'avons vu, joue également un rôle important et un simple revêtement en imitation bois peut grandement améliorer le quotidien des astronautes. Des projets comme *Architecture on the Moon*⁵⁴ ou *Project Boreas*⁵⁵ traitent de cette question en profondeur et proposent des concepts d'architecture d'intérieur détaillés. Dans *Project Boreas*, chaque module possède son atmosphère propre avec des matériaux uniques.

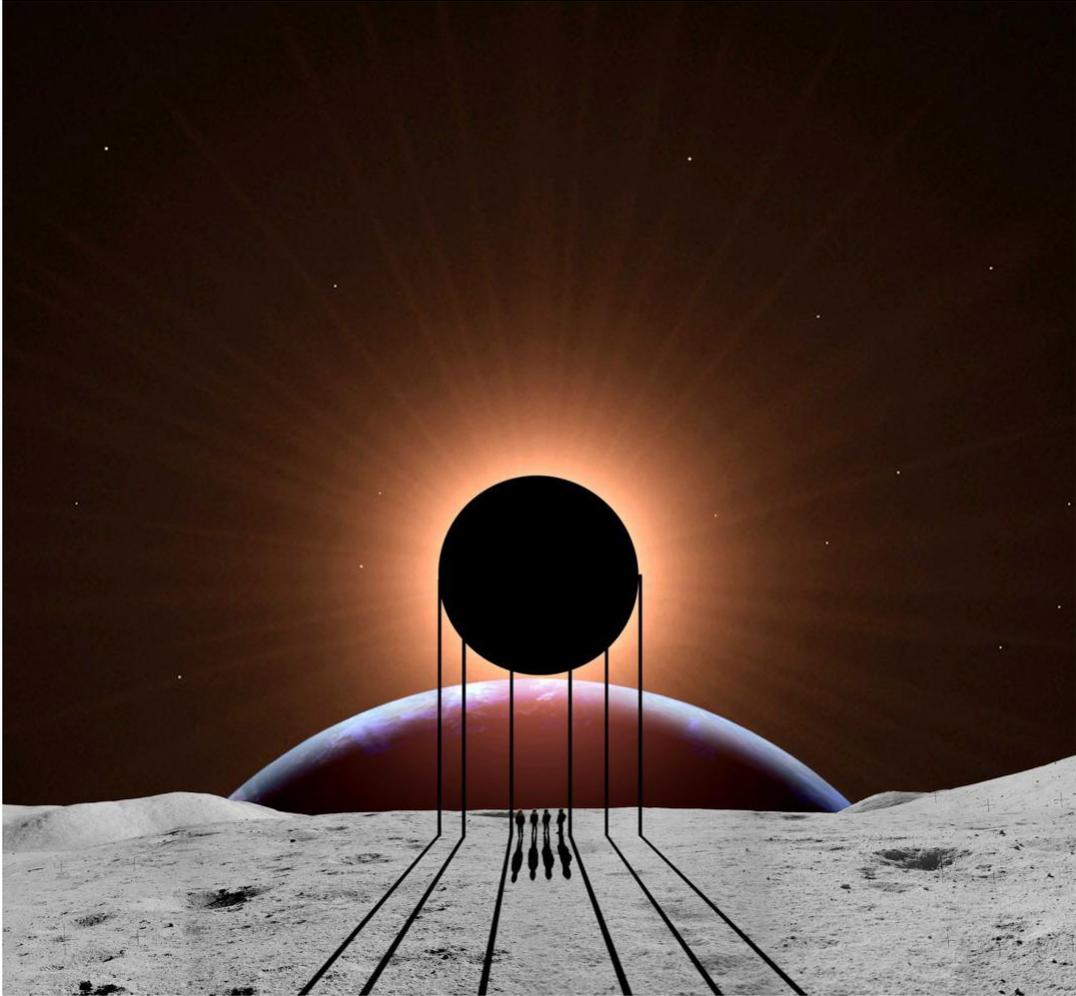
Un des aspects essentiel de la sensation d'espace est l'ouverture sur l'extérieur. Comme vu précédemment, le type de projet détermine en grande partie les possibilités d'ouverture de la base. En effet, pour les bases souterraines, les seuls ouvertures sur l'extérieur possible sont des écrans numériques. Alors que pour les bases en surface il est possible d'intégrer des hublots, comme dans *Lunar Project* ou des baies vitrées pour les projets les plus ambitieux. Parmi ceux-ci on peut citer *Resistance/Residence under Cover*⁵⁶ ou *Architecture on the Moon* qui proposent une ou plusieurs grandes baies vitrées dans leur projet à la différence près que la baie du premier est protégée par une casquette en régolithe ce qui permet de mieux réguler l'ensoleillement direct et de protéger la vitre de l'environnement lunaire. On peut aussi signaler l'ingéniosité du projet *Aymard*⁵⁷ qui choisit de s'enterrer sur la crête d'un cratère, permettant ainsi de percer le flan de ce dernier afin d'avoir des vues sur l'extérieur et de la lumière tout en étant protégé. Dans ce projet, les concepteurs ont également pensés à mettre en place un réseau de fibre optique afin d'amener la lumière naturelle dans les quartiers d'habitation qui sont complètement enterrés.

La variation de l'espace entre également en considération quand il s'agit de parler de sensation d'espace. Ce sont assez logiquement les projets les moins ouverts sur l'extérieur qui ont traités de cette question le plus en profondeur. *Lunar biodiversity data base*⁵⁸, par exemple, propose un paysage intérieur varié avec un travail sur la topologie qui permet de créer une grande variété d'espace et de forme. Une spirale relie les étages entre eux et permettant d'établir des connexions visuelle entre les niveaux.

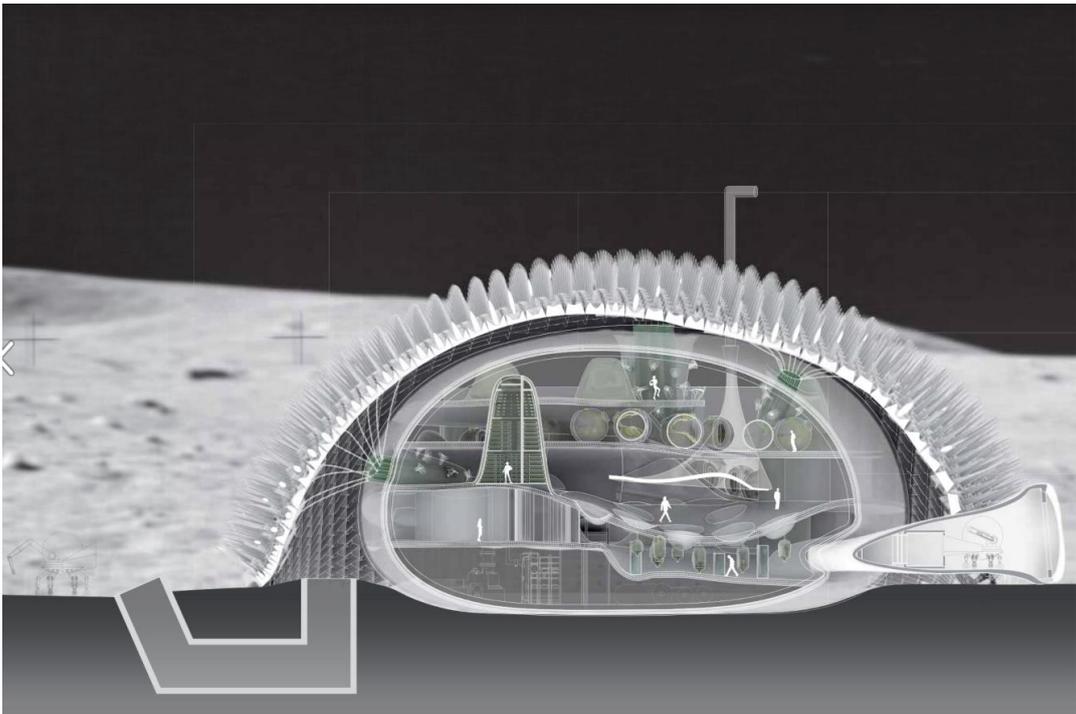
⁵⁴ <http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>

⁵⁵ Schmitt (Harrison H.) et al, *Lunar Settlements*, Rutgers University, Benaroya (Haym), 2010.

⁵⁶ ⁵⁷ ⁵⁸ ⁵⁹ Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), *Destination Moon*, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012



Vue de Architecture on the Moon par Victor Jesus Del Carpio Torres. 2016



Vue de Lunar biodiversity data base par Julia Klaus, Christian Mörtl. 2012

On retrouve la même idée dans *Down to Earth*⁵⁹ dans une moindre échelle. Dans ce projet, les espaces individuels se déploient sous la forme de poche qu'il est possible de rétracter ce qui crée une variété dans la perception de l'espace.

- redondance

La redondance dans le langage courant peut avoir une connotation négative mais en ingénierie, elle signifie simplement la duplication de composants ou de fonctions critiques d'un système dans le but d'accroître sa fiabilité. En multipliant les systèmes on prévient la défaillance de l'un d'entre eux. En architecture spatiale, la redondance est essentielle pour assurer la sécurité des astronautes. L'isolement extrême imposé par la Lune nous force à prévoir des solutions sur place pour répondre à une urgence.

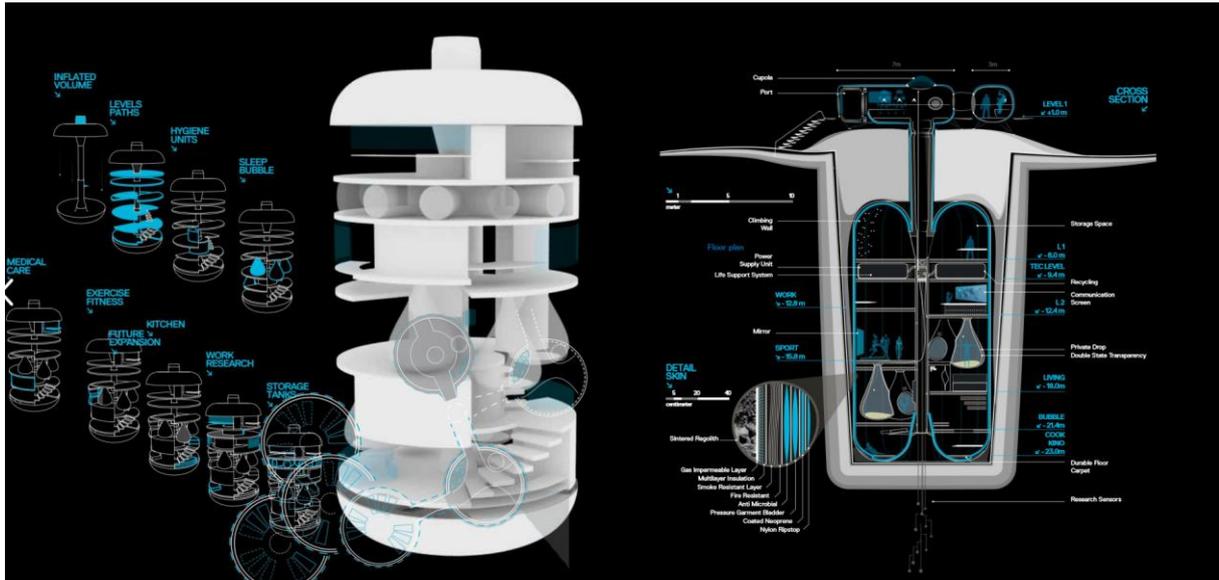
Dans la pratique, les principaux risques sont la dépressurisation, l'incendie ou le dysfonctionnement du système de survie. Il est possible de renforcer les équipements afin de réduire les risques de pannes mais il faut tout de même avoir un plan B au cas où le pire arriverait. Pour réduire les conséquences d'un incendie ou d'une dépressurisation, il est essentiel d'installer des sas entre les différentes parties de la base. Idéalement les sas sont doublés comme dans *Resistance/Residence under Cover*⁶⁰ ou *Lunar habitation*⁶¹ car cela permet d'accéder à une zone dépressurisée sans passer par l'extérieur et sans compromettre une autre partie de la base.

La duplication du système de survie ou de production d'énergie est rarement mentionnée dans la description des projets puisque ces sujets concernent plus les ingénieurs mais c'est également un élément important de la redondance.

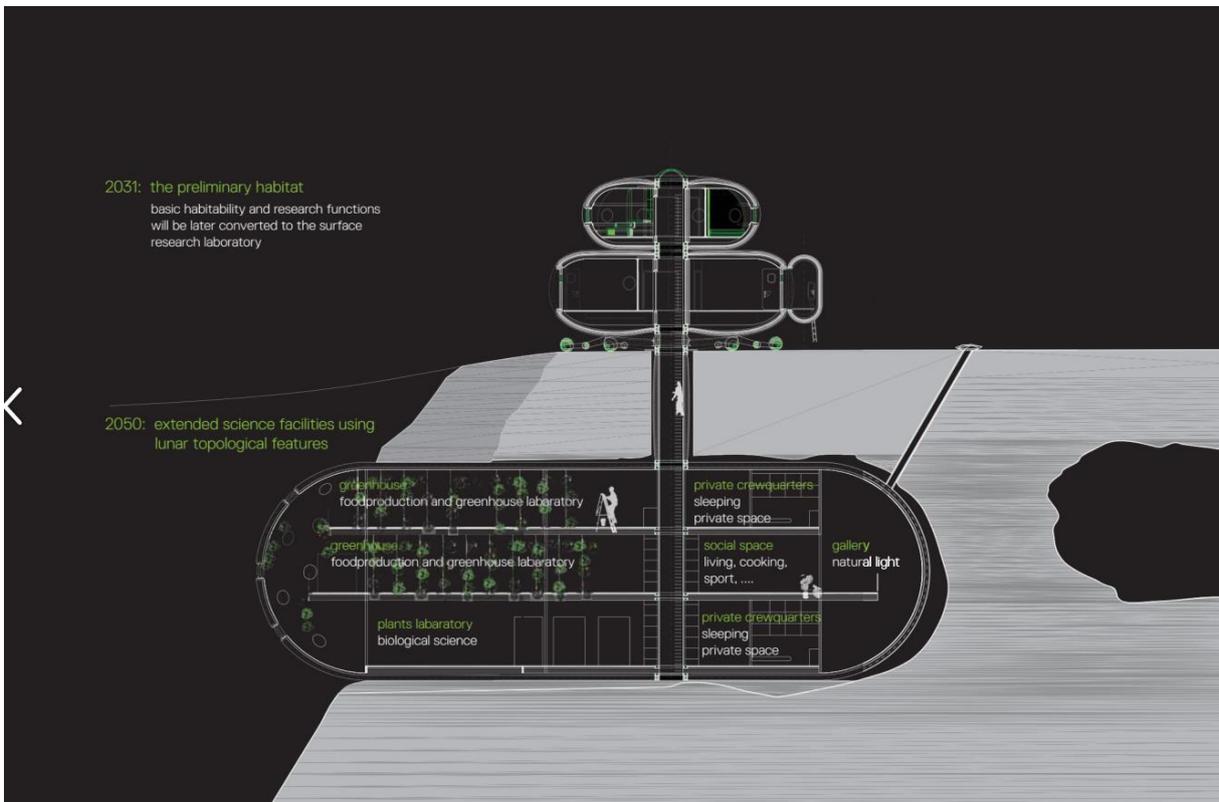
- ISRU

L'ISRU (In Situ Resource Utilisation), en français utilisation de ressources in situ, est employée dans de nombreux projets analysés. La plupart du temps il s'agit d'utiliser le régolithe tel quel, fondu ou dans un béton préparé sur place. Il est toutefois également possible d'extraire des éléments du régolithe tel que de l'aluminium, de l'eau ou du fer. On peut ensuite utiliser ces ressources pour approvisionner la base en eau ou pour fabriquer des pièces de rechange ou de nouveaux outils.

⁶¹ « Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », Press of Foster & Partners, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne]. [Consulte en avril 2017],



Vue de Down to Earth par A. Khouni, K. Pluch. 2012



Vue de Aymara par Karl Hengl, Mark Steinschifter. 2012

Le régolithe est principalement utilisé dans les projets pour protéger la base des radiations et des météorites. On retrouve généralement cet usage pour les bases en surface et le régolithe peut alors être employé sous plusieurs formes. Dans les projets *Resistance/Residence under Cove*⁶², *Lunar habitation* et *Luna Gaia*⁶³, la base, composée de modules gonflable, est recouverte par une couche de régolithe stabiliser. Foster + Partners détaillent la fabrication de cette enveloppe et sont même allés jusqu'à fabriquer un échantillon de mur en simili béton lunaire pour prouver la faisabilité du procédé. Il s'agit d'imprimer en 3D, couche après couche, un dôme autour du module gonflable à l'aide de robots qui récoltent le régolithe qui une fois mélangé avec de la colle se durcit par-dessus la couche précédente. Seule une partie de la surface est traitée avec de la colle afin d'économiser au maximum les ressources importées. La structure rigide suit une forme de squelette inspiré des formes naturelles qui sont plus résistantes et donc plus économes que les lignes droites que nous avons pris l'habitude de créer.

La construction de structures en béton sur place est aussi envisagée dans certains projets comme *Selenolith*⁶⁴ ou *Modulpia*⁶⁵. Dans le cas de ce dernier, le béton n'est pas utilisé pour se protéger des radiations mais pour construire la structure porteuse des modules qui sont ensuite assemblés en un dôme. La fabrication de ces modules a lieu dans des tunnels de lave qui assurent la protection des habitants pendant l'édification de la base à proprement parler. Dans *Selenolith*, le béton à base de régolithe sert à créer de larges structures d'un style néo-classique qui tranche avec les autres projets lunaires. Ces structures abritent des modules d'habitat et de recherche qui peuvent être facilement remplacés.

Certains projets font une utilisation originale du régolithe comme *Myo*⁶⁶ qui place simplement le matériau tel quel dans de vastes poches extérieures prévues à cet effet le long des modules. Une fois remplies, ces poches se ferment grâce à un principe similaire au scratch et protègent la base des radiations. Le projet *Lunar Biodiversity data base*⁶⁷ utilise des picots électromagnétiques tout autour de la base afin de capter les particules de poussières lunaires chargées et ainsi assurer la protection de la base sans efforts.

^{60 62} Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Department for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

⁶³ ISU SSP 2006 Team Project, LUNA GAIA A closed-loop habitat for the moon executive summary, Illkirch-Graffenstaden, ISU, Aout 2006

⁶⁴ <http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>

⁶⁵ Nine Visions of MOONTOPIA. Eleven Magazine [en ligne]. [Consulté le 18 septembre 2018]

^{66 67} Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Department for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

2-4 Résultats de l'étude

Cette étude comparative et le travail de fichage des projets préalable nous a permis de réaliser un panorama non exhaustif des différentes facettes du projet lunaire mais pas seulement. Nous avons aussi découverts quels sont les réflexes à adopter et à éviter lorsque l'on conçoit un projet pour la Lune. Il n'existe pas une mais plusieurs façons d'aborder chaque critère et c'est souvent la symbiose entre ces différents critères qui crée la qualité d'un projet. C'est donc, comme toujours en architecture, une question de parti pris.

Au fil des recherches, il est devenu de plus en plus clair que cet exercice n'était pas parfaitement objectif puisque pour définir les points positifs et négatifs, il me fallait faire un exercice critique basé sur mes connaissances de l'habitat lunaire mais aussi sur l'opinion que j'ai, consciemment ou inconsciemment, de ce que devrait être un habitat lunaire. Il me semble par exemple que la présence de végétation est essentielle à la fois pour le bien-être psychologique des habitants à long terme mais aussi pour accroître autant que possible l'autonomie de la base puisque l'on sait d'ores et déjà que les systèmes de survie physico-chimiques ne permettent pas des missions de longues durées sans ravitaillement. De plus mon point de vue est celui d'un architecte mais un ingénieur aurait certainement un autre ordre des priorités et une autre vision des enjeux de l'architecture lunaire. Cette différence me paraît pourtant être un point positif puisque la confrontation de plusieurs systèmes de pensée et de conception est souvent source de créativité qui se révèle nécessaire pour apprivoiser l'environnement lunaire.

Un autre problème est le fait que certains aspects positifs impliquent des conséquences négatives par leur simple présence ou par la manière dont ils sont traités ou agencés avec les autres fonctions. La présence de fenêtre est par exemple un point important qui ouvre la vue sur le paysage extérieur et diminue fortement le sentiment d'enfermement. Mais des fenêtres trop nombreuses ou mal placées peuvent fragiliser la base elle-même et la rendre vulnérable aux radiations, aux météorites et à la poussière abrasive. Les bases enterrées sont souvent les plus protégées des éléments extérieurs mais il devient alors très compliqué d'offrir des vues extérieures et l'on peut au mieux apporter de la lumière via un réseau de fibre optique. Les bases semi-enterrées peuvent néanmoins pallier à ce problème en offrant des ouvertures ciblées et protégées. De plus certains projets sont plutôt utopiques. Ils concernent donc la troisième phase d'exploration lunaire. Tandis que d'autres projets sont plus réalistes et concernent donc la deuxième phase d'exploration. Cela rend leur comparaison d'autant plus difficile.

3 Perspectives futures (Existe-t-il une base lunaire idéale ?)

Le dérèglement climatique, l'effondrement de la biodiversité, la propagation des déchets plastiques, la multiplication des zones mortes, la raréfaction de terres arables et des espaces naturels, la crise démocratique et l'accroissement des inégalités sont quelques-uns des défis qui rendent le futur de notre civilisation incertaine. Il est donc possible qu'en cas d'effondrement de notre civilisation, l'Homme ne retourne jamais sur la Lune. Il nous reste toutefois une marge de manœuvre de quelques années d'après le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Dans le cas où nous arrivons à surmonter ces difficultés, il est très probable que l'Homme devienne une espèce interplanétaire et cette colonisation débutera par le premier corps céleste à proximité de la Terre : la Lune. La deuxième phase de colonisation de la Lune est sur le point de débuter et de nombreuses agences spatiales et entreprises privées se penchent désormais sur la question. Cette phase verra l'apparition d'avant-postes permanents qui habiteront une présence humaine continue. En fonction de la réussite de cette phase et des conditions économiques et politiques futures, la troisième phase pourrait bien lui emboîter le pas rapidement pour voir des villes se développer sur la Lune qui serait alors entièrement indépendante de la Terre et pourrait même exporter des ressources vers celle-ci. Dans cette hypothèse, il y a fort à parier que la Lune sert de hub entre la Terre et le reste du système solaire puisqu'il est beaucoup plus facile de décoller de la Lune en raison de la faible gravité et de l'absence d'atmosphère.

Il s'agit désormais d'exploiter les résultats de l'analyse comparative afin de donner à voir les enseignements tirés de cette étude. Nous allons donc dessiner, critère après critère, ce que serait une base idéale. Nous aborderons ensuite les limites inhérentes à la proposition de base idéale pour finir par les conséquences de ce projet pour la Terre.

3-1 Proposition de la base idéale

Définissons d'abord les éléments déterminant du projet comme la mission, la chronologie ou la localisation. Il me semble plus approprié de proposer un projet qui s'inscrit dans la deuxième phase de colonisation de Lune puisque celle-ci est maintenant imminente. D'autant plus que, le futur étant incertain, on ne sait pas quand aura lieu la troisième phase de colonisation ni quelles seront les technologies disponibles à ce moment. Si l'on devait donner une date limite à la mise en œuvre de ce projet, 2030 semble raisonnable aux vues des avancées technologiques encore nécessaires. Bien sûr la faisabilité financière est aussi un enjeu important mais celui-ci relève principalement des priorités politiques et de la conjecture économique. En ce qui concerne la durée de vie de la base, on peut espérer que celle-ci dépasse l'ISS qui en est à sa vingtième année d'activité consécutive.

La mission de la base lunaire sera essentiellement scientifique étant donné que la recherche est la raison principale pour retourner sur la Lune. Cependant, une présence humaine permanente est une véritable aubaine pour la construction lunaire. C'est l'occasion de pouvoir expérimenter différents types d'habitats, de tester les possibilités offertes par le régolithe et d'en apprendre plus sur l'ergonomie lunaire. La mission de la base sera donc à la fois d'effectuer des expériences de recherche fondamentale mais aussi des expérimentations sur l'habitat et la construction lunaire.

En ce qui concerne la localisation de la base, il me semble avantageux de se placer près des pôles, sur la face cachée de la Lune. En effet, c'est près des pôles que l'on trouve les pics de lumière éternelle qui permettent une production d'électricité quasi constante grâce à l'énergie solaire. De plus, on trouve aussi dans ces régions des cratères qui ne voient jamais la lumière du soleil et qui pourrait contenir des traces d'eau, ressource intéressante s'il en est que ce soit pour des raisons scientifiques comme la recherche d'organismes vivants ou de façon plus pratique pour approvisionner la base en eau qui peut aussi donner du carburant ou de l'oxygène une fois traité adéquatement. Se positionner sur la face cachée de la Lune nécessite la présence d'un réseau satellitaire autour de la Lune pour permettre de communiquer avec la Terre. Cependant, l'installation d'un télescope sur la face cachée de la lune pourrait permettre d'observer l'univers avec une précision et une netteté inégalée puisque cet emplacement est protégé par la masse de la Lune des émissions de radiation en provenance de la Terre qui polluent les images que l'on reçoit de l'espace. De plus la Lune ne possède pas d'atmosphère ce qui signifie que le rayonnement de l'univers n'est pas filtré lorsqu'il atteint la Lune.

Il faut à présent choisir un type base. Nous avons vu que les bases les mieux protégées sont celles qui sont enterrées mais que celles-ci ne disposent que rarement d'ouvertures sur l'extérieur. Cependant, si l'on place un module dans un tube de lave, on évite en grande partie les travaux de terrassement et il est protégé des radiations et des chutes d'objets célestes tout en disposant d'ouvertures sur l'extérieur. C'est donc une solution assez économique et qui permet l'existence d'un espace intermédiaire protégé de l'environnement lunaire tout en étant exposé au vide. Cet espace pourrait servir à entreposer du matériel ou des véhicules mais aussi à expérimenter par exemple la construction lunaire à base de régolithe. Ainsi, comme nos ancêtres se sont abriter un temps dans les grottes, nous trouverons refuge dans l'épaisseur de la roche lunaire.

C'est donc dans les tunnels de lave que nous positionnerons la base. Celle-ci pourra être déployée rapidement si tant est que l'on réussisse à insérer le module dans le dit tunnel. Il est important de penser à la modularité et aux possibilités d'extension de la base. Il faut donc prévoir un modèle standard de sas et de connexions entre les modules afin de pouvoir ajouter des modules différents si nécessaire. De plus, la modularité peut nous aider à mieux nous adapter à la topographie accidentée des tunnels de lave. Il faut donc prévoir différents types de modules qui peuvent être assemblés de différentes façons pour suivre l'évolution du terrain. Il faut donc des liaisons souples entre les modules. Couplés à des doubles sas, ceux-ci peuvent également améliorer la sécurité incendie et dépressurisation.

À mon sens, la présence de végétation dans la base ne suffit pas. Il faut recréer un écosystème fermé qui puisse à la fois subvenir à nos besoins mais également se développer sans apports extérieur. La technologie actuelle permet de créer un environnement fermé à 98% grâce à de la culture hydroponique mêlée avec des poissons et des micro-organismes. C'est un résultat très élevé pour un écosystème si restreint mais il est encore possible de l'améliorer en ajoutant des espèces au cycle. Il est actuellement question d'y ajouter des insectes qui en plus d'être très résistants produisent des protéines.

Le rôle de cet écosystème est d'assurer un environnement vivable pour les êtres humains. Il s'agit donc d'absorber le CO₂, la vapeur d'eau, les déchets organiques et tous les polluants volatiles et de produire de l'O₂, de l'eau et de la nourriture de manière à subvenir aux besoins de toute la base. Afin de garantir une redondance suffisante au projet, il est toutefois nécessaire de disposer d'un système de survie physico-chimique en cas de dérèglement de l'écosystème. En effet, le rôle de cet écosystème est de garantir une autonomie suffisante pour limiter les ravitaillements mais il faut aussi garantir la sûreté des astronautes dans tous les cas de figure.

Cependant, ce n'est pas le seul rôle de la végétation puisque celle-ci a également une influence considérable sur la santé mentale des êtres humains. Afin de profiter au maximum de ces effets bénéfiques, il faut placer cet écosystème au centre du projet et en faire le lieu de socialisation par excellence. On peut par exemple y intégrer la cuisine ou l'espace repas ce qui permettra aux astronautes de passer plusieurs heures par jour dans un environnement positif. On sait aussi que la biodiversité d'un écosystème a un impact sur le bien-être des habitants dans les villes sur Terre. Ce fait est valable pour tous les êtres humains et donc aussi sur la Lune. Il faut donc veiller à ce que le plus d'espèces, de formes et de couleurs composent cet écosystème.

Afin d'accroître le volume intérieur disponible, il est préférable d'utiliser des modules gonflables mais ceux-ci sont difficilement aménageables. Il faut donc les utiliser avec précaution, pour des usages spécifiques et non comme principe général. Un autre problème que posent les modules gonflables est la difficulté à réarranger l'espace ou à réaffecter un lieu. Or on sait que ces usages changent au fil du temps et qu'il va falloir s'y adapter.

Le design intérieur est aussi à prendre en considération. La présence de couleurs et de matériaux variés est un élément primordial dans ce domaine. On sait depuis longtemps l'effet psychologique des couleurs sur l'Homme. Même si des variations persistent en fonction des cultures, on sait que le bleu a tendance à calmer tandis que le rouge rend plus actif. On pourrait ainsi définir un code couleur lié aux fonctions des différents modules. Ces couleurs peuvent être accompagnés de matériaux comme le bois ou la pierre qui nous rappellent nos origines terrestres. L'important étant de lutter contre la monotonie qui peut provoquer des désordres mentaux sur le long terme.

Il est aussi important de lutter contre le sentiment d'enfermement que peut provoquer l'isolation dans un environnement hostile. Pour ce faire, il est important de maintenir un contact permanent avec la Terre grâce à des écrans numériques. Mais cela ne saurait suffire à satisfaire le besoin d'horizon de tout humain. Il faut donc des ouvertures sur l'extérieur, de préférence près de l'entrée du tunnel afin d'avoir une vue sur le grand paysage et un apport de lumière naturelle. Ces ouvertures sont de préférence des baies vitrées assez larges afin de dissoudre la dichotomie intérieure-extérieure de manière beaucoup plus efficace qu'avec un simple hublot. Certes, la plus grande vitre jamais installée dans l'espace ne représente pas encore une baie vitrée mais un nouveau matériau, ALON, qui est composé d'aluminium, d'oxygène et d'azote, promet de remplacer le verre blindé dans l'espace. Celui-ci est plus résistant aux impacts, aux rayures et à la pression que le verre classique et peut se développer actuellement sur 80cm de diagonale. Ce matériau plus résistant et moins lourd que le verre peut nous aider à mettre en œuvre cette volonté d'ouverture sur l'extérieur.

Le paysage intérieur est également à prendre en compte dans le design d'une base lunaire. Par soucis de taille, il est cependant difficile de réaliser une telle surface dans les tunnels de lave. Il est toutefois possible de donner plus d'ampleur à certains espaces. Comme dans l'architecture sur Terre, il s'agit d'économiser les moyens et mettre l'emphase sur les éléments clés du programme comme les lieux de réunion et de socialisation. Les espaces privatifs et les laboratoires peuvent être moins hauts de plafond. Cette question est aussi reliée à l'ergonomie qui est très particulière sur la Lune puisque celle-ci ne possède que 1/6 de la gravité terrestre. On sait par exemple grâce aux vidéos prises sur la Lune lors des missions Apollo que les escaliers doivent avoir des marches plus profondes que sur Terre. Les échelles sont plus facilement praticables et il serait préférable de disposer des prises permettant de faciliter les déplacements.

Afin de limiter au maximum la mise en mouvement de la poussière lunaire il est important de prévoir des routes, du moins à proximité de la base. Cela permet aux astronautes de se déplacer aux abords de la base sans soulever de poussière. Il faut aussi prévoir une piste d'atterrissage et de décollage qui soit à la fois éloigné de la base pour des raisons de sécurité et pour limiter la présence de poussière à proximité de la base. Cependant, elle ne doit pas se situer trop loin pour que les astronautes puissent y accéder facilement en cas d'urgence. Pour réaliser ces routes, il suffit d'exposer la couche superficielle du régolithe à des radiations intenses pour le faire fondre. Il se forme ainsi une couche rigide et homogène qui ne dégage plus de poussières en cas de passage.

Dans un second temps, une fois la base installée et les astronautes sur place il sera également possible de tester le régolithe afin de déterminer s'il est possible d'agrandir la base à moindre frais. On pourrait par exemple tester de creuser la roche à l'intérieur du tunnel de lave afin de déterminer s'il est possible de créer des alcôves pour de futures modules. On peut même imaginer qu'en faisant fondre la roche sur sa couche superficielle, on puisse créer des volumes hermétiquement fermés par un sas disposé à l'entrée de l'alcôve. Cela permettra d'avoir une matérialité unique dans ces alcôves et d'étendre la base tout en restant protégé. Si cette solution s'avérait trop coûteuse ou pas assez sécuriser, il est toujours possible d'étendre la base grâce à des modules déployés à même la surface est recouvert de régolithe avec la technologie d'impression 3D de béton testé par Foster + Partners.

3-2 Limites attendues de la base idéale

Cependant, aucun projet n'est parfait et celui-ci ne fait pas exception. Quels sont les limites ou les contradictions présentes dans ce projet ? L'idée même de créer une base idéale est un peu naïve puisque tout projet doit s'adapter à son environnement et que la qualité réelle d'un projet ne peut se mesurer qu'une fois construit. C'est donc plutôt un projet tentant de mêler au mieux les dernières découvertes qui peuvent faciliter la colonisation de la Lune.

Les limites de la base sont en partie liées au travail d'analyse qui l'a précédé. En effet, celui-ci a mis en avant l'existence de plusieurs solutions viables aux contraintes lunaires. Faire un projet à partir de cette étude nécessite donc de faire des choix subjectifs prospectivistes puisque de nombreuses technologies proposées n'ont jamais été testées sur place. De plus cette analyse a été pensée d'un point de vue architectural qui n'est pas le même que celui d'un ingénieur ou d'un chercheur. Cela signifie que certains des thèmes abordés ici comme la sensation d'espace ou l'organisation des fonctions n'aurait sans doute pas été abordés par un ingénieur. Et de manière équivalente, certains thèmes ici laissés de côté comme la production d'énergie sont primordiales pour les ingénieurs. Le projet de base lunaire tiré de cette analyse hérite donc de cette subjectivité et a été pensé avec une pensée architecturale tout en essayant de prendre en compte les contraintes techniques inhérentes à la Lune.

Un autre problème est l'avancement des technologies actuelles. De nombreuses recherches et tests sont encore nécessaires pour que la mise en œuvre de la base puisse avoir lieu. Les modules gonflables, par exemple, sont en phase de test mais des incertitudes persistent quant à l'étanchéité de la liaison entre les sas et des éventuelles fenêtres d'un côté et la paroi gonflable de l'autre. Le système de survie biologique est lui aussi en test dans de nombreux pays mais une boucle fermée à 100% n'a jamais été atteinte. Il faut donc encore du temps aux chercheurs afin de tester l'implantation de nouvelles espèces afin de trouver celles qui s'adaptent le mieux. Un autre défi est le maintien d'un écosystème en équilibre en cas d'imprévu. On sait par exemple que la présence de poissons nécessite une température de l'eau constante. Mais dans le cas où une défaillance devait arriver et où l'équilibre de l'écosystème s'en trouve perturbé, comment rétablir cet équilibre avant que les autres espèces n'en souffrent ? Enfin, on n'en sait très peu sur les tunnels de lave présents sur la Lune et il n'existe aucune photo de l'intérieur de ces tunnels. On ne sait donc pas si ceux-ci sont praticables ni s'il sera possible d'y faire entrer des modules de vie facilement. Il faudra donc attendre encore quelques années pour que ce projet soit réalisable et c'est pourquoi la date de départ annoncée est 2030.

3-3 Conséquences pour la Terre

Enfin, intéressons-nous aux conséquences d'un tel projet sur Terre. En effet, comme nous venons de le voir, des avancées technologiques sont encore nécessaires à l'heure actuelle pour pouvoir déployer ce projet. Quels sont les implications du développement de ces technologies sur Terre ?

L'impression 3D est un des domaines qui pourrait le plus profiter à la Terre et à la Lune. Cette technologie existe depuis les années 2000 et elle a peu à peu été appliquée dans de nombreux secteurs d'activité tel que le prototypage, la visualisation pour l'architecture ou les études de design, la prothèse, la production de pièces de voitures, d'avions, de bâtiments et de biens de consommation. Cette progression s'explique par le gain de productivité permise par l'autonomisation total du processus de fabrication de l'objet. De plus, l'utilisation d'une imprimante 3D permet la création rapide et précise de formes complexes à partir des modèles numériques. Cependant cette technologie ne peut pas encore parvenir à tous les besoins de l'humanité. En effet, les matériaux utilisés sont la résine, le plastique, la cire, le métal (titane, platine, aluminium, acier), le verre, le béton, la céramique et le plâtre. Il est cependant impossible d'utiliser plusieurs matériaux en même temps sur la même machine. Cela signifie qu'on ne peut pas encore tout fabriquer avec une imprimante 3D. De plus, il est souvent nécessaire d'effectuer un lissage des surfaces après l'impression 3D car celles-ci sont granuleuses du fait du procéder par couches successives. Il reste donc d'énormes marges de progrès notamment sur la limite de taille qu'imposent la plupart des imprimantes. Or en cas de présence humaine permanente sur la Lune il sera nécessaire de pouvoir construire des modules de vie, de outils et des pièces de rechanges sur la Lune à partir de matériaux locaux et il va sans doute falloir utiliser des procéder d'impression 3D pour y parvenir. Le développement de cette technologie est donc d'une importance capitale à la fois pour la Lune et pour la Terre. En effet, accompagnée par le développement de l'intelligence artificielle, cette technologie pourrait bien mener à une deuxième révolution industrielle où les machines travailleraient pour les humains et non les humains pour les machines.

Les recherches actuelles en matière de système de survie bio-régénératif sont étroitement liées aux recherches sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. En effet, pour pouvoir recréer un écosystème stable et productif dans l'espace il nous faut déjà comprendre les écosystèmes sur Terre. De nombreuses expérimentations sont actuellement en cours et parfois même depuis de décennies. On peut par exemple citer Biosphère 2 qui depuis 1991 accueille 7 environnements différents dans d'immenses serres au milieu du désert. L'objectif été initialement de créer une boucle fermé pendant deux ans avec une équipe de huit chercheurs à l'intérieur. Cependant en raison de manque

de dioxygène dans l'atmosphère, de l'air neuf est injecté dans l'habitat au bout d'un an d'occupation. L'échec de la tentative de vie en autarcie a cependant été riche en enseignements et ces écosystèmes sont désormais étudiés de près par des biologistes afin de comprendre l'influence des changements de l'environnement sur les différents écosystèmes. De façon plus générale, certains chercheurs et architectes se penchent sur la question des similitudes entre les enjeux planétaires et ceux de l'exploration spatiale. On peut par exemple citer le travail de Sue Fairburn, Susmita Mohanty et Barbara Imhof sur le concept de « City as a Spaceship »⁶⁸, la ville comme un vaisseau spatial, en français. Cette réflexion nous invite à considérer chaque ville comme un environnement qui doit subvenir lui-même à ses besoins en matière de production d'énergie, d'oxygène, d'eau et de nourriture. Il s'agit donc de créer des systèmes de survie bio-régénératifs à l'échelle de la ville afin de faire face aux changements climatiques qui s'avancent éte dans l'espoir de les limiter.

De plus, si une base lunaire venait à être construite, il est fort probable que ce ne soit pas une mais plusieurs nations qui la financent étant donné le coût d'une telle opération. Cette collaboration internationale pourrait avoir des répercussions géopolitiques différentes en fonction des nations qui y contribueront. On peut espérer que si les grandes puissances arrivent à mettre leurs différents de côté pour lancer une mission lunaire, ils s'en trouvent alors poussés par des intérêts communs à bien s'entendre.

Si cette base venait à se développer, on peut imaginer alors que la Lune serve de porte d'entrée dans le système solaire pour l'Homme. Il est en effet bien plus facile de décoller de la Lune que de la Terre puisque cette dernière est plus massive et possède donc un champ d'attraction gravitationnel plus important. Une fusée tirée depuis la Lune pourrait donc aller plus loin, plus vite et pour un moindre coût que sur Terre. La colonisation de la Lune et du système solaire pourrait être une solution à très long terme pour lutter contre la surpopulation même si celle-ci ne représente un problème que dans un monde de surproduction et de surconsommation.

Enfin, l'installation d'une base permanente sur la Lune devrait permettre de faire avancer la recherche fondamentale sur l'origine de l'univers, la formation des planètes et bien d'autres sujets. Notre vision du cosmos pourrait bien s'en voir changée.

⁶⁸ Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), City as a Spaceship, IAC-E4.2.8, 2014

Conclusion et recommandations

Nous avons commencé par déterminer quelles sont les raisons qui nous poussent à retourner sur la Lune, plus de quarante ans après la dernière mission Apollo. Celles-ci sont variées mais la motivation première reste à mon sens les avancées scientifiques que rendrait possible une présence humaine permanente sur la Lune. Il nous faut alors étudier de près la Lune et son environnement pour nous y préparer au mieux. La Lune a une attraction gravitationnelle d' $1/6$ celle de la Terre. De ce fait elle ne dispose pas d'atmosphère et elle est soumise aux rayonnements directs du soleil et de l'univers et aux impacts de corps célestes. C'est donc un environnement très peu hospitalier pour l'Homme mais la Lune n'est pas sans ressources. Le régolithe qui couvre la totalité de la surface de la Lune est riches en métaux et contiendra même de l'eau. Afin de créer une base sur la Lune, il est essentiel de prendre ces contraintes en compte et nous les appellerons les contraintes lunaires. Il faut encore y ajouter les contraintes inhérentes aux êtres humains que ce soit des besoins physiques ou psychologiques mais également les contraintes de faisabilités techniques ou financières. Il est ensuite possible d'extraire des critères d'évaluation à partir des contraintes lunaires, humaines et de faisabilité. Ces critères ont été appliqués à 18 projets récents qui avaient fait au préalable l'objet d'un travail de fichage systématique. L'analyse comparée de ces différents critères dans ces 18 projets mis en relation avec les contraintes initiales a permis d'établir quels sont les différentes solutions actuellement envisageable pour chacun des problèmes soulevé par l'installation d'une présence humaine permanente sur la Lune. Certaines de ces solutions ont ensuite été condensées en un projet de base lunaire idéale. Ce projet a pour objectif à la fois d'assurer une présence humaine sur la Lune à des fins de recherches mais aussi pour expérimenter avec le régolithe présent en abondance sur place afin de tester un agrandissement de la base. Il est important que la base soit le plus autonome possible à la fois pour des raisons budgétaires mais aussi pour prouver qu'il est possible de vivre en autarcie sur un autre corps céleste que la Terre. Puis, l'étude des impacts du développement d'un tel projet sur Terre nous a montré que la société humaine pourrait bénéficier des avancées technologiques nécessaires à sa mise en œuvre. Mais les apports sont plus nombreux si l'on prend aussi en considération les recherches qui seront menés sur la Lune et l'entraide internationale que nécessite ce genre de projet. Dans ce mémoire, nous avons vu que l'architecture a bel et bien sa place sur la Lune. Cependant, le spatial reste un domaine éminemment multi-professionnel et les architectes ne sont qu'un rouage dans la mécanique complexe de l'habitat lunaire.

Si les conditions sur Terre ne se dégradent pas trop vite, la colonisation de la Lune pourrait bien advenir dans un futur proche. L'humanité parviendra-t-elle à devenir une espèce multi-planétaire ?

Liste des abréviations

ECLSS: Environmental Control and Life Support System (*Système de contrôle environnemental et de supports de vie*)

ESA : European Space Agency (*Agence spatiale Européenne*)

EVA: Extravehicular Activity (*Sortie extravéhiculaire*)

ISS : International Space Station (*Station Spatiale Internationale*)

ISRU : In Situ Ressources Utilisation (*Utilisation des ressources présentes sur place*)

LEO: Low Earth Orbit (*Orbite terrestre basse*)

LSS : Life Support System (*Système de support de vie*)

NASA : National Aeronautics and Space Administration (*Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique*)

Bibliographie

Ouvrages

ISU SSP 2006 Team Project, LUNA GAIA A closed-loop habitat for the moon executive summary, Illkirch-Graffenstaden, ISU, Aout 2006

ISU SSP 2006 Team Project, LUNA GAIA A closed-loop habitat for the moon final report, Illkirch-Graffenstaden, ISU, Aout 2006

Schmitt (Harrison H.) et al, Lunar Settlements, Rutgers University, Benaroya (Haym), 2010.

Morin (Lee) et al, "Rocks to Robots: Concepts for initial Robotic Lunar developpement", in Lunar Settlements, 2010, p.129 à 141.

Ignatiev (Alex) et al, "Solar cell fabrication on the Moon from Lunar Ressources", in Lunar Settlements, 2010, p.143 à 151.

Schlacht (Irene Lia), "Multidisciplinary Approach for User Reliability", in Lunar Settlements, 2010, p.155 à 164.

Bishop (Sheryl L.), "Here to stay: Designing for Psychological Well-Being for Long Duration Stays on Moon and Mars", in Lunar Settlements, 2010, p.261 à 276.

Häuplik-Meusburger (Sandra), Lu (San-Hwan), Destination Moon, Departement for Building Construction and Design - HB2 Vienna University of Technology Editor, 2012

Aranya (S.) et al, Moon, Badescu (Viorel), 2012

JANKOVIC, Nikola. The Martians. Paris. 2015-. Architectures CREE, 2015/2016, déc./janv., no 374. 2015.

LIU, Xiao, WANG, Hao, TU, Bingtian, WANG, Weimin et FU, Zhengyi. Highly Transparent Mg 0.27 Al 2.58 O 3.73 N 0.27 Ceramic Prepared by Pressureless Sintering. KRELL, A. (éd.), Journal of the American Ceramic Society. janvier 2014. Vol. 97, n° 1, pp. 63 66. DOI 10.1111/jace.12711.

WAHL, Joseph M, HARTNETT, Thomas M, GOLDMAN, Lee M, TWEDT, Richard et WARNER, Charles. Recent Advances in ALONTM Optical Ceramic. . pp. 12.

SALEM, Jonathan A. Transparent Armor Ceramics as Spacecraft Windows. SGLAVO, V. (éd.), Journal of the American Ceramic Society. janvier 2013. Vol. 96, n° 1, pp. 281 289. DOI 10.1111/jace.12089.

Meuser (Philipp), Galina Balashova Architect of the soviet Space programme, Dörria (Cornelia), 2015

Clervoy (Jean-François), Lehot (Frank), Histoire de la conquête spatiale, Paris, 30 mai 2017

Servigne (Pablo), Stevens (Raphaël). Comment tout peut s'effondrer. Paris. 2015.

Doule (Ondrej), Architecture universelle série éducative, Space Innovations L.L.C. Melbourne. 2017

Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), City as a Spaceship, IAC-E4.2.8, 2014

Filmographies

Jaumann (Ralf), *Crust Formation and evolution*, ESA Lunar Exploration, [Consulte en janvier 2018], Disponible sur Internet, <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/218?ha=247>

Joy (Katherine), *Morphology*, ESA Lunar Exploration, [Consulte en avril 2017], Disponible sur Internet, Internet, <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/218?ha=245>
Howard (Ron), Grazer (Brian), *Mars*, National Geographic, , 52 minutes, 2016.

Nolan (Christopher), *Interstellar*, Warner Bros et Paramount Pictures, 169 minutes, 2014.

Schmitzer (Ulrike) und Widter (Matthias), *Space architecture: Architektur für den Weltraum*

3D-printing a lunar base, ESA, 4 minutes 54, 6 novembre 2014, consulte en decembre 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=pkgPWUGkz7o>

TEDX TALKS. Contour Crafting: Automated Construction: Behrokh Khoshnevis at TEDxOjai [en ligne]. 28 avril 2012. [Consulté le 11 décembre 2017]. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog>

BEROK KHOSHNEVIS. contour crafting [en ligne]. 6 juin 2017. [Consulté le 11 décembre 2017]. Disponible à l'adresse : https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=53zN4MZI8RE

Webbographie

Sites :

<http://www.aiaa.org/>

<http://www.jacquesrougeriedatabase.com/Projects/space>

<http://www.research.fit.edu/hcdi/publications.php>

<http://www.spacearchitect.org/>

<http://www.spaceinnovations.net/main>

<http://www.shee.eu>

<http://www.spinoff.NASA.gov>

Pages Web :

« Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », *Press of Foster & Partners*, Publie le 31 janvier 2013 [en ligne].

[Consulte en avril 2017],

<http://www.institut-polaire.fr/ipev/infrastructures/les-bases/concordia/>

Home. *CC-Corp* [en ligne]. [Consulté le 11 décembre 2017]. Disponible à l'adresse :

<http://contourcrafting.com/>

Space Applications. *CC-Corp* [en ligne]. [Consulté le 11 décembre 2017]. Disponible à l'adresse :

<http://contourcrafting.com/space-applications/>

Lunar Exploration. [en ligne]. [Consulté le 15 octobre 2017]. Disponible à l'adresse :

<http://lunarexploration.esa.int/#/explore/technology/231>

Lunar Exploration. [en ligne]. [Consulté le 22 octobre 2017]. Disponible à l'adresse :

<http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/224?ha=254>

Mars500. *Wikipédia* [en ligne]. 2017. [Consulté le 14 octobre 2017]. Disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mars500&oldid=139641826>

The Solution. [en ligne]. [Consulté le 14 octobre 2017]. Disponible à l'adresse :

<http://www.sociomapping.com/the-solution>

About MVA. *Moon Village Association* [en ligne]. [Consulté le 13 novembre 2017].

Disponible à l'adresse : <https://www.moonvillageassociation.org/>

NASA. Garcia Mark . "About the Space Station: Facts and Figures". [en ligne].

[Consulté le 9 May 2018]. Disponible à l'adresse :

<https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>

ESA Euronews: Moon Village. *European Space Agency* [en ligne]. [Consulté le 9 avril 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2016/02/ESA_Euronews_Moon_Village

IAC-2017-E3.2.1 MVA (1). *Google Docs* [en ligne]. [Consulté le 13 novembre 2017]. Disponible à l'adresse : https://drive.google.com/file/d/0ByoJOuuNPnJCdjcwU2JudnY0SmM/view?usp=sharing&usp=embed_facebook

ESA. Moon Village: humans and robots together on the Moon. *European Space Agency* [en ligne]. [Consulté le 9 avril 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.esa.int/About_Us/DG_s_news_and_views/Moon_Village_humans_and_robots_together_on_the_Moon

ESA, Lunar Resources, Metals and rare Earth elements, [page consultée le 21 octobre 2017] Disponible sur internet: <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/244?ha=254>

ESA, Lunar Resources, Water and Volatiles, [page consultée le 23 octobre 2017] Disponible sur internet: <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/224?ha=252>

ESA, Lunar Resources, Illumination [page consultée le 23 octobre 2017] Disponible sur internet: <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/224?ha=256>

ESA, Lunar Resources, Coping with the Environnement, [page consultée le 23 octobre 2017] Disponible sur internet: <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/technology/228?ha=300>

ESA, "Information Kit Mars 500 Isolation study", [page consultée le 23 octobre 2017] Disponible sur internet: http://www.esamultimedia.esa.int/docs/Mars500_infokit_feb2011_web.pdf

ESA. ESA's MELiSSA life-support programme wins academic recognition. [page consultée le 23 avril 2018] Disponible sur internet: [http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/ESA_s_MELiSSA_life-support_programme_wins_academic_recognition/\(print\)](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/ESA_s_MELiSSA_life-support_programme_wins_academic_recognition/(print))

ESA. ESA wastewater recovery picked as key climate change. [page consultée le 18 mai 2018] Disponible sur internet: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/ESA_waste_water_recovery_picked_as_key_climate_technology

Home. CC-Corp [en ligne]. [Consulté le 11 décembre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://contourcrafting.com/>

Space Applications. CC-Corp [en ligne]. [Consulté le 11 décembre 2017].
Disponible à l'adresse : <http://contourcrafting.com/space-applications/>

Bringing Nasa Down To Earth | Invention and Technology. [en ligne]. [Consulté le 11 novembre 2018]. Disponible à l'adresse :
<https://www.inventionandtech.com/content/bringing-nasa-down-earth-0?page=0>

International Moon Village Workshop. Eventbrite [en ligne]. [Consulté le 19 octobre 2017]. Disponible à l'adresse :
<https://www.eventbrite.fr/e/38105428362?aff=efbneb>

Nine Visions of MOONTOPIA. Eleven Magazine [en ligne]. 11 janvier 2017. [Consulté le 18 septembre 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.eleven-magazine.com/2017/01/11/nine-visions-moontopia/>

ContourCraftingCororation, contour crafting, 6 Juin 2017, [page consultée le 12/12/2017] Disponible sur internet: contourcrafting.com

ContourCraftingCororation, Contour crafting: Automated Construction: Behroth Khoshnevis at TEDxOjai, 6 Juin 2017, [page consultée le 12/12/2017] Disponible sur internet: contourcrafting.com

Mémoire

Hilaire (Vincent), Mar Architecture, Memoire, sous la direction de Denis Bocquet, Ecole Nationale, Supérieur, d'Architecture de Strasbourg, 2016

Meyer (Claire). Architecture extra-terrestre et ses apports pour nos villes sur Terre. Sous la direction de DUFRASNES Emmanuel et WETZEL Jean-Paul Ecole Nationale, Supérieur, d'Architecture de Strasbourg, 2017

Sommaire

Introduction.....	1
1 Etat de l'art.....	2
1-1 Motivations pour retourner sur la Lune ?.....	2
1-1-1 Besoins scientifiques.....	3
1-1-2 Coopération internationale.....	4
1-1-3 Exploration et colonisation de l'espace.....	7
1-1-4 Bénéfices sur Terre.....	8
1-2 La Lune et son environnement: avantages et inconvénients.....	9
1-2-1 La distance Terre-Lune.....	10
1-2-2 L'environnement lunaire.....	11
1-2-3 Le sol lunaire: le régolithe.....	14
1-3 La place de l'architecte sur la Lune.....	16
1-3-1 La lune domaine des ingénieurs.....	17
1-3-2 Des architectes se sont déjà penchés sur la question.....	18
1-3-3 L'architecture sera de plus en plus présente sur la Lune.....	22
2 Etude de cas.....	23
2-1 Méthode employée dans l'étude de cas.....	24
2-2 Critères de sélection.....	25
2-3 Analyse par critères et extraction des meilleures solutions.....	26
2-4 Résultats de l'étude.....	44
3 Perspectives futures.....	45
3-1 Proposition de la base idéale.....	46
3-2 Limites attendues de la base idéale.....	50
3-3 Conséquences pour la Terre.....	51
Conclusion et recommandations.....	53
Liste des abréviations.....	54
Bibliographie.....	55
Annexes.....	61

Annexes

Fiches d'analyse de projets Lunaires

Lunar Habitation

SHEE

Luna Gaïa

Project Boreas

Selenolith

Sphere Station

Architecture on the Moon

Aymara

Lunar Biodiversity Data Base

CyclopsHUB

Down to Earth

The Green Andromeda

Myo

Touch the Moon Slightly

Resistance/Residence under cover

T:W:I:S:T

TESTLAB

MODULPIA

Lunar Habitation

- conçue en 2012
- par Foster + Partners
- client: ESA
- 3 modules gonflables
- ISRU en impression 3D
- pour 4 personnes



Foster + Partners fait partie d'un consortium mis en place par l'Agence spatiale européenne pour explorer les possibilités de l'impression 3D pour construire des habitations lunaires. Ils ont conçu un habitat lunaire pour 4 personnes. L'espace de vie est gonflé puis recouvert d'une structure à haute résistance faite de matériaux lunaires et de colle qui est imprimée en 3D par des robots. Un module cylindrique en dur qui contient le système de survie et attaché à chaque module gonflable. Ce projet, conçu par l'agence d'architecture Foster + Partner, montre bien que l'exploration spatiale repose de plus en plus sur des entreprises privées dont les agences d'architecture. La structure de l'impression 3D s'inspire des systèmes biologiques naturels et utilise autant de matériaux locaux que possible.

Points positifs:

Module gonflable	gain de volume de 100 à 200 %
intérieur gonflable	pas d'assemblage à prévoir sur place
protection par une couche de régolithe	bloque les radiations et les micro météorites
ISRU	protection assurée avec un moindre poids
hublots	lumière naturelle
3 modules autonomes	redondance des systèmes de survie
impression 3D	utilisation économe de la régolithe
robotisation	moins d'EVA nécessaires
phasage	modules prêts quand les astronautes arrivent
biomimétisme	impression 3D plus efficace et économe
2 étages avec double hauteur	diversité spatiale, respiration
intérieur très tactile	effets psychologiques positifs

Points négatifs:

base en surface	protection insuffisante contre les météorites
système de survie chimique	dépendance à l'approvisionnement Terrestre
1 seul accès par module	vulnérabilité au feu
hublots positionnés au plafond	pas de vue à hauteur d'Homme
impression 3D de la protection en régolithe	plusieurs mois de constructions nécessaires
pas de production de nourriture sur place	dépendance à l'approvisionnement Terrestre
pas de végétation	mauvais psychologiquement à long terme
pas de moyens de transport prévu	limitation de la zone de recherche
pas de sas à véhicule prévu	contamination possible de poussière lunaire

Conclusion:

Ce qu'on peut retenir de Lunar habitation c'est d'abord la recherche sur l'ISRU et l'impression 3D de béton à base de régolithe. En effet, Foster + Partners en collaboration avec l'ESA ont fabriqués un morceau de mur en simili-régolith avec une imprimante 3D.

Cette première montre les possibilités qu'offre l'ISRU couplé à l'impression 3D sur la lune même si des recherches complémentaires doivent encore être faites pour rendre cela réalisable à grande échelle. L'utilisation de modules gonflables est également très intéressant en terme de gain d'espace et de réduction des coûts.

Cependant cette structure fragile doit être protégée des radiation, des météorites et de la poussière lunaire. Le projet se propose donc de recouvrir la base d'une couche de régolithe imprimé en 3D à l'aide de robots.

Cependant même si cette couche protège la base efficacement de la plupart des radiations et des micro-météorites, une météorite un peu plus grosse représente toujours un risque sérieux quoiqu'extrêmement rare étant donné la fréquence à laquelle des météorites de gros diamètres percutent la Lune. Ce risque pourrait toutefois être diminué si la base se trouvait dans une grotte de lave ou sous la surface lunaire.

SHEE (Self-Deployable Habitat for Extreme Environments)

- conçue en 2013-2015
- coordinateur: ISU
- client: ESA
- module rigide déployable
- pour 2 personnes
- masse: 6 T



SHEE est un projet collaboratif qui réunit 7 partenaires européens regroupés autour de l'ISU dans le cadre du septième programme spatial de la Commission européenne . C'est un démonstrateur de ce que pourrons être les futures bases de survie en environnement extrême. En effet, cet habitat a été conçu pour pouvoir assurer la vie humaine dans tous les environnements extrêmes y compris l'espace. Le tronçon principale du module contient les sas d'entrées et de sortie du module ainsi que la cuisine qui occupe l'espace central du module, lieu de socialisation privilégié. De chaque cotés de cet élément rigide se déploient des espaces à savoir des petites chambres avec des couchettes pliantes et de l'autre coté deux grandes zones de travail avec des sanitaires dont l'intimité est assuré par une paroi mobile.

Points positifs:

Employabilité	installation instantanée
Autonomie	2 personnes pendant 2 jours
Module déployable	gain d'espace à l'intérieur
Taille standard	transportable par camion
Modèle déjà construit en 1:1	retour possible sur expérience
structure rigide hexagonale	meilleur résistance et isolation
Assemblage	possibilité d'assembler de plusieurs modules
Stockage des déchets	pas d'impact sur l'environnement
Petit module léger	facilement déplaçable
Prototype	beaucoup de recherches effectuées
Universel	supporte tous les environnements
différentes couleurs de la veilleuse	variété des couleurs

Points négatifs:

Autonomie réduite	Seulement 2 jours d'autonomie
Pas de sas dans le module	vulnérable au feu
Suit lock sans sas de sûreté	risque de dépressurisation
Pas d'espace personnel fermé	manque d'intimité
Sanitaires séparé par une cloison mobile	intimité insuffisante
Peu de couleur dans le module	monotone à long terme
Pas de fenêtre	pas de vue sur l'extérieur
Module assez petit	ambiance claustrophobie
Ambiance lumineuse froide	ambiance glauque
Coque en fibre de verre	protection insuffisante contre les radiations
Base en surface	Protection insuffisante contre les météorites

Conclusion:

SHEE a un avantage significatif comparé aux autres projets de base lunaire analysés: des prototypes ont été bâtie en dur et servent à effectuer des recherches sur l'habitat en milieux hostiles. Un exemplaire est actuellement à l'ISU à Strasbourg et il est possible de le visiter.

On peut ainsi réellement comprendre l'ambiance, l'impression d'espace et l'ergonomie à l'intérieur de ce module. L'ingéniosité du dispositif est de déployer des lieux de vie automatiquement dès la mise en place. Cela permet un gain d'espace considérable comparé à un volume rigide.

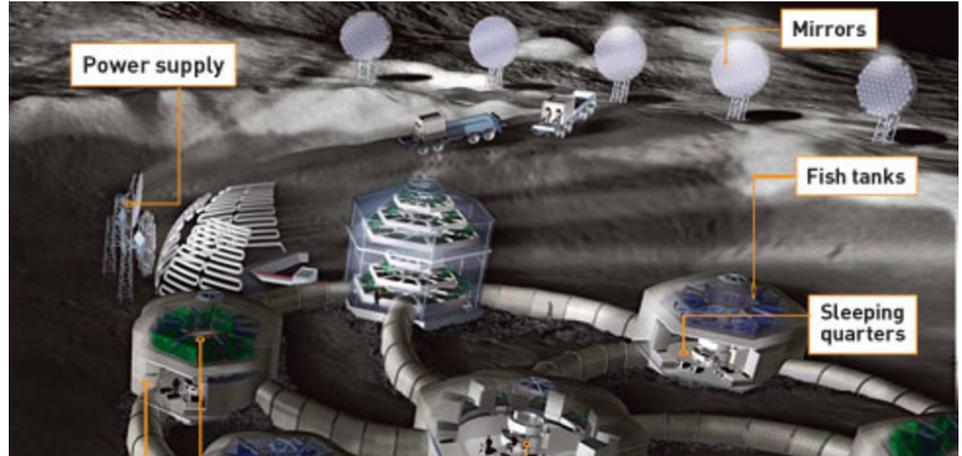
Cependant, c'est aussi une contrainte supplémentaire pour l'organisation spatiale et l'intimité possible. Bien que les chambres soient relativement isolées l'une de l'autre, les sanitaires laissent peut de place à la discrétion avec un simple paroi mobile translucide comme seul intimité.

Le projet est sans doute trop fragile pour pouvoir être utilisé dans l'espace. En effet, la coque en fibre de verre ne garanti pas une protection suffisante contre les météorites. L'autonomie de deux jours est également insuffisante pour une utilisation sur la lune.

Même si ce projet n'est pas parfait, il a le mérite d'avoir été réaliser et de servir de base pour les futures modules lunaires. De plus de nombreux domaines de recherches dans l'habitat spatial ont profité de ce projet pour faire des avancées.

LUNA GAÏA

- conçue en 2006
- coordinateur: ISU
- par: SSP 2006 Team Project
- base conceptuelle
- recommandations pour les agences spatiales
- vision globale



Luna Gaïa est le résultat du travail d'étudiants de l'ISU encadrés par des enseignants qualifiés dont le but a été de proposer un modèle théorique, un cahier des charges que devraient respecter les futures bases lunaires. Mais le projet ne s'arrête pas là et prend en compte toutes les difficultés qui sont un frein à la mise en place d'une base lunaire que ce soient des problèmes techniques, institutionnels ou politiques. Tous les champs d'études sont abordés dans ce travail et chacun a son lot de recommandations et de choix clairement exprimés. Leur objectif est: « de créer une structure responsable de l'établissement à long terme d'une base lunaire qui fonctionnerais comme un système fermé efficace et auto-régénératif avec des applications potentielles sur Terre. »

Points positifs:

- | | |
|---|---|
| protection par une couche de régolithe | bloque les radiations et les micrométéorites |
| ISRU | protection assurée avec un moindre poids |
| Citerne de stockage autour des lieux de vie | protection contre les radiations renforcée |
| design modulaire | facilité d'expansion |
| forme structurelle inspirée du carbon 60 | grande résistance, pliable |
| tous les éléments de même dimensions | réduction des coûts |
| zonage des activités | redondance et facilitation du rythme journalier |
| système de survie biorégénératif LUGALISUS | autonomie à 90/98% |
| localiser dans un cratère | protection contre les radiations solaires |
| automation la plus vaste possible | moins de radiations pour les habitants |
| plusieurs sources et stockages d'énergie | redondance énergétique |
| pas de forme prédéfinie | recommandations que chacun peut utiliser |

Points négatifs:

pas de forme prédéfinie	pas de mise en pratique des principes
énergie basé sur le nucléaire	risque de contamination de la Lune
droits de propriétés sur la Lune	risque d'exploitation marchande
base partiellement en surface	protection insuffisante contre les météorites
LUGALISUS	système théorique jamais testé
conçu par des étudiants	l'ISU rejette toute responsabilité
conçu en 2006	12 années de progrès techniques depuis

Conclusion:

Luna Gaïa est un projet très instructif qui présente une sorte d'état de l'art sur l'habitat lunaire. La vision très global développer dans ce travail permet d'aborder toutes le thématiques qui tournent autour de l'habitat lunaire comme le transport, la production d'énergie, le système de survie, le design intérieur, l'agencement de la base, l'ISRU, l'éthique, la communication, la coopération internationale, la juridiction, le droit de propriété, les missions, etc.

En plus de proposer un état de l'art sur ces différents thèmes, Luna Gaïa créer de nouvelles connaissances comme par exemple LUGALISUS qui est un système de survie auto-régénératif qui associe les meilleurs technologies disponibles à l'époque pour créer un système autonome à 90/98%.

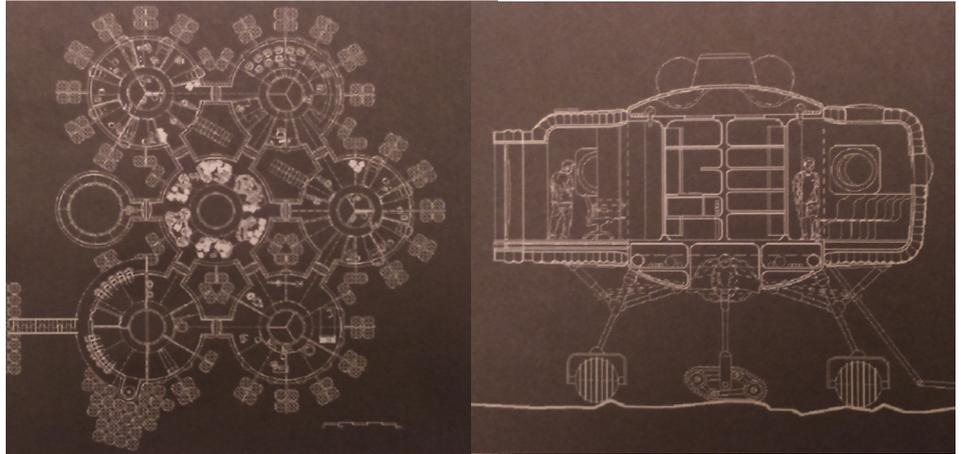
De plus, Luna Gaïa prend position sur toutes les thématiques en exprimant clairement les choix logiques qui sont les leurs. Il s'agit en effet de créer une sorte de guide de la construction lunaire qui puisse servir aux ingénieur et aux chercheurs pour leur apporter une vision globale qui diffère peut être le la leur.

Dans ce projet, une attention particulière est portée sur les freins à la mise en place d'une base lunaire. Les principales lacunes sont identifiés et les auteurs n'hésitent à dire quand des recherches futures sont nécessaires comme sur les modules gonflables par exemple.

Enfin, on s'intéresse aussi aux apports pour la Terre qui sont très vaste, de l'impression 3D à la création se systèmes biologiques productifs fermés en passant par la recherche fondamentale.

Project Boreas

- conçue en 2003-2006
- par: British Interplanetary Society
- projet sur Mars
- durée de vie: 5 ans
- 6 modules
- pour 10 personnes



Project Boreas est un projet de base polaire sur Mars. Bien que Mars et la Lune sont très différents, le design de cette base me semble contenir des enseignements précieux pour les deux. La base est constituée de 5 modules habitables organisés autour d'un sixième module faisant office de serre agricole. Les modules sont reliés entre eux par des sas en enfilade et par le module centrale. Dans ce projet, une grande attention a été portée sur le design intérieur, la redondance et l'habitabilité de la base. Le projet probablement inspiré de Halley VI, également conçue par des britanniques, ne se pose pas directement sur le sol mais est surélevé par un système de vérin associé à des roues ce qui permet de déplacer la base et donc d'accroître son rayon d'action.

Points positifs:

base mobile	rayon d'action accru
design modulaire	facilité d'expansion
zonage des activités	redondance et facilitation du rythme journalier
module centrale cultivable	effets psychologiques positifs
atelier dans la serre	socialisation facilitée
fenêtres dans chaque module	diminue le sentiment d'enfermement
redondance des modules	moins de risques de panne fatale
configuration en étoile	fluidité et facilité des accès
chaque module a son thème	variété visuelle et bien-être
éclairage extérieur	point de repère et vue nocturne
système de réalité virtuelle	plus de stimulus et de variété
robotisation à distance	moins de sorties pour les astronautes

Points négatifs:

base en surface	protection insuffisante contre les météorites
durée de vie de quelques années	base semi-permanente
base mobile	complique l'implantation permanente
chaque module a son thème	augmentation du prix de fabrication
base conçue pour mars	non adaptée aux conditions lunaires
modules circulaires	difficilement aménageable

Conclusion:

Dans l'état actuel, le projet Boreas n'est pas transposable directement sur la Lune. En effet la base a été conçue pour résister à l'environnement martien très différent de l'environnement lunaire. Il y a moins de radiations et de météorites qui sont stoppés par l'atmosphère martienne qui n'est pas présente sur la Lune. De plus, les objectifs de la mission et l'utilisation des ressources sur place a été calibrer pour les pôles martiens et les mêmes procédés ne seraient pas possible sur la Lune.

Cependant, cette étude qui a réuni 25 chercheurs et ingénieurs pendant 3 ans est très complète et de nombreux enseignements peuvent en être tirés. Comme le travail très approfondi sur l'habitabilité des modules dans le long terme, l'autonomie grâce à la serre centrale, l'implantation de la base en étoile, les systèmes de circulation, l'utilisation de ressource locales, le système de survie, la production d'énergie, le contrôle thermique, la robotisation, la médecine spatiale, la mobilité, le contrôle à distance, l'extraction minière, l'ouverture sur l'extérieur, l'éclairage extérieur, l'utilisation de la réalité virtuelle etc .

C'est pour toutes ces raisons que j'ai décider de l'incorporer au corpus d'étude bien qu'elle ai été conçue pour Mars. A la fois la qualité et la précision et l'ampleur du design, qui couvre toutes les thématiques associées à l'habitat spatial, permis par une étude de 3 ans par 25 personnes sont rares dans le domaine spatial.

Selenolith

- conçue en 2015
- auteur: Anton Rakov
- pour ∞ personnes
- ISRU en impression 3D
- construction par blocs
- système d'ordre ancien



Selenolith est un projet de base lunaire conçue pour être réalisée à partir de régolithe imprimé en 3D par des robots sur la Lune. Une épaisse couche protection en régolithe qualifiée de durable et massive habitera les modules de vie et de recherches ainsi que les véhicules apportés préfabriqués de la Terre. Cette couche protectrice serait constituée de blocs primaires assemblés afin de créer de larges espaces couverts. Pour Anton Rakov : «L'idée principale du projet réside dans le fait que l'utilisation de détails en pierre pour la protection et l'exploitation des établissements lunaires ramène l'architecture à l'ancien système d'ordres.» C'est une idée assez incongrue et inhabituelle de repartir des ordres architecturaux pour la création de bases spatiales.

Points positifs:

ISRU	protection assurée avec un moindre poids
construction robotique	diminution des risques pour les astronautes
piste d'alunissage adaptée	facilite l'alunissage, diminution des poussières
double sas avec sas à combinaison	pas de poussière à l'intérieur
construction par bloc	possibilité d'extension infini
durabilité quasi infini des protections	possibilité d'une base permanente
recouvrement plusieurs mètres de régolithe	bloque les radiations et les micrométéorites
système d'ordre architectural	environnement familier
tests de construction préalable possible	apporte une sécurité supplémentaire
laboratoire de construction	permet d'expérimenter avec la régolithe
laboratoire chimique	permet de stocker les déchets

Points négatifs:

projet = couche de protection en régolithe	de nombreux domaines restent non traités
système d'ordre architectural	peu efficient en ressources
système d'ordre architectural	récupération historique sans réel raison
construction par blocs	nécessite une mise en œuvre supplémentaire
une seule source d'énergie prévue	pas de redondance en cas de panne
détails en régolithe	aspect ornemental superflu
protection massive en régolithe	utilisation de régolithe massive
expérimentation et mise en œuvre robotique	peu prendre des années

Conclusion:

Selenolith met en œuvre des procédés de construction et une utilisation de la régolithe de façon paradoxalement innovante en empruntant le système d'ordre architectural et la construction à partir de blocs de base.

Peu de projets lunaires font une utilisation aussi massive et ornemental de la régolithe. Le concept même de construire des abris en régolithe pour ensuite placer des modules dedans est lui aussi innovant. En effet, la plupart des concepts faisant appelle à la régolithe procèdent de façon inverse en important le module dans un premier temps pour ensuite le recouvrir de régolithe.

L'utilisation des ordres architecturaux anciens viens certainement d'une volonté de créer un environnement familier pour les habitants et du constat qu'une grande masse de régolithe est nécessaire pour assurer une protection suffisante, ce qui rappel les constructions massives des débuts de la pierre de taille.

Cependant, l'ornementation et les références historiques semblent quelque peu hors contexte sur la Lune. D'autant plus que la technologie d'impression 3D permet, grâce à l'intelligence artificielle de créer des structures plus résistantes tout en consommant moins de matières premières.

Sphere Station

- conçue en 2016
- auteur: Ekaterina Bondareva
- pour 4 personnes
- base mobile
- 3 modules
- sphères géodésiques



Sphere Station a été conçue comme un laboratoire mobile pour Mars et la Lune. 3 modules de base autonomes servent à créer une base mobile plus ou moins grande selon les besoins de l'expédition. Un de bloc sert d'habitation, un autre sert de laboratoire et le troisième a des fonctions techniques. Ces modules peuvent parcourir 1000km depuis la base principale qui n'est pas détaillée ici. Comme le dit Ekaterina Bondareva «Le but du projet est de créer la station qui peut maintenir des conditions de confort pour les scientifiques dans les extrêmes environnementaux et fournir de nouvelles possibilités de recherche.»

Points positifs:

base mobile	rayon d'action accru
design modulaire	facilité d'expansion
redondance des systèmes de survie	moins de risques
connexions entre les modules	fluidité et facilité des accès
fenêtres	diminue le sentiment d'enfermement
système gyroscopique	stabilité accrue
moteur placé dans le bas des sphères	maintient la sphère en équilibre
autonomie des modules	possibilité de division du convoie
structure géodésique	résistance accrue
éléments de fabrication standardisés	production moins onéreuse
couleurs à l'intérieur	variété et stimulus visuel

Points négatifs:

base en surface	protection insuffisante contre les météorites
durée de vie de quelques années	base semi-permanente
base mobile	nécessite une base fixe
base conçue pour mars et la Lune	pas parfaitement adaptée a la Lune
modules sphériques	difficilement aménageable
parois fines et légères	insuffisant contre les radiations
pas de plans intérieur détaillé	difficile d'aménager une sphère
3 modules différents	nécessite au moins 3 modules

Conclusion:

Sphere Station est un concept intéressant par bien des aspect mais il pâtit de sa principale caractéristique: il est mobile. Cela a évidemment l'avantage d'un grand rayon d'action ce qui permet d'accéder à des zones de recherche auparavant inaccessible.

Pourtant, la mobilité implique la légèreté des modules qui sont alors moins résistants qu'une base fixe. Malgré la structure en sphère géodésique, les protections contre les radiations et les météorites sont en effet insuffisantes pour une base lunaire.

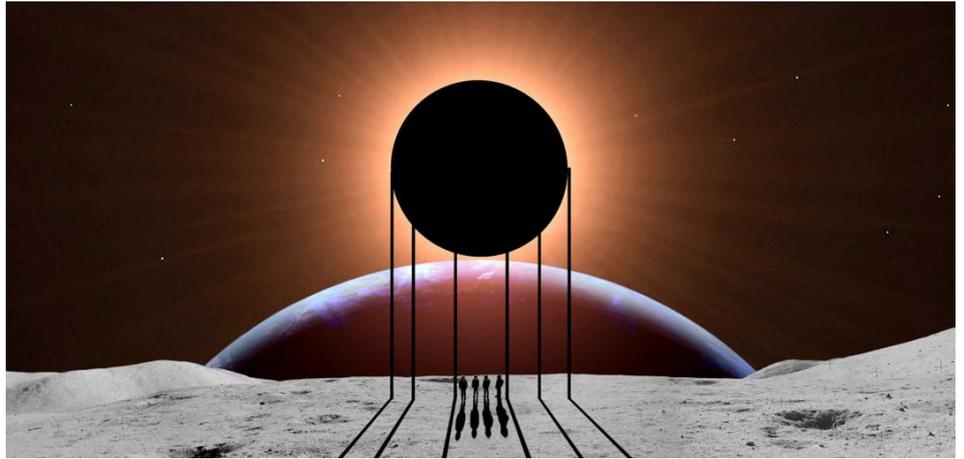
L'idée est pourtant intéressante de coupler un système modulaire et une base mobile car cela permettra en théorie de couvrir de grandes distances tout en garantissant des conditions de confort pour les scientifiques et une redondance des systèmes de survie.

On peut cependant se questionner sur l'énergie nécessaire au déplacement des modules et son origine ou sur la manoeuvrabilité des modules lorsqu'ils sont interconnectés.

A mi-chemin entre véhicule d'exploration et base de recherche scientifique, Sphere Station ouvre peut-être la voie a une nouvelle génération de bases mobiles à grande autonomie.

ARCHITECTURE ON THE MOON

- conçue en 2016
- auteur: Victor Jesus Del Carpio Torres
- pour 8 personnes
- module préfabriqué
- mission: tourisme
- hauteur: 24,65m



Ce projet part du principe que l'établissement d'une base de recherche lunaire ira de pair avec l'implantation d'hôtels sur la Lune. L'hôtellerie servira à financer la recherche et fournira de nombreux cas d'étude pour l'habitabilité spatiale. L'hôtel consiste en une sphère portée par six poteaux très fins du fait de la faible gravité sur la Lune. Cette sphère peut accueillir jusqu'à huit personnes sur 4 niveaux. Un ascenseur central permet d'accéder à tous les étages. De larges baies vitrées donnent sur la Terre. La sphère symbolise évidemment la perfection mais dans ce contexte elle renvoie surtout à la Terre et à la Lune.

Points positifs:

fenêtres	diminue le sentiment d'enfermement
forme sphérique	meilleure ratio volume surface
intérieur très détaillé	permet de se projeter dans l'espace
circulation centrale	distribution efficace
module autonome	pas de réseaux nécessaires
rapport au sol très léger	qualité architectural
forme planétaire	qualité architectural
alcôve personnelle	intimité
observatoire au dernier étage	observation de corps astraux
fenêtres nombreuses	ouverture sur le paysage lunaire
modules préfabriqués	pas de construction sur place

Points négatifs:

module en surface	vulnérable au météorites
base en hauteur	difficulté d'accès
une seule sortie	peu de redondance
pas de sas entre les espaces	sécurité insuffisante
module sphérique	difficilement aménageable
durée de vie de quelques années	base semi-permanente
système de survie au rdc	peu d'espace disponible

Conclusion:

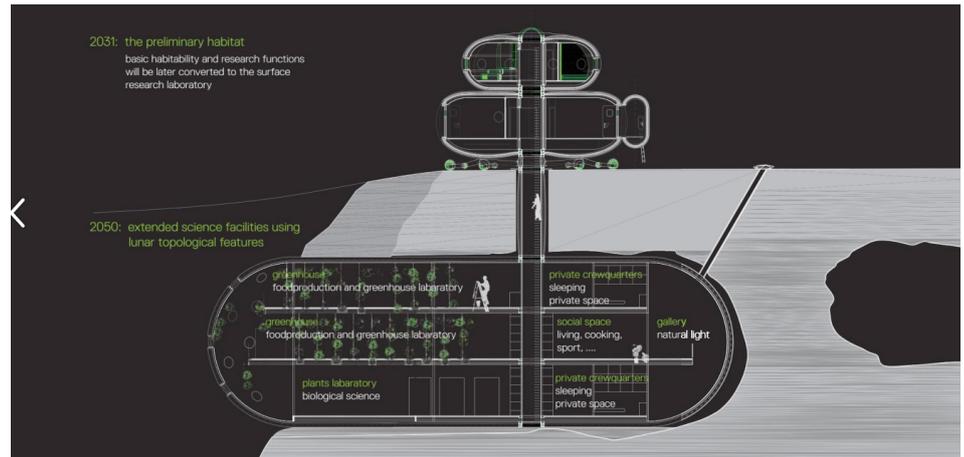
Architecture on the Moon est un projet intéressant par son programme: un hôtel sur la Lune mais aussi par le niveau de détail du plan intérieur. L'aspect extérieur est également très original, y compris l'utilisation de poteaux très fins. Le projet s'intègre bien à son environnement et l'aménagement intérieur semble très confortable: de nombreuses ouvertures adaptées à des usages particuliers, un espace vaste et un mobilier tout confort.

Cependant, le projet étant à plus de 24 mètres de hauteur, il est très exposé aux météorites et aux radiations. Les radiations peuvent ne pas être un problème si les séjours sont suffisamment courts mais j'ai du mal à imaginer cette structure supporter l'impact d'une micro-météorite.

Le RDC est consacré aux équipements techniques, le 1er étage contient une greenhouse, les 2ème et 3ème étages abritent les logements à proprement parler et le dernier niveau abrite un observatoire. Cette organisation autour de la circulation verticale permet une distribution efficace de tous les espaces mais l'absence de sas entre les espaces indique un manque de sécurité évident en cas de dépressurisation.

Aymara

- conçue en 2012
- lieux: Shackelton Crater
- Auteur: Karl Hengl, Mark Steinschifter
- Mission: recherche et mine
- durée: 6 mois
- pour 6 personnes



Aymara est un projet de base lunaire multifonctionnel, mobile puis fixe, en surface et enterré. Après avoir scanner la Lune, des robots sont envoyés afin de préparer le terrain. Un module mobile est ensuite envoyé sur la Lune avec 3 astronautes. Une fois la préparation du sous-terrain terminée, la base mobile vient se fixer sur la base enterrée et fait la connexion entre la base et l'extérieur. La base se déploie autour de la circulation verticale centrale et les espaces de vie et de travail sont séparés. L'auteur écrit: «Une station gonflable et multifonctionnelle avec un intérieur adaptable pour différentes fonctions et usages. Un sous-terrain permanent additionnel avec une serre agricole et une zone sécurisée.»

Points positifs:

- | | |
|---|---|
| zone sécurisée enterrée | protège en cas des radiations et météorites |
| vaste serre agricole | autonomie accrue |
| vaste serre agricole | effets psychologiques positifs |
| phasage très précis | projet semble plus réalisable |
| modules gonflables assemblables | gain de place et économie |
| module mobile | positionnement facile et sûr |
| meublement amovible | ré-agencement possible |
| circulation centrale | distribution efficace |
| une fenêtre par pièce de vie | diminue le sentiment d'enfermement |
| suitlock avec un sas supplémentaire | redondance accrue |
| galerie intérieure avec lumière naturelle | effets psychologiques positifs |
| base enterrée avec des ouvertures | protection et vision dégagée |

Points négatifs:

site: tube de lave au cratère Shackelton	n'existe pas
19 ans de présence humaine sans safe haven	protection insuffisante contre météorites
module mobile gonflable	vulnérable aux météorites et aux radiations
Sas simple pour le rover	danger de dépressurisation
pas de sas entre les espaces	danger de dépressurisation
système de survie non détaillé	peu de volume disponible
manque d'information	pas de plan de l'espace enterré
assenseur central	pas nécessaire sur la Lune

Conclusion:

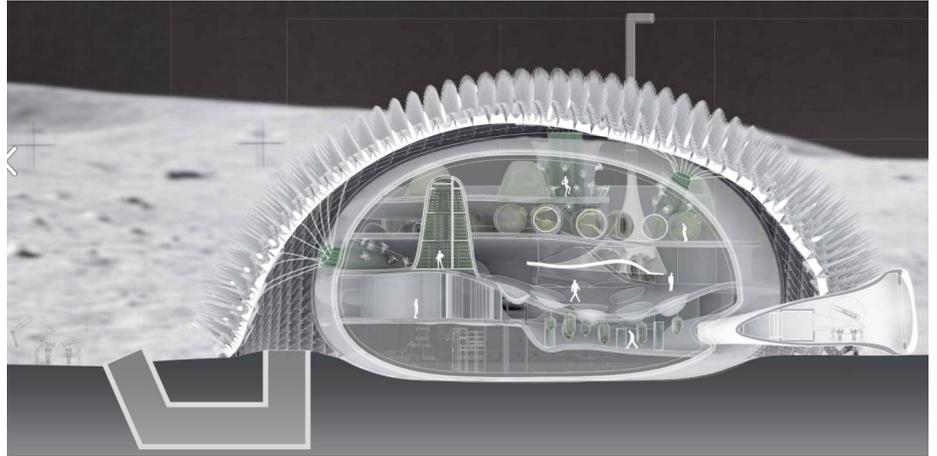
Aymara est un projet de station lunaire assez réaliste avec des plans précis et un phasage cohérent. Cependant, l'idée de s'implanter dans une coulée de Lave sur les bords du cratère Shackelton s'est révélée être une erreur puisque d'après Bernard Foing une hypothétique coulée de lave aurait été détruite lors de la formation du cratère.

Malgré ce défaut de taille, cette base propose de nombreuses idées intéressantes. Comme la connexion entre le module mobile de base et la base souterraine permettant de réutiliser le premier module. L'idée d'une base semi enterrée permet également d'avoir un espace sécuriser et un espace plus accessible depuis la surface. Un apport de lumière naturelle dans l'espace souterrain est également une idée à conserver car elle amène la vie dans espace qui peut autrement être perçu comme anxiogène.

L'organisation radiale des espaces et les parois et mobiliers amovibles permettent une grande variété d'utilisation des espaces tout en assurant une distribution efficace. On peut également noter la place très importante que prend la serre agricole dans l'espace souterrain. Tout comme la lumière, ce dispositif permet de soulager psychologiquement l'équipage mais aussi d'assurer une plus grande autonomie de la station. Un laboratoire biologique est prévu en dessous des deux étages de serres afin de tirer parti au maximum de ce grand espace.

Lunar biodiversity data base

- conçue en 2012
- lieux: Shackelton Crater
- Auteur: Julia Klaus, Christian Mörtl
- Mission: banque de graines
- durée: 100 ans
- pour 24 à 80 personnes



Cette base lunaire se donne l'objectif de permettre l'établissement d'une banque de graine enfouie sous la régolithe afin de préserver au maximum la biodiversité cruciale pour l'être humain. Le projet c'est cependant surtout concentrer sur le centre de recherche et de vie attendant. La base est très vaste et se déploie sur 4 niveaux organisés en spirale afin de créer un paysage intérieur. La protection contre les météorites et les radiations est assurée par des éléments de constructions fabriqués sur place à base de régolithe. Une couche de picots électromagnétiques capte la poussière lunaire qui s'accumule pour former une couche de protection. Une grande bulle gonflable englobe la base et garantie sont étanchéité.

Points positifs:

éléments de construction en ISRU	réduit le poids et donc le coût
filet électromagnétique	capte la poussière et protège la base
formes organiques	variété visuelle
capsules privées	permet une bonne intimité
serres aerobiques	effets psychologiques et nutritifs positifs
réseau de poche d'algues	fourni de l'O ₂ et absorbe le CO ₂
paysage intérieur	sentiment d'espace large et ouvert
4 tunnels d'entrée	redondance accrue
tubes de lumières	amène la lumière naturelle dans le projet
double et triples hauteurs	connexion visuelle entre les niveaux
garages	véhicules protégés

Points négatifs:

base assez peu réaliste	pas réalisable
filet électromagnétique	efficacité et rapidité d'action inconnue
base très vaste	module gonflable de cette taille impossible
capsules privées	disposées aléatoirement
construction par robots de la protection	prendrai des années étant donné la taille
double hauteurs	beaucoup de surface perdue
semi atmosphère dans l'entre deux	beaucoup de volume perdu et peu de stockage
banque de graine	pas d'explication sur le fonctionnement

Conclusion:

Lunar biodiversity data base est plus un projet conceptuel que réalisable mais il regorge cependant de bonnes idées.

L'utilisation d'un filet électromagnétique pour capter la poussière lunaire et ainsi se prémunir contre les radiations et les météorites est très originale même si aucune expérience n'a été menée pour en prouver l'efficacité.

De plus, ce filet est également équipé de tubes de lumières qui amène celle-ci dans les serres aérobiques, dans les poches d'algues et dans l'habitat lui-même.

La création d'un paysage intérieur permise par la très grande taille du projet offre une grande variété visuelle et des connexions visuelles entre les niveaux. Mais cela veut aussi dire qu'un grand volume est perdu du point de vue fonctionnel.

Du point de vue constructif, il semble peu probable qu'une telle structure puisse être construite. D'autant plus que très peu d'éléments porteurs sont visibles.

CyclopsHUB

- conçue en 2012
- lieux: pôle sud
- Auteur: O. Benesch, D. Galonja, T. Milchram, V. Rossetti
- Mission: recherche
- durée: 25 ans
- pour 8 personnes



Ce projet a été conçu pour se déployer en 3 phases. La première phase débute par l'implantation de 10 modules cyclops qui logent 8 astronautes assistés par une intelligence artificielle A.M.E.L.I. De 2025 à 2050, les astronautes expérimentent la construction lunaire et collectent des ressources. Durant la phase 2, une serre agricole avec un diamètre de 60 mètres sera bâtie, fournissant eau, oxygène et nourriture pour toute la page. De nouveaux modules cyclops viennent alors se greffer sur cette nouvelle structure. La phase 3 voit la création d'une véritable ville sur la Lune avec l'arrivée de nouveaux modules compatibles avec cyclops. Les modules sont des sphères gonflables placés dans des structures octaédres tronqués de 8,5 m de diamètre qui peuvent se connecter entre eux sur plusieurs niveaux.

Points positifs:

modularité	permet une extension quasi infini
assemblage facile	nombreuses options d'extension
forme sphérique	meilleur ratio volume surface
ISRU expérimentale	expérimentation puis utilisation de l'ISRU
super duper membrane	interface entre LSS et habitat
système de survie dans chaque module	redondance accrue
alcôves individuelles	intimité possible
module gonflable déployable	économie de place donc d'argent
beema bamboo	absorbe le + de CO2 et relâche le + d'O2
module laboratoire mobile	zone de recherche étendue
module préfabriqué	coûts réduits
taille module réduite	adapté aux lanceurs de type Ares V

Points négatifs:

1 seul module	tous les espaces sont identiques
base en surface	protection contre les météorites insuffisante
circulation vertical par escaliers centraux	déplacement peu fluide
super duper membrane	technologie pas encore au point
beema bamboo	synergie de différentes espèces plus efficace
forme sphérique	difficilement aménageable
modules gonflables	protection insuffisante contre les radiations

Conclusion:

CyclopsHUB est sans doute l'un des projets lunaires le plus radicalement modulaire. En effet, un seul module se répète et s'assemble en 3D, formant ainsi la structure de la base. L'intérieur des modules varie bien entendu selon le programme qu'ils accueillent mais les dimensions, les circulation verticales et les systèmes de survie sont toujours identiques. Viennent alors se greffer à l'intérieur des plantations, un laboratoire ou encore des alcôves individuelles.

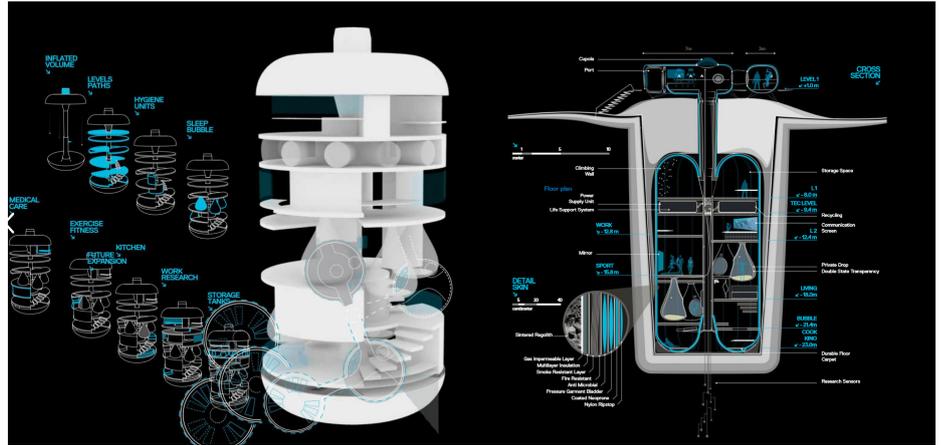
Cette modularité à l'avantage de faciliter l'expansion de la base; De plus, les modules étant gonflables et déployable, les coûts de transport sont fortement réduit et le volume habitable disponible s'en trouve augmenté.

Cependant la répétition d'un élément a ses limites et le projet manque d'un autre module plus grand pouvant accueillir des programme plus volumineux. Même si la construction d'une serre de culture de 60 mètres de diamètre à partir de ressources trouvées sur place est mentionner, il n'y a pas de plan pour ce module qui reste donc hypothétique.

L'équipe qui a créer CyclopsHUB a d'ailleurs confirmer que s'ils avaient plus de temps, ils se serrait attelés à la création d'un second module aux dimensions différentes mais tout de même compatible avec le module original.

DOWN TO EARTH

- conçue en 2012
- lieux: PRINZ Crater
- Auteur: A. Khouni, K. Pluch
- Mission: recherche, recyclage
- durée: 2 ans
- pour 6 à 12 personnes



Down to Earth est prévu pour se déployer en 3 phases grâce à un seul lanceur. Un bras robotique creuse tout d'abord un trou d'environ 30 mètres de profondeur et 15 mètre de rayon. Le module déployable est alors déposé au fond du trou où il s'étend grâce à des parois gonflables. Le module est ensuite recouvert d'une épaisse couche de régolithe et un sas de connexion avec l'extérieur est installé au sommet. Cette base souterraine se déploie sur 7 niveaux dont certains sur un demi étage. Des escaliers longeant la parois externe lient certains étages et créent des vues entre les étage. Le module étant cylindrique, le plan s'organise de façon radiale autour d'une circulation verticale centrale. Des poches individuelles permettent une certaine intimité.

Points positifs:

- | | |
|--|--|
| poches individuelles | intimité possible |
| base enterrer | bonne protection contre radiation et météorite |
| module gonflable | gain de volume |
| circulation verticale centrale | distribution efficace des espace |
| une fonction par étage | diminue les gênes du à la promiscuité |
| SAS et suitlock à la surface | facilité d'accès et sécurité |
| escaliers en spirale en périphérie | variété visuelle et qualité spatiale |
| végétation dans les espaces de vie | effet psychologique positif |
| Échange VoIP individuel avec la Terre | intimité et connexion avec la Terre |
| ISRU | protection assurée avec un moindre poids |
| escalier conçu pour 1/6 de gravité terrestre | adapté aux déplacements sur la Lune |

Points négatifs:

un seul accès à l'extérieur	redondance insuffisante
pas de sas entre les niveaux	danger en cas de dépressurisation
pas d'ouverture sur l'extérieur	sentiment claustrophobie accru
durée de vie de 2 ans	base semi permanente
base enterrer	extension de la base impossible
module gonflable	comment se déploient les éléments rigides
pas de lumière naturelle	effets psychologiques négatifs

Conclusion:

Down to Earth est un projet qui s'inspire assez largement de TransHab, le projet d'habitat spatial gonflable pour l'ISS. Un tronc central soutient toute la structure et l'étanchéité est assurée par une paroi souple qui se déploie lors de la pressurisation du module. Sauf qu'ici, au lieu d'être dans l'espace, le module est placé sous le sol Lunaire.

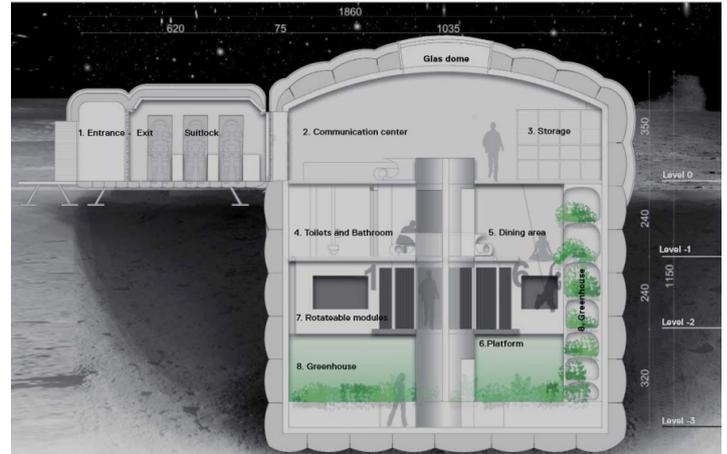
Cette typologie lui donne l'avantage d'être parfaitement protégé des radiations et des météorites. Cependant, cet avantage n'est pas gratuit puisque le module étant enterrer, il ne dispose d'aucune vue sur l'extérieur ni d'apport de lumière naturelle.

Un autre concept intéressant dans ce module est la poche individuelle pour chaque astronaute. Cette poche repliable contient un couchage, un écran de liaison avec le Terre, de l'espace de stockage personnel, un liseuse, un apport d'air frais et la paroi souple est insonorisée.

De plus, la poche est personnalisable grâce à des supports qui permettent d'accrocher des effets personnels. C'est donc un espace confortable et intime qui peut en plus se replier pour laisser plus d'espace libre aux habitants lorsqu'ils sont debout.

The Green Andromeda

- conçue en 2012
- lieux: Shackleton Crater
- Auteur: M. Badzak, D. Krljes
- Mission: recherche biologique
- durée: 1 an
- pour 6 personnes



The Green Andromeda est une base semi-enterrer qui s'organise autour d'une circulation verticale centrale. Les auteurs la décrivent comme une : «Base lunaire de 12 mètres de diamètre avec 1 étage en surface et 3 en sous-sol. La base contient 6 modules rotatifs, 2 salle de bains et toilettes, une cuisine et une serre agricole qui s'étend depuis le 1er étage sous-terrain.» La recherche sur la biologie et son application sur la Lune serait au cœur du projet avec une greenhouse occupant plus d'espace que les autres fonctions. Ce projet ressemble par certains aspect à Down to Earth mais il n'est pas entièrement enterrer ce qui permet d'apporter de la lumière naturelle à l'intérieur du module de vie.

Points positifs:

modules individuels	intimité possible
base semi enterrer	bonne protection contre radiation et météorite
circulation verticale centrale	distribution efficace des espace
SAS et suitlock à la surface	facilité d'accès et sécurité
modules individuels mobiles	variété visuelle et qualité spatiale
végétation dans les espaces de vie	effet psychologique positif
écran individuel	intimité et connexion avec la Terre
meubler amovible	adaptabilité des espaces
présence de la végétation à tous les niveaux	apport de l'O ₂ dans tous les espaces
grande greenhouse	production de nourriture
modules personnels inter connectable	possibilité de mise en commun des espace

Points négatifs:

un seul accès à l'extérieur	redondance insuffisante
pas de sas entre les niveaux	danger en cas de dépressurisation
pas de vue sur l'extérieur	sentiment claustrophobie accru
durée de vie de 1 ans	base semi permanente
base enterrer	extension de la base impossible
intérieur monochrome	effet psychologique négatif
modules personnels mobile	difficulté d'accès quand ils sont tous connecté

Conclusion:

The Green Andromeda est un projet qui se base essentiellement sur la recherche agricole sur la Lune et c'est cet objectif qui conditionne l'agencement de la base et l'omniprésence de la végétation. Celle ci se déploie horizontalement au niveau -3 mais aussi verticalement le long d'une paroi.

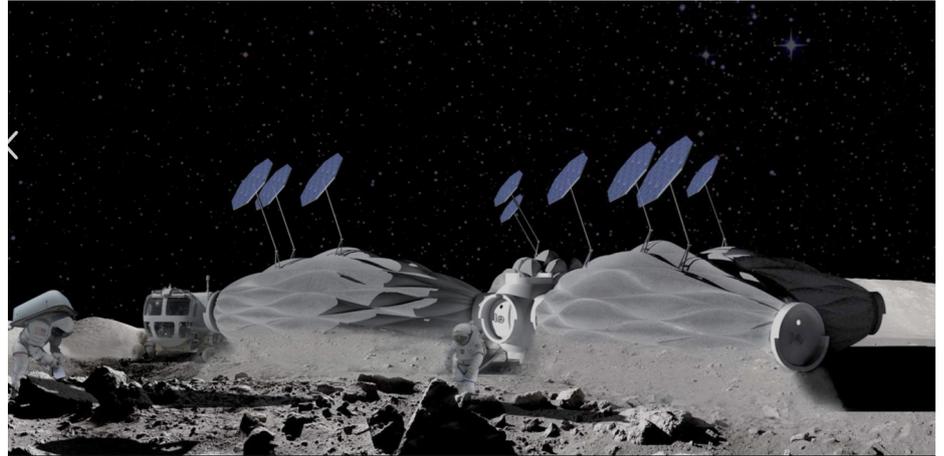
Ce projet s'inspire aussi assez largement de TransHab, le projet d'habitat spatial gonflable pour l'ISS. Un tronc central soutient toute la structure et l'étanchéité est assurée par une paroi souple qui se déploie lors de la pressurisation du module. Sauf qu'ici, au lieu d'être dans l'espace, le module est semi-enterrer

Cette typologie lui donne l'avantage d'être bien protégé des radiations et des météorites. Cependant, cet avantage n'est pas gratuit puisque le module étant enterrer, il ne dispose d'aucune vue sur l'extérieur à part le dôme de verre qui éclaire le rez de chaussée.

Les modules individuels sont travaillés dans le détail avec du mobilier amovible permettant de transformer les chambres en bureau et inversement. De plus les modules sont eux même mobiles et peuvent tourner autour de l'axe central. Il est même possible de les connecter ou de les déconnecter selon les envies des astronautes. Cela contribue à faire varier l'espace dans la base au fil du temps.

MYO

- conçue en 2012
- lieux: pôle sud
- Auteur: M. Czech, E. Lang
- Mission: recherche, moonport
- durée: 50 ans
- pour 6 à 100+ personnes



Myo est un projet de base expérimental qui développerai un port spatial pour rendre accessible le reste du système solaire. 2 modules composent le projet: un module expansible qui sert d'habitat, de lieu de travail et d'extension et un module de liaison qui permettrait de relier les modules entre eux et d'accéder à la surface de la Lune. Les modules arrivent les uns après les autres à bord d'Ariane 5 après que 2 astronautes aient préparé le terrain. Les modules peuvent être agencer en cercle ou sur plusieurs niveaux. L'espace intérieur est divisé en 10 partie en coupe et l'équipement technique est situé dans le sol.

Points positifs:

ISRU	protection assurée avec un moindre poids
modularité	permet une extension quasi infini
assemblage facile	nombreuses options d'extension
système de survie dans chaque module	redondance accrue
alcôves individuelles	intimité possible
module gonflable déployable	économie de place donc d'argent
végétation dans chaque module	effets psychologiques positifs
écrans numérique	ouverture sur le Terre
espace libre changeant	variété visuelle
circulation centrale	accès facile à toutes les fonctions
énergie solaire	énergie abondante et propre

Points négatifs:

pas d'ouverture sur l'extérieur	sentiment claustrophobie accru
pas de lumière naturelle	effets psychologiques négatifs
espace libre assez restreint	sensation d'enfermement possible
protection par sac de régolithe	protection insuffisante contre les météorites
pas de moonport	objectif proclamé du projet non atteint
angle de 72° entre les modules	ne permet pas de créer une trame uniforme
sol non uniforme	déplacements peu fluide

Conclusion:

MYO est un projet modulaire qui utilise la régolithe afin de se protéger des radiations mais qui reste cependant vulnérable aux météorites. Les deux modules qui constituent la base peuvent être assemblés de multiples façons selon les besoins des habitants.

Cette modularité a l'avantage de faciliter l'expansion de la base; De plus, les modules étant gonflables et déployables, les coûts de transport sont fortement réduits et le volume habitable disponible s'en trouve augmenté d'autant plus que le module de vie peut être lancé à bord d'une fusée Ariane 5.

Réunir toutes les fonctions dans un seul module est une intention louable mais le résultat est qu'il reste peu d'espace libre si ce n'est la circulation au centre du module de vie. Les chambres sont également assez étroites et basses de plafond.

On peut tout de même se demander par quel moyen le module s'étend-t-il ? La paroi extérieure est en effet censée coulisser le long d'un axe central en dur et l'effet de compression gonfle alors le volume. Il n'est cependant pas précisé comment les espaces intérieurs suivent alors cette déformation ni ce qu'il advient de la partie du tronc central qui est alors exposé aux conditions lunaires.

Touch the Moon Slightly

- conçue en 2012
- lieux: pôle sud
- Auteur: P. P. Nagy, S. Yin
- Mission: recherche
- durée: 20+ ans
- pour 5 à 10 personnes



Ce projet part du principe qu'il faut préserver le plus possible la Lune dans son état initial. La base est donc surélevée par un plateau structurel à part pour un module sécurisé qui se situe sous le sol lunaire. La base est constituée de 5 modules tous identiques à l'extérieur mais dont l'aménagement intérieur et l'orientation varie. 3 de ces modules forment une tour qui relie l'espace sécurisé et la serre agricole. Les modules sont liés par une circulation verticale centrale en spirale qui est accompagnée par de la végétation sur toute sa longueur. Des véhicules lunaires peuvent se connecter à la base par la sous face de la serre qui dispose également de sas à combinaisons.

Points positifs:

module sécurisé	peut servir d'abris en cas de danger
circulation verticale centrale	distribution efficace des espaces
séparation des différentes fonctions	diminue les gênes du à la promiscuité
possibilité de fenêtres	ouverture sur l'extérieur
possibilité de volumes gonflables	espace disponible peut s'étendre
végétation à tous les étages	effets psychologiques positifs
module avec de nombreuses interfaces	possibilité d'expansion
1 module de serre agricole	production de nourriture et d'O ₂
organisation en demi-étages	connexions visuelles diverses
panneaux de protection interchangeable	entretien et modularité facilité
véhicules lunaires multifonction	augmente le rayon d'action

Points négatifs:

base en surface	protection insuffisante contre le météorites
tour verticale	difficulté d'accès aux étages les plus hauts
un seul SAS d'accès à l'extérieur	redondance insuffisante
préserver la Lune	qu'y a-t-il à préserver ?
plateau structurel	beaucoup d'efforts pour peu de résultat
véhicule lunaires	contradictoire avec l'objectif de préservation
protection remplaçable par panneaux solaires	vulnérable aux rayonnements

Conclusion:

Touch the Moon Slightly est un projet de base lunaire intéressant par son originalité et son parti pris. En effet, l'objectif d'interagir le moins possible avec la Lune est rarement le point de départ d'un concept de base Lunaire. C'est d'ailleurs assez contradictoire car le meilleur moyen de conserver la Lune dans son état original est de ne pas faire de base du tout. D'autant plus que le projet prévoit également des véhicules lunaires qui seraient équipés d'outils de minage.

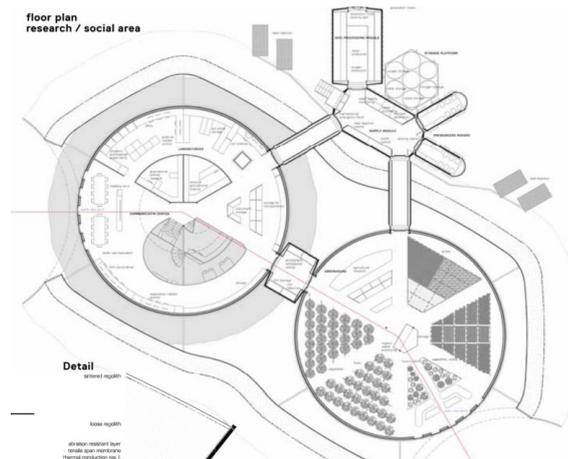
L'orientation verticale de la base est aussi assez inhabituelle ainsi que le fait de surélever la base par rapport au sol lunaire. Il y a sans doute une bonne raison pour ne pas orienté une base lunaire de façon vertical: l'accès aux différentes fonction se fait de plus en plus difficile au fur et à mesure que l'on monte dans les étages.

Cependant, ce projet a aussi des bonnes idées réutilisable comme la triple utilisation des interfaces sur les modules qui peuvent relier un autre module, être équipé d'une fenêtre ou d'une paroi souple gonflable pour gagner de l'espace.

L'escalier en spirale central accompagné de végétation est aussi une idée intéressante surtout quand elle est lié à une organisation spatiale en demi niveaux qui permettent des vues variés sur les autres étages.

Resistance/Residence under Cover

- conçue en 2012
- lieux: pôle sud
- Auteur: Stefan Kristoffer
- Mission: sciences
- durée: 10 ans
- pour 12 à 20 personnes



Resistance/Residence under cover est une base constituée de 3 modules. Situé dans un cratère, les modules se posent d'abord dans leur forme compact. Deux d'entre eux se basent sur un vaste plan hexagonal et se déploient en même temps qu'ils se pressurisent et sont ensuite recouverts de régolithe. Le module habitat se déploie sur deux niveau avec les quartiers d'équipage au rez-de-chaussée et le laboratoire et l'espace social à l'étage. Le module greenhouse est lui de plein pieds et est connecter au module habitat par un double sas. Le dernier module sert de tampon avec l'extérieur et contient un laboratoire de régolithe et les sas d'entré et de sortie. Il n'est pas recouvert de régolithe comme les autres modules.

Points positifs:

- | | |
|---|--|
| vaste espaces ouverts | diminue le sentiment d'enfermement |
| deux larges fenêtres | ouverture sur l'extérieur |
| module déployable et gonflable | gain d'espace considérable |
| ISRU | protection assuré avec un moindre poids |
| couvert par une épaisse couche de régolithe | protège des radiations et des météorites |
| grande greenhouse | effets psychologiques positifs |
| escaliers monumentaux | qualité spatiale |
| nombreux espace communs | socialisation facilitée |
| sas entre les modules | redondance en cas de dépressurisation |
| organisation spatiale fonctionnelle | facilité d'accès aux différentes fonctions |

Points négatifs:

un module non couvert de régolithe	vulnérable aux radiations et aux météorites
sas vers l'extérieur non représentés	on suppose par manque de temps
nécessite un cratère aux bonnes dimensions	difficile à trouver un site idéal
un seul SAS d'accès à l'extérieur	redondance insuffisante

Conclusion:

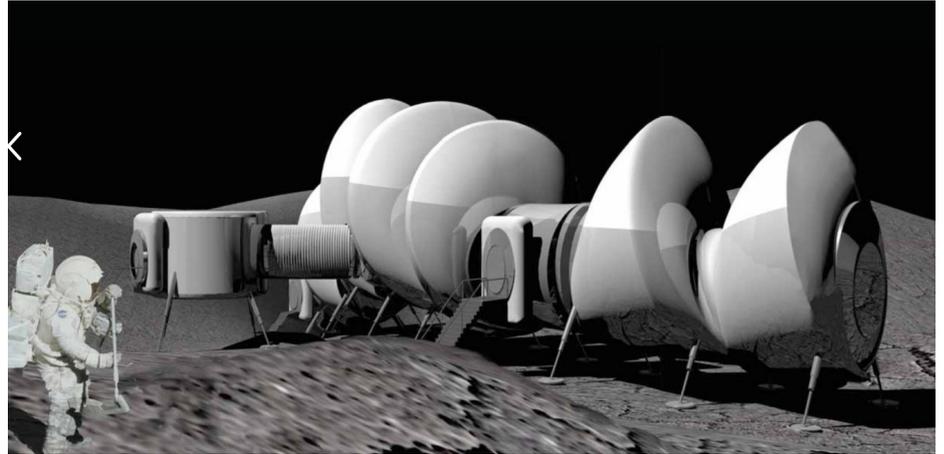
Ce projet est tout d'abord exceptionnel par sa taille, avec des modules de 25 mètres de diamètre. Ce n'est cependant pas forcément positif puisque bien que l'espace intérieur soit vaste et ouvert, il faut tout de même transporter cet énorme module jusqu'à la Lune. Ce problème a ici été résolu avec un système déployable et gonflable qui permet de rendre très compact ces vastes modules.

L'un des modules est exclusivement réservé à la greenhouse ce qui laisse présumer une assez bonne autonomie de la base. Les deux modules principaux possèdent une large baie vitrée protégée par une casquette de régolithe qui cadre le paysage. Le reste de module étant recouvert de régolithe, le bâtiment s'intègre alors parfaitement au paysage si ce n'est pour le dernier module qui n'est pas recouvert et qui casse légèrement cette unité.

Recouvrir la base par une épaisse couche de régolithe est un moyen efficace peu onéreux de protéger la membrane des radiations, des météorites et de la poussière abrasive et électriquement chargée.

T:W:I:S:T

- conçue en 2012
- lieux: Shackleton Crater
- Auteur: Daniela Siedler
- Mission: recherche
- durée: 3 ans
- pour 8 personnes



Ce projet de base lunaire utilise un organigramme linéaire le long duquel les différentes fonctions sont présentes. La base est séparée en 2 parties: l'une située sur le bord d'un cratère et contenant l'habitat, le module sécurisé et des laboratoires; et l'autre située au fond du cratère pour y mener des expériences réalisables uniquement dans cet environnement. L'habitat consiste en 6 modules déployables qui fonctionnent comme des ressorts comprimés qui se déploieraient ensuite sur la Lune puis seraient gonflés. Enfin une mousse à l'intérieur de la membrane souple se solidifierait afin de renforcer la structure. Une partie des modules est enterrée et peut fonctionner de manière autonome en cas de danger.

Points positifs:

- | | |
|---------------------------|--|
| symbiose poissons plantes | autonomie accrue |
| modules déployables | gain d'espace |
| greenhouse | effets psychologiques positifs |
| nombreux sas extérieur | redondance en cas de défaillance |
| sas entre les modules | sécurité au feu et à la dépressurisation |
| modules tous différents | variété visuelle |
| hauteurs variés | adapté aux besoins |
| design modulaire | expansion facilitée |

Points négatifs:

base en partie en surface	vulnérable aux radiations
modules tous différents	processus de fabrication complexe
modules en spirale	espace difficilement aménageable
base en 2 parties	difficulté d'accès
base en dénivelé	déplacements difficiles
agencement linéaire	peu de connexion entre les fonctions
pas de fenêtres	sentiment d'enfermement

Conclusion:

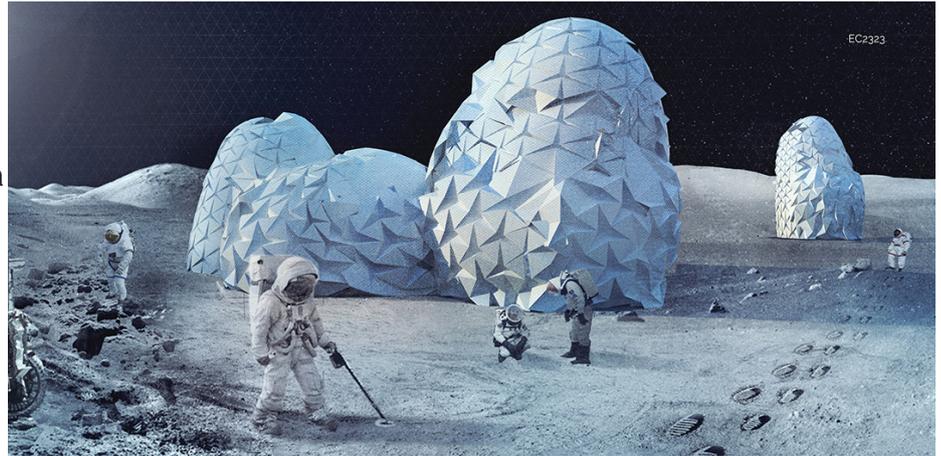
T:W:I:S:T est un projet qui s'attache avant tout à développer un système de déploiement original et efficient. L'originalité n'est cependant pas toujours synonyme de bonne idée puisque les modules tous différents sont connectés de manière linéaire ce qui diminue fortement les possibilités de connexion entre les différents programmes. De plus, ces espaces biscornus sont difficiles à aménager de manière optimale.

L'avantage de ce concept est de proposer des espaces variés, adaptés aux fonctions qui cassent la monotonie. La présence d'une promenade verticale dans la greenhouse couplée à une symbiose entre poissons et plantes est très intéressante puisqu'elle offre un espace de relaxation mais qui reste fonctionnel puisqu'il génère de l'O₂ et de la nourriture pour toute la base.

On ne peut que regretter l'absence de fenêtres dans les modules qui rend cet environnement claustrophobe. Mais on peut aussi remarquer la répartition des espaces et notamment la présence des lieux de vie et d'un stockage d'urgence dans la partie enterrée ce qui pourrait permettre aux astronautes de se mettre en sécurité pour attendre de l'aide en cas de problème.

TESTLAB

- conçue en 2017
- lieux: Pole sud
- Auteur: Monika Lipinska, Laura Nadine Olivier & Inci Lize Ogun
- Mission: recherche
- durée: long terme
- pour 8 à 80 personnes



Testlab est un projet de base lunaire dont l'objectif est d'accélérer la recherche pour l'exploration spatiale. Une structure en 3D est tout d'abord imprimée à base de ressources lunaires. Grâce au mode d'impression en 4D, la structure en fibre de carbone active s'auto-assemble grâce aux vents solaires. Cette membrane sert à protéger la base et permet de créer de l'eau et de l'oxygène pour les habitants grâce à des réactions chimiques qui sont déclenchées par les atomes d'hydrogène qui sont chariés par les vents solaires. Une solution aqueuse permet de réaliser ces réactions grâce à des dialyses successives. Cette solution se trouve entre la membrane extérieure et les différents modules pressurisés qui se trouvent à l'intérieur.

Points positifs:

modules déployables	gain d'espace
ISRU	protection assurée avec un moindre poids
greenhouse	effets psychologiques positifs
sas entre les modules	sécurité au feu et à la dépressurisation
modules tous différents	variété visuelle
hauteurs variés	adapté aux besoins
design modulaire	expansion facilité
membrane en carbon actif	déploiement automatique de la structure.
membrane intelligente	création d'H ₂ O et d' O ₂
position centrale de l'espace de vie	socialisation facilitée
couche aqueuse autour de la base	bonne protection contre les radiations

Points négatifs:

base en surface	vulnérable aux météorites
modules tous différents	processus de fabrication complexe
base en différentes parties	difficulté d'accès
un seul sas par module interieur	peu de connexion entre les fonctions
pas de fenêtres	sentiment d'enfermement
un seul sas exterieur	redondance insuffisante
structure auto assemblable	jamais tester à cette échelle

Conclusion:

Testlab est un projet très innovant qui propose une structure auto déployable imprimée en 3D à partir de ressources lunaires. Des modules de vie pressurisés gonflables sont alors placés dans cette enveloppe protectrice. Cette méthode réduit au minimum la quantité de matière à envoyer sur la Lune pour construire cette base.

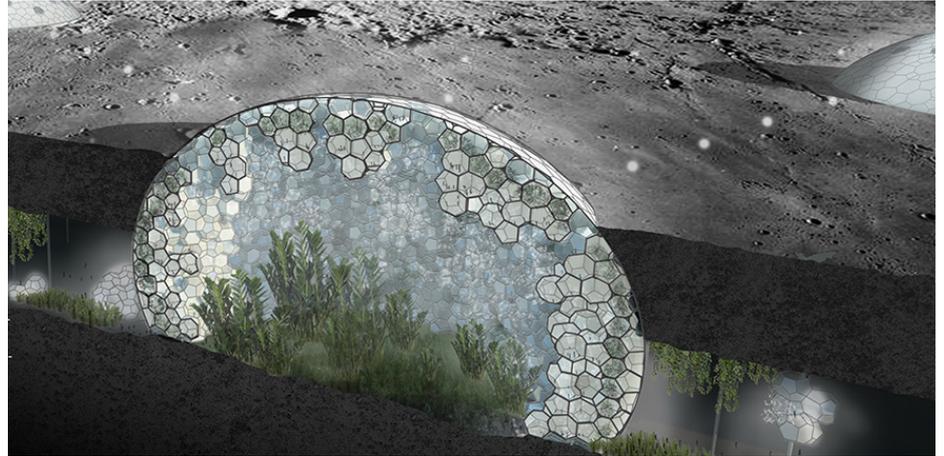
Ce procédé permet de créer des formes variées avec des modules de différentes hauteurs, améliorant la variété visuelle et spatiale et par conséquent la qualité de vie des astronautes.

De plus, la paroi extérieure peut également capter des atomes d'hydrogène du vent solaire afin de produire de l'eau et de l'oxygène pour la base qui sont les deux ressources indispensables à la vie humaine. Il n'est cependant pas précisé l'efficacité de cette proportion et dans quelle mesure elle contribuerait à l'indépendance de la base.

On peut regretter que les structures imprimées en 3D ne soient pas connectables une fois assemblées. D'autant que ces structures ne possèdent qu'un seul sas vers l'extérieur ce qui peut être problématique en cas de dysfonctionnement sur le dit sas.

MODULPIA

- conçue en 2017
- lieux: Shackleton Crater
- Auteur: A. Giorgi, C. Feng, S. Pan & E. Analuiza
- Mission: logements
- durée: long terme
- pour milliers de personnes



Modulpia propose un concept très intéressant basé sur des modules produit sur place en béton lunaire. Ces modules possède une géométrie basée sur la structure de Weaire-Phelan qui permet un assemblage extrêmement compacte tout en ayant une apparence aléatoire et organique. Une station usine mobile est tout d'abord placée dans un tube de lave afin d'expérimenter en toute sécurité. Une fois la méthode de production suffisamment fiable, la station est déplacé sur le site définitif et commence la production de modules qui sont ensuite placé en dôme semi-enterrer autour d'un vide centrale qui sert de serre géante. La structure est connectée aux tubes de lave en souterrain et des modules y sont installés afin d'habiter les habitant en cas d'impact de météorite.

Points positifs:

greenhouse	effets psychologiques positifs
nombreux sas extérieur	redondance en cas de défaillance
sas entre les modules	sécurité au feu et à la dépressurisation
design modulaire	expansion facilité
ISRU	réduction du poids et du coût de l'opération
système de survie bioregeneratif	autonomie accrue
assemblage organique	variété visuelle
modules de sureté dans les tubes de lave	protection en cas d'impact de météorites
fenêtres nombreuses	vues à l'exterieur
éclairage naturel	effets psychologiques positifs
serres agricoles autour de la base	production de nourriture optimisée

Points négatifs:

base en partie en surface	vulnérable aux météorites
nécessite de creuser dans le tube de lave	progrès techniques nécessaires
modules tous identiques	espace non adapté à tous les usages
nécessite un tunnel de lave idéale	difficile de trouver le site parfait
modules avec une géométrie irrégulière	difficile à aménager

Conclusion:

Modulpia est sans doute l'un des projets utopiques les plus aboutis que j'ai pu observer. L'agencement des modules est très original et permet de créer une structure auto-portante, variée et fonctionnelle. Les modules sont disposés de telle sorte à créer un dôme qui abrite une végétation dense, éclairé par des failles dans le dôme.

L'emplacement et la typologie choisis sont également très judicieux. S'installer dans un premier temps dans un tube de lave permet de s'abriter des météorites et des radiations. On peut donc dans un premier temps expérimenter avec le module en toute liberté. Puis, lorsque la base est totalement déployée, les tunnels de lave peuvent encore servir d'abri en cas de danger. La typologie semi-enterrée permet d'offrir de la lumière naturelle et des vues sur l'extérieur tout en protégeant la base, en grande partie enterrée, des radiations et des météorites.

Le détail du dôme en coupe semble aussi très bien pensé. Une première couche de modules sert de filtre avec l'extérieur, protégée par une carapace. La deuxième couche de modules sert de ferme lunaire afin de profiter au maximum de l'énergie du soleil. S'ensuit une couche de modules servant à la circulation et enfin les modules d'habitat qui s'assemblent dans des sortes de grappes de logement organique.

Tableau comparatif

	SHEE	Luna Gaia	Project Boreas	Selenolith	Sphere Station	Architecture on the Moon	Aymara	Lunar Biodiversity Data Base	Cyclops HUB	Down to Earth	The Green Andromeda	Myo	Touch the Moon Slightly	Resistance/Residence under cover	TWIST	Lunar Habitation	Testlab	Modulpia
ISRU	Black	Green	Yellow	Green	Red	Red	Yellow	Green	Red	Green	Green	Blue	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green
Type	Yellow	Blue	Red	Blue	Red	Green	Green	Blue	Red	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Red	Blue	Yellow	Green
Végétation	Red	Green	Green	Black	Yellow	Blue	Green	Green	Blue	Blue	Green	Red	Blue	Green	Yellow	Yellow	Blue	Green
Ouvertures	Red	Blue	Green	Blue	Yellow	Green	Blue	Green	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Yellow	Yellow	Green
Espace	Red	Black	Blue	Black	Yellow	Green	Blue	Blue	Yellow	Red	Yellow	Red	Blue	Blue	Yellow	Black	Black	Blue
Matériaux	Red	Black	Green	Black	Yellow	Green	Black	Blue	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Yellow	Black	Black	Blue
Durabilité	Red	Blue	Yellow	Green	Yellow	Red	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Blue	Yellow	Blue
Organisation	Blue	Black	Green	Black	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Black	Yellow	Yellow
Volume	Blue	Blue	Blue	Black	Blue	Blue	Blue	Green	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Green	Blue	Green	Green	Green
Faisabilité	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Red	Blue	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Red	Yellow	Green	Red	Yellow
Autonomie	Blue	Blue	Blue	Black	Blue	Yellow	Blue	Blue	Black	Black	Blue	Blue	Yellow	Green	Black	Blue	Black	Blue
Sas	Red	Yellow	Green	Black	Blue	Red	Yellow	Blue	Blue	Red	Red	Blue	Green	Blue	Blue	Blue	Blue	Black

Légende



Absence de données



A éviter



Insuffisant



Satisfaisant



A reproduire

Mots clés

Lune

Habitat

Autonomie

Compacité

Architecture

Régolithe

L'exploration spatiale va sous peut débuter sa seconde phase qui verra l'implantation de bases extra-terrestre permanentes. La Lune, de par sa position est un excellent terrain d'entraînement pour la colonisation spatiale. Il sera donc bientôt question d'envoyer des gens habité la Lune. Les architectes doivent donc se préoccuper dès maintenant de la manière de créer le meilleur environnement possible pour les astronautes.

Cette base lunaire doit répondre aussi bien aux besoins humains aux contraintes de l'environnement lunaire et à la réalité de la faisabilité technique et financière. Ces contraintes ont été affinées en critères d'analyse qui ont permis de comparer 18 projets de base lunaire récents. Les résultats de cette analyse comparative ont permis l'élaboration d'un projet de base lunaire « idéale » qui s'efforce d'associer les solutions identifiées précédemment.

Les futures bases lunaires devront être protégées des radiations et des météorites. La manière la plus efficace pour y parvenir semble être l'implantation de la base dans un tunnel de lave lunaire qui offre une protection naturelle. La présence de végétation variée est un élément essentiel aussi bien pour l'autonomie de la base que pour la bonne santé psychologique des astronautes. Il faut également porter une grande attention au design intérieur et à l'ergonomie qui est sur la Lune différente de la Terre. Les espaces intérieurs doivent être le plus spacieux possible et offrir des vues sur l'extérieur afin de diminuer le sentiment d'enfermement. Les matériaux et les couleurs doivent être choisis avec soin afin de permettre une variété visuelle qui est importante dans un environnement aussi austère. De nombreux autres critères tout aussi déterminants sont étudiés dans ce mémoire et les solutions sont présentées sous la forme d'une proposition de base idéale.