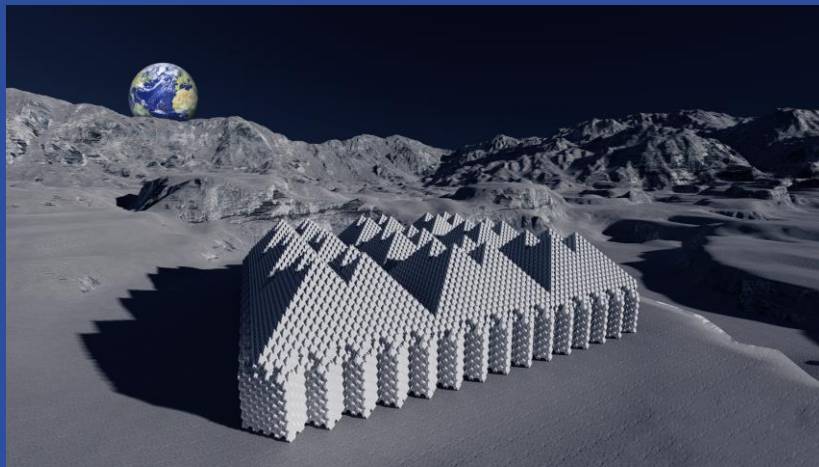


École polytechnique de Louvain

# Etat de l'art des structures habitables dans l'espace et conception d'un habitat sur la Lune



Auteur : **Martin VANOVERSCHELDE**  
Promoteur : **Pierre LATTEUR**  
Lecteurs : **Joao ALMEIDA, Igor BOUCKAERT, Henri DE CHAUNAC**  
Année académique 2019–2020  
Master [120] : ingénieur civil des constructions



Université Catholique de Louvain

## **Abstract**

Ecole Polytechnique de Louvain  
Master : Ingénieur civil des constructions

# **Etat de l'art des structures habitables dans l'espace et conception d'un habitat sur la Lune**

par Martin Vanovershelde

Le récent regain d'intérêt pour l'exploration spatiale ainsi que les dernières avancées technologiques en matière de voyage spatial créent une demande de structures extraterrestres prêtes à l'usage, dans l'espace comme sur des planètes tels que la Lune ou Mars. L'objectif de ce mémoire est d'étudier le processus de conception nécessaire pour produire ce genre de structures. Pour nous aider dans notre travail, nous avons établi un nouveau référentiel de construction dans l'espace. Celui-ci définit les conditions locales auxquelles doit faire face notre habitat lunaire. En étudiant les concepts de structures en développement, nous avons pu identifier les forces et les faiblesses des différentes stratégies de construction qu'elles utilisent. Enfin, sur base de ces apprentissages, nous avons créé une liste des points à adresser lors de la construction d'un habitat extraterrestre. Cette série de conditions à remplir nous a permis de construire un arbre de décision qui sert finalement à la conception de notre habitat lunaire. L'objectif final de cet habitat est de mettre en avant un concept capable d'adresser les conditions difficiles de l'espace tout en tenant compte des difficultés liées à l'exploration spatiale en général. Le concept d'habitat lunaire qui découle de notre étude montre que beaucoup d'hypothèses demandent toujours à être validées avant de pouvoir le considérer opérationnel. Cet habitat nous montre également que la construction spatiale, avant d'être possible, demande des avancées technologiques conséquentes. Avancées qui ont un potentiel terrestre très intéressant.

The recent regain in interest in space exploration and the newly breakthrough in rocket science create the need for "ready to use" space structures. The objective of this thesis is to study the requirements of the conceptualization process of such a structure. To help us in this process, we studied the local conditions in space and defined a space referential. This referential pointed out the technical requirements our habitat has to fulfil. By making the state of the art of space structures currently in development, we learned what kind of strategies is efficient against this newly created referential. Based on those knowledges, we were able to stand a list of all the issues we had to take care of when designing our habitat. This list helped us building the decision tree we used to choose the final form of our habitat. Habitat which, finally point out the difficulties related to space construction in general. Before calling our concept a "ready to use structure", a consequent number of hypotheses needs to go through a validation process. However, the technological breakthrough space construction need has a certain potential on earth.



# Remerciements

Avant toutes choses, je souhaiterais remercier mon promoteur Pierre Latteur. En me faisant confiance sur la bonne conduite de ce travail, il a pu se concentrer, lors de nos entrevues à s'assurer que je ne perdais pas de vue le sens de mon mémoire et que je restais dans des réflexions pertinentes. Les validations qu'il a faites de cette étude et les guidances qu'il a pu me donner, m'ont permises de rester motivé et investi tout à long de cette année. En me prêtant également une partie de son matériel de travail, j'ai pu appréhender et comprendre les droxels pour les utiliser au mieux. Enfin, toujours dans l'optique d'arriver à un résultat intéressant, je suis reconnaissant des fonds qu'il m'a alloué pour la création de rendus architecturaux photos et vidéos. Rendus sans lesquels il m'aurait été difficile d'illustrer ce travail.

Je remercie également Benoît Herman et Xavier Bollen pour le temps qu'ils ont consacré à optimiser des fichiers de droxels et à les imprimer dans leur laboratoire en vue d'en produire plus de 150. Production que nous avons malheureusement dû interrompre mais qui m'a tout de même démontré les intérêts de l'impression 3D et l'usage que je pouvais en faire dans mon travail.

Un merci particulier à Baptiste Roiseux, un étudiant ingénieur architecte qui a accepté la tâche compliquée de réaliser les rendus de ce mémoire. Les nombreuses heures qu'il a passé à ajuster et essayer de reproduire le plus honnêtement possible mes idées jouent un rôle signifiant dans l'aspect final de ce document.

Enfin, mille merci à mes parents qui m'ont supporté durant ces nombreuses années et blocus, qui m'ont soutenu dans mes projets et poussé à donner le meilleur de moi-même en tout temps et à toute heure. L'impact qu'ont eu leurs soutiens et finalement, la relecture finale de ce mémoire est indéniable. Si je suis fier de mon travail aujourd'hui, c'est parce que vous m'avez motivé et poussé lorsque je n'y croyais plus ou ne voulais plus y croire.

## TABLE DES MATIERES

Introduction.....	9
1 Chapitre 1 : Description du milieu extraterrestre.....	11
1.1 L’astrophysique en quelques lignes.....	11
1.1.1 L’Espace.....	11
1.1.1.1 Définition.....	11
1.1.1.2 L’Espace et l’Univers.....	11
1.1.1.3 Les dangers de l’Espace.....	14
1.1.1.3.1 Corps célestes.....	14
1.1.1.3.2 Radiations.....	15
1.1.2 Notre système solaire.....	15
1.1.2.1 En général.....	16
1.1.2.2 Mercure.....	16
1.1.2.3 Vénus.....	16
1.1.2.4 Mars.....	17
1.1.2.5 Jupiter.....	18
1.1.2.6 Saturne.....	18
1.1.2.7 Uranus et Neptune.....	19
1.1.2.8 La Lune.....	19
1.2 L’Homme et l’espace.....	19
1.3 Challenges techniques.....	21
1.3.1 Propulsion et carburant.....	21
1.3.2 Durabilité des structures.....	23
1.3.3 Bouclier radiatif.....	24
1.3.4 Différences de température.....	24
1.4 Enjeux économiques et politiques.....	25
1.5 Conclusion.....	25
2 Chapitre 2 : Etat de l’art des structures spatiales existantes.....	27
2.1 Fiche technique.....	27
2.2 Grille d’évaluation.....	27
2.2.1 Hypothèses.....	28
2.2.1.1 Question de l’environnement.....	28
2.2.1.2 Question des phases de vie de l’habitat.....	28
2.2.1.3 Question du type de structure.....	29

2.2.1.4	Récapitulatif des hypothèses .....	30
2.2.2	Critères d'évaluation .....	30
2.2.2.1	Critère 1 : Construction et entretien .....	30
2.2.2.2	Critère 2 : Structure .....	33
2.2.2.3	Critère 3 : Humain .....	34
2.2.3	Grille d'évaluation – Canevas.....	36
2.3	Analyse des concepts.....	36
2.3.1	Mars Ice House .....	37
2.3.2	Mars Xhouses .....	38
2.3.3	Zopherus.....	40
2.3.4	Mars Incubator .....	40
2.3.5	Base lunaire ESA .....	41
2.3.6	Conclusions.....	42
3	Chapitre 3 : Conception d'une base lunaire.....	45
3.1	Technique de construction .....	46
3.1.1	Le droxel, une brique paramétrique .....	46
3.1.2	Le droxel lunaire en pratique .....	48
3.2	Quantifications des défis techniques.....	51
3.2.1	Hypothèses des modèles d'analyse.....	52
3.2.2	Analyse des modèles .....	56
3.2.2.1	Différentiel de Pression .....	57
3.2.2.2	Variations thermiques .....	67
3.2.2.3	Radiations .....	68
3.2.2.4	Droxelisation.....	70
3.3	Choix de la structure finale .....	74
3.3.1	Arbre de décision.....	75
3.3.1.1	Niveau 1 : Radiations .....	76
3.3.1.2	Niveau 2 : Pression et températures.....	78
3.3.1.3	Niveau 3 : Modulabilité et Humain .....	80
3.3.1.4	Niveau 4 : Outils de construction .....	81
3.3.1.5	Résumé .....	85
3.3.1.6	Rendus.....	86
3.3.2	Questions techniques en suspens .....	87
3.3.3	Conclusion .....	88

3.4	Construction de l'habitat .....	89
3.4.1	Site de construction.....	89
3.4.2	Phases de construction.....	90
3.4.3	Intégration d'un équipage .....	98
3.5	Comparaison avec les concepts existants.....	99
3.5.1	Soumission au canevas.....	99
3.5.2	Comparaison.....	99
4	Conclusion.....	101
5	Références.....	104
6	Annexes.....	107

## INTRODUCTION

Le fond de nos océans et l'espace représentent les deux derniers milieux où l'Homme est allé mais n'est pas resté. Ces deux milieux sont les derniers en date où aucune structure permanente ne persiste. La Station Internationale elle-même se trouve à quelques 400 kilomètres d'altitude, ce qui la place sous la protection de la magnétosphère de la Terre. Les conditions de ces deux milieux sont telles qu'y installer une structure habitable relève de l'exploit. Au fond de nos océans règnent des pressions extrêmement importantes, une absence de lumière et un accès particulièrement difficile selon les endroits. Dans l'espace règnent des pressions très faibles, des variations thermiques importantes, une exposition extrême aux radiations et un accès encore plus complexe.

Pourtant, les récentes avancées technologiques ont relancé l'exploration spatiale. De nouvelles missions sont prévues pour la Lune ainsi que pour Mars. Des satellites toujours plus nombreux orbitent autour de ces deux corps célestes dans le but de faciliter l'installation d'un avant-poste surfaciel. Les intervenants qui cherchent à prouver leurs capacités à rallier les planètes voisines montrent des résultats prometteurs. Résultats qui viennent avec le besoin grandissant de structures extraterrestres prêtes à l'usage.

Ce travail vient introduire le cheminement nécessaire à l'étude de la conception d'une structure extraterrestre. Il nous faudra, pour y arriver, définir un nouveau référentiel de contraintes. Référentiel défini lors du premier chapitre par l'introduction de notions d'astrophysiques et qui sera directement lié à la destination de notre futur structure. Après ce premier chapitre, un état de l'art des structures spatiales en développement sera fait. Etat de l'art qui nous servira de base de travail pour comprendre les stratégies permettant d'adresser les contraintes associées à notre nouveau référentiel extraterrestre. Pour finalement, une fois nos conditions locales établies et les stratégies pertinentes de la construction spatiale comprises, travailler à l'élaboration d'un habitat extraterrestre. Chacune de ces étapes viendra avec son lot d'hypothèses, plus ou moins fortes, imposées par le peu de données disponibles.

L'habitat final que nous proposons est composé de 9 modules distincts, offrant chacun 101 [m<sup>2</sup>] de surface habitable. Ces modules faits de droxels seraient construits en une centaine de jours chacun. Notre habitat met en avant l'intérêt de créer une structure modulable basée sur une technique de construction unique, le droxel. Pour arriver à ce concept, nous avons travaillé à la construction d'un arbre de décision. Cet arbre de décision est créé à partir des enseignements issus de notre référentiel spatial mais aussi des structures en développement. L'objectif de cet outil décisionnel est de fournir une réflexion indépendante du manque de données locales nécessaires à la quantification des contraintes et des matériaux disponibles (conditions précises sur la lune, propriétés des sols, propriétés des matériaux transformés à partir du sol lunaire, ...). En procédant de la sorte, nous sommes en mesure de conceptualiser un habitat paramétrique dans un premier temps. La version que nous obtenons à la fin de ce mémoire n'est qu'une itération parmi plusieurs. La flexibilité de notre réflexion permet de l'orienter en fonction de nos besoins et produire un habitat adapté à ceux-ci. Dans un second temps, le jour où ces données locales seront disponibles, nous pourrons soumettre notre concept à ce jeu de données et ainsi valider nos hypothèses et quantifier la réponse de notre structure.



## 1 CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DU MILIEU EXTRATERRESTRE

Le but de ce chapitre est de situer le lecteur parmi la multitude d'idées reçues et de zones d'ombres au sujet de l'exploration spatiale. Peu d'entre nous peuvent se prétendre experts en astrophysique, en voyage interplanétaire ou encore en colonisation extraterrestre. Afin de rendre la thématique la plus accessible possible, une introduction à ce monde est de mise.

Les dangers et défis techniques et humains présentés ici seront également utilisés comme les critères d'analyse des structures étudiées dans la deuxième partie.

### En résumé :

- **Quoi** : Définir le référentiel de construction spatial.
- **Pourquoi** : Nous avons besoin de comprendre dans quelles conditions nous travaillerons.
- **Comment** : En étudiant les défis relatifs à l'exploration spatiale et en définissant ces défis sur des sites de construction potentiels.
- **Conclusions** : Choix justifié d'un site de construction et du référentiel local.

### 1.1 L'ASTROPHYSIQUE EN QUELQUES LIGNES

Cette section nous permet de passer en revue les quelques notions d'astrophysique nécessaires pour réduire notre champ d'action. En prenant conscience des distances entre les différents corps célestes et des conditions qui y règnent, nous serons en mesure de sélectionner des candidats potentiels à l'installation d'un habitat extraterrestre.

#### 1.1.1 L'ESPACE

##### 1.1.1.1 DÉFINITION

L'université de Cambridge définit l'Espace comme « *Tout ce qui se trouve au-delà de l'atmosphère terrestre* »<sup>1</sup>. Or, d'un point de vue physique, l'atmosphère ne disparaît pas à une altitude bien précise. Elle devient de plus en plus fine au fur et à mesure que nous nous éloignons de la Terre. La Station Spatiale Internationale orbite à quelques 400 kilomètres, altitude où il n'y pas d'atmosphère au sens propre du terme<sup>2</sup>. Nous la considérons pourtant bel et bien dans l'espace.

Si nous partons du côté de la NASA et de l'US Air Force, l'espace débute à une altitude de 80 kilomètres car un objet n'a pas les mêmes droits dans l'espace et la zone aérienne commerciale. Enfin, les scientifiques tendent à considérer qu'un vaisseau se trouve dans l'espace à partir du moment où l'atmosphère ne suffit plus pour soutenir son vol à des vitesses inférieures aux vitesses orbitales.

L'espace en général est une zone où le manque de données est prédominant. Nous sommes réduits à y travailler sur base d'hypothèses.

##### 1.1.1.2 L'ESPACE ET L'UNIVERS

Quelles sont les différences entre les termes d'espace interplanétaire, interstellaire ou encore intergalactique ? Pourquoi sont-ils si différents les uns des autres et en quoi nous intéressent-ils ? Il s'agit ici de fixer une terminologie exacte et de ne pas se méprendre vis-à-vis des nombreuses idées reçues issues de la science-fiction ou de la vulgarisation scientifique.

Le programme Voyager<sup>3</sup> nous servira à illustrer ces concepts via quelques faits d'exploration spatiale. En 1977, la NASA lança deux missions dite interstellaires, Voyager 1 et Voyager 2. Leur but était de profiter d'un alignement de planètes particulièrement favorable à la propulsion assistée par la gravité des planètes en question. Alignement ne se présentant que tous les 176 ans. Ces missions reprennent 3 phases distinctes :

1. Subir le choc terminal
2. L'exploration de l'héliosheath<sup>i</sup>
3. L'exploration de l'espace interstellaire (zone orangée sur la **Figure 1**)

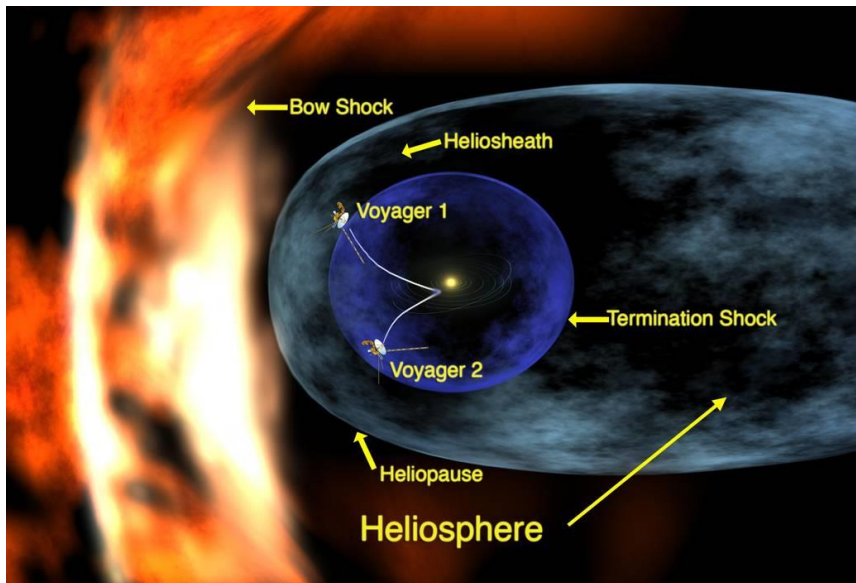


Figure 1: Mission Voyager – Crédits : NASA

Après le survol de Saturne et Jupiter, Voyager 1 est sorti de l'espace interplanétaire et a subi le choc terminal. Ce choc marque la fin de l'espace interplanétaire et le début de la zone d'influence des vents interstellaires. Les vents solaires forment une sphère protectrice autour de notre système solaire, l'héliosphère<sup>4</sup>. Celle-ci est divisée en deux parties principales, l'espace interplanétaire<sup>ii</sup> et l'héliosheath.

Avant le choc terminal, seuls les vents solaires<sup>iii</sup> sont présents et voyagent à une vitesse de 300 à 700 [km/s]. Le choc terminal survient lorsque ces mêmes vents interagissent avec les vents interstellaires<sup>iv</sup>, ils ralentissent et se réchauffent pour former la deuxième partie de l'héliosphère, l'héliosheath.

L'héliosphère se termine au point d'équilibre entre les vents solaires et interstellaires. La pression des 2 forces est constante et forme une frontière. Cette frontière, l'héliopause marque la zone où les vents solaires sont renvoyés en arrière. La forme elliptique de l'héliosphère est due au fait que le soleil et notre système solaire qui orbite autour du soleil, se déplacent dans l'espace. Nous pouvons observer le même phénomène avec un bateau dans l'eau. L'eau retourne en arrière devant le bateau lorsque

<sup>i</sup> Couche externe de l'héliosphère, représentée par la forme elliptique bleu clair sur la **Figure 1**, concept détaillé ci-dessous.

<sup>ii</sup> Zone représentée par le cercle bleu foncé sur la **Figure 1**.

<sup>iii</sup> Vents générés par le soleil de notre système solaire.

<sup>iv</sup> Vents, courants de particules qui viennent de l'extérieur de notre système solaire.

celui-ci avance. Il en va de même pour les vents solaires, à l'héliopause, ils repartent en arrière et forment une trainée.

En clair, nous avons 3 régions distinctes, l'espace interplanétaire, l'héliosheath et l'espace interstellaire. Les 2 premiers font partie de l'héliosphère, une enveloppe formée par les vents issus de notre soleil. La première partie, l'espace interplanétaire, est la région où leur intensité est la plus forte. La deuxième partie est un mélange entre vents solaires et interstellaires. Pour passer de l'une à l'autre, il faut subir le choc terminal. Enfin, la troisième région, l'espace interstellaire est la région où les vents interstellaires sont dominants. Pour y accéder, il faut franchir l'héliopause.

*Espace interplanétaire : Intensité<sub>vents interstellaires</sub> minimale*

*Héliosheath : Intensité<sub>vents solaires</sub> > Intensité<sub>vents interstellaires</sub>*

*Espace interstellaire : Intensité<sub>vents solaire</sub> minimale*

Voyager 1 a voyagé plus de 27 ans avant de subir le choc terminal. Voyager 2 a mis, quant à lui plus de 30 ans<sup>5</sup>. Ces deux vaisseaux passeront ensuite respectivement 8 et 11 ans dans l'héliosheath avant de passer dans l'espace interstellaire proprement dit. Cet espace interstellaire est donc la partie de l'espace entre chaque système solaire de notre galaxie.

Dans combien de temps Voyager 1 et 2 atteindront l'espace intergalactique ? Probablement jamais. Avant de pouvoir prétendre y voyager, il leur faut traverser l'entièreté de la Voie Lactée. Galaxie qui fait entre 100.000 et 120.000 [AL] de diamètre.

L'année lumière [AL] est une unité utilisée en astronomie pour décrire la distance parcourue par la lumière (c'est-à-dire un photon) en un an<sup>i</sup>. Voyageant à une vitesse de 299.792.458 [m/s], nous parlons d'approximativement 10<sup>13</sup> kilomètres<sup>ii</sup>.

Après plus de 40 ans de voyage, les deux vaisseaux se trouvent à 20,58 et 17,1 [heures lumières] de la Terre. Avec une vitesse moyenne par rapport au Soleil de 56.000 [km/s], la prochaine étoile qu'ils auront l'occasion d'apercevoir (et qui se trouve à une distance d'1,6 [AL]) leur apparaîtra dans plus de 40.000 ans.<sup>iii</sup>

A titre de comparaison, la distance Terre-Lune est de 384.400 [km] en moyenne, soit 1,28 [secondes lumières]<sup>6</sup>. La distance Terre-Mars varie entre 206,6 à 249,2 millions de kilomètres. Ce qui correspond à une distance de 13 [minutes lumières] en moyenne.

Historiquement, l'unité astronomique [UA]<sup>7</sup> est d'usage pour les corps célestes relativement proches. Elle équivaut à la distance Terre-Soleil.

$$AL = 63\,241,77\,UA$$

$$1\,UA \approx 150\,000\,000\,[km]$$

---

<sup>i</sup> En une année julienne pour être précis, soit 365,25 jours ou 31557600 [s] pour le SI.

<sup>ii</sup> La distance exacte est de 9461x10<sup>9</sup> km, 10<sup>13</sup> km est un arrondi ayant une erreur de 5,4%.

<sup>iii</sup> La vitesse dans l'espace n'est pas constante par rapport à la Terre. Celle-ci orbite autour du soleil qui est lui-même en mouvement. D'où la nécessité de se référer au Soleil et non à la Terre.

Pour conclure, l'héliopause<sup>i</sup> se trouve à plus de 123 UA. Mars qui est l'objectif de nombreuses agences spatiales aujourd'hui, se trouve à plus de 9 mois de trajet pour une mission habitée. Une mission hors de notre système solaire n'est pas envisageable aujourd'hui. Notre champ d'investigation se réduira à notre système solaire pour la suite de cet exposé.

---

### 1.1.1.3 LES DANGERS DE L'ESPACE

Quels sont les dangers de l'exploration spatiale auxquels nous avons fait face depuis le lancement de Sputnik 1 le 4 octobre 1957, depuis le premier pas de Neil Armstrong sur la Lune le 20 juillet 1969 ou encore depuis la mission de 438 jours consécutifs en orbite de Valery Polyakov dans la station spatiale MIR ?

Nous traitons ici des obstacles auxquels nous devront faire face si nous voulons envoyer l'Homme plus longtemps et plus loin dans l'Espace.

#### 1.1.1.3.1 CORPS CÉLESTES

---

Le plus grand danger pour un vaisseau en orbite terrestre serait la collision avec un météore ou autre débris spatial. Plus de 16.000<sup>8</sup> débris de la taille d'un raisin ou plus sont actuellement suivis en continu par les différentes agences spatiales. Il en va de même pour les météores approchant la Terre. Ce monitoring permet la prédiction des trajectoires, ce qui réduit la probabilité d'un impact avec un objet capable de faire de réels dommages. Le danger réside dans ce que nous ne sommes pas capables de traquer ; les microéléments, plus petits qu'une bille. Orbitant autour de la Terre à plus de 28.000 [km/h], ils sont potentiellement dangereux pour la viabilité d'un vaisseau.

La station spatiale internationale est la plus grande station en orbite à ce jour. Elle fait plus de 100m par 75m et son premier module fut lancé en 1998. En 20 ans de service, aucun impact majeur n'a été signalé sur sa coque. Certains panneaux solaires et modules présentent des éraflures mais aucun n'a subi de dommages conséquents ou irréversibles. En août 2019<sup>9</sup>, une faible dépressurisation de la station a relevé un trou de 2mm de large. Une dépressurisation totale de la station aurait demandé 18 jours s'il n'avait pas été colmaté. Étant donné que la station est continuellement monitorée, l'anomalie a été identifiée et résolue rapidement.

Cet incident nous démontre que la collision avec un corps céleste est faible dans le cas de voyage spatial<sup>10</sup>. Une fois hors de la ceinture de débris orbitant autour de la Terre, dans l'espace interplanétaire, la présence de corps célestes est rarissime<sup>ii</sup>. De plus, la station spatiale dispose d'un système de bouclier capable de prévenir toute pénétration de la coque par les microéléments non traçables. Bouclier qui est basé sur une coque multi couches capable d'emmagasiner l'énergie cinétique de ces particules<sup>12</sup>. La plupart du temps, l'impact entraîne la désintégration du corps étranger suite à l'énergie thermique libérée lors du choc.

En conclusion, la collision avec un météore ou tout autre corps céleste comme danger potentiel est une idée reçue. La technologie actuelle permet de prédire les trajectoires des corps célestes avec précision. Dès lors, une collision avec l'un d'eux en orbite terrestre basse est rare et une collision avec

---

<sup>i</sup> Frontière de notre système solaire

<sup>ii</sup> En comparaison avec la taille du vaisseau. Les différents corps célestes sont espacés de plusieurs milliers de kilomètres.<sup>11</sup>

un objet une fois cette ceinture de déchets franchie, encore plus rare. Nous pouvons donc considérer qu'ils représentent un danger négligeable pour notre futur habitat.

#### 1.1.1.3.2 RADIATIONS

---

Une fois en dehors du rayon d'action du champ magnétique terrestre et de l'atmosphère terrestre, l'intensité des radiations augmente considérablement. Cette augmentation est d'autant plus forte une fois que la limite dite de « L'orbite terrestre basse ou OTB » est atteinte. En pratique, ce plafond se situe à 1000 kilomètres de la Terre<sup>13</sup>.

Un fois au-delà, les astronautes et leur équipement devront faire face à des GCR (Galactic Cosmic Ray) et des SPE (Solar Particle Events) dont l'intensité varie entre 50 et 2.000 mSv<sup>i</sup>.

Les GCR sont des flux de protons, d'ions et de particules lourdes venant de l'extérieur de notre système solaire. Hautement chargés en énergie, ils voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière. Leur intensité dans le système solaire dépend de l'intensité de l'héliosphère<sup>ii</sup>.

Les SPE sont des flux d'énergie de la forme de rayons gamma, de rayons x et de courants de particules. Ils sont expulsés dans le système solaire lors des éruptions solaires. Leur intensité varie selon le cycle d'éruptions du soleil. Cycle qui se répète tous les 11 ans.<sup>14</sup>

Combinés, ces deux types de radiations ont un impact majeur sur tout ce qui se trouve hors de l'OTB.

La dose de radiations naturellement subie par un homme se situe aux alentours de 3 à 4 mSv/an<sup>15,16</sup>. D'un point de vue médical, un dépassement de cette limite d'exposition pourrait augmenter la probabilité de maladies cardio-vasculaires et de cancers sur le long terme.

Les circuits électroniques ou autres appareils présents à bord du vaisseau encourent également le risque d'être frappés par un flux de particules ionisées. Ce flux pourrait perturber les données des ordinateurs en changeant des 0 en 1 dans le code binaire de ceux-ci<sup>17</sup>. A titre d'exemple, pour éviter tout dérèglement, le télescope spatial Hubble coupe ses instruments scientifiques lorsqu'il traverse les zones les plus risquées et prévient ainsi toute anomalie dans ses mesures.

Enfin, la coque d'un vaisseau pourrait se charger en électricité statique et affecter tout ce qui se trouve à son bord. En avril 2010, le satellite de télécommunication Galaxy 15 est devenu un satellite fantôme suite à ce problème<sup>18</sup>. Le contact n'a pu être rétabli que 8 mois après, une fois que l'effet de la charge électrique fut atténué.

L'exposition des équipages et des équipements aux radiations, GCR ou SPE demandera une attention particulière dans le design de notre habitat.

---

#### 1.1.2 NOTRE SYSTÈME SOLAIRE

Comme mentionné dans la section **L'Espace et l'Univers**, ce document se limite à notre système solaire. Une brève description de celui-ci est de mise afin de pouvoir sélectionner les zones d'intérêts.

---

<sup>i</sup> milliSievert : Unité du SI utilisée pour évaluer l'impact des radiations sur l'homme.

<sup>ii</sup> L'intensité de l'héliosphère dépend de l'activité solaire, au plus les vents solaires sont forts, au moins les GCR pénètrent notre système solaire et vice versa.

---

### 1.1.2.1 EN GÉNÉRAL

Notre système solaire est composé de 8 planètes orbitant autour du soleil, des dizaines de Lunes et des millions d'astéroïdes, comètes et météores<sup>19</sup>. La majorité de ces planètes a été survolée au moins une fois dans l'histoire de l'exploration spatiale. Survol ou exploration de surface qui ont permis de détailler les différentes atmosphères et conditions de surface au sein de notre système solaire.

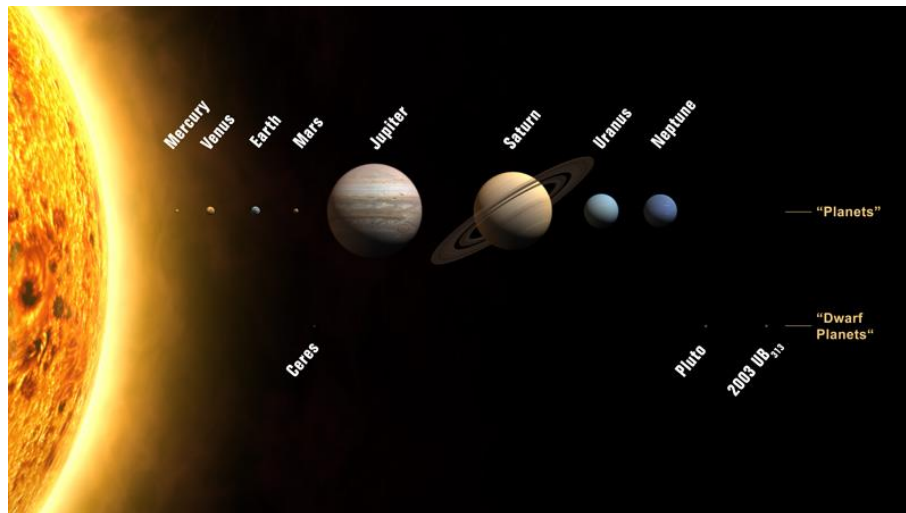


Figure 2 : Système solaire - Crédits : International Astronomical Union

---

### 1.1.2.2 MERCURE

Il s'agit de la plus petite planète de notre système solaire. Situé à une distance moyenne de 0,6 [UA]<sup>i</sup> de la Terre, la lumière du soleil y est 7 fois plus intense que sur Terre et les niveaux de radiations solaires élevés.

Une journée sur Mercure équivaut à 176 jours terriens. Sa surface est similaire à celle de notre Lune dû aux impacts de comètes et météorites. Les maxima de températures qui y règnent sont de 430°C le jour à -180°C la nuit. Ce gradient de température vient du fait qu'il n'y pas d'atmosphère pour retenir la chaleur.

En conclusion, Mercure est trop chaude et trop exposée aux radiations pour y envoyer l'Homme.

---

### 1.1.2.3 VÉNUS

Planète la plus proche de la Terre, avec une taille similaire mais un climat drastiquement différent, Vénus est la planète la plus chaude de notre système solaire.

Située à 0,3 [UA]<sup>ii</sup> de la Terre, un cycle jour/nuit dure 117 jours. Son atmosphère est très dense et composée majoritairement de dioxyde de carbone. C'est cette densité qui contribue à conserver la chaleur émise par le soleil, il fait 471°C à sa surface.

---

<sup>i</sup> 90.000.000 [km]

<sup>ii</sup> 45.000.000 [km]

Les conditions extrêmes de la planète ont détruit en quelques minutes les composants électroniques des sondes qui y ont été envoyée. Pour les mêmes raisons, nous ne retiendrons pas cette planète comme candidat potentiel à l'installation d'un habitat.

---

#### 1.1.2.4 MARS

Surnommée la Planète Rouge pour sa couleur apparente, Mars est la planète la plus étudiée à ce jour (après la Terre évidemment). Sa couleur rouge vient de l'oxydation de son sol, aussi appelé régolite<sup>i</sup>, une poussière très fine couvrant toute sa surface.

Située à plus de 0,5 [UA]<sup>ii</sup> de la Terre, 6 vaisseaux s'y trouvent actuellement en orbite ainsi qu'un rover et un lanceur sur sa surface. Les données collectées ont mis en avant des similarités avec la Terre. La durée d'une journée y est de 24.6 heures terrestres et quatre saisons distinctes y sont observables.

Bien qu'aucune forme de vie ancienne n'ait été mise à jour par Curiosity<sup>iii</sup>, plusieurs éléments tendent à dire que Mars fut jadis une planète avec de l'eau liquide à sa surface. Eau qui est aujourd'hui conservée sous ses pôles sous forme solide.

Son atmosphère est trop fine pour conserver la chaleur du soleil ou jouer le moindre rôle de protection contre les radiations. Les températures varient de 24°C le jour et -153°C la nuit.

Enfin, les conditions climatiques à la surface de Mars peuvent être un problème. Par exemple, la planète est sujette à des événements de tempêtes totales. Lorsque les vents sont assez forts, des tempêtes soulèvent la régolithe martienne sur plusieurs kilomètres de hauteur. Cette fine poussière peut mettre plusieurs mois à retomber.

Le voyage vers Mars est également complexe. Mars a besoin de 687 jours pour compléter une orbite. La Terre en a besoin de 365,25. En tenant compte de la forme, de la position dans l'espace de leurs orbites et de leurs vitesses respectives, une fenêtre de tir<sup>iv</sup> où la distance entre les 2 planètes peut se parcourir avec un minimum de carburant ne se présente que tous les 26 mois<sup>20</sup>.

Sur base des fusées actuelles, un trajet doit être optimisé d'un point de vue énergétique et non temporel. Le coût du carburant et son poids en font le facteur limitant d'une mission d'exploration spatiale.

---

<sup>i</sup> La régolithe est le nom de la couche de sol non consolidée recouvrant la couche rocheuse d'une planète.

<sup>ii</sup> 75.000.000 [km]

<sup>iii</sup> Curiosity est le rover de la NASA évoluant sur le sol martien.

<sup>iv</sup> Intervalle de plusieurs jours durant lequel une trajectoire vers l'objet cible est possible.

L'orbite de transfert d'Hohmann permettrait de rallier Mars en 9 mois avec une quantité minimale de combustible. La mission devra passer un peu moins de 500 jours sur Mars avant de pouvoir bénéficier d'une nouvelle fenêtre de tir et revenir sur Terre en 9 mois à nouveau. Un total d'au moins 900 jours dans l'Espace.

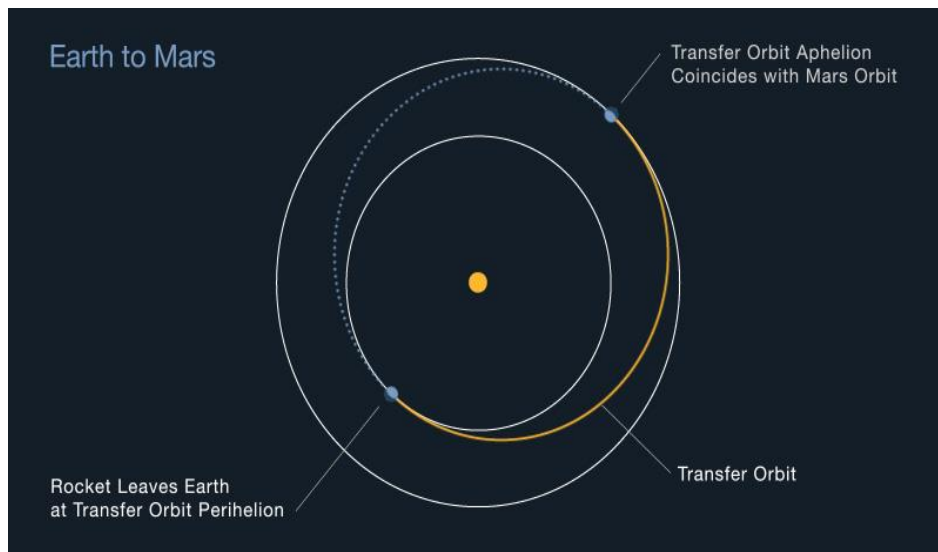


Figure 3 : Orbite de transfert de Hohmann depuis la Terre vers Mars - Crédits : NASA

Il existe une multitude d'autres orbites de transfert. Chacun présentant des deltas de vitesses, des technologies et des besoins en carburant différents. En théorie, un tel voyage est possible. Les défis pour le rendre possible seront abordés dans la section **Challenges techniques**.

Mars est donc une planète où une mission habitée est possible. Les conditions d'accès et les conditions de vie sur place sont contraignantes mais pas rédhibitoires.

---

#### 1.1.2.5 JUPITER

La plus grande planète de notre système solaire ne présente pas de grand intérêt pour l'exploration spatiale. En effet, à partir de Jupiter, le temps de voyage pour une mission se compte en années et non plus en mois.

Se trouvant à 4,2 [UA]<sup>i</sup> de la Terre, Jupiter est une géante gazeuse. C'est-à-dire qu'elle ne possède pas de surface solide proprement dit mais un amas de gaz et de liquides tourbillonnants à de très hautes pressions et températures.

Le seul point d'intérêt serait une de ses Lunes, Europa. Lune qui aurait un océan d'eau salée sous une croûte gelée épaisse d'une quinzaine de kilomètres.

---

#### 1.1.2.6 SATURNE

Se trouvant à 8 [UA]<sup>ii</sup> en moyenne de la Terre, Saturne est également une gazeuse.

---

<sup>i</sup> 630.000.000 [km]

<sup>ii</sup> 1.200.000.000 [km]

Pour la même raison que Jupiter, un voyage trop long et des conditions de surfaces extrêmes, une mission habitée n’y est pas possible.

---

#### 1.1.2.7 URANUS ET NEPTUNE

La première, Uranus, se trouve à plus de 18,8 [UA]<sup>i</sup> de la Terre et est une planète froide. Elle n’a pas de réelle surface mais est composée de liquides.

Enfin, Neptune, la planète la plus éloignée de notre système solaire, se trouve à plus de 29 [UA]<sup>ii</sup> de la Terre. Le soleil y brille 900 fois moins fort que sur la Terre et sa surface similaire à celle d’Uranus.

Ces deux planètes ne sont donc pas propices à l’installation d’une base spatiale.

---

#### 1.1.2.8 LA LUNE

Au même titre que Mars, la Lune est susceptible d’accueillir, dans les prochaines années, des missions habitées.

Se trouvant à 384.400 kilomètres de la Terre, notre Lune est accessible à raison d’un voyage d’approximativement 3 jours.

La Lune orbite en 27 jours autour de la Terre et tourne sur elle-même à la même vitesse que la Terre. Du point de vue terrestre, c’est la raison pour laquelle nous sommes si familiers avec ce côté de la Lune, nous l’avons continuellement en visuel. Le cycle jour/nuit lunaire proprement dit est donc d’approximativement un mois, le temps qu’une rotation terrestre se fasse et que le Soleil soit de nouveau au même emplacement sur l’horizon de notre satellite naturel.

L’atmosphère lunaire est inexistante, elle n’offre aucune protection contre les corps célestes et les radiations ni la capacité de conserver de la chaleur à sa surface. Il en résulte une épaisse couche de régolithe et un gradient thermique allant de -173°C la nuit à 127°C le jour. Des cratères continuellement à l’ombre et à températures plus constantes (mais très basses) existent aux pôles.

Enfin, depuis 2008 et la mission indienne Chandrayaan-1, de l’eau a officiellement été découverte sur la Lune. L’eau qui est un élément essentiel pour l’installation d’une mission habitée sur le long terme. La Lune est un candidat potentiel pour les futures missions d’exploration spatiale.

## 1.2 L’HOMME ET L’ESPACE

Envoyer des équipages au-delà de l’OTB revient à les soumettre à des niveaux d’exposition aux radiations importants. Les risques d’impacts négatifs sur le corps humain et la santé mentale sont non négligeables. Ces effets sur le corps humain demanderont des dimensionnements particuliers de nos structures pour en minimiser les conséquences.

---

<sup>i</sup> 2.820.000.000 [km]

<sup>ii</sup> 4.350.000.000 [km]

## 1. Impacts physiologiques

Le corps humain n'est pas fait pour l'espace. L'état d'équilibre du corps humain et son fonctionnement est basé sur le référentiel terrestre. Un environnement où règne une gravité de 9,81 [m/s<sup>2</sup>] et une atmosphère de 101325 [Pa].

Changer de référentiel revient à infliger un choc au corps. D'un environnement ouvert sous l'effet de la gravité, les astronautes voyagent dans un environnement fermé sans gravité (dans l'espace) ou à gravité réduite (sur Mars ou la Lune). Référentiel dans lequel le corps va devoir déterminer un nouvel équilibre, comme le montre l'expérience « NASA Twins Study<sup>21</sup> ». En 2010, Scott Kelly s'est envolé vers l'ISS pour une année complète en orbite. Le but de cette mission était d'observer les changements sur son corps et les comparer avec ceux de son frère jumeau, resté sur Terre. La stabilité de cet équilibre fait encore l'objet de nombreuses recherches.

En 40 ans d'exploration spatiale, 565 personnes sont allées dans l'espace. Ces 565 personnes représentent la totalité des données disponibles des effets de l'espace sur le métabolisme humain. Bien que les scientifiques s'accordent pour dire que ces données ne permettent pas encore d'affirmer les conséquences de l'exploration spatiale sur le corps humain, une série d'effets est constatée.<sup>22</sup>

L'absence de gravité est l'un des problèmes majeurs pour les astronautes. Le squelette est conçu pour supporter le poids du corps, or sans gravité, le poids d'un homme est nul. En conséquence, sa densité osseuse va diminuer et ses muscles s'atrophier. Le risque de fracture augmente donc considérablement.

Il en va de même pour les fluides corporels. N'étant plus sujets à la gravité, leur comportement n'est plus le même. Par exemple, les astronautes ont souvent besoin de lunettes dans l'espace. Des fluides migrent vers l'arrière du globe oculaire et s'y accumulent, ce qui déforme la lentille et altère la vision. Des problèmes cardiovasculaires durant ou après la mission sont également à prévoir.

Une fois l'OTB passé, le niveau de radiation augmente fortement. Scott Kelly fut, selon les estimations, exposé à 48 fois la dose naturelle de radiations durant sa mission à bord de l'ISS<sup>i</sup>. S'aventurer au-delà de l'OTB multiplierait encore par 8 cette valeur<sup>ii</sup>. Ceci sans compter les événements radiatifs intenses tels qu'une éruption solaire exceptionnelle ou un champ de GCR.

Dans le cas de l'astronaute Kelly, des mutations génétiques ont été observées. Mutations qui ne se sont pas dissipées une fois revenu sur Terre. Des études sur l'effet des radiations (rayons gamma et x) montrent que le corps perdrait progressivement sa capacité à se régénérer. Le lien explicite avec l'augmentation du risque de développer un cancer n'est pas établi mais évoqué.

Enfin, vivre dans l'espace implique de vivre dans un espace fermé, climatisé en permanence et avec peu d'opportunités de conserver une hygiène optimale. Ce genre de conditions est

---

<sup>i</sup> ISS qui orbite en OTB

<sup>ii</sup> Facteur variable en fonction de la destination et de la durée de la mission.

favorable à la propagation d'un virus. Eternuer dans un vaisseau spatial est un problème. Tout l'équipage devient susceptible de tomber malade.

A titre d'information, l'**Annexe A** compare des maladies relatives au voyage spatiale avec des maladies terrestres. Ce tableau donne un aperçu des conséquences qui peuvent apparaître avec ce genre problèmes au sein d'une mission de plusieurs mois voire années.

## 2. Impacts psychologiques

La réussite d'une mission dépend autant des machines que de la fiabilité de son équipage. Comment s'assurer qu'une équipe de 4 à 6 personnes<sup>i</sup> restera saine d'esprit tout au long de la mission ?

Dans l'hypothèse d'un voyage vers Mars, ils vivront près de 2 années et demie dans un espace confiné où la vie privée est limitée par souci de place disponible. A cela s'ajoute l'isolation par rapport à la Terre et les communications limitées. Les risques de blessure, de panne technique, de collisions ou encore l'affaiblissement physique rendent cet environnement très stressant. Tout ceci complexifie la gestion de la santé mentale des astronautes. Ils devront être capables de gérer les erreurs et les tensions par eux-mêmes. Ces aspects psychologiques font l'objet de nombreuses études.

Le manque de données ne permet pas de tirer de conclusion sur les effets d'un voyage spatial de longue durée. Les équipes de recherche peuvent au mieux prédire et prévenir les éventuels problèmes que rencontreront les équipages.

### 1.3 CHALLENGES TECHNIQUES

Quels sont les challenges techniques majeurs que présenteraient un voyage interplanétaire ? Quelles sont les solutions existantes ? Sont-elles fiables sur le long terme ? Quelles solutions sont en cours de développement ? Quelles stratégies sont mises en place pour pallier aux problèmes pour lesquels aucune solution technique n'existe ? Autant de questions auxquelles il nous faut répondre pour comprendre ce qui doit être mis en œuvre pour se rendre sur une autre planète et y construire en toute sécurité.

#### 1.3.1 PROPULSION ET CARBURANT

La question de la propulsion est déterminante dans les programmes spatiaux. Le poids des moteurs combiné au coût et au poids du carburant sont tels qu'ils représentent à eux seuls la majeure partie de la fusée. Ce qui est fait le facteur limitant des missions spatiales aujourd'hui.

Une mission habitée vers une autre planète devra passer par les étapes suivantes :

1. Aller : Se défaire de l'atmosphère terrestre.
2. Aller : Atteindre une vitesse de croisière pour le transfert vers la planète cible.
3. Aller : Décélérer lors de l'approche de la planète cible.
4. Retour : Se défaire de l'attraction de la planète en question.
5. Retour : Atteindre une vitesse de croisière pour le transfert vers la Terre.

---

<sup>i</sup> Nombre minimum estimé d'astronautes pour une mission habitée vers Mars selon la NASA.

## 6. Retour : Décélérer lors de l'entrée dans l'atmosphère de la Terre.

Les étapes 1, 3, 4 et 6 nécessitent une énergie considérable. Dans le cas de la Terre, la stratégie actuelle consiste à utiliser un lanceur qui contient un surplus de carburant et des moteurs supplémentaires pour fournir la poussée nécessaire à la mise en orbite. Lanceur qui se détachera de la structure une fois la vitesse d'extraction atteinte. Cette stratégie n'est pas applicable sur la planète cible, le lanceur additionnel étant resté sur Terre. Il faudra transporter tout le matériel nécessaire sur la planète cible pour assurer le retour de la mission.

La fusée en activité la plus puissante à ce jour est la Falcon Heavy<sup>23</sup> et ses 3 lanceurs Falcon 9<sup>24</sup> équipés de 9 moteurs « Merlin » chacun. Avec une poussée au niveau de la mer de 22,819 [kN], elle est capable d'amener en OTB 63 tonnes de charge utile. Pour y arriver, les 27 moteurs consomment quelques 440 tonnes de RP-1, un kérosène raffiné pour fusée.

Si la Falcon Heavy devait aujourd'hui se rendre sur Mars, sa charge utile serait réduite à 17 tonnes. Plus la destination s'éloigne, plus augmente le besoin en carburant pour le transfert vers la planète cible et plus diminue la charge utile embarquée. Une charge très loin des besoins en carburant pour redécoller et revenir sur Terre. Pour se rendre sur une autre planète (que ce soit pour une mission de survol ou de surface), un apport externe de carburant est indispensable.

Plusieurs pistes sont envisagées pour remédier à ce problème.

1. Envoyer des réservoirs de carburant à l'avance sur la planète cible
2. Construire une unité de production locale de fuel
3. Changer radicalement de type de moteur

Envoyer des fusées supplémentaires avec pour unique vocation de transporter du carburant est possible mais compliqué d'un point de vue budget et logistique. Pour envoyer une cargaison de 17 tonnes de carburant sur Mars, il faut en consommer 440 sur Terre et sacrifier la partie supérieure de la fusée.<sup>i</sup> Même si la gravité martienne est plus faible que la gravité terrestre, la consommation de carburant pour redécoller dépasse la capacité cargo d'une fusée. Plusieurs fusées de ravitaillement sont donc à prévoir pour ramener un seul équipage. Et nous n'avons pas encore considéré le matériel nécessaire à la mission ou les besoins pour la construction de l'habitat dans l'équation. Il s'agit de l'option la plus coûteuse et qui demande le plus de fusées opérationnelles au même moment.

La seconde option est plus prometteuse. Le RP-1<sup>ii</sup> étant très compliqué à synthétiser sans machinerie lourde, SpaceX développe depuis plusieurs années un moteur d'un nouveau genre. Un moteur plus puissant et fonctionnant avec un carburant synthétisable sur Mars, un mélange de méthane et d'oxygène liquide sous-refroidis. Si les tests en cours se révèlent concluants, le moteur « Raptor » pourrait propulser le projet Starship<sup>25</sup> vers la Lune et vers Mars dans les années à venir.

Enfin, d'un point de vue théorique, il existe des moteurs permettant de s'affranchir du souci de carburant. Il s'agit des moteurs à propulsion ionique, thermonucléaire ou encore à fission. Sans réelles

---

<sup>i</sup> Partie supérieure qui restera sur Mars.

<sup>ii</sup> Nom du carburant en usage.

avancées technologiques, ces moteurs ne sont pas encore capables de fournir un rapport poussée/charge utile intéressant.

---

### 1.3.2 DURABILITÉ DES STRUCTURES

La question de la durabilité d'une structure est intimement liée à l'objectif de la mission. Les contraintes pour un voyage interplanétaire ou une mission de surface sur Mars sont très différentes. La durée d'une mission est également à considérer. Un aller-retour vers la Lune demande 8 jours, un aller-retour vers Mars en demande plus de 900. Les sollicitations des habitats varieront en fonction de leur destination et leur usage.

#### 1. Dans l'espace

Le programme MISSE<sup>26</sup> ou « Materials International Space Station Experiments » a permis et permet toujours d'étudier la durabilité d'un panel de matériaux au sein de l'ISS<sup>i</sup>. Installés sur des panneaux extérieurs à la station, leurs réactions aux radiations, aux changements de températures et aux impacts avec des débris et autres micrométéorites y sont étudiées. Ces données permettent aux chercheurs de prédire la réaction des structures dans l'espace.

Ces expériences se déroulent sous l'OTB. Les chercheurs ne peuvent que simuler leur comportement une fois au-delà.

#### 2. Sur une autre planète

Sur la Lune, le module Apollo était conçu pour durer 75 heures. Sur Mars, la mission la plus courte serait d'une année complète. L'habitat utilisé pour ce genre de missions longues devra répondre à des exigences plus contraignantes que son prédécesseur, Apollo. Il devra être plus robuste, résistant à l'usure mais aussi suffisamment grand. Construire une structure de taille suffisante demandera donc beaucoup de matière.

Envoyer un kilogramme de matière en OTB coûte 3000 US\$ en moyenne<sup>27</sup>. Prix qui augmente avec la distance et qui dépend de la fusée utilisée. Dès lors, envoyer une tonne de béton et d'acier en vue de construire une structure sur une autre planète nous ramène au problème du carburant. Outre le fait qu'utiliser la charge utile d'une fusée pour transporter des matériaux de construction comme de l'acier est discutable. Plus la destination est éloignée, plus le carburant prend une grande proportion de la charge utile. Se servir des matériaux disponibles in situ est donc essentiel à l'établissement d'une mission interplanétaire.

La question de la durabilité des structures est d'autant plus compliquée qu'aucune mission n'est jamais revenue de Mars. Mis à part des échantillons lunaires, les scientifiques ne peuvent que faire des hypothèses sur la manière dont réagiront les différents matériaux. Les rovers Vikings et Curiosity ont permis de recréer un échantillon de régolithe martienne. Cet échantillon type et son homologue lunaire servent aux différentes études sur l'impression 3D et autres techniques de construction spatiales.

Enfin, en considérant une mission habitée vers une autre planète, Mars ou la Lune en l'occurrence. Si l'habitat est transporté depuis la Terre vers sa destination puis déployé par

---

<sup>i</sup> L'ISS ou « International Space Station », abréviation utilisée en français comme en anglais.

les astronautes eux-mêmes, celui-ci doit être conçu pour 500 jours.<sup>i</sup> Si l'habitat en question est construit par des rovers à l'avance, celui-ci devra résister à la durée de la construction, l'attente de l'équipage et enfin la durée de la mission.<sup>ii</sup>

---

### 1.3.3 BOUCLIER RADIATIF

Comme nous l'avons vu dans la section **Les dangers de l'Espace**, s'aventurer hors du champ magnétique terrestre revient à s'exposer à une quantité non négligeable de radiations.

Le défi technique est de reproduire la protection que fournit la Terre une fois en dehors de celle-ci.

A cause de la nature des radiations, le choix d'un bouclier est complexe. Des particules lourdes chargées comme les GCR savent passer à travers des épaisseurs importantes de matière. Certains matériaux sont susceptibles d'interagir avec les flux de radiations et générer un second flux, parfois plus nocif que le flux primaire. D'autres matériaux n'auront pas le moindre effet protecteur et agiront comme des passoires. Les radiations étant composées de particules aussi petites que des protons, une matière trop grossière ne sait pas les stopper.

La question actuelle est de déterminer quel matériau est le plus performant pour ensuite l'intégrer aux systèmes de protection et de savoir si nous sommes en mesure de le produire sur base des matériaux disponibles sur place<sup>28</sup>.

Enfin, l'habitat devra être conçu pour minimiser l'exposition des astronautes aux radiations sur le long terme et fournir un refuge en cas d'événements radiatifs intenses.

---

### 1.3.4 DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE

Le matériel scientifique et de vie qui pourraient composer l'équipement extérieur<sup>iii</sup> d'une base planétaire devra résister aux variations quotidiennes de températures. Passant tous les jours d'un milieu chaud à, souvent, un milieu extrêmement froid. Pour garantir le bon fonctionnement des composants électroniques de ces machines, il faut leur fournir un intervalle de température restant entre -40°C et 40°C.<sup>29,30</sup> Pour se protéger de la chaleur émise par les radiations et conserver une température optimale le reste du temps, l'isolation est essentielle.

Les satellites et différents rovers évoluant dans notre système solaire se protègent selon le concept de WEB ou « Warm Electronic Box ». Cette boîte abrite les composants essentiels au bon fonctionnement de l'équipement. Elle est monitorée pour être refroidie et chauffée en continu de sorte à éviter toute anomalie de température.

Le futur habitat devra répondre aux mêmes exigences. En plus de devoir résister aux variations thermiques sans se fissurer, se dépressuriser, il devra assurer une isolation parfaite et conserver une température constante entre ses murs. Le défi est d'assurer cette gestion de la chaleur sans devoir créer de parois aux tailles disproportionnées. Plus le mur doit être épais, plus il nous faudra récolter

---

<sup>i</sup> Durée minimum d'une mission martienne selon les orbites de transferts Terre-Mars et Mars-Terre.

<sup>ii</sup> Durabilité d'autant plus contraignante que la structure doit être finie et opérationnelle lorsque l'équipage se posera pour s'y installer. Au risque d'entraîner un échec prématuré de la mission.

<sup>iii</sup> Panneaux solaires, rovers d'extraction, matériel de construction, ...

de la matière première, la transformer et enfin la poser sur la structure. Une opération trop longue augmente le risque d'erreurs comme le coûts de la mission.

#### 1.4 ENJEUX ÉCONOMIQUES ET POLITIQUES

Aux défis techniques s'ajoutent les enjeux politiques et économiques. Un programme spatial a besoin d'une garantie de financement sur plusieurs années. Durée qui dépasse souvent la durée des mandats des gouvernements en activité. Gouvernements susceptibles de revoir le budget consacré aux agences spatiales.

La simple question de la motivation derrière un programme spatial est discutable. La première ère de la conquête spatiale a été motivée par des besoins de démonstration entre les Etats-Unis et l'URSS lors de la guerre froide. Cette course à l'espace nous a porté jusqu'au premier homme sur la Lune et au premier engin sur Mars.

Aujourd'hui, l'effort spatial est majoritairement scientifique. Que ce soit au sein de la Station Spatiale Internationale ou des rovers lunaires et martiens, le principal objectif d'en apprendre plus sur l'espace et ses composants.

Pour complexifier ce schéma, des agences privées comme SpaceX ou Boeing se positionnent comme de nouveaux intervenants sur le marché de l'exploration spatiale. En proposant les premiers vaisseaux réutilisables, le coût d'envoi d'un kilogramme de matériel a été divisé par 20.

Une analogie peut être faite avec le continent arctique. Les premiers pionniers à s'y être aventurés l'ont fait pour l'exploration, découvrir cet inconnu. Ce sont ensuite des expéditions scientifiques qui ont pris le relais, collectant des données, menant de multiples études en vue de comprendre ce monde hostile. Petit à petit, ce bout de territoire a été convoité par les états voisins. Riche en pétrole et gaz, le pôle Nord présente également une position militaire stratégique. L'espace pourrait être vu comme l'Arctique d'un autre âge.

#### 1.5 CONCLUSION

Pour conclure ce chapitre d'introduction, il est important de rappeler les points essentiels du raisonnement qui vient d'être fait. Ceux-ci serviront de base pour l'analyse des concepts en cours de développement.

Avec la technologie actuelle, Mars est considérée comme la limite externe des missions habitées. En considérant le carburant comme facteur limitant, l'orbite de transfert optimal demande 9 mois de voyage. Pour pouvoir bénéficier du même orbite lors du trajet retour, l'équipage devra passer 500 jours sur Mars. Au total, nous parlons de plus de 900 jours dans l'espace. Pour les raisons précédentes, la Lune se démarque par son accessibilité. Nous pouvons nous y rendre 365 jours par an et assurons l'aller-retour en une semaine. Les conditions de surfaces sont similaires aux conditions martiennes. Notre futur habitat sera donc à destination de la Lune.

Le principal danger une fois dans l'espace est l'exposition continue à des flux radiatifs dont l'intensité dépasse largement le seuil acceptable sur Terre. Les Hommes et les machines devront y faire face, au risque de tomber malade pour les uns ou de dysfonctionner pour les autres. S'ajoute à cela les impacts physiques et psychologiques auxquels devront faire face les équipages.

Outre les radiations, se pose encore la question du transport. Quitter l'attraction terrestre et se rendre sur la Lune (ou Mars) demande une quantité de carburant importante. Avant de pouvoir considérer un voyage de plusieurs mois, nous devons comprendre comment synthétiser notre fuel sur une autre planète, au risque de ne pas savoir revenir. Pour cela, nous devons travailler avec les ressources in situ. Ressources qui devront également nous servir à la construction et l'alimentation en énergie.

Enfin, l'éventuelle structure déployée sur la surface de la Lune, de Mars ou d'un autre corps céleste devra faire face aux intempéries parfois extrêmes et à des variations thermiques considérables. Cet environnement relativement nouveau n'étant pas assez restrictif de base, les futures missions spatiales devront également considérer les enjeux politiques et économiques.

## 2 CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART DES STRUCTURES SPATIALES EXISTANTES

Le chapitre précédant nous a permis de décrire un nouveau référentiel, le milieu extraterrestre. Les défis techniques, économiques, psychologiques et physiques qui en ressortent nous serviront de base pour la suite de ce mémoire.

Le but de ce chapitre est de passer en revue différents concepts de structures extraterrestres en cours de développement. Comme expliqué dans le chapitre précédent, nous nous concentrerons sur les habitats à destination de la Lune. Pour ne pas mettre de côté des concepts intéressants, nous garderons encore l'hypothèse de Mars le temps de cette section. Cette analyse nous permettra de tirer des leçons sur les stratégies existantes ainsi que de traquer leurs forces et leurs faiblesses. Qu'il s'agisse d'idées pour combattre les radiations, les paramètres psychologiques ou encore les variations de températures extrêmes, cette base de données sera notre point de départ pour le dernier chapitre, la conception d'une base lunaire proprement dite. En d'autres mots, il ne s'agit pas de quantifier les problèmes mais de comparer les méthodes et d'identifier des techniques prometteuses.

L'analyse de chaque structure sera composée d'une fiche technique décrivant le concept de celle-ci ainsi qu'une grille d'évaluation des différentes stratégies de la structure.

### En résumé :

- **Quoi** : Etat de l'art des structures spatiales existantes
- **Pourquoi** : Créer une base de travail sur bases de leçons tirées de chaque concept
- **Comment** : En identifiant les stratégies de chaque structure pour adresser les défis techniques relatif à notre référentiel de construction
- **Conclusions** : Obtention d'une liste de leçons utiles à notre base

### 2.1 FICHE TECHNIQUE

La fiche technique reprend les différentes informations importantes à la compréhension d'une structure. En plus des caractéristiques générales (surface créée, concepteurs, technologie utilisée, ...), elle met également en avant les innovations du concept.

Le canevas de la fiche technique est disponible dans l'**Annexe B**.

### 2.2 GRILLE D'ÉVALUATION

Construire une grille d'évaluation oui mais pour quel type de structure ? Analyser un module prévu pour assurer la survie d'un équipage de 6 personnes pendant 15 jours n'a rien avoir avec une structure conçue pour accueillir une équipe de 100 scientifiques pendant 300 jours. Ces différences nous demandent de faire des arbitrages de simplification.

La même question se pose pour les phases de vie de la structure. La première phase de vie d'un habitat est sa construction, vient ensuite son utilisation proprement dite et la maintenance puis le potentiel recyclage de l'habitat. Analyser une structure en considérant sa construction, son utilisation et sa maintenance ne revient pas au même qu'uniquement en étudier son utilisation.

Toutes ces questions soulèvent des problèmes et des approches différentes.

Enfin, l'objectivité des critères de l'analyse doit être également discutée. Au même titre qu'un modèle de simulation, les résultats que donne un jeu de données dépendent de la calibration du modèle. Ici, en fonction de la justification de nos critères d'analyse, les forces et les faiblesses de chaque stratégie ne seront pas les mêmes.

---

## 2.2.1 HYPOTHÈSES

Les 3 hypothèses qui suivent justifient le choix des habitats que nous analyserons.

---

### 2.2.1.1 QUESTION DE L'ENVIRONNEMENT

Comme précisé dans le premier chapitre, Mars représente la limite des recherches. Les missions habitées au non, dépassant Mars ne seront pas considérées par ce travail. Ce qui réduit les différents environnements possibles à :

1. **L'espace** : stations orbitales
2. **La Lune** : habitats de surface
3. **Mars** : habitats de surface

Les autres planètes et leurs Lunes ne sont pas considérées à cause de la durée du voyage pour s'y rendre.

Bien que les problèmes techniques rencontrés dans l'espace ou sur une planète (autre que la Terre) sont comparables, l'espace ne sera pas inclus dans cette analyse. Les raisons de ce choix sont les suivantes :

1. **Dépendance terrestre** : Le fait de ne pas avoir accès à des ressources telles que la régolithe ou l'eau disponible sur les autres planètes limite fortement les possibilités de construction. La structure serait totalement dépendante des cargaisons envoyées depuis la Terre, ce qui va à l'encontre de la recherche d'autonomie d'une colonie ou d'une mission à long terme.
2. **Ressources in situ** : L'objectif de ce mémoire est de travailler sur le concept d'une base lunaire et de réfléchir à comment construire dans un milieu hostile. Milieu hostile qui n'est cependant pas dépourvu de ressources exploitables, critère que l'espace ne remplit pas.

Bien que la finalité de ce mémoire soit de concevoir une base lunaire, la liste des habitats disponibles pour l'analyse reprend des concepts martiens. Les exclure reviendrait à mettre de côté des concepts transposables pour la Lune. En effet, les défis de construction sont similaires sur les deux planètes. Extrapoler les idées d'une planète à une autre est réalisable.

En conclusion, la grille d'évaluation se concentre sur les projets surfaciels martiens et lunaires.

---

### 2.2.1.2 QUESTION DES PHASES DE VIE DE L'HABITAT

La phase de construction d'une structure demande autant d'efforts de planification que le design de la structure elle-même. Sur Terre, la planification d'un chantier se fait en fonction des conditions météorologiques et selon un planning bien précis. Ne pas prendre ce point en compte sur une autre planète serait un non-sens.

La question de l'entretien est tout aussi importante. Nombreux sont les exemples de négligences sur Terre qui ont menés à des accidents parfois mortels, des bâtiments négligés toujours en activité aux

ouvrages de génie civil non entretenus. Ce souci d'entretien est d'autant plus critique sur Mars ou sur la Lune. Si l'habitat venait à présenter une faiblesse, aussi petite soit-elle, toute la mission serait en péril. Le fait de pouvoir réparer des défaillances est également important.

Notre analyse considérera différentes phases de vie de la structure.

### 1. Phase de construction

C'est-à-dire que nous analyserons la complexité de la construction de la structure (construction élancée, porte-à-faux, hauteur, ...) et le nombre de phases sensibles que les équipages ou les rovers devront compléter (mise en tension, pressurisation compliquée, pose d'éléments critiques, ...).

### 2. Usage régulier et maintenance

Analyse qui considérera l'intégrité de la structure finie ainsi que les options d'isolation et de réparation des défaillances en cas de dommages.

---

#### 2.2.1.3 QUESTION DU TYPE DE STRUCTURE

Le type d'habitat considéré a également une grande influence sur les critères d'évaluation. Un module éphémère ne doit pas répondre aux mêmes niveaux de protection qu'un habitat permanent et autonome.

Nous pouvons classer les structures en 3 catégories :

1. **Type « Survie »** : Assurer les conditions essentielles à la survie d'un équipage pendant une courte durée. Le confort est réduit au strict minimum.
2. **Type « Durable »** : Habitat semi-permanent. La structure est toujours dépendante des apports terrestres mais assure une qualité de vie et un confort restreint à un équipage.
3. **Type « Opérationnel »** : Il s'agit de l'objectif final d'une structure extraterrestre. L'habitat serait autonome, fonctionnel et apparenté à une colonie.

L'**Annexe C** présente un tableau comparant ces 3 concepts. Plus nous allons avancer vers un habitat proche de la colonie, plus nous parlons d'une structure basée sur les ressources locales. Le coût initial des structures augmente avec la même logique. Plus l'utilisation des ressources locales est grande, plus l'investissement de départ est grand pour créer les outils nécessaires à leur exploitation.

Considérer la 3<sup>ème</sup> proposition, cas où l'Homme a établi une colonie fonctionnelle sur une autre planète est une option qui demandera encore de nombreuses recherches dans un cadre multidisciplinaire (construction, architecture, agronomie, médical, économie, ...). Développer un tel concept demande un travail d'architecture, de logistique et des besoins en ingénieries qui dépasse l'analyse structurelle. Choisir le cas de la colonie pour la suite de cette analyse nous empêchera d'approfondir les problématiques propre de l'ingénieur comme les questions structurelle ou de stabilité.

Considérer la 1<sup>ère</sup> proposition, le module de survie, revient à se montrer inflexible et opposé à l'utilisation des ressources locales. Son utilisation semble exclusivement réservée à des missions de collecte de données. Une mission de courte durée ne se prête pas à des essais de transformation de matériaux ou encore de construction.

En conclusion, notre analyse sera axée vers la 2<sup>ème</sup> proposition, les habitats durables. Ceux-ci représentent la majorité des concepts actuellement développés dans la littérature et présentent le plus grand potentiel pour une installation semi-permanente sur une autre planète.

---

#### 2.2.1.4 RÉCAPITULATIF DES HYPOTHÈSES

**En résumé :**

- **Environnement** : La Lune ainsi que Mars
- **Phase de vie** : De la construction à l'entretien
- **Type de structure** : Habitat durable

Ce choix nous permet d'exploiter les ressources locales et de considérer une structure de taille raisonnable. Les deux raisons principales sont que la majorité des concepts disponibles à l'analyse se situe dans cette catégorie et que la finalité de ce mémoire est de concevoir une structure appartenant à cette même catégorie.

---

#### 2.2.2 CRITÈRES D'ÉVALUATION

Dans cette section, nous allons passer en revue les différents critères composant la grille d'analyse. Étant donné que ces critères sont subjectifs et difficilement quantifiables, une justification s'impose.

Certains sont évidents comme la qualité de stratégie de protection contre les radiations tandis que d'autres sont plus sujets à la critique comme le confort général d'un équipage. Dans le premier cas, nous pouvons baser l'analyse sur l'exposition théorique à laquelle font face les astronautes et les potentielles zones de refuge. Le deuxième cas est plus délicat. Comment juger l'impact psychologique d'une structure sur la santé mentale des personnes qui y vivent ?

L'intérêt de cette section est de mettre en avant les critères qui nous semblent les plus relevant dans le cadre de ce travail. Ils couvrent, entre autres, les problématiques développées dans le chapitre précédent.

Enfin, les critères sont répartis en 3 sous-sections distinctes. La phase de construction et de maintenance en premier lieu. La qualité de la structure en général en second lieu. Et pour finir, l'intégration d'un équipage.

---

##### 2.2.2.1 CRITÈRE 1 : CONSTRUCTION ET ENTRETIEN

Critère d'analyse pour l'aspect général de la construction et de l'entretien de la structure.

En théorie, les techniques de construction terrestres traditionnelles sont applicables dans le milieu extraterrestre. En pratique, l'utilisation de matériaux aux propriétés inconnues (béton martien ou lunaire, PEHD<sup>i</sup> lunaire, ...) et les conditions de constructions spatiales (températures, gravité, radiations, ...) remettent en question le bon fonctionnement de ces méthodes. Afin de faciliter l'analyse, nous considérons que les technologies terrestres utilisées dans l'espace sont néanmoins fonctionnelles.

---

<sup>i</sup> PEHD : Polyéthylène à haute densité

## 1. Gestion des ressources

La gestion des ressources reprend deux questions.

### 1.1. *Quelle est la proportion de ressources ex situ pour un module ?*

L'un des objectifs d'un habitat durable extraterrestre est de tenter d'augmenter son autonomie vis-à-vis de la Terre. Chaque nouvel habitat, extension ou modification d'une structure dépend de ses besoins en ressources importées. Plus le concept est dépendant des apports terrestres, moins il est autonome.

Il s'agit également d'une question de transport. Une structure ayant besoin de 25% de ressources ex situ demande un effort de transport plus conséquent qu'une structure en demandant 15%. Minimiser ce volume est déterminant. Il permet de libérer plus de volume dans la cargaison pour du matériel scientifique, de construction ou du matériel vital à l'installation d'un équipage. L'impact sur le coût du programme<sup>i</sup> spatial est également important.

### 1.2. *Quel est le pourcentage de ressources ex situ recyclable ?*

Chaque kilogramme acheminé sur une autre planète coûte cher, gaspiller cette ressource revient à perdre de l'argent. Une mission doit pouvoir réaffecter un kilogramme de matière facilement, et ce en fonction des besoins ou changements de programme inopinés.

Dans une situation extrême, si une structure venait à être endommagée au point d'être inutilisable, les astronautes doivent pouvoir se servir des débris comme nouvelle source de matériaux et continuer leur mission.

## 2. Outillage de construction

Quelle que soit la technique de construction choisie pour une structure, le matériel nécessaire à sa mise en œuvre doit répondre à une série d'exigences. Les points les plus importantes sont les suivantes.

### 2.1. *Polyvalence*

Ne pouvant pas acheminer facilement une importante flotte d'engins sur une autre planète, un nombre réduit de machines devra assurer la totalité des tâches normalement prises en charge par cette flotte. Tâches qui sont susceptibles d'évoluer avec le temps. Qu'il s'agisse de réparations particulières ou d'une structure d'un genre nouveau à construire, les machines devront pouvoir s'adapter rapidement.

### 2.2. *Robustesse*

Ce point semble évident mais pourtant, une machine défaillante est chose courante sur un chantier terrestre. Casser une pièce sur une machine essentielle peut mettre tout un site à l'arrêt. La remise en marche du chantier dépend de la disponibilité de la pièce à remplacer, le voyage qu'elle doit réaliser et le temps des réparations. Ces 3 dimensions

---

<sup>i</sup> Apollo est le nom du programme spatial à destination de la Lune dans les années 70, Apollo 11 est le nom de la mission qui a posé le premier astronaute sur la Lune. Les agences sont financées pour un programme et non pas pour une mission. L'augmentation du coût d'une mission réduit le potentiel total d'un programme.

seront décuplées une fois sur la Lune. L'exemple semble extrême mais c'est ce qui arrivera sur un chantier extraterrestre. Ne pas considérer cet éventualité reviendrait à mettre toute la mission en péril.

La dépendance aux machines sera immense. Contrairement aux chantiers terrestres, un chantier extraterrestre va de l'extraction du matériau, à sa transformation et jusqu'à sa pose. Rien que la phase d'extraction demandera des pièces de rechange, potentiellement en grande quantité.

En plus d'une utilisation en continu<sup>i</sup>, ces machines devront aussi faire face aux conditions difficiles de l'espace, conditions citées dans le premier chapitre.

### 2.3. *Compacité et poids*

La charge utile et le volume disponible dans les fusées sont très réduits. Comment y faire rentrer des engins de chantier ? Faut-il diminuer leurs dimensions de sorte qu'ils rentrent en une seule pièce dans la fusée ou les démonter avant de les expédier ? La logistique du transport est donc également pertinente.

Pour conclure, l'analyse du matériel de construction est difficile à faire sur base des données actuellement disponibles. Il s'agit ici de mettre en avant les problèmes que nous pourrions rencontrer avec les machines considérées pour la construction des habitats et non leur fonctionnement.

## 3. **Durée de construction**

Dans l'hypothèse d'un habitat durable, la préparation de la structure serait probablement faite avant l'arrivée d'un équipage. Extraire les matériaux et construire la structure proprement dite prend du temps. Cette phase se ferait potentiellement sans assistance humaine. Plus elle sera longue, plus le risque d'erreur ou de dysfonctionnement d'un engin est grand et donc le risque d'avoir un habitat non fonctionnel à l'arrivée d'une mission augmente.

## 4. **Réparations et entretien de la structure**

Une fois que l'habitat est opérationnel, il faut savoir l'entretenir facilement et opérer des réparations dessus.

Dans le cas d'une construction préfabriquée, l'unité de production pourrait simplement renouveler la pièce défectueuse. Lorsqu'il s'agit d'une structure en béton martien (ou lunaire), le problème est plus complexe. Comment assurer la même résistance ?

La question des réparations vient également avec le problème des ressources importées. Comment se passer des ressources terrestres pour une réparation ?

---

<sup>i</sup> Ce genre de machines sera probablement robotisée dans l'espace et pourra travailler en continu.

**En résumé :**

**Le Critère N°1 « Construction et entretien » reprend :**

1. La gestion des ressources
2. Outillage de construction
3. Durée de construction
4. Réparations et entretien de la structure

---

### 2.2.2.2 CRITÈRE 2 : STRUCTURE

Critère d'analyse pour le concept général de la structure.

Nous faisons l'hypothèse que le concept est structurellement stable. Les différents points qui suivent considèrent que le modèle fonctionne dans des conditions optimales. Le but principal de ce critère est d'évaluer les différentes stratégies ainsi que leur robustesse. Il ne s'agit pas de quantifier les effets des éléments perturbateurs mais bien la réaction de la structure.

#### 1. Radiations

Les radiations représentent le principal ennemi de tout explorateur spatial. Ces flux d'énergies sont difficilement atténuables et peuvent provoquer des problèmes physiques et psychologiques ou encore endommager des pièces d'équipements vitales.

Afin d'avoir une meilleure idée de la stratégie de la structure, nous pouvons décomposer le problème comme suit :

*1.1. Quelle proportion de l'habitat se trouve au-dessus du seuil d'exposition limite ?*

Savoir si les concepteurs ont inclus une étude d'exposition dans le développement de leur structure, s'ils ont défini un seuil d'exposition et s'ils ont conçu les espaces sur base de ce dernier est déterminant.

*1.2. Où se trouve les équipements vitaux<sup>i</sup> de l'habitat ?*

L'espace technique est aussi important que les espaces de vie de l'équipage. Il permet d'assurer le bon fonctionnement et la viabilité de l'habitation.

*1.3. Est-ce que des abris sont prévus pour les événements radiations exceptionnels ?*

*1.4. Quels matériaux sont utilisés pour la création d'un « bouclier antiradiations » ?*

#### 2. Températures

Les températures sur le Lune et Mars peuvent descendre jusqu'à plus de -150°C ou monter à 25°C pour Mars et 120°C pour la Lune. Le gradient de températures auquel devront résister les structures est grand. La question réside donc dans la gestion de ce flux de chaleur.

*2.1. Comment est-ce que la structure va gérer ce changement de températures régulier ?*

#### 3. Pression et gravité

Mars a une atmosphère très fine et la Lune n'a pas d'atmosphère. Or pour que l'habitat soit viable, il faut assurer une atmosphère similaire à celle présente sur Terre. La gravité étant aussi

---

<sup>i</sup> Unité de production d'eau, d'oxygène et de chaleur assurant un environnement viable.

très réduite, le poids propre de la structure est inférieur au référentiel terrestre. Il en résulte un jeu de forces contre-intuitif agissant sur la structure.

*3.1. Avec une composante du poids propre réduite et la pression interne qui surpasse la pression externe, comment est-ce que la structure interagit avec ce jeu de forces ?*

#### **4. Poussière**

La surface martienne et lunaire est martelée de météorites depuis des millions d'années. Il en résulte une couche de fine roche pulvérisée ; la régolithe. Cette poussière est si fine qu'elle s'infiltré dans tout, les équipements, les combinaisons spatiales, les conduits de climatisation, etc...

Lors des différentes missions habitées vers la Lune, une petite quantité de cette poussière est parvenue à rentrer dans le module. Quantité qui a suffi à donner la nausée à l'un des astronautes à son bord. Garder cette fine particule hors de l'habitat est donc très important. Afin de ne pas rendre les habitants malades, de ne pas boucher les filtres de la ventilation ou tout simplement contaminer cet espace clos.

*4.1. Quelle est la stratégie prévue pour assurer un environnement sauve de poussière lunaire ?*

#### **5. Sollicitations extraordinaires**

Nous sommes arrivés à la conclusion qu'une micrométéorite ne représente pas un danger. Nous ne sommes pas pour autant à l'abri de dysfonctionnements créant des situations exceptionnelles.

Par exemple, un bâtiment terrestre doit suivre des normes strictes concernant le risque au feu. Des échappatoires sont à prévoir, des systèmes de prévention doivent être intégrés, ... Un habitat extraterrestre est tout aussi exposé à ce genre d'événements.

*4.1. Quelles stratégies sont mises en place pour répondre à des situations d'urgences ?*

**En résumé :**

**Le Critère N°2 « Structure » reprend la gestion :**

1. Des radiations
2. Des températures
3. De la pression et de la gravité
4. De la poussière
5. Des sollicitations extraordinaires

---

#### **2.2.2.3 CRITÈRE 3 : HUMAIN**

Critère d'analyse de l'intégration de l'Homme dans le modèle. Ce critère est inspiré par le travail de Xavier De Kestelier, « Human Centric Approach to Space Exploration »<sup>31</sup> présenté lors de l'événement IASS 2018 à Boston.

Le voyage jusqu'à destination n'est pas pris en compte. Nous assumons que l'équipage qui arrive dispose ou disposera dans un futur proche, de l'habitat fonctionnel une fois sur place pour l'étude de ce critère. C'est-à-dire qu'ils ne doivent pas se soucier de la phase de construction.

Leur temps de séjour sur place sera de plusieurs mois, justifiant un certain niveau de confort pour adresser au mieux les aspects psychologiques.

## **1. Confort et qualité de vie**

Ces dernières années, le monde de l'exploration spatiale s'en rendu compte de l'importance d'intégrer des architectes et autres professions de design dans le processus de développement des stations et bases spatiales. Leur point de vue tend à considérer le bien-être de l'Homme avec une autre approche que l'ingénieur.

Il aura fallu 23 ans à la communauté internationale pour installer le module « Cupola » sur l'ISS, une large plateforme avec vue sur la Terre. Depuis, c'est dans ce module que les astronautes passent la majorité de leur temps libre. L'impact psychologique de pouvoir observer la Terre et le monde extérieur a été immense sur les différents équipages.

Etablir une base permanente sur une autre planète est une mission centrée sur l'humain. Dès lors, se poser la question de l'impact du modèle sur lui est aussi important que la stabilité de cette structure.

Ce critère est peut-être le plus subjectif de cette sélection. Dire qu'un habitat est confortable ou non dépend de chacun, de sa culture et son histoire.

Afin de tenter de rester neutre, nous nous concentrerons sur les points suivants :

### *1.1. Est-ce que l'habitat prévoit une ouverture vers le monde extérieur ?*

L'exemple de la Cupola au sein de l'ISS est explicite. Cette vision du monde environnant est un gain pour le personnel sur place.

### *1.2. Dans quelle mesure est-ce que les astronautes pourront avoir une vie privée ?*

Comme expliqué précédemment, il est difficile de définir le confort de manière universelle. Avoir accès à des espaces personnels permettra aux habitants d'y développer leur propre notion de confort.

### *1.3. Est-ce que l'habitat donne un sentiment de sécurité ?*

Ne pas de sentir en sécurité sous son toit est une source de stress pouvant générer des tensions et des angoisses. La qualité de vie d'une structure réside dans son confort physique comme psychologique.

## **2. Flexibilité du modèle**

Il s'agit de la possibilité de faire évoluer l'habitat. Est-ce que l'habitat est un concept fini et une fois construit aucun module ne peut y être ajouté ? Est-ce que l'habitat est un ensemble de petits modules de tailles et/ou formes différentes que l'équipage pourrait ajuster à ses besoins ?

La possibilité de pouvoir améliorer leur environnement permettra aux différentes missions de projeter leurs objectifs au travers de l'habitat. Outre le point de vue psychologique, un habitat pouvant être mis à l'échelle des missions le visitant est très puissant. Au lieu de devoir construire de A à Z une structure en fonction du but d'un arrivage, la structure en place pourrait tout simplement être étendue, modifiée ou réhabilitée.

2.1. *Est-il possible de faire évoluer l'habitat dans l'espace et dans le temps en fonction des besoins des missions l'occupant ?*

### 3. Temps d'intégration d'un équipage

Ce dernier critère est le temps que mettra un équipage à passer de leur alunisseur (ou équivalent martien) à l'habitat permanent. Sur Terre, le temps d'intégration est le temps entre le moment où une maison reçoit le statut « Hors d'air et hors d'eau » et le moment où le propriétaire peut s'y installer. Une intégration rapide diminue la période que l'équipage doit passer dans un habitat temporaire à faible protection.

3.1. *Est-ce que la structure sera prête à l'usage ou est-ce que les astronautes devront y travailler avant de pouvoir l'intégrer ?*

Le temps qu'ils mettent à migrer de leur abri provisoire et rudimentaire vers cette nouvelle habitation est donc important.

**En résumé :**

**Le Critère N°3 « Humain » reprend :**

1. Le confort et la qualité de vie
2. La flexibilité
3. Le temps d'intégration

#### 2.2.3 GRILLE D'ÉVALUATION – CANEVAS

La grille d'évaluation a pour but de mettre en avant les points forts et les points faibles de chaque structure. Enfin, une fois toutes les structures analysées, nous pourrions tirer les conclusions sur les différentes stratégies et ainsi aller de l'avant dans la conception de notre base lunaire.

Un exemple de ce canevas se trouve dans l'**Annexe D**.

### 2.3 ANALYSE DES CONCEPTS

Les structures qui nous analyseront sont les suivantes :

1. **Mars Ice House**<sup>32</sup>
  - 1.1. Fiche technique : **Annexe E**
  - 1.2. Grille d'évaluation : **Annexe F**
2. **Mars Xhouse V1**<sup>33</sup>
  - 2.1. Fiche technique : **Annexe G**
  - 2.2. Grille d'évaluation : **Annexe H**
3. **Mars Xhouse V2**<sup>33</sup>
  - 3.1. Fiche technique : **Annexe I**
  - 3.2. Grille d'évaluation : **Annexe J**
4. **Zopherus**<sup>34</sup>
  - 4.1. Fiche technique : **Annexe K**
  - 4.2. Grille d'évaluation : **Annexe L**
5. **Mars Incubator**<sup>35</sup>
  - 5.1. Fiche technique : **Annexe M**

5.2. Grille d'évaluation : **Annexe N**

## 6. ESA Moon Base Concept

6.1. Fiche technique : **Annexe O**

6.2. Grille d'évaluation : **Annexe P**

Une multitude de structures supplémentaires sont disponibles à l'analyse. Comme le projet Marsha ou encore celui de Penn State qui méritent d'être mentionnés. Nous nous limiterons toutefois à cette sélection-ci afin de ne pas nous répéter et de mettre uniquement en avant les quelques stratégies intéressantes dans notre étude. La plupart de ces projets sont issus de concours de design et de structures financés par la NASA ces dernières années. En conséquent, les documents relatifs aux études faites sur ces structures ne sont pas toujours disponibles pour le public, ce qui nous limite souvent à devoir travailler avec peu de documentation. Les descriptions complètes des différents habitats se trouvent en annexe comment mentionné ci-dessus, il s'agit ici d'en tirer des conclusions. Conclusions qui nous serviront de base pour le chapitre suivant. Un tableau comparatif de ces 6 structures est disponible en **Annexe Q**.

---

### 2.3.1 MARS ICE HOUSE

Du premier habitat, Mars Ice House, nous retiendrons l'utilisation de la glace comme matière première. Imprimer avec de la glace requiert moins d'énergie qu'avec de la régolithe. Ce concept met également en avant que la régolithe n'est pas le seul matériau disponible, une approche moins « classique » est possible. C'est-à-dire une approche non pas axée sur le béton, comme ce que nous faisons la plupart du temps sur Terre mais axée sur un matériau moins conventionnel. Cette idée défie en quelques sortes nos habitudes.

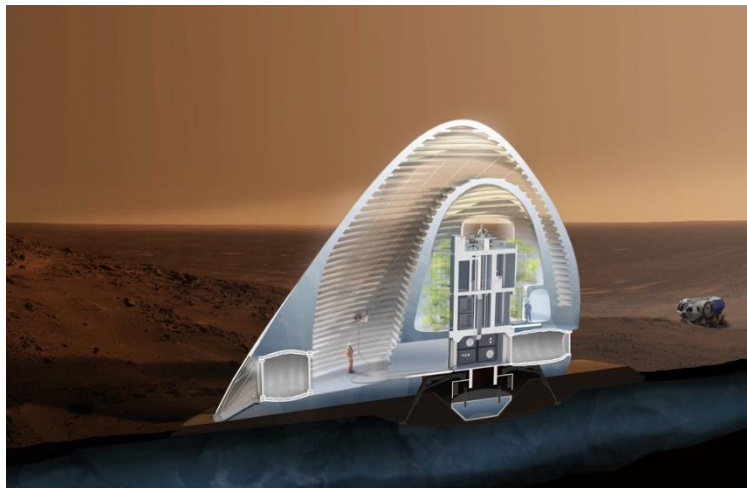


Figure 4 : Rendu extérieur - Crédits : Mars Ice House

En plus de la glace, la construction se fait sur base de rovers araignées. Il s'agit de rovers aux dimensions réduites capables d'escalader les murs. Ils sont en mesure de construire de grandes structures sans nécessiter beaucoup de matériel (échafaudages, plateformes montantes, grues, ...).

Dans le cas particulier de Mars Ice House, les rovers en question évoluent sur la surface interne de la structure. En imprimant un support additionnel leur servant de guide, ils peuvent monter en même temps que l'habitat. Leur fonctionnement est illustré par la **Figure 5**.



**Figure 5 : Concept du rover araignée – Crédits : Mars Ice House**

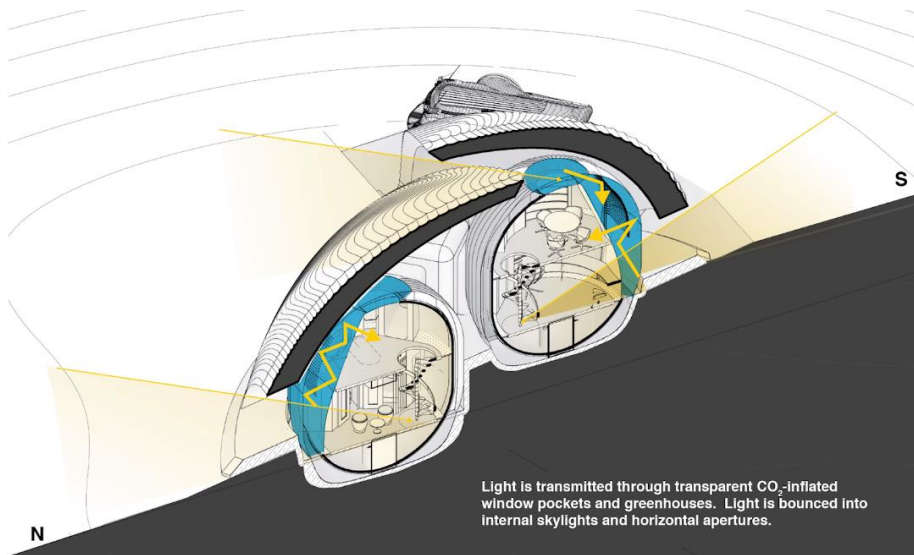
Le gain de volume et de poids dans le cargo résultant de cette stratégie est non négligeable. En effet, vu que ces robots s'autosuffisent, une économie est faite sur le matériel de construction.

Ce concept présente toutefois deux inconvénients majeurs. Le premier est qu'il est construit autour de son lanceur, celui-ci doit dès lors être sacrifié. Or, comme l'a démontré SpaceX en récupérant le premier étage de ses fusées, c'est en recyclant nos véhicules que les coûts de l'exploration spatiale seront diminués. Ensuite, l'habitat entier est recouvert d'une membrane extérieure. Elle agit telle une ballon en créant un volume pressurisé dans lequel la structure est construite. Cette membrane externe n'inspire pas à la sécurité, le moindre défaut ou impact peut potentiellement ruiner l'habitat.

### 2.3.2 MARS XHOUSES

Des Mars Xhouses V1 et V2 nous pouvons mettre en avant les options suivantes :

1. Xhouse V1 fait une étude complète de la gestion de la lumière et des radiations. En jouant avec l'angle de leurs ouvertures et un système de multicouches pour protéger les zones critiques (espace de repos, zone technique, refuge, ...), le concept est capable de percer des ouvertures lumineuses dans sa carapace sans compromettre le bouclier radiatif.



**Figure 6 : Gestion de la lumière - Crédits : Mars Xhouse V1**

2. Xhouse V2 nous propose un premier béton de régolithe renforcé de fibre de basalte et isolé de l'intérieur par une couche de PEHD. La composition des murs, illustré par la **Figure 7** du béton renforcé au PEHD continue de compléter le panel de matériaux de construction envisageables.

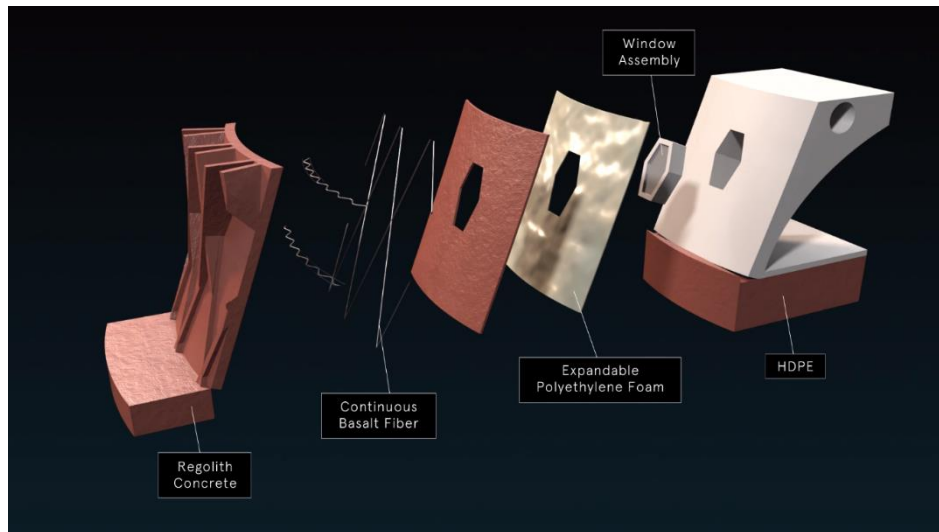


Figure 7 : Composition d'un mur - Crédits : Mars Xhouse V2

3. Xhouse V2 est une tour concave surmontée d'un dôme d'eau. Cette forme ainsi que la composition des murs, nous assure une reprise optimale de la traction due à la pressurisation.

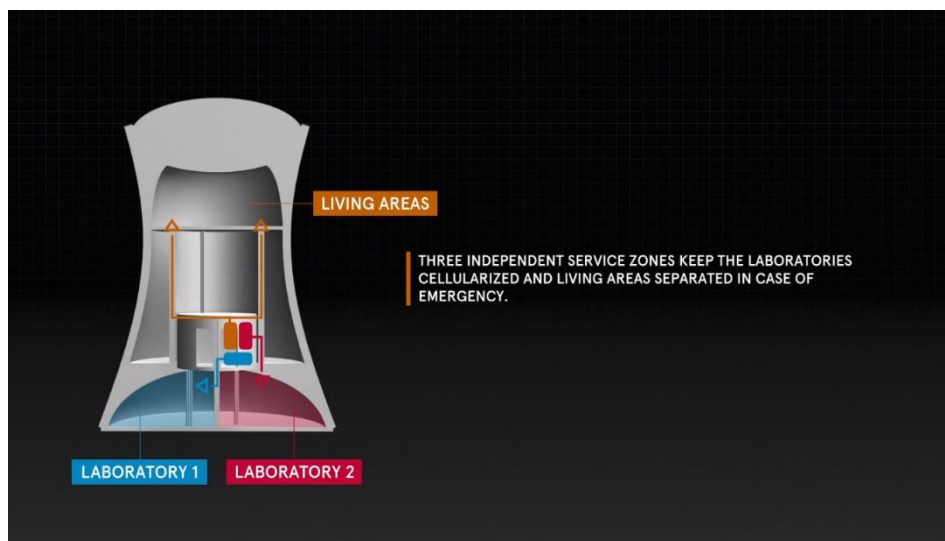


Figure 8 : Concavité et pression - Crédits : Mars Xhouse V2

Malheureusement pour les Xhouses, la construction des deux habitats repose sur des imprimantes extérieures. Imprimantes aux dimensions similaires à ce que nous pourrions utiliser sur Terre. Du matériel compliqué à entretenir et à acheminer. La fiabilité de l'impression dans les conditions extérieures de la Lune ou de Mars est aussi discutable.

---

### 2.3.3 ZOPHERUS

La structure de Zopherus offre une alternative au problème d'impression complexe à mettre en œuvre. Chaque module de son habitat serait construit sous scellé, dans le lanceur. Lanceur qui a dans sa tête tout le nécessaire à l'impression.

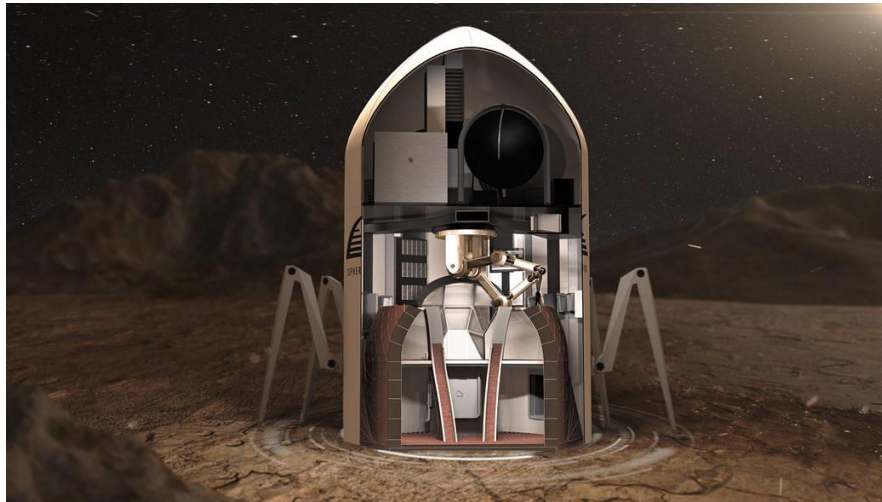


Figure 9 : Imprimante intégrée dans le lanceur – Crédits : Zopherus

En procédant de la sorte, le lanceur peut imprimer chaque module séparément. Au fur et à mesure qu'il imprime des modules, l'habitat s'étend. Ce concept offre une grande modularité mais aussi une gestion des ressources ex situ plus optimale. L'habitat étant extensible, il suffit d'ajouter un nouveau module au précédent pour accueillir de nouveaux arrivants. Il n'est plus nécessaire reconstruire de A à Z un habitat complet à chaque mission ou nouveau besoin. L'apport de ressources ex situ est donc minimisé aux éléments de jonctions entre les habitats comme les sas ou autres éléments d'étanchéité. L'extraction de matière in situ est diminuée au nécessaire pour la construction d'un nouveau module.

---

### 2.3.4 MARS INCUBATOR

Imprimé un module en entier dans le lanceur limite cependant les dimensions de la structure. C'est ici que l'habitat Mars Incubator intervient. En proposant une structure de panneaux de préconstruits en

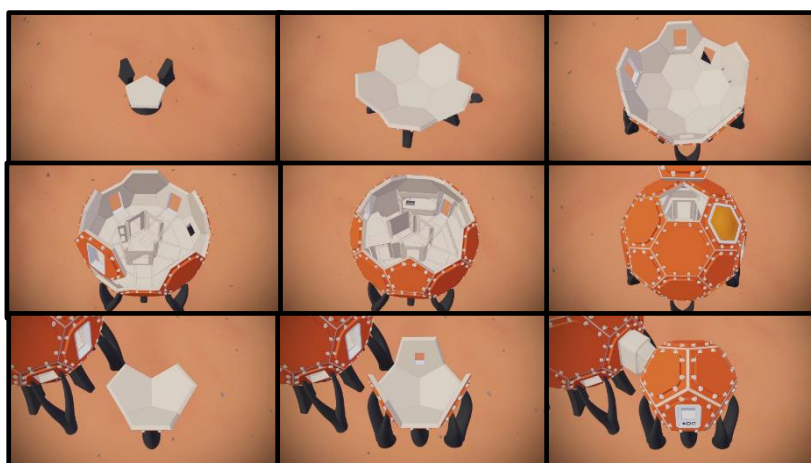


Figure 10 : Assemblage d'un module - Crédits : Mars Incubator

régolithe, il offre un volume habitable plus grand que Zopherus. Les panneaux sont produits dans des unités séparées pour être ensuite assemblés sur site.

Pour assurer l'étanchéité du module, les panneaux sont préalablement mis en tension par un système de visse de serrage et de câbles importés.



**Figure 11 : Visse de mise en tension entre deux panneaux – Crédits : Mars Incubator**

Mars Incubator, avec ses panneaux préfabriqués mis en tension et monté sur des fondations imprimées met en avant un problème : multiplier le nombre de technologies requises pour compléter un habitat augmente rapidement le nombre de machines essentielles à transporter. Les fondations demandent un module d'impression, les panneaux demandent une unité de production, le système de mise en tension demande des robots spécialisés et est entièrement importé.

---

### 2.3.5 BASE LUNAIRE ESA

Avant de conclure, un concept de base lunaire européen met en avant l'usage de la régolithe non transformée, comme une couche inerte de protection contre les radiations.



**Figure 12 : Module à ensevelir – Crédits : ESA**

Bien que l'habitat soit un bunker qui va à l'encontre de notre recherche d'intégration et du confort de l'équipage, le fait de se servir de sol lunaire sans le transformer est intéressant pour les économies que cela génère.

---

## 2.3.6 CONCLUSIONS

L'analyse de ces 6 habitats nous permet de tirer une série de leçons.

### 1. Besoin de redondance dans l'outillage de construction

Quatre des six concepts exploitent l'impression 3D, Mars Ice House avec de la glace, les Xhouses et Zopherus avec un béton de régolithe. Sans considérer le choix de la matière première, cette technique de construction permet une grande versatilité vis-à-vis des formes possibles. Le risque, comme nous pouvons le voir avec les Xhouses est d'avoir besoin d'engins très grands. Cela complexifie leur transport et leur maintenance. Pour créer de la redondance, nous voulons avoir à disposition une multitude d'outils identiques et polyvalents de petite taille. Le transport est plus simple et le risque d'entrave à la construction en cas de panne diminué.

### 2. Sélection de matériaux élargie

La base lunaire de l'ESA met en avant l'usage de régolithe inerte, les XHouses et Zopherus l'usage de béton de régolithe renforcé de fibre de basalte et d'isolation en PEHD, Mars Ice House l'usage de l'eau.

Les concepts étudiés mettent en avant que nous avons accès à plus de matériaux que ce que nous pourrions imaginer. Des matériaux transformés comme du PEHD ou de la fibre de basalte sont synthétisables sur site. La régolithe peut servir de façon inerte mais aussi dans un béton, renforcé ou non. Ces options de matériaux nous permettront de développer des murs de composition mixte pour répondre au mieux aux contraintes.

### 3. Limiter le nombre de techniques de construction

Mars Incubator est basé sur la préfabrication de panneaux en régolithe mais demande des engins d'impression 3D pour réaliser ses fondations. Le concept se défait de la problématique des grands engins mais contrecarre ce gain par une augmentation du nombre d'engins nécessaire à sa finalisation. Multiplier le nombre de techniques requiert un nombre accru de machines à acheminer sur la Lune. Nous chercherons donc à créer un habitat en nous basant sur une technique unique.

### 4. Utilisation d'un bouclier radiatif multicouche

Mars Ice house et les Xhouses atténuent l'intensité des radiations via un système de multiplication du nombre de couches à traverser. Les zones extérieures des habitats sont plus exposées mais fonctionnent comme des espaces tampons pour garantir la protection optimale du cœur de la structure. L'attribution des espaces se fait en fonction de cette exposition, stratégie que nous conserverons pour notre habitat.

### 5. Qualité de construction

Les Xhouses mettent en avant la difficulté de garantir une qualité de construction parfaite. En imprimant directement sur la structure, leurs têtes d'impressions sont exposées aux conditions extérieures. Conditions qui comme expliqué dans le premier chapitre, peuvent être très contraignantes et variables. La qualité finale du produit d'impression est remise en question.

Comme illustré par Zopherus et Mars Incubator, la qualité finale peut être garantie en construisant de façon discontinue. La discontinuité du processus de construction permet

d'isoler des éléments ou des sections du reste de l'habitat et de les produire parfaitement avant de les intégrer au bloc principal.

## **6. Modulabilité**

A nouveau, Mars Incubator et Zopherus mettent en avant l'intérêt d'un habitat modulable. Rendre un habitat modulable diminue la dépendance terrestre en ressources importées et en ressources in situ à récolter. Cela permet un gain de temps et d'argent tout en créant un habitat extensible. Plus la surface pressurisée en continu est grande, plus le concept est confortable.

Les leçons que nous venons de citer nous serviront de points de départ pour l'élaboration de notre propre version d'une base dans le chapitre suivant.

Enfin, le cheminement présenté ici n'est qu'une piste parmi plusieurs. Le choix des stratégies repose sur les habitats sélectionnés et l'objectif que nous avons, c'est-à-dire la création d'un concept le plus polyvalent possible. Si notre objectif avait été axé sur une protection totale contre les radiations ou encore sur d'autres hypothèses de base comme la durée de construction ou l'intégration de l'équipage, notre conclusion en serait probablement modifiée.



### 3 CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UNE BASE LUNAIRE

Nous avons déterminé un nouveau référentiel de construction et les défis qui y sont associés dans le premier chapitre. Nous avons ensuite, dans le second chapitre, établi une série de points que nous voulons adresser après avoir étudié les structures spatiales existantes. Sur base de ces apprentissages, nous pouvons démarrer la conception même d'un habitat. Conception qui nous permettra d'illustrer chacun des problèmes évoqués jusqu'ici et de tenter de les résoudre via une approche polyvalente.

En gardant en tête les analyses précédentes, cette étude a pour but de mettre en avant un concept innovant tant d'un point de vue structurel qu'humain. Les challenges techniques comme les radiations sont aussi importants que l'équilibre psychologique de l'équipage qui séjournera dans l'habitat.

Ce chapitre sera séparé en 5 sections :

1. **Section 1** : Choix des techniques de construction
2. **Section 2** : Quantification des défis techniques relatif à notre référentiel lunaire
3. **Section 3** : Conception de notre habitat lunaire
4. **Section 4** : Construction de l'habitat lunaire
5. **Section 5** : Comparaison avec les habitats existants

Les questions des radiations, des matériaux de construction et du nombre de techniques de construction évoquées dans le chapitre précédent seront étudiées dans la seconde section. Nous y traiterons également les questions du différentiel de pression et du gradient thermique.

Les besoins structuraux relatif au différentiel de pression, au gradient thermique ou aux radiations seront donc abordés dans la conception proprement dite. A cela s'ajoute aussi le confort de l'équipage et l'architecture du bâtiment. Comment allons-nous gérer la lumière tout en assurant une protection radiative optimale ? Dans quelle mesure le concept sera-t-il modulable ? En combien de temps une telle entreprise de construction verrait-elle le jour ? La conception couvrira un large panel de questions sans pouvoir toutefois toutes les couvrir. Comme depuis le début de ce travail, le manque des connaissances scientifiques quant à l'exploration spatiale nous oblige émettre à beaucoup d'hypothèses. Une point sera fait sur les questions techniques restées en suspens.

Enfin, les deux dernières sections couvriront l'application pratique de notre habitat et la différence d'approche par rapport aux concepts étudiés dans le chapitre précédent.

#### En résumé :

- **Quoi** : Développer notre propre base lunaire
- **Pourquoi** : Pour illustrer la complexité de la construction spatiales et répondre aux défis techniques associés
- **Comment** : En utilisant tout ce que nous avons appris jusqu'ici.
- **Conclusion** : Présentation de notre base lunaire

### 3.1 TECHNIQUE DE CONSTRUCTION

Comme expliqué dans le chapitre 2, plus nous travaillons avec des techniques de construction différentes, plus nous avons besoin de matériel. L'idéal serait donc de travailler avec une technique unique mais polyvalente, choix que nous faisons. Cela complexifiera probablement les parties de l'habitat ou sa construction mais simplifie les machines nécessaires et la logistique d'acheminement sur site.

Pour faire ce choix, nous retenons les points suivants des habitats étudiés :

**1. La création d'un habitat modulable par souci d'économie de matériaux et de temps**

Pouvoir repartir d'une structure existante et l'étendre est une économie considérable de temps, d'usure des machines comme de matériaux in situ et ex situ tout en garantissant une augmentation continue de la surface habitable.

**2. Assurer une qualité d'impression irréprochable en produisant des produits préfabriqués sous scellé**

Se rendre indépendant de la variabilité des conditions extérieures assure une qualité finale des modules bien plus grande. La fiabilité de l'habitat en sera grandement améliorée.

**3. Travailler avec plusieurs machines de petites tailles pour faciliter le transport et créer de la redondance**

La question du transport est considérée comme acquise, s'encombrer de machines aux dimensions importantes va à l'encontre du concept que nous cherchons à construire ici. Se munir de plusieurs machines capables de réaliser le même travail diminue notre dépendance au bon fonctionnement des unités de production, d'extraction ou de construction. Une panne technique sur une machine n'entraverait pas totalement le chantier.

Même si ces 3 points paraissent évidents de prime abord, le chapitre précédent démontre qu'ils sont compliqués à combiner.

---

#### 3.1.1 LE DROXEL, UNE BRIQUE PARAMÉTRIQUE

C'est via le droxel que nous allons, dans un premier temps, répondre aux 3 exigences précédentes. Cette « brique » peut être aisément produite dans un module sous scellé et présente plusieurs avantages utiles à la construction spatiale.

Le droxel est le seul élément de construction dit « universel » existant. Il a été développé par Sébastien Goessens dans le cadre de son doctorat.<sup>i</sup> Par élément de construction universel, nous entendons un élément capable de matérialiser n'importe quelle structure avec de la résistance, capable de se passer d'échafaudage lors de la construction, capable de s'emboîter avec une grande tolérance mais aussi d'affiner son aspect par homothétie.

---

<sup>i</sup> Son travail peut être illustré par la vidéo suivante : **Droxels : The universal construction component** -<https://www.youtube.com/watch?v=EwIXBx9F1Uk>

Sa conceptualisation est faite de sorte à créer un élément facile à mettre en place par des machines. Or contrairement à la construction terrestre, nous ne disposons pas d'ouvriers mais bel et bien de machines, télécommandées ou non. Il nous faut donc choisir nos méthodes de sorte qu'elles soient implémentables par des rovers.

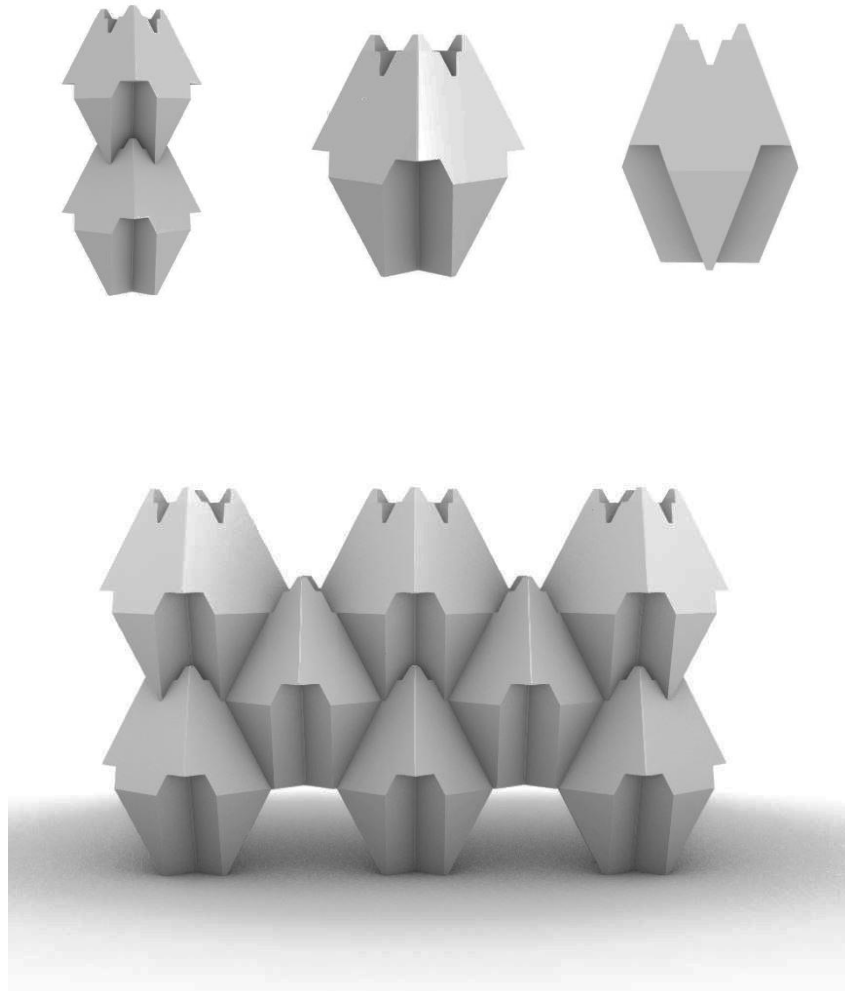


Figure 13 : Illustrations du droxels - Crédits : Baptiste Roiseux

Sur base du droxel, il est possible, en théorie, de matérialiser n'importe quelle structure ou surface. Imaginé autour du concept du pixel, il suffit de « pixeliser » une structure pour la reproduire à l'identique en droxels, reproduction dépendante de la finesse de cette pixellisation. Le panel de formes disponibles pour la conception de notre habitat est donc « infini ».

Nous ne sommes donc plus limités à une sphère comme Mars Incubator mais disposons d'autant de formes que nous le désirons pour répondre à nos différents besoins.

Le travail de Mr.Goessens est initialement axé sur la construction terrestre et l'installation par voie aérienne. Drones dont nous devrons nous passer sur la Lune faute d'atmosphère sur laquelle reposer.<sup>i</sup>

---

<sup>i</sup> La question d'un drone propulsé avec une rétrofusée est discutée dans la sous-section **Production sur site**.

D'un point de vue géométrie, le droxel sort du lot pour les raisons suivantes :

1. Il a une bonne tolérance à l'assemblage dans toutes les directions
2. Nous avons la possibilité de construire des arches et donc des ouvertures
3. Nous avons la possibilité de construire des murs verticaux
4. La bonne connexion entre les droxels assure la stabilité et résistance de la structure
5. L'absence d'angle aigu dans sa géométrie permet sa production par impression ou moulage

Pour conclure, la flexibilité de sa géométrie, son utilisation facile et sa production possible sur la Lune en font un candidat intéressant pour notre base lunaire en considérant les concepts retenus du second chapitre.

---

### 3.1.2 LE DROXEL LUNAIRE EN PRATIQUE

#### 1. Gestion des ressources primaires

Comme évoqué dans la section « **Enjeux économiques et politiques** », déterminer ce qui poussera l'homme à retourner sur la Lune est hasardeux. La raison, quelle qu'elle soit, conditionnera le budget disponible et les moyens mis en œuvre pour y parvenir.

Une mission scientifique visant à préparer un voyage vers Mars ne nous donnera pas les mêmes outils que l'installation d'une exploitation minière d'hélium 3 et issue du secteur privé. L'un est temporaire tandis que l'autre cherche à créer une installation durable.

Nous faisons ici l'hypothèse suivante :

#### 1.1 Notre habitat sera construit dans le cadre d'une exploitation minière lunaire ou toutes autres missions capables de subvenir à nos besoins en outillages de construction

Le raisonnement qui nous pousse dans cette direction est le suivant : depuis le retour du programme Apollo, 115kg de sol lunaire ont été ramenés sur Terre et sont étudiés par la NASA. De ce sol ressort un élément particulier, l'hélium 3. Un élément quasiment absent de la surface terrestre. Le bouclier magnétique qui nous protège des vents solaires en est la raison. Les vents solaires sont dépourvus de leur He<sub>3</sub> lorsqu'ils heurtent notre magnétosphère. Magnétosphère qui n'existe pas autour de la Lune qui se charge donc en He<sub>3</sub> depuis des milliards d'années.

Considéré candidat potentiel pour devenir « l'énergie de demain », cet isotope serait la clé d'une énergie propre et efficace à produire. Le stock lunaire pourrait alimenter des réacteurs à fusion He<sub>3</sub>-He<sub>3</sub> pendant une période de plusieurs centaines d'années et ce sans le moindre déchet.<sup>i</sup>

Cette exploitation minière nous intéresse pour deux raisons. D'une part pour la source de financement et d'intérêts commerciaux qu'elle représente.<sup>ii</sup> D'autres par pour les sous-

---

<sup>i</sup> La technologie n'en est pas encore au développement d'une réacteur à fusion He<sub>3</sub>-He<sub>3</sub>. Les recherches actuelles sont concentrées sur une version plus polluante de ce procédé en vue de s'étendre à cette fusion dans le futur. Nous considérons ici que, le temps que l'homme soit en mesure (technologiquement et économiquement parlant) de retourner sur la Lune pour s'y installer, une demande d'He<sub>3</sub> devrait exister.

<sup>ii</sup> Une tonne d'He<sub>3</sub> est estimée entre 2 et 5 milliards de dollars.

produits générés dans la production de l'isotope tel que du H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ou encore de l'Hélium 4.

L'**Annexe R** donne une ordre de grandeur des quantités de sous-produits qui serait disponibles dans l'hypothèse de l'exploitation de l'He<sub>3</sub>. Ces éléments, disponibles en grande quantité, nous permettront de produire du fuel, de quoi alimenter l'habitat en air, en eau et surtout de la matière première de construction. Nous pouvons également considérer que les cargos de rapatriement de l'He<sub>3</sub> assureraient l'apport en matériaux terrestres indispensables à la construction. (Sas, machines, ...)

Il en va de même pour les besoins en matériaux ex situ. Les cargo réguliers entre la mine et la Terre assureraient un approvisionnement optimal.

Cette hypothèse forte n'est qu'une supposition, en la faisant, nous nous défaisons de la problématique du matériel à acheminer. Ce n'est pas pour autant que nous abandonnons l'idée de minimiser les apports requis pour la construction de notre habitat.

A titre de comparaison, au lieu de voir la Lune comme une potentielle exploitation minière, elle pourrait aussi servir d'avant-poste pour les voyages vers Mars. Si tel est le cas, l'avant-poste aurait pour rôle de faire le plein des fusées à destination de Mars. Ce qui implique des unités de production de carburant et donc des conclusions similaires à l'hypothèse minière.

## 2. Production sur site

Selon le même procédé qu'une imprimante 3D classique, le droxel serait imprimé dans un cube de production contenant tout le nécessaire et préalablement acheminé sur la Lune. Ce cube assurerait la protection de la tête d'impression contre les différents éléments pouvant altérer la qualité finale du produit. La technologie précise d'impression 3D importe peu à ce stade de l'étude. Ce mode de construction est en continuelle évolution. Ce qui existe aujourd'hui sera probablement obsolète le jour où nous retournerons sur la Lune.

Sur base des performances des imprimantes de l'UCLouvain et de la taille du droxel choisie, nous pouvons faire des estimations de temps de production. Non pas pour déterminer avec précision un minutage mais bien pour se donner un ordre de grandeur.

Pour ne pas avoir besoin de cube d'impression aux proportions démesurées, nous travaillerons avec un droxel d'une cinquantaine de centimètres de hauteurs et de la moitié de large.

Dimensions générales	
Hauteur	500 [mm]
Diagonale horizontale	430 [mm]
Empreinte au sol (largeur)	250 [mm]

Tableau 1 : Dimensions d'un droxel

A l'heure actuelle, imprimer un tel objet en PEHD demande une centaine d'heures dans une imprimante professionnelle. Ce paramètre est variable, il dépendra du matériau d'impression (PEHD, béton de régolithe ou autre), du volume de matière à extruder (impression d'une coque, d'un bloc plein, d'un bloc ayant une structure interne augmentant sa résistance à la compression, ...) ou encore du type de machine utilisée.

## **2.1 Nous faisons l'hypothèse que d'ici là, ce temps d'impression sera réduit de 2**

### **3. Transport et manipulation**

Le nom du droxel vient d'une combinaison entre drone et pixel. C'est-à-dire une brique initialement optimisée pour être facilement transportée et mise en place avec un drone. Or l'atmosphère lunaire ne permet pas le vol d'un drone classique à hélices. Celui-ci a besoin d'air pour se maintenir en l'air, air absent de la surface de la Lune. La situation diffère légèrement sur Mars, une très fine atmosphère y réside mais à nouveau, sa densité rend le transport aérien compliqué.

La seule option pour l'utilisation de drones serait d'en concevoir un modèle monté sur des rétro fusées et non plus des hélices. Afin de minimiser le temps de fonctionnement du moteur, la stratégie serait de faire « des bonds » et profiter de la gravité réduite pour se déplacer le plus loin possible avec le moins de fuel possible. Option qui va impliquer une surconsommation de ressources in situ, ressources coûteuses à extraire et travailler.

Le problème du transport entre le site de production et le site de construction est facilement solvable. Un simple rover d'exploration surfacique peut assurer ce rôle, au même titre qu'un camion ou autre véhicule de transport sur Terre.

Pour ce qui est de la phase de construction, deux options sont considérées :

#### **3.1 Des rovers araignées comme présentés dans le cas de Mars Ice House**

Il s'agirait de rovers capables d'escalader la construction au fur et à mesure de son avancement. Non plus montés sur des roues mais des « pattes », ceux-ci pourraient évoluer sur les murs en construction et y déposer les droxels avec une grande précision.

L'avantage de cette solution est la possibilité de travailler avec une multitude de rovers en parallèle. Chacun d'eux pouvant se rendre sur une section différente de la construction et le temps total nécessaire à la construction serait réduit.

Ce genre de flotte robotisée serait capable de travailler en totale autonomie. Aucune assistance humaine ne serait à prévoir.

### 3.2 Via un grapin mobile monté sur des tours de droxels tel une tête d'impression.

En suivant l'idée d'une tête d'impression 3D, le grapin, installé entre 3 (ou plus) tours de droxels surplombant le chantier, serait en mesure de déposer des droxels à n'importe quel emplacement avec une précision suffisante.

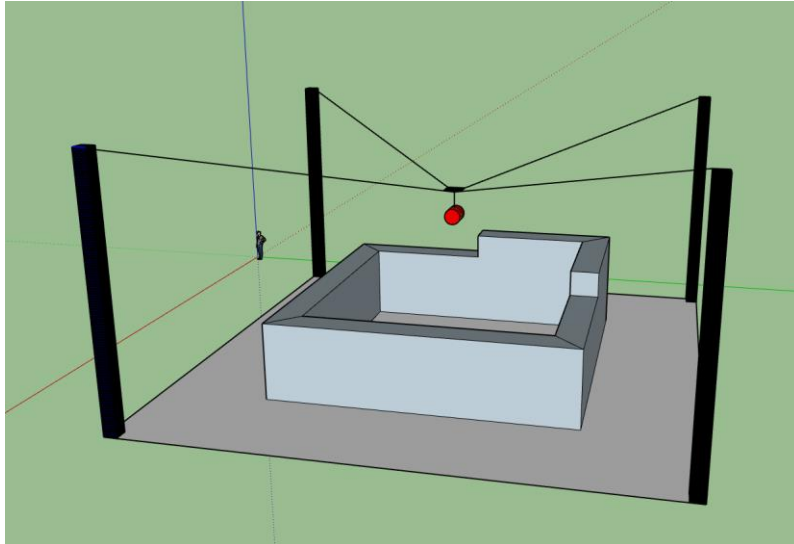


Figure 14 : Schéma d'un grapin mobile monté sur des tours de droxels

La mise en place d'une telle installation serait plus contraignante mais assurerait une plus grande flexibilité dans la construction. De petits rovers n'auront potentiellement pas la puissance requise pour installer les câbles de pré-tension, ont le risque de générer un porte à faux dans certaines phases critiques comme la pose des droxels de toit ou simplement tomber et endommager des éléments.

En conclusion, en procédant de la sorte, nous minimisons le matériel nécessaire pour assurerait une construction optimale. Le droxel serait utilisé pour l'habitat mais aussi de façon temporaire pour l'installation d'un grapin. Installation qui serait également assurée par les rovers araignées. La question de la mise en place du grapin reste en suspens dans la mesure où savoir s'il est possible de se passer d'assistance humaine est déterminante. L'option d'un équipage présent lors de la mise en place du chantier est envisageable pour ensuite laisser les machines prendre le relais.

#### En résumé :

**Nous construirons exclusivement en droxels pour les raisons suivantes :**

1. Possibilité de préfabrication
2. Assemblage et manipulation aisés
3. Capacité de droxeler des formes complexes et variées

### 3.2 QUANTIFICATIONS DES DÉFIS TECHNIQUES

Pour orienter le choix de notre habitat final, nous avons besoin d'un support quantitatif des défis techniques. Cette section a pour but de fournir ce support pour les questions du différentiel de pression, de la variation thermique, des radiations ainsi que des contraintes associées à la droxelisation.

Pour quantifier les questions de la pression et de la température, nous analysons un ensemble de 6 formes élémentaires. Leur comportement est étudié pour comprendre comment elles interagissent avec ces 2 contraintes.

L'absence d'atmosphère sur la Lune et la nécessité de fournir un environnement similaire à l'atmosphère terrestre dans notre habitat crée un différentiel de pression de l'ordre de 100 [kN/m<sup>2</sup>]. Type de charge que nous aurions normalement repris en grande partie avec le poids propre de notre structure. Or, la gravité lunaire est de 1,62 [m/s<sup>2</sup>] contre les 9,81 [m/s<sup>2</sup>] terrestre. 6 fois inférieur, le poids propre lunaire ne sera plus une charge prédominante dans notre structure comme il pourrait l'être sur Terre. Les déplacements et les contraintes subies par l'habitat en seront donc fortement influencés.

La variation thermique sera, quant à elle, déterminée par la localisation de notre base lunaire. Un suivi continu de l'évolution de la température à la surface de la Lune au fil des jours et des saisons est assuré par plusieurs satellites. Suivi qui nous permet de déterminer ce gradient thermique en fonction de l'emplacement choisi.

L'emplacement de l'habitat déterminera les ressources disponibles, l'ensoleillement, la facilité d'approche pour les fusées ou encore la durée du jour et de la nuit, ... Certaines zones sont sujettes à des pics de lumières éternelles<sup>i</sup> comme le contour du cratère de Shackleton et de Shoemaker au pôle Sud. D'autres sont continuellement à l'ombre comme le fond de ces 2 mêmes cratères. Enfin, certaines zones équatoriales subissent des variations thermiques de plus de 300 [K] tous les 14 jours. Bref, nous tirerons nos conclusions sur des simulations ayant des deltas de températures allant de 50 à 300 [K] afin d'inclure les situations les plus extrêmes dans notre réflexion.

Enfin, les radiations seront évaluées sur base d'une étude d'atténuation des GCR et SPE réalisée par la NASA et le processus de droxelisation expliqué avec des chiffres pratiques.

---

### 3.2.1 HYPOTHÈSES DES MODÈLES D'ANALYSE

Comme à chaque étape de toute cette étude, une série d'hypothèses s'imposent. Chacune d'elle a une influence non négligeable sur la signification des résultats générés.

L'analyse des différents modèles est faite avec Scia Engineer© - Version étudiante.

#### 1. Matériau de construction

Un seul matériau de construction sera considéré durant nos analyses Il s'agit du polyéthylène à haute densité (PEHD). Les propriétés utilisées sont celles disponibles sur Terre. Idéalement, le PEHD utilisé serait produit sur la Lune. (Voir la section **Le droxel lunaire en pratique**)

L'utilisation de modèles mono-matériau nous permet d'avoir une certaine simplicité dans ceux-ci. Le but étant de comprendre leurs comportements et d'obtenir des résultats, non pas exacts mais donnant un premier ordre de grandeur à leurs réactions.

---

<sup>i</sup> Pic de lumière éternelle : Point d'un objet du Système solaire qui est constamment plongé dans la lumière du Soleil. Cet effet est la conséquence à la fois de la rotation de l'objet et de l'altitude du point

Le peu de sol ramené de la Lune ne permet pas de se faire une idée précise de ce dont nous aurons à disposition une fois sur place. Le peu, voire l'absence de données existantes sur les propriétés mécaniques et thermiques du sol lunaire ou encore des produits dérivés de celui-ci nous impose l'utilisation de matériaux terrestres pour nos simulations.

Le choix du PEHD contre le béton de régolithe (par exemple) est motivé par les raisons suivantes :

1. La qualité d'impression 3D en PEHD est déjà très bonne aujourd'hui
2. Il est possible de le produire sur base des sous-produits de l'extraction l'hélium 3
3. Ses propriétés mécaniques et thermiques sont ajustables en fonction des besoins
4. Il offre la possibilité d'imprimer une coque, un bloc plein ou un mix entre les 2

Malgré ses propriétés thermiques discutables, il reste un meilleur candidat que le béton de régolithe pour les raisons suivantes :

1. Imprimer en béton demande beaucoup d'énergie
2. La technologie actuelle ne permet pas d'imprimer des formes complexes comme le droxel avec la précision requise
3. Une couche de protection interne est à prévoir pour prévenir la pénétration des éléments toxiques du béton dans l'habitat<sup>i</sup>
4. Nous connaissons les propriétés des couches supérieures du sol lunaires aux différents sites d'exploration visités mais pas les propriétés précises du béton de régolithe sur base de ce sol

Le polyéthylène que nous utilisons dans nos modèles a les propriétés suivantes :

<b>Propriétés mécaniques</b>	
Masse volumique	955 [kg/m <sup>3</sup> ]
Module de Young	1500 [MPa]
Coefficient de Poisson	0,46 [/]
Limite élastique	1000 [MPa]
Résistance à la traction	15 [MPa]
<b>Propriétés thermiques</b>	
Dilatation thermique	0,00018 [m/mK]
Chaleur spécifique	1900 [J/kgK]
Conductivité thermique	0,4 [W/Km]

**Tableau 2 : Propriétés du PEHD**

Comme mentionné ci-dessus, ces paramètres nous permettent de comprendre comment fonctionnent nos formes élémentaires. L'habitat lunaire final nécessitera probablement plusieurs matériaux de construction pour être fonctionnel. Il aura besoin d'un matériau structural (béton de régolithe, PEHD, ...), d'une ou plusieurs couches d'isolation (dont la composition sera à déterminer), de joints pour assurer la liaison entre les droxels, ...

<sup>i</sup> Des traces de ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> ont été découverte dans la régolithe, un élément nocif pour l'Homme.

## 2. Joints entre les droxels

Toujours dans un souci de simplification des modèles, les parois, murs, toits ou toutes autres parties normalement composées de droxels sont modélisés comme des éléments continus. Leur épaisseur est conditionnée par les paramètres généraux du droxel structural en usage. L'hypothèse revient à considérer que les joints sont parfaits entre les éléments.

Ce point est important à garder en tête lorsque nous analysons les déplacements des structures.

## 3. Dimensions

La taille de nos modèles est conditionnée par nos besoins tandis que les dimensions des éléments structuraux sont conditionnées par le droxel.

Le droxel peut être revu sous plusieurs variantes. Sans rentrer dans les détails de sa variabilité, la géométrie du droxel permet de créer une série de variantes spécialisées. Une version du droxel serait purement structurelle (murs, toit, colonnes, ...) tandis qu'une autre servirait uniquement au compartimentage de l'habitat (cloisons, escaliers, ...). Ces deux versions auraient des dimensions et propriétés différentes.

Seul le droxel structural nous intéresse et celui-ci a les dimensions suivantes :

Dimensions générales	
Hauteur	500 [mm]
Diagonale horizontale	430 [mm]

Tableau 3 : Dimensions du droxel structural

L'épaisseur des murs est fixée à 430mm, ce qui correspond à la diagonale d'un droxel de 500 mm de hauteur.

Le choix des dimensions globales de nos modèles est inspiré d'un volume de référence. Ce volume doit pouvoir facilement être converti selon les besoins. C'est-à-dire qu'il ne doit pas être trop grand que pour pouvoir être utilisé comme une seule pièce (espace commun ou laboratoire par exemple) et qu'il doit être assez grand que pour être compartimenté (création de chambres ou bloc sanitaire par exemple).

En général, un espace de +/- 8m par 8m<sup>i</sup> permet de minimiser les zones mortes. Cela correspond à la surface d'un petit studio. Nous pouvons le diviser facilement en plusieurs sections, sans générer d'espaces minuscules et inutilisables.

Les dimensions de chaque modèle sont reprises dans le tableau ci-dessous.

---

<sup>i</sup> Ce choix est arbitraire. Le raisonnement change peu entre 7,8 et 9m.

Dimensions extérieures – [m]			
Nom	Largeur	Longueur	Hauteur
1.Dome	8	8	4
2.Pyramide	8	8	5
3.Demi-cylindre	8	16	4
4.Prisme	8	16	5
5.Demi-cylindre concave	8	16	8
6.Maison simple	7	7	11

Tableau 4 : Dimensions globales des modèles

Le choix de ces 6 formes élémentaires comme modèles d'analyse est motivé dans la section suivante.

La longueur doublée des structures à base rectangulaire (prisme et demi-cylindre) a pour but d'accentuer les effets des contraintes sur le côté étudié, la longueur. Les hauteurs augmentées de la pyramide et du prisme sont dues aux dimensions du droxel.<sup>i</sup>

Enfin, le cas de la maison simple, une prisme rectangulaire surmonté d'un toit pyramidal est une structure à 2 étages. La largeur et la longueur sont réduites pour diminuer la hauteur du toit.

Les dimensions de ces formes élémentaires sont basées sur une construction avec une taille de droxel structurel unique. Celles-ci peuvent certainement être uniformisées en jouant avec une combinaison de différents modèles de droxels.

#### 4. Comportement des matériaux

Les calculs fournis par le logiciel d'analyse Scia sont faits suivant l'hypothèse du comportement élasto-plastique du PEHD et les maxima de Von Mises. Ce critère correspond bien au cas de l'analyse d'une structure en mono-matériau.

Enfin, les modèles que nous avons créés ici sont probablement trop simplistes que pour fournir des valeurs exactes. Ils permettent toutefois de donner un ordre de grandeur aux effets des contraintes qui y sont appliquées et d'orienter l'étude de notre concept.

Une utilisation peut-être plus optimale de cet outil d'analyse complexe fournirait des résultats plus précis mais à nouveau, ce n'est pas le but ici.

#### En résumé :

Nous travaillons avec les hypothèses suivantes :

1. **Matériau de construction** : PEHD
2. **Joint entre droxels** : joints parfaits entre les éléments
3. **Dimensions** : surface de référence de 8mx8m
4. **Comportement des matériaux** : Critère élasto-plastique de Von Mises

<sup>i</sup> Les tentatives de droxelisation (*droxelisation* : reproduction d'une structure en droxels) réalisées sur modèles réduits ont permis de lier la largeur du droxel à la largeur et enfin la hauteur d'une pyramide.

### 3.2.2 ANALYSE DES MODÈLES

Nous étudierons ici le comportement de 6 formes élémentaires.

1. Un dôme
2. Un demi-cylindre
3. Une pyramide
4. Un prisme
5. Un demi-cylindre concave
6. Une maison simple à 4 façades de 2 étages avec un toit pyramidal

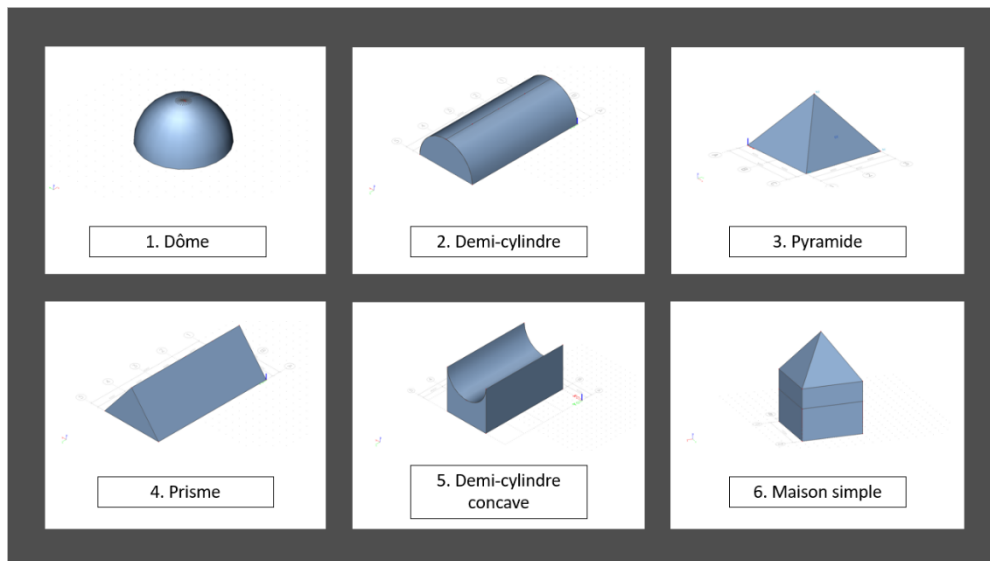


Figure 15 : Modèles d'analyse - formes élémentaires

Chaque modèle est analysé suivant une série de nœuds. Nœuds se trouvant aux emplacements clés des formes, au sol, au sommet et au milieu des parois. C'est par l'étude de ces nœuds principaux que nous pourrions déterminer les tendances de chaque forme ou type de forme.

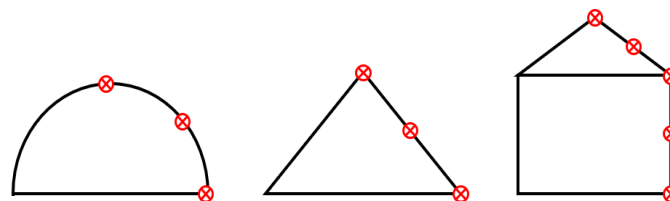


Figure 16 : Emplacements des nœuds d'analyse

Le dôme et le demi-cylindre, concave ou non, s'imposent pour leur bonne gestion d'une charge hydrostatique. Si nous devons nous référer aux structures présentes dans l'espace comme l'ISS, tous ses éléments sont soit des sphères soit des cylindres. Le différentiel de pression entre l'espace et l'atmosphère nécessaire pour la survie de l'équipage crée le besoin de reprendre cette charge uniforme et omnidirectionnelle.

D'un point de vue pratique, il n'est pas si aisé de créer ce genre d'arrondis en droxels. Du moins avec un droxel d'une cinquantaine de centimètres de haut et des dimensions globales d'habitats inférieurs

à la dizaine de mètres. Il suffit de comparer la qualité d'une image de 480 pixels à une image de 1080 pixels pour visualiser l'impact de la taille d'un élément de base.

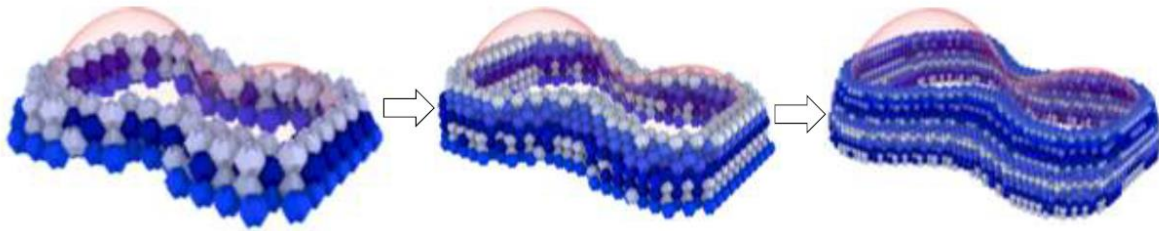


Figure 17 : Pixellisation d'une structure

Le même principe s'applique à nos droxels. Plus le ratio « dimension principale du droxel/dimension principale de l'habitat » est grand, plus la finesse de la forme sera faible. A nouveau, la finesse de la forme est aussi dépendante de l'utilisation d'un seul modèle de droxel ou de plusieurs.

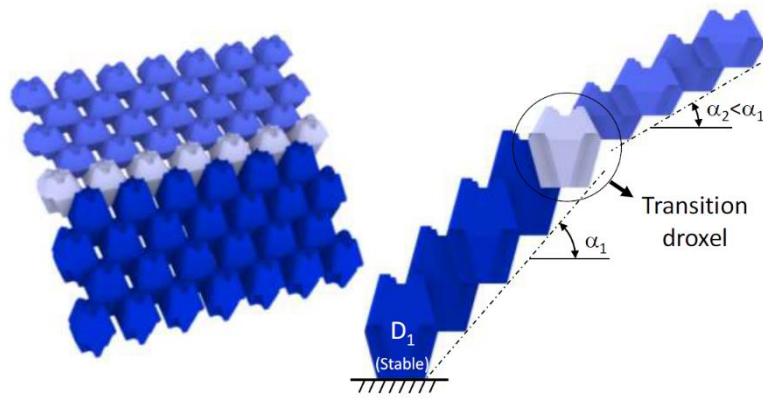


Figure 18 : Influence des dimensions d'un droxel sur la finesse

La pyramide et le prisme à base triangulaire représentent donc nos formes funiculaires « à basse résolution ».

D'un point de vue théorique, le dôme est la forme funiculaire d'une charge répartie tandis que notre pyramide celle d'une charge ponctuelle. Le premier est optimal sur papier tandis que le second se rapproche plus de la pratique.

Enfin, le choix de travailler avec une maison de 2 étages et 4 façades, une cube surmonté d'une pyramide pour faire simple répond au besoin d'également travailler la dimension verticale.

### 3.2.2.1 DIFFÉRENTIEL DE PRESSION

Comme mentionné en début de chapitre, la Lune est une planète où aucune atmosphère ne règne. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur des murs de nos modèles est donc de l'ordre de :

$$\Delta p = 100 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Contrairement à sur Terre, le poids propre lunaire n'est pas aussi important. La gravité lunaire vaut  $1,62 \text{ [m/s}^2\text{]}$ , 6 fois inférieure à la gravité terrestre. Pour essayer de compenser ce manque, nous avons appliqué à chaque modèle une charge surfacique externe de régolithe inerte allant de  $0 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  à  $100$

[kN/m<sup>2</sup>]. Le cas de 0 [kN/m<sup>2</sup>] étant une structure sans cette charge supplémentaire. L'idée de recouvrir les structures de sol lunaire vient du modèle enterré de l'ESA, présenté dans le chapitre 2.

En appliquant différents cas de recouvrement aux structures, nous pourrions analyser l'interaction de ces couches de reprise et du différentiel de pression.

### 1. Contraintes maximales

Selon le critère de Von Mises, aucune des structures analysées n'atteint la contrainte maximale admissible. La résistance en traction est fixée à 15 [MPa] pour le PEHD que nous utilisons.

Les contraintes principales, sur la face interne comme externe du dôme sont comprises dans l'intervalle [1 ; -2,5] [MPa]. En comparaison, la pyramide a les mêmes tendances avec comme seule différence un intervalle plus prononcé de [4,5 ; -3,5] [MPa]. Le milieu des côtés de la structure reprend le maximum de contraintes avec les fondations.

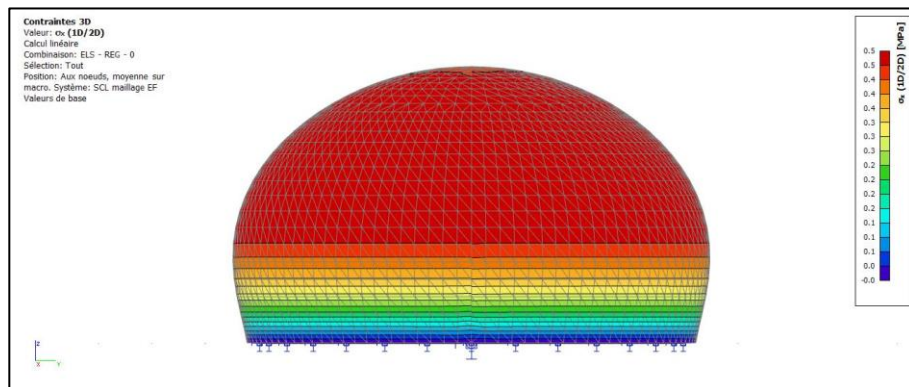


Figure 19 : Répartition des contraintes - Dôme - Couche de reprise : 0kN/m<sup>2</sup>

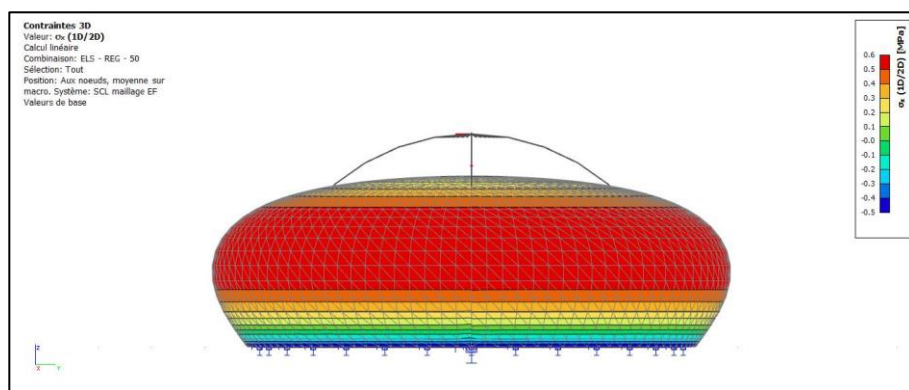


Figure 20 : Répartition des contraintes - Dôme - Couche de reprise : 50kN/m<sup>2</sup>

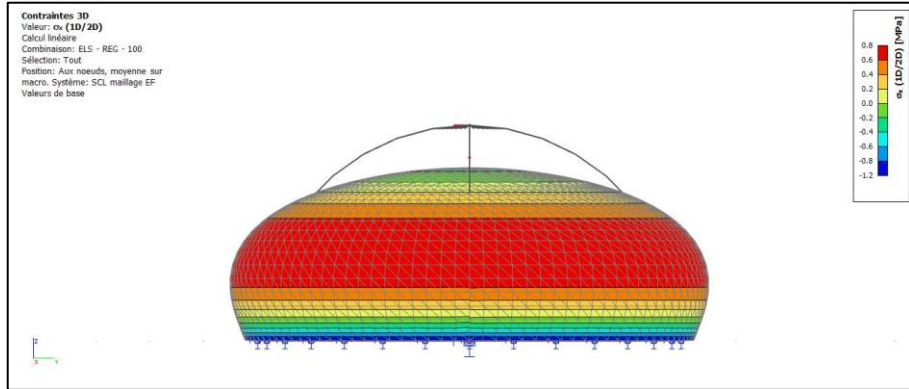


Figure 21 : Répartition des contraintes - Dôme - Couche de reprise : 100kN/m<sup>2</sup>

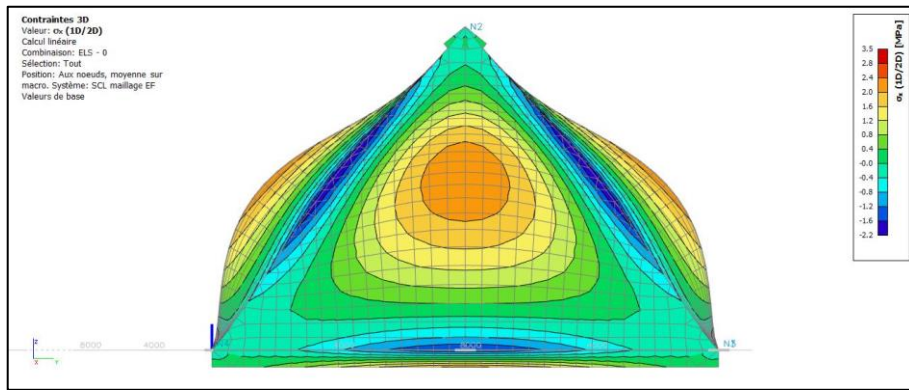


Figure 22 : Répartition des contraintes - Pyramide : Couche de reprise : 0kN/m<sup>2</sup>

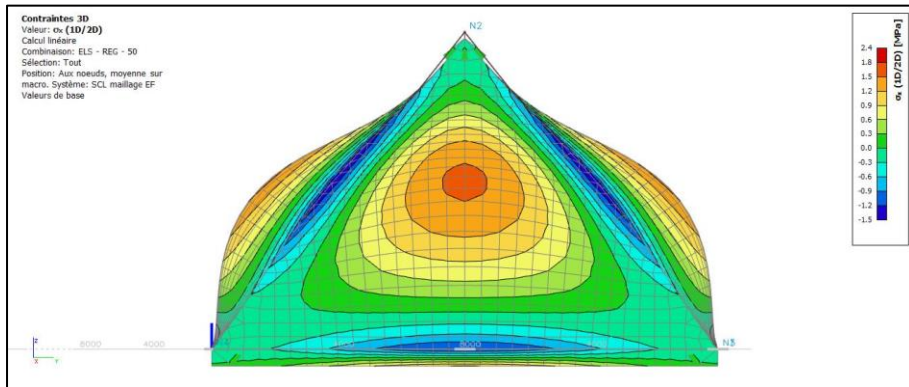


Figure 23 : Répartition des contraintes - Pyramide : Couche de reprise : 50kN/m<sup>2</sup>

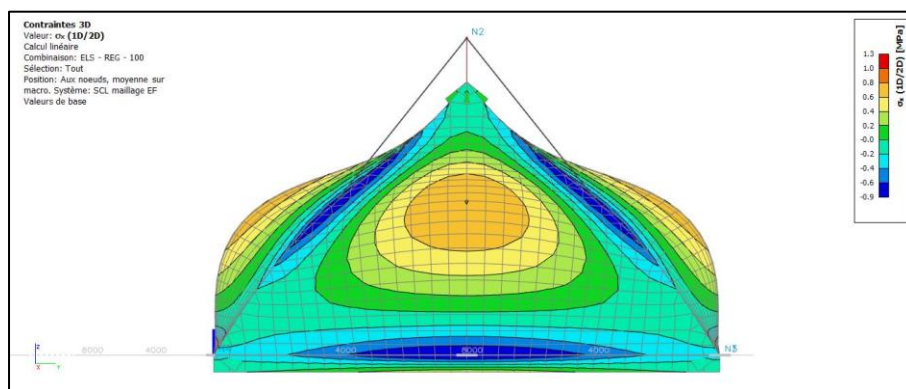


Figure 24 : Répartition des contraintes - Pyramide : Couche de reprise : 100kN/m<sup>2</sup>

Les courbes de répartitions des contraintes au sommet, au sol et sur les parois, dans le cas de la pyramide et du prisme à base triangulaire, ont tendance à converger au fur et à mesure que la couche de reprise de régolithe devient importante. La différence entre les 2 structures est la pente de ces courbes. La maison simple se trouve également dans le même type de tendances mais de pente moins prononcées.

Un phénomène inverse s'observe sur le dôme et le cylindre. Initialement regroupées, les 3 courbes vont, diverger après avoir traversé l'axe horizontal. La vitesse à laquelle cela se produit est plus accentuée sur le demi-cylindre. Le raisonnement est similaire pour la paroi interne et externe des structures. Le cylindre concave suit la même tendance, les extrema se trouvent au milieu des parois et les courbes divergent.

Les valeurs maximales par structure sont reprises dans la table suivante :

Maxima des $\sigma_x$ & $\sigma_y$ sur les faces extérieures et intérieures des structures				
Structures	$\sigma_{x\_ext}$ [MPa]	$\sigma_{x\_int}$ [MPa]	$\sigma_{y\_ext}$ [MPa]	$\sigma_{y\_int}$ [MPa]
Dôme	[0,2 : 0,6]	[-0,8 : 0,8]	[-0,8 : 1,4]	[-2,2 : 0,6]
Cylindre	[-2,9 : 3,7]	[-4,5 : 4,3]	[-3,4 : 1,7]	[-2,1 : 3,9]
Pyramide	[-1,5 : 2,2]	[-1 : 2]	[-3,4 : 1,5]	[-0,9 : 4,4]
Prisme	[-2,4 : 5,5]	[-5,3 : 2,9]	[-5 : 11,4]	[-11,2 : 6,1]
Cylindre concave	[-2 : 0,9]	[-1 : 1,4]	[-0,4 : 0,7]	[-0,2 : 1,3]
Maison simple	[-0,2 : 3,1]	[-0,2 : 1,4]	[0 : 0]	[-0,1 : 0,6]

Tableau 5 : Maximes des contraintes par structure – Cas de la pression

L'Annexe S compare les effets des différentes couches de reprises entre le dôme et la pyramide. Ces 2 formes illustrent le comportement des structures courbes pour le premier et plane pour le second. Etant donné que les tendances observées sont similaires pour les formes d'un même type, nous pouvons nous limiter à l'illustration d'une forme par type.

## 2. Déformations

La déformation initiale subie par les structures est similaire dans chaque situation. Un gonflement de la structure, plus ou moins prononcé, est observé dans chaque cas, sans exception.

Ce gonflement initial, uniquement dû à la pression interne varie en intensité et en forme selon le type de structure. Il sera remplacé, au fur et à mesure de l'augmentation des couches de reprises par un tassement vertical généralisé et une forte déformation. La principale différence notable entre les formes élémentaires, déplacements maximum exceptés, est la zone de transition entre expansion et tassement.

Les structures « arrondies » comme le dôme et le demi-cylindre ont une expansion uniforme, quel que soit le nœud de la structure considéré. Le sommet de la structure suit la même variation verticale que le milieu des parois pour conserver une forme similaire à la forme initiale. Une fois la phase de tassement initié, ces structures perdent complètement leur forme. Le sommet se tasse plus vite que les parois pour donner une forme aplatie et très déformée. Dans ce cas-ci, la transition arrive dès la charge de 25 [kN/m<sup>2</sup>] pour le dôme et le cylindre. Le cylindre concave se comporte globalement de la même façon, un début d'expansion qui est rapidement repris par la couche de reprise et qui déforme fortement la structure. A noter que le cylindre concave fonctionne dans l'autre sens. L'expansion initiale le met en compression et non en traction comme pour le dôme ou le cylindre.

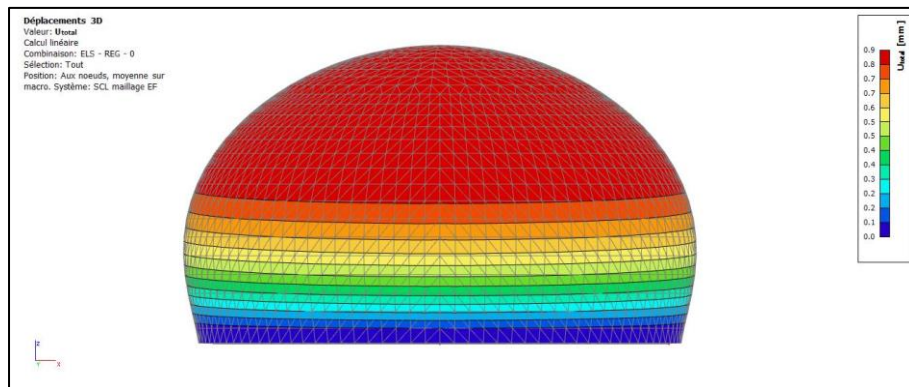


Figure 25 :  $U_{tot}$  - Dôme - Couche de reprise : 0kN/m<sup>2</sup>

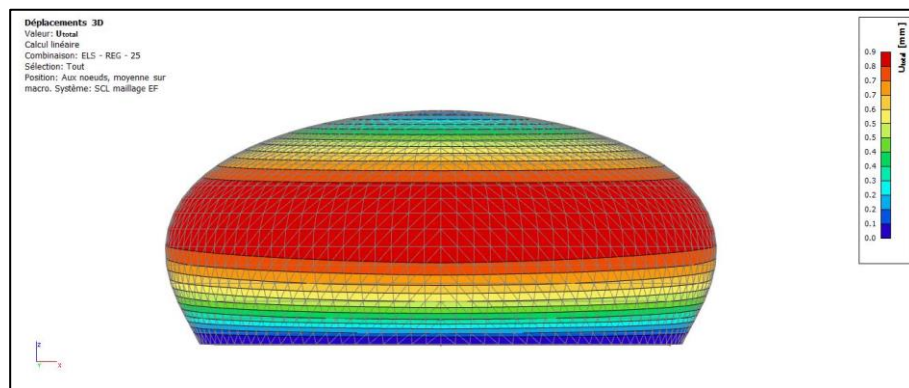


Figure 26 :  $U_{tot}$  - Dôme - Couche de reprise : 25kN/m<sup>2</sup>

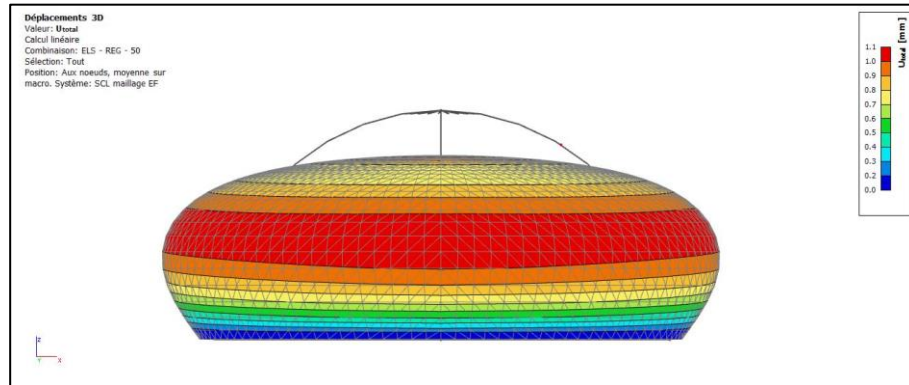


Figure 27 :  $U_{tot}$  - Dôme - Couche de reprise : 50kN/m<sup>2</sup>

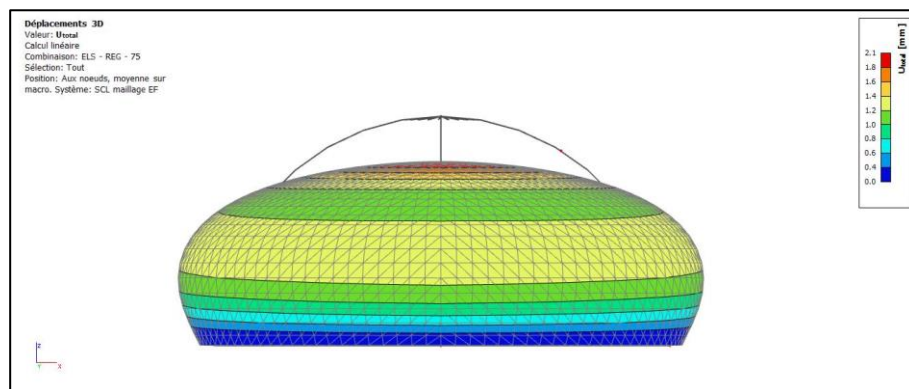


Figure 28 :  $U_{tot}$  - Dôme - Couche de reprise : 75kN/m<sup>2</sup>

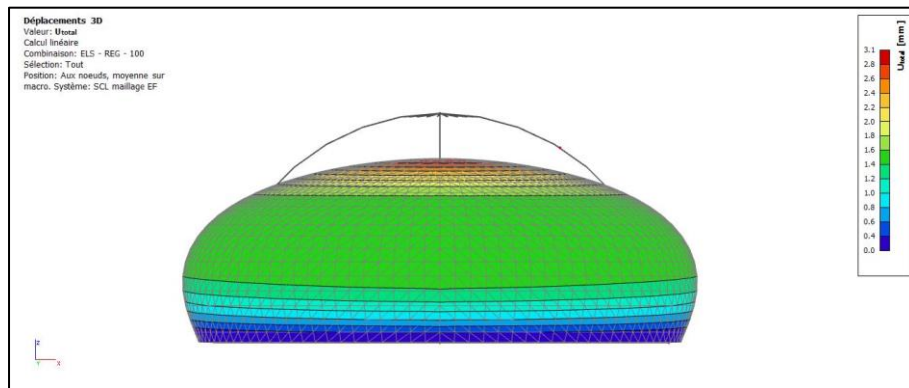


Figure 29 :  $U_{tot}$  - Dôme - Couche de reprise : 100kN/m<sup>2</sup>

Les structures dites « planes » comme la pyramide ou le prisme réagissent de façon similaire lors de la première phase, une expansion est observée mais non-uniforme. Le sommet de la structure se déplace peu par rapport aux parois. D'entrée de jeu, la structure perd ses similarités avec sa forme initiale et présente des déplacements localisés. Nous pouvons observer que l'augmentation de l'intensité des couches de reprises va contrecarrer ces déplacements localisés pour se rapprocher de la forme initiale. Dans le cas de la pyramide, le début de la phase de tassement est différé entre le sommet et le milieu des parois. Celles-ci sont de plus en plus contraintes dans leur expansion par la couche de reprise, au fur et à

mesure de son augmentation sans parvenir à revenir à leur point d'origine. Le sommet commencera à tasser vers 25 [kN/m<sup>2</sup>]. Le prisme se tassera uniformément à partir de 50 [kN/m<sup>2</sup>].

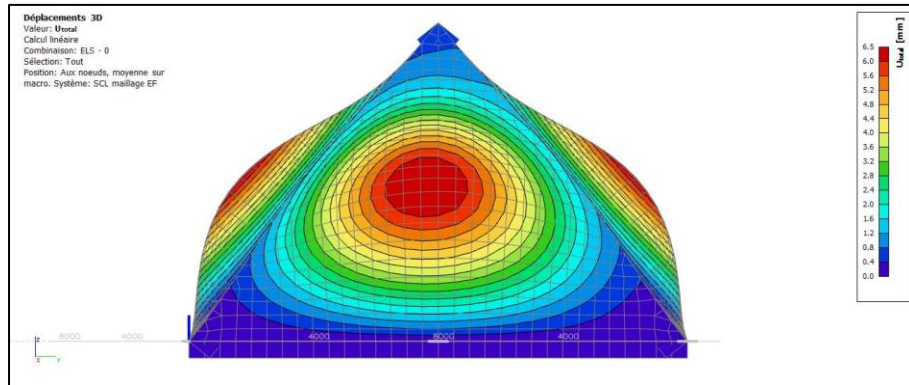


Figure 30 : U<sub>tot</sub> - Pyramide - Couche de reprise : 0kN/m<sup>2</sup>

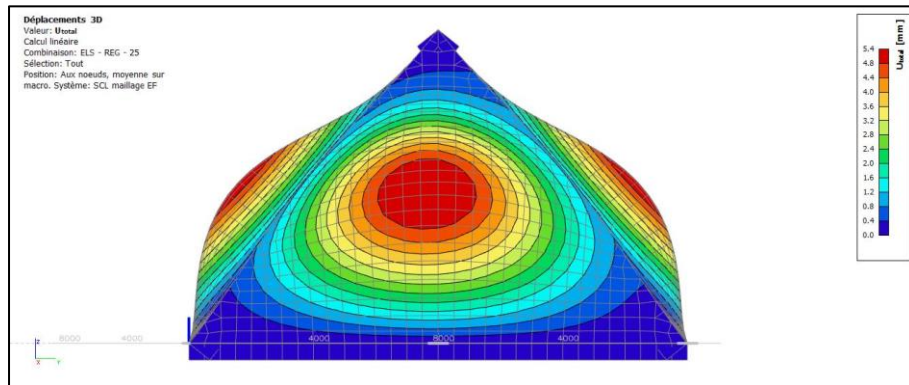


Figure 31 : U<sub>tot</sub> - Pyramide - Couche de reprise : 25kN/m<sup>2</sup>

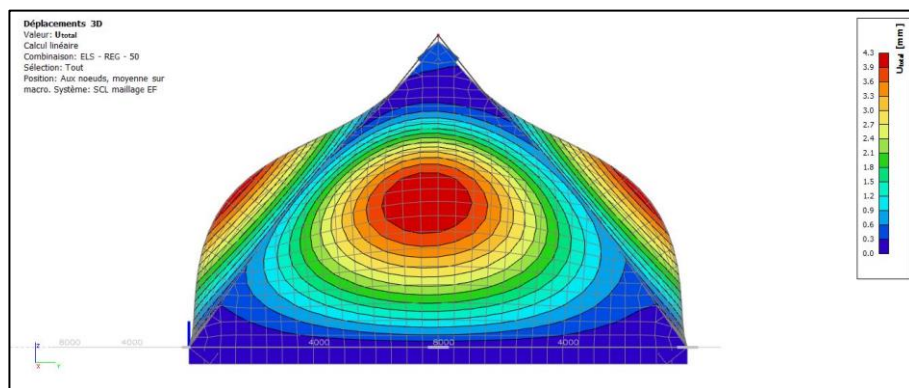


Figure 32 : U<sub>tot</sub> - Pyramide - Couche de reprise : 50kN/m<sup>2</sup>

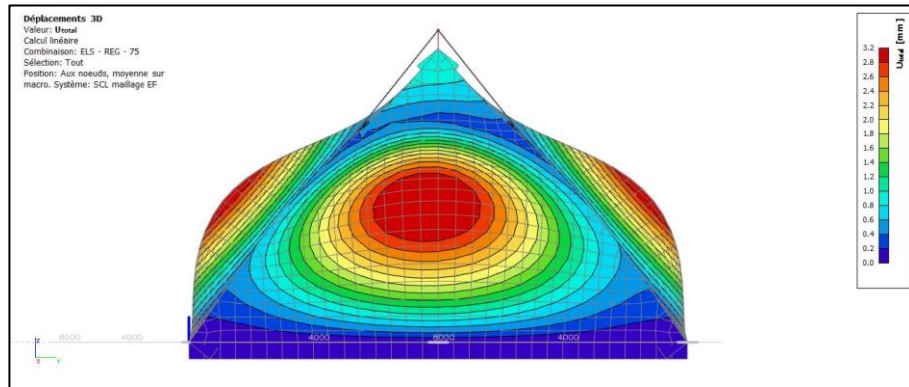


Figure 33 :  $U_{tot}$  - Pyramide - Couche de reprise : 75kN/m<sup>2</sup>

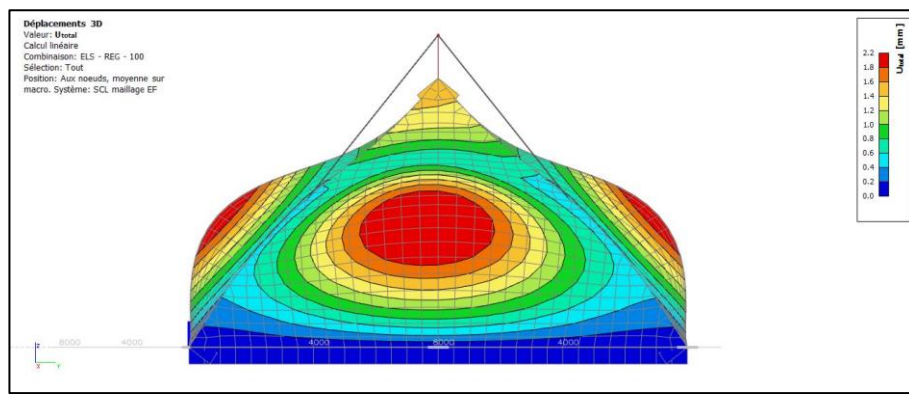


Figure 34 :  $U_{tot}$  - Pyramide - Couche de reprise : 100kN/m<sup>2</sup>

D'un point de vue des valeurs maximales et minimales, le déplacement vertical du sommet oscille entre 4 et 11.4 [mm] pour les structures courbes tandis que les structures planes se placent entre 1.3 et 5.4 [mm]. Le module du delta de déplacement vertical des parois va de 0.9 à 3.5 [mm] pour les structures courbes et de 3.9 à 24.8 [mm] pour les planes. Le module horizontal général reste quant à lui dans un intervalle de 0.6 et 2.1 [mm].

Si nous restons sous le cas des 25 [kN/m<sup>2</sup>] de charge de reprise, le sommet ne se déplacera pas de plus de 2mm autour de sa position initiale et les parois resteront dans une intervalle de +/- 5 [mm].

Enfin, le cas de la maison multi-étagée présente quelques irrégularités. La partie supérieure montre des déformations similaires au cas de la pyramide tandis que la partie inférieure ne se déplacera presque exclusivement verticalement au centre des parois planes. Comme l'illustrent les figures suivantes, le déplacement selon x et y est relativement faible. La valeur maximale des déplacements selon x et y au centre des parois varie entre 0 et 2 mm alors que le déplacement total est déjà de plus de 7mm pour une couche de 25kN/m<sup>2</sup>.

L'intensité des déplacements sera toutefois plus importante avec des déplacements extrêmes à la transition entre les 2 sections de la structure (pyramide et cube). Lors du tassement du sommet, la région charnière va translater et emporter le sommet des murs verticaux avec elle.

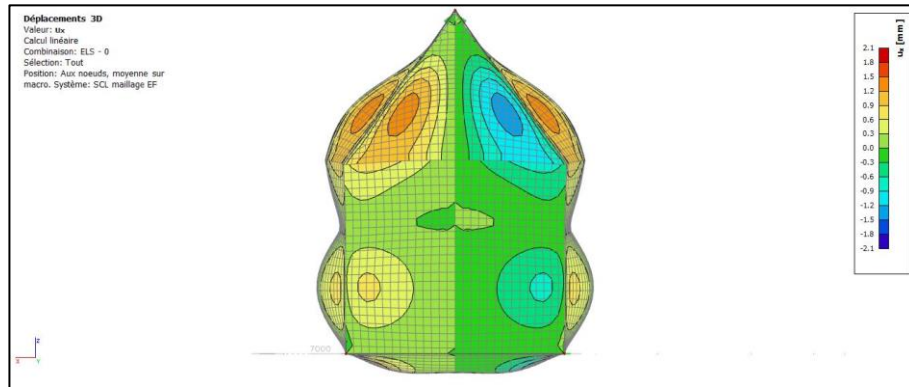


Figure 35 :  $U_x$  – Maison simple - Couche de reprise :  $0\text{kN/m}^2$

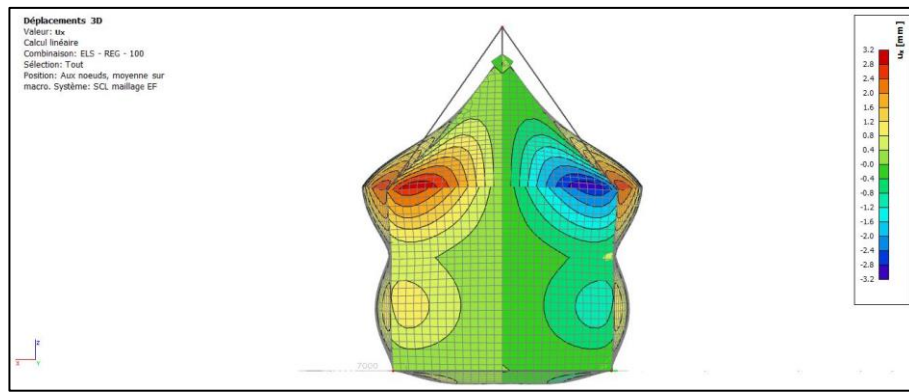


Figure 36 :  $U_x$  – Maison simple - Couche de reprise :  $100\text{kN/m}^2$

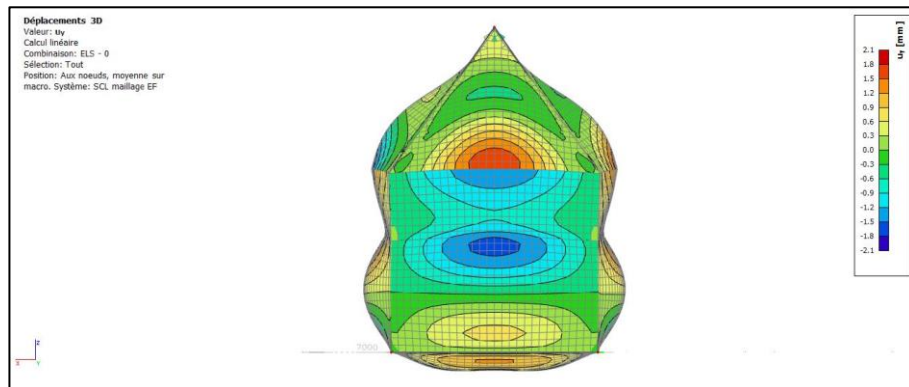


Figure 37 :  $U_y$  – Maison simple - Couche de reprise :  $0\text{kN/m}^2$

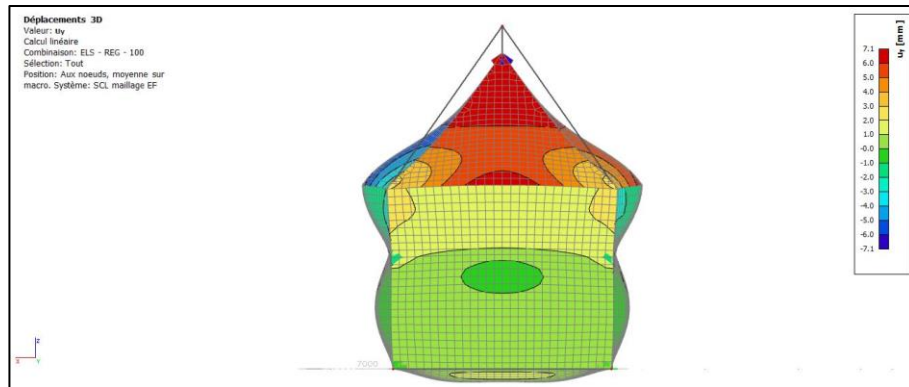


Figure 38 :  $U_y$  – Maison simple - Couche de reprise : 100kN/m<sup>2</sup>

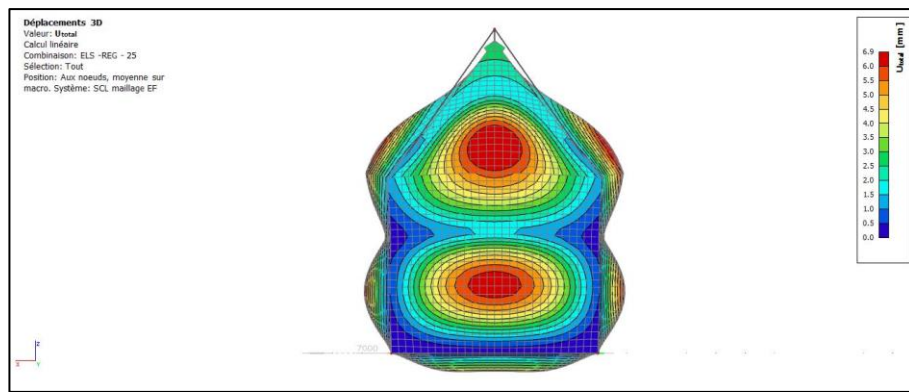


Figure 39 :  $U_{tot}$  – Maison simple - Couche de reprise : 25kN/m<sup>2</sup>

### 3. Interprétations des résultats

Dans le cas des formes courbes, la forme naturelle répond bien à la situation initiale, la déformation est limitée et les contraintes bien réparties. Globalement, la structure fonctionne comme prévu sans la couche de reprise. Une fois que cette couche gagne en intensité, la structure perd sa forme initiale et se déforme fortement. En s'éloignant de son statut initial, des pics de contraintes localisées apparaissent, les déformations s'intensifient rapidement. Plus nous cherchons à tricher et contrer la charge de la pression interne, moins la structure coopère. Ces contraintes internes vont générer de la traction dans le cas du dôme et du cylindre et de la compression pour le cylindre concave.

L'inverse se produit avec les surfaces planes. La charge initiale génère des déplacements et des contraintes localisés. Lorsqu'on introduit les couches de reprises, l'élément perturbateur, la pression interne, est de plus en plus contenu. Les déformations et contraintes parasites diminuent et la structure tend vers sa forme initiale. Comme escompté, les surfaces planes demandent plus d'attention lors du design de la structure. Trop grandes, elles se déformeront de façon excessive et ne permettront pas d'assurer un état ELS acceptable pour garantir l'utilisabilité de l'habitat.

Les résultats mis en avant par cette analyse nous permettrons, dans la section suivante de justifier le choix de notre structure finale. Sur base de cette analyse, nous avons pu identifier le comportement des formes élémentaires sous la combinaison des charges de pression

internet et des couches de reprises. Quelle que soit la forme finale de l'habitat, nous savons maintenant comment il réagira et ce à quoi nous devons porter attention.

### 3.2.2.2 VARIATIONS THERMIQUES

Similairement à la situation terrestre, les températures sur la Lune varient en fonction des périodes de jours, de nuits mais aussi des saisons et de l'emplacement considéré.

Pour simuler toutes les possibilités de gradient thermique, une charge thermique variant de 50 à 300 [K] est appliquée sur chaque modèle. La pression interne du modèle est toujours de 100 [kN/m<sup>2</sup>] et la couche de reprise en régolithe inerte n'est pas considérée ici. Le but est de comprendre les besoins de gestion thermique de notre futur habitat. Qu'il se trouve au fond d'un cratère, sur la ligne équatoriale ou à proximité des pôles, il doit pouvoir assurer une gestion parfaite de ce gradient thermique.

#### 1. Contraintes maximales

Contrairement au cas précédent, les structures analysées atteignent la contrainte maximale admissible selon Von Mises fixée à 15 [MPa], à quelques exceptions près.

Une seule et unique tendance est observable parmi les résultats ; une divergence des courbes et une pente importante. De façon logique, plus la charge thermique est grande, plus les contraintes induites dans les structures sont grandes. La grandeur du module des contraintes est toutefois préoccupante.

Maxima des $\sigma_x$ & $\sigma_y$ sur les faces extérieures et intérieures des structures				
Structures	$\sigma_{x \text{ ext}}$ [MPa]	$\sigma_{x \text{ int}}$ [MPa]	$\sigma_{y \text{ ext}}$ [MPa]	$\sigma_{y \text{ int}}$ [MPa]
Dôme	[-93,5 : -11,9]	[12,8 : 73]	[-89,5 : -11,9]	[12,8 : 90,3]
Cylindre	[-96,3 : 21,8]	[-41,1 : 87,6]	[-102,9 : 27,4]	[-51,3 : 68]
Pyramide	[-126,7 : -12,9]	[12,8 : 75,6]	[-99 : -9,7]	[10,1 : 117,6]
Prisme	[-103,8 : -9]	[-3,6 : 58,2]	[-103,8 : 1,5]	[-10,7 : 78,7]
Cylindre concave	[-97,2 : 0]	[11,4 : 90,3]	[-93,5 : -15,6]	[8,9 : 77,9]
Maison simple	[-971,1 : 3,1]	[-1008,8 : 1,4]	[-45,5 : 0]	[-2,9 : 29,7]

Tableau 6 : Maximes des contraintes par structure – Cas du gradient thermique

#### 2. Déformations

Les déformations des structures suivent toutes la même tendance, une expansion globale et importante.

Structures	Déplacement au sommet		
	$U_{\text{tot}}$ [mm] Cas : 50 [k]	$U_{\text{tot}}$ [mm] Cas : 150 [k]	$U_{\text{tot}}$ [mm] Cas : 300 [k]
Dôme	25	74	147
Cylindre	22	64	126
Pyramide	26	79	158
Prisme	27	78	155
Cylindre concave	50	155	312
Maison simple	301	905	1811

Tableau 7 : Déplacement au sommet par structure - Cas du gradient thermique

De l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres pour 300 [K], les déplacements des sommet comme des parois sont considérables dès l'apparition d'une charge de 50 [K].

### 3. Qualité et fiabilité des résultats

L'analyse des contraintes et des déformations met en avant un problème potentiel de résultats. Un mur plein en PEHD de 430 [mm] d'épaisseur sous une charge thermique de 50 [K] ne devrait pas se déformer de 3cm, même avec une pression interne de 100k [N/m<sup>2</sup>]. L'utilisation de ce matériau sur Terre est prévue pour résister à des pressions et des températures importantes. Utilisation terrestre habituelle<sup>i</sup> terrestre qui questionne l'ordre de grandeur de nos résultats.

Ces résultats pourraient s'expliquer par la mauvaise maîtrise ou utilisation des charges thermiques sur Scia Engineer®.

Le type de charge utilisé ici est une charge linéaire. En fixant la température aux surfaces internes et externes, nous obtenons une régression linéaire entre les 2 surfaces, sur base des propriétés thermique préalablement définies. Cela revient à appliquer une charge thermique sur le matériau sans considérer sa différence de comportement vis-à-vis d'un environnement chaud ou froid. Le plastique est connu pour mieux fonctionner dans le froid que dans le chaud. C'est exactement le cas du PEHD. Or les habitats que nous concevons devront affronter des températures allant de 120 [K] à 420 [K] dans certains cas. Dans la moitié des cas, le mur travaillerait en conditions froides où ses propriétés sont meilleures qu'en conditions chaudes. Un des problèmes avec cette méthode serait **l'impossibilité de déterminer une courbe de distribution des propriétés en fonction des températures pour le PEHD dans nos modèles.**

**Les résultats que nous avons obtenus, bien que peu pertinents d'un point de vue quantitatif, illustrent le besoin essentiel de gérer les extrema positifs de températures**

Le PEHD n'étant pas fait pour travailler à des températures trop importantes, il faudra envisager une stratégie de protection de celui-ci.

---

#### 3.2.2.3 RADIATIONS

Présentées dans le premier chapitre de ce travail, les radiations ne peuvent être négligées dans la conception d'un habitat hors de la protection de la magnétosphère terrestre.

Pour rappel, une fois en dehors de celle-ci, les Hommes comme les machines devront faire face à :

1. Des GCR (Galactic Cosmic Rays), autrement dit, des particules lourdes hautement chargées en énergie
2. Des SPE (Solar Particle Events), des flux de protons venant d'éruptions solaires
3. Des neutrons secondaires, présents dans les murs des habitats et la surface lunaire, cette seconde vague de radiations survient après le passage des GCR<sup>ii</sup>

Combinées, l'intensité de ces radiations est telle, qu'il n'est pas envisageable d'envoyer des humains à long terme dans l'espace sans protection adéquate et de prendre le risque de les exposer à une quantité de radiations favorisant des dysfonctionnements sévères du corps humain.

---

<sup>i</sup> Utilisation pour les tuyaux d'eau par exemple.

<sup>ii</sup> Actuellement négligé dans la problématique de la construction spatiale, ce type de radiations favoriserait le développement de cancers et autre maladie cardio-vasculaire dans le corps humain.

L'étude «Radiation Shielding Materials Containing Hydrogen, Boron, and Nitrogen: Systematic Computational and Experimental Study -Phase I»<sup>36</sup> réalisée en 2012 par le Dr. Sheila Ann Thibeault à la NASA propose une approche pour assurer la protection d'un équipage et de son matériau contre les 3 types de radiations évoquées.

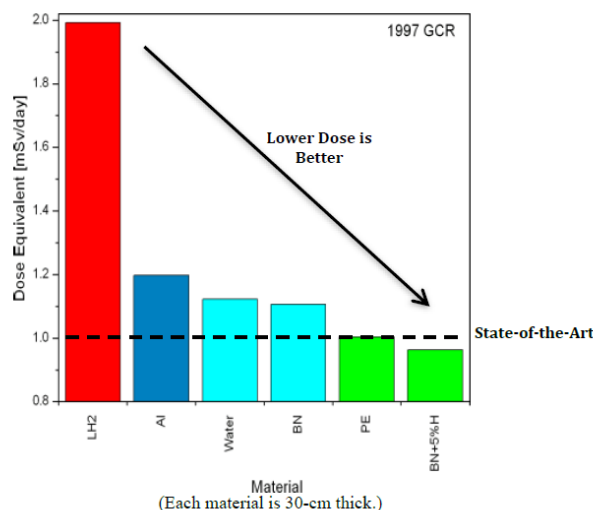
Son travail suit le raisonnement suivant. Les GCR et SPE perdent en énergie en interagissant avec la charge du matériau traversé. Le ratio charge/masse de la matière conditionne l'intensité de cette perte. L'hydrogène étant l'élément ayant le ratio charge/masse le plus élevé du tableau périodique, développer un matériau à forte concentration en hydrogène permettrait de se protéger contre ces radiations. Le matériau sur lequel, elle et son équipe ont travaillé est le BNNT ou « Nanotubes de boron nitride ». Ces tubes sont composés de petits éléments (Le numéro atomique du bore est 5 et du nitrogène 7) dans lesquels de l'hydrogène peut être injecté pour augmenter le ratio charge/masse.

Outre la création d'un potentiel matériau de construction, stable à de hautes températures tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques (le BNNT)<sup>i</sup>, nous pouvons retenir 2 leçons importantes de son étude :

- 1. Construire avec un matériau composé d'hydrogène est une première stratégie gagnante**  
Le PEHD utilisé jusqu'ici se confirme comme un choix intéressant pour nos analyses.
- 2. L'absorption d'énergie via une épaisse couche de matière est plus intéressante qu'une approche réfléchive pour les radiations**

La **Figure 40**, issue de la même étude reprend la dose équivalente (DE) par jour qu'une personne subirait dans l'espace si elle se trouvait derrière un mur de 30cm d'épaisseur de composition variable.

$$DE = Dose\ absorbée \times Facteur\ de\ qualité [Sv]$$



**Figure 40 : Comparaison de la protection fournie par différents matériaux contre les GCR - Crédits : Dr.Sheila Ann Thibeault**

<sup>i</sup> Comme mentionné dans les « Hypothèses des modèles d'analyse », les matériaux de construction finaux de notre habitat ne sont pas définis. Le BNNT sera probablement un candidat de choix le jour où la question de l'habitat lunaire passera de la théorie à la pratique.

Chaque astronaute, selon son âge et son sexe possède une dose équivalente maximale cumulée d'exposition. C'est cette limite qui détermine la période qu'il peut passer dans l'espace. Plus celui-ci est jeune, plus elle sera basse.<sup>i</sup> La **Figure 41** reprend, à titre d'exemple, des données de la NASA au sujet de l'exposition cumulée limite qu'un astronaute peut subir durant sa carrière.

Career Exposure Limits for NASA Astronauts by Age and Gender*				
Age (years)	25	35	45	55
Male	1.50 Sv	2.50 Sv	3.25 Sv	4.00 Sv
Female	1.00 Sv	1.75 Sv	2.50 Sv	3.00 Sv

\* Please visit the website for more information on radiation exposure limits. <sup>18</sup>

**Figure 41 : Exposition limite aux radiations des astronautes de la NASA au cours de leurs carrières - Crédits : NASA**

Nous pouvons en déduire un calcul simple et rapide. Si un astronaute de 25 ans se rend sur la Lune, dans un habitat ayant des murs en polyéthylène de 30cm d'épaisseur. En assumant que son moyen de transport a les mêmes propriétés que son habitat lunaire, qu'il ne quittera jamais l'environnement de son habitat sans protection équivalente et que nous négligeons les variations d'intensité des radiations dans l'espace au cours du temps, notre astronaute peut rester 1500 jours dans l'espace. Après ce délai, il ne pourra plus jamais repartir dans l'espace.

**En conclusion, quelle que soit la forme de notre habitat final, il est important de fournir une épaisseur de murs suffisante pour garantir la bonne protection contre les radiations**

Un environnement sauf ou presque de toutes radiations est également à envisager. Les équipages occupant la Lune devront pouvoir se protéger d'éruptions solaires exceptionnelles telle que celle survenue en 1972 entre la mission Apollo 16 et 17.

---

#### 3.2.2.4 DROXELISATION

Le choix du droxel vient, entre autres, de sa capacité à reproduire n'importe quelle structure. Les hypothèses faites sur ses dimensions et sa production nous permettent d'estimer le nombre de droxels et le temps requis pour réaliser une structure. Ces deux hypothèses ont toutefois des limitations.

---

<sup>i</sup> Un jeune astronaute vivra en théorie plus longtemps, ce qui laisse plus de temps pour des cancers et autres maladies liées aux radiations pour se développer.

En définissant la taille de notre élément de base, le droxel, à une cinquantaine de centimètres de hauteur et de la moitié de large, nous imposons d'entrée de jeu une série de contraintes à la production de celui-ci et à la construction de la structure. Ne pouvant pas prédire les capacités des futures imprimantes 3D, nous ne savons pas affiner ce choix pour optimiser le temps de production, la quantité de matière requise ou le temps de construction. Enfin, en faisant l'hypothèse de la construction sur base d'un modèle unique de droxel, pour simplifier la modélisation, nous excluons l'affinage de certaine forme.

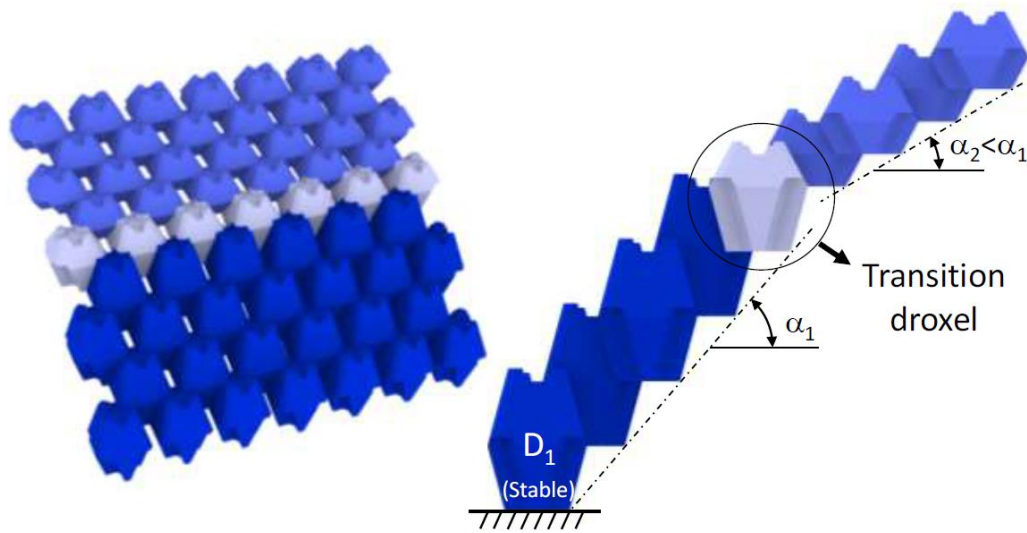


Figure 42 : Ajustement d'une pente via des modèles de droxels différents

Comme mentionné en début de section, le ratio qui détermine la finesse de l'habitat est basé sur les dimensions globales et locales.

$$\text{Finesse de la forme droxélisée} = \frac{\text{Dimensions principales du droxel}}{\text{Dimensions principales de la structure}}$$

D'un point de vue pratique et en accord avec nos hypothèses, les surfaces arrondies sont difficilement réalisables. Leur droxélisation n'est pas réaliste dans de telles conditions. Nous les excluons de notre démarche.

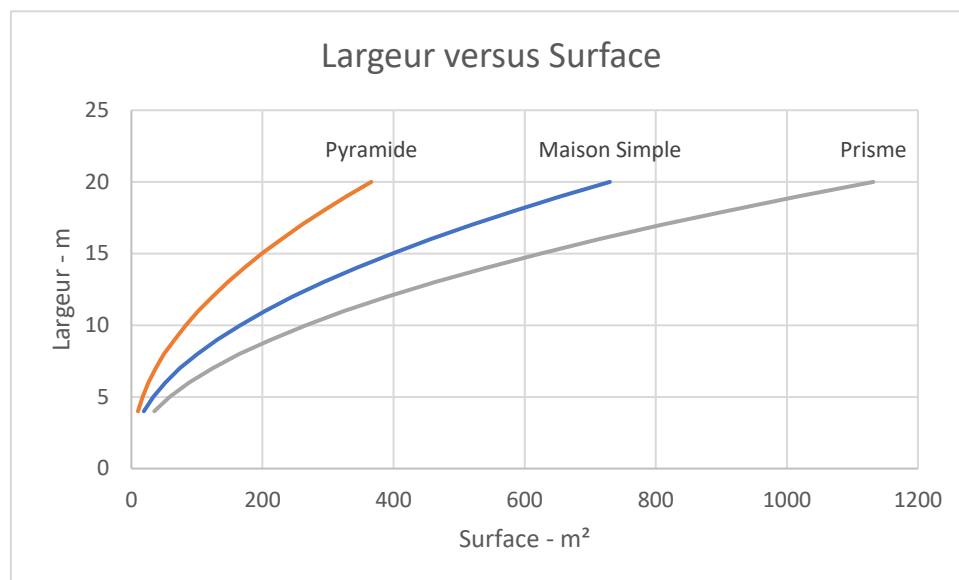
Afin de nous aider dans le développement de notre habitat final, nous pouvons faire une estimation du nombre de droxels requis pour la construction des 3 formes élémentaires restantes. Cet ordre de grandeur est basé sur la largeur de l'habitat. Nombre de droxels sur base duquel nous calculons également une estimation du temps de construction de chaque structure.

Nous comparons les formes sur base de la largeur de l'habitat. Celle-ci conditionne la taille de l'habitat au sol. La pyramide et la maison dite simple ont une empreinte carrée tandis que le prisme considéré ici aura une empreinte rectangulaire ayant un rapport de 3/1. Son côté long équivaut à 3 fois la largeur.

La surface habitable totale est un critère majeur pour la conception de l'habitat. L'analyse est faite de sorte à étudier les possibilités de l'augmenter. Pour une même largeur, la pyramide nous propose une surface de référence. La maison simple a deux étages, elle propose deux fois cette surface de référence

pour les mêmes dimensions au sol. Le prisme a un rapport de dimensions longueur/largeur de 3 pour 1, il offrira 3 fois la surface de référence pour la même largeur.

Nous pourrions, à termes, choisir comment combiner ses structures pour maximiser notre surface habitable tout en répondant à nos contraintes techniques. Que ce soit en utilisant une seule de ces formes élémentaires ou en les combinant pour donner un concept plus complexe mais potentiellement plus adapté à nos besoins. La **Figure 43** compare l'influence de la largeur de l'habitat<sup>i</sup> sur les surfaces habitables de chaque forme.



**Figure 43 : Influence de la largeur sur la surface totale**

La droxelisation d'une forme est l'estimation du nombre de droxels requis pour sa création. Ce procédé dépend des dimensions de la structure, du droxel mais aussi de l'agencement des droxels entre eux. Agencement qui varie en fonction de la forme. Des murs d'épaisseur simple, double ou triple ne se montent pas de la même façon par exemple. L'**Annexe T** illustre les différences d'agencements entre ces 3 dispositions. Dans chaque situation, le droxel aura plus ou moins de droxels voisins et selon une certaine orientation de pose.

En plus de considérer les droxels nécessaires pour construire la structure, nous comptons également les droxels nécessaires à l'installation d'un sol. Les structures que nous concevons doivent être étanches, parfaitement isolées de leur environnement, d'où la nécessité de venir « fermer » l'habitat.<sup>ii</sup> La **Figure 44** résume le nombre de droxels estimés par structure et par taille.

<sup>i</sup> Largeur extérieure, la surface occupée par les murs doit être déduite du résultat.

<sup>ii</sup> Utiliser le droxel pour la construction d'un sol est discutable. Une version modifiée est nécessaire de sorte à fournir une surface plane et donc un second modèle de droxel. Celui-ci n'a toutefois pas d'influence sur l'analyse, nous considérons donc que les temps de production et sa taille seront similaires au droxel structurel. Cela nous permet également de ne pas multiplier les technologies de construction requises.

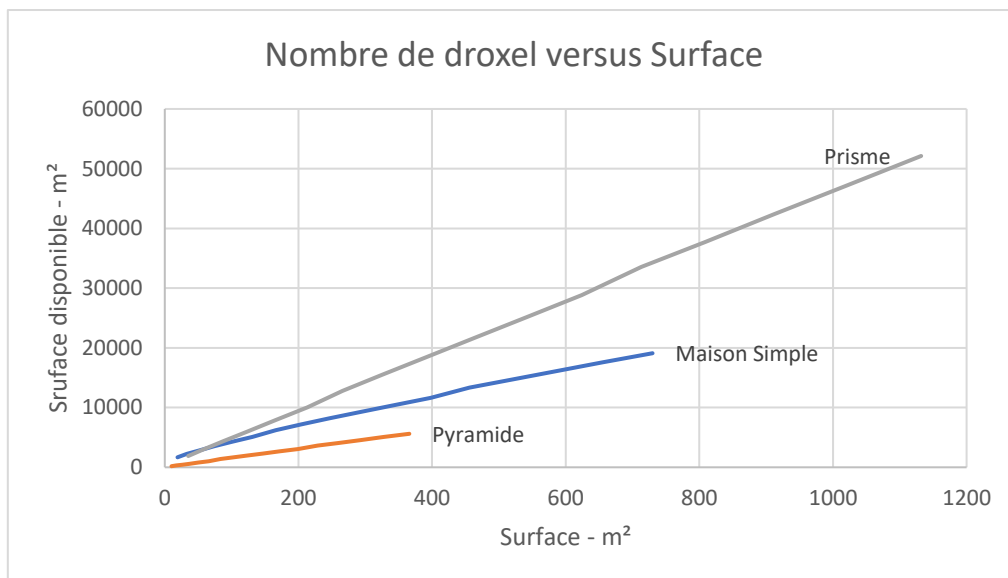


Figure 44 : Influence de la surface sur le nombre de droxels nécessaire

Sur base du nombres de droxels calculés, nous pouvons approximer le temps de construction. En estimant le temps de production d'un droxel ainsi que sa mise en place, nous avons une idée de la période à prévoir.

Etapes	Durée – [secondes]
Etape 1 : impression du droxel	180000 <sup>i</sup>
Etape 2 : acheminement sur site	600
Etape 3 : mise en place	360
Total	180960

Tableau 8 : Estimation du temps requis pour produire, déplacer et installer un droxel

La Figure 45 résume les différents intervalles de temps nécessaire par structure et par surface.

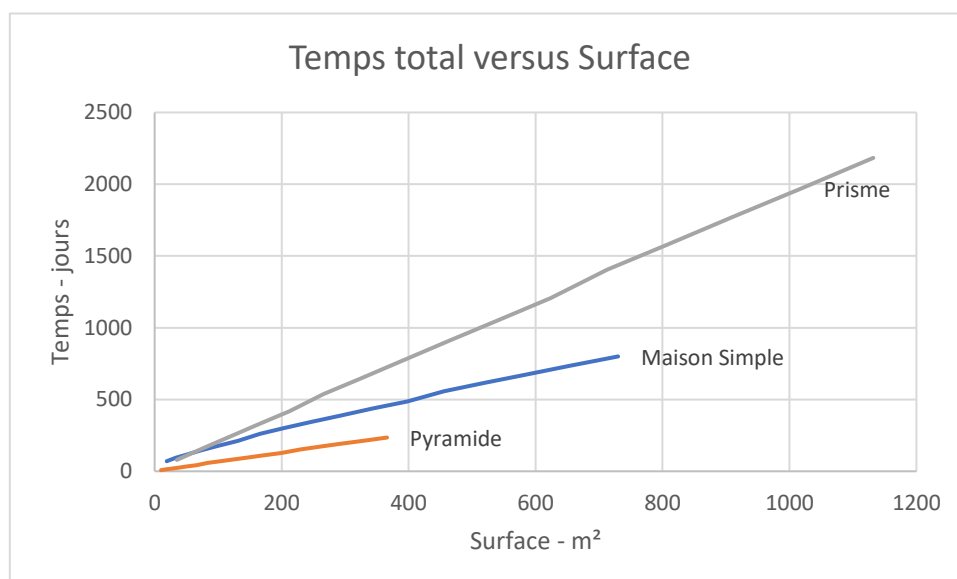


Figure 45 : Influence de la surface sur le temps de construction

<sup>i</sup> Voir « Le droxel lunaire en pratique –Production sur site »

Même très simplifié, ce calcul nous permet de mettre en avant le temps que mettrait une structure à être construite. Intervalle de temps qui ne prend pas en compte la phase d'extraction et de transformation des matières premières, ni l'habillage de l'habitat.<sup>i</sup>

**En résumé, pour fournir une surface de référence de 100 [m<sup>2</sup>], nous devons compter :**

- 1. 179 [jours] pour une maison simple** de 8 [m] de largeur
- 2. 69 [jours] pour une pyramide** large de 11 [m]
- 3. 200 [jours] pour un prisme** de 6x18 [m].

Logiquement, la structure la plus simple nous demande le moins de droxels.

### 3.3 CHOIX DE LA STRUCTURE FINALE

Cette section traite de la conception proprement dite de notre base lunaire en combinant les différentes leçons apprises et les contraintes associées à la lune.

Lors du choix final de la structure, nous prendrons en compte les points suivants :

- 1. Garantir un habitat modulable**
- 2. Exploiter la préfabrication et considérer ses restrictions**
- 3. Utiliser du matériel de construction de taille réduite**
- 4. Assurer une reprise de la pression interne**
- 5. Gérer les variations thermiques**
- 6. Fournir une protection contre les radiations**
- 7. Considérer le facteur humain**

La considération de chacun de ces points complexifie la conception d'un habitat.

Choisir la préfabrication et le droxel comme outillage de construction implique une limitation dans les formes disponibles. Considérer le facteur humain nous éloigne d'un optimum purement structurel et nous force à intégrer une démarche d'équipe mixte incluant designers, architectes comme ingénieurs.

Certains points sont également contradictoires. Assurer une protection parfaite contre les radiations augmente de risque d'avoir un effet bunker au détriment du facteur humain. La modulabilité demandera probablement la création de formes plus complexes, plus difficile à optimiser vis-à-vis de la pression et des variations thermiques.

**En conclusion, l'arbre de décision qui conditionne le choix de l'habitat dépend de l'ordre d'importance donné à chacun de ces 7 points.**

---

<sup>i</sup> Sur terre, cette phase de construction correspond aux différents corps de métier qui s'enchainent dans un bâtiment une fois la phase structurelle finie.

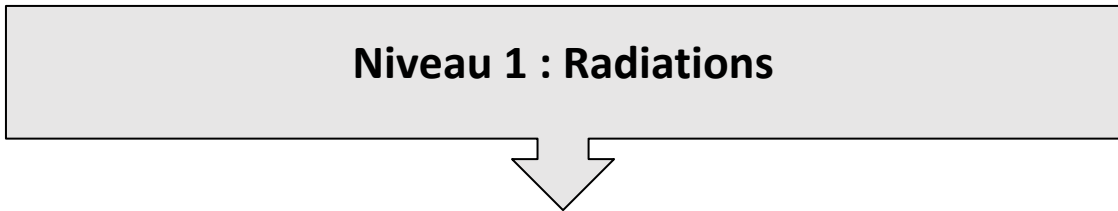
---

### 3.3.1 ARBRE DE DÉCISION

L'arbre de décision sur lequel se base notre base lunaire suit la logique suivante :

**1. Les radiations représentent l'élément le plus dangereux et le plus difficile à gérer**

Elles sont capables de traverser d'importantes quantités de matière. Leur atténuation dépendra de la quantité de matière traversée et de sa constitution. En plus de devoir fournir une protection optimale dans la totalité de l'habitat, une zone sauve de toutes radiations est aussi à prévoir en cas d'événements radiatifs exceptionnels.



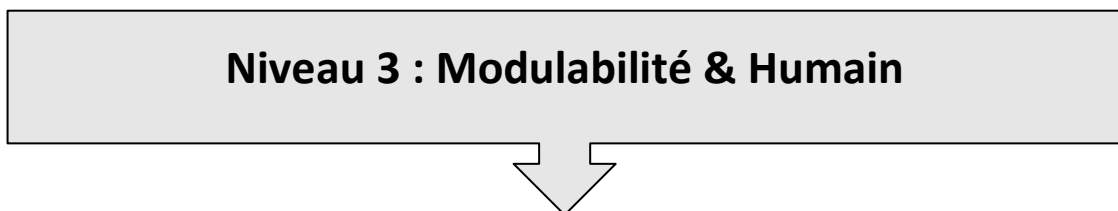
**2. En second lieu viennent les questions de la pression interne et de la variation thermique**

Ces 2 contraintes physiques interagissent de façon similaire avec l'habitat. Le différentiel de pression comme le gradient thermique tendent à faire gonfler l'habitat et générer des contraintes parasites indésirables. Assurer un déplacement minimal nous permettra de garantir l'étanchéité et minimiser les contraintes afin d'assurer l'intégrité physique de la structure.



**3. Le troisième niveau de l'arbre reprend la modulabilité et le facteur humain**

C'est-à-dire le fait de pouvoir se servir d'un habitat existant et de l'étendre pour faciliter l'accueil d'équipages supplémentaires. Cela permet un gain de temps, d'énergie et de matériaux. Le fait de pouvoir compartimenter l'habitat, de disposer d'une surface extensible nous autorise une certaine redistribution des espaces en fonction des besoins de chaque mission. Une évolution de l'habitat dans le temps serait possible.



#### 4. Enfin, le dernier niveau reprend le choix des outils de construction et les contraintes associées

Ces éléments sont les plus susceptibles d'évoluer dans le temps, conditionner tout l'habitat sur eux viendrait à le rendre désuet à l'instant où ceux-ci évolueront. En minimisant leur impact sur le concept, celui-ci sera indépendant de leur variabilité.

## Niveau 4 : Technique de construction

### 3.3.1.1 NIVEAU 1 : RADIATIONS

Mars Xhouse V1 exploite l'idée d'une gestion des radiations basée sur des couches multiples à traverser. Au lieu de construire des murs très épais et surdimensionnés d'un point de vue structurel, l'habitat est construit afin que les radiations doivent, dans le plupart des cas traverser au moins 2 murs avant d'atteindre l'espace de vie proprement dit.

Forcer une onde à traverser plusieurs couches est, dans tous les cas, une bonne piste, quel que soit le matériau des couches. En revanche, construire une couche ayant pour unique vocation de contrer des ondes représente beaucoup de matière et de temps. Avoir en général un élément à vocation unique est une perte de potentiel dans l'espace.

La dimension verticale prend toute son importance avec cette idée de développer un système de multicouches. Au lieu de fournir une protection parfaite sur toute la surface de l'habitat, nous pouvons attribuer des « niveaux de protection » variables en fonction des besoins de chaque zone. Un espace de vie n'a pas la même fréquentation qu'un espace de travail ou encore un espace de stockage.

Si nous définissons l'exposition maximale à 1 [mSv/jour] comme niveau de référence, nous pouvons construire une table d'attribution des zones en fonction de leur exposition.

Niveaux d'exposition		
Niveau N°	Exposition – [mSv/jour]	Utilisation permise
0	1	Laboratoires, serres, SAS, espaces de stockage, circulation
1	0.5	Espaces communs, sanitaires
2	0.25	Espaces privés, zone technique
3	0 (théorique)	Refuge anti-radiations

Tableau 9 : Niveaux d'exposition aux radiations quantifiés

- **C'est dans cette optique que nous choisissons comme forme de base la maison simple**  
En ayant, un ou 2 étages de hauteur, nous pouvons créer ces différents niveaux de protection en multipliant les murs à traverser.

En jouant sur la hauteur, les radiations sont forcées à traverser plusieurs épaisseurs de matière (murs, toit, sol, ...) avant d'atteindre le cœur de l'habitat au niveau du sol. La **Figure 46** illustre ce concept. La couleur rouge peut être vue comme une zone de Niveau 0 où les radiations doivent traverser 1 épaisseur de matière, la zone brune comme une zone de Niveau 1 où les radiations doivent traverser 1 à 2 épaisseurs de matière et la zone verte comme une zone de Niveau 3 où les radiations traversent 2 à 3 épaisseurs de matière.

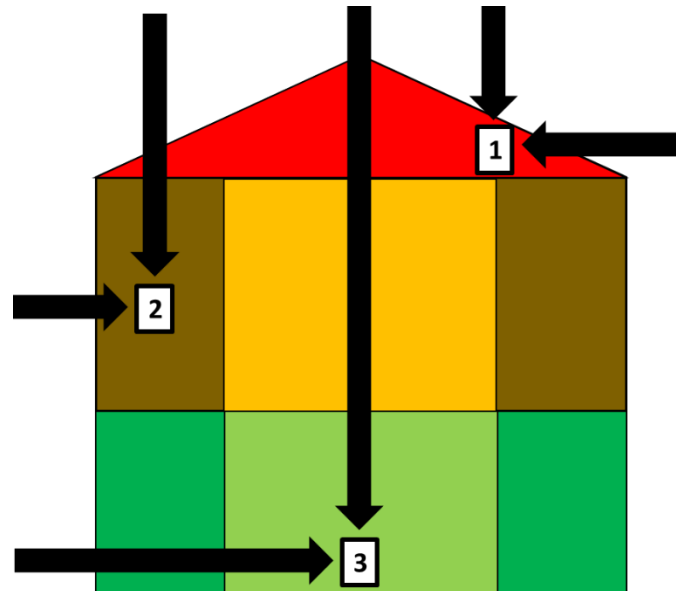


Figure 46 : Concept du bouclier radiatif multicouche

Comme le montre la figure ci-dessus, les dimensions verticales et horizontales nous permettent de jouer sur le nombre d'épaisseurs à franchir. Le point de départ de notre habitat sera la forme de la maison multiétagée. La hauteur, la largeur et le nombre d'étages de celle-ci sont encore à déterminer.

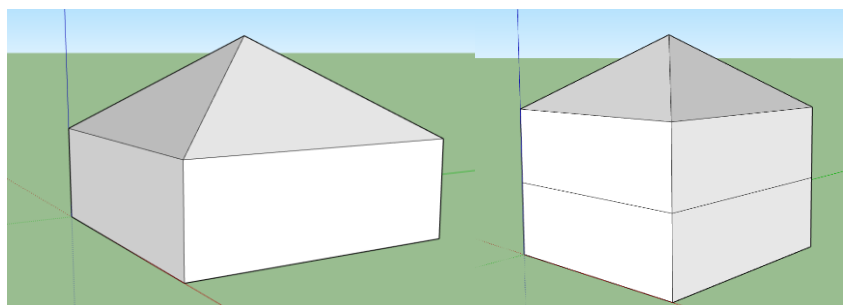


Figure 47 : Niveau 1 de l'habitat lunaire

- **Niveau 1 : Une maison simple pour créer des épaisseurs multiples et forcer les radiations à traverser une importante quantité de matière**

### 3.3.1.2 NIVEAU 2 : PRESSION ET TEMPÉRATURES

Nos modèles d'analyse concernant la pression sont explicites. Les formes courbes sont à privilégier. Le dôme et le demi-cylindre présentent tous les 2 de bons résultats en l'absence de couche de reprise et des résultats meilleurs encore avec une reprise de 25 [kN/m<sup>2</sup>]. Nous pouvons adapter notre modèle de maison simple carrée à un cylindre vertical surmonté d'un dôme.

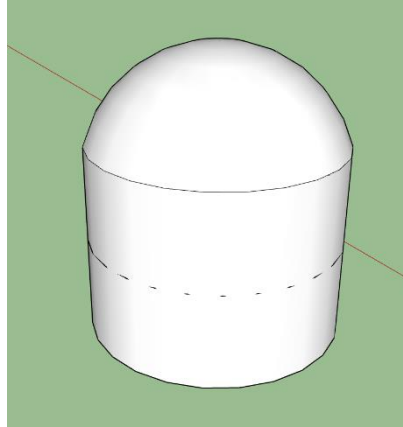


Figure 48 : Niveau 2a de l'habitat lunaire

Créer une couche de régolithe uniforme sur le modèle de notre maison simple demanderait beaucoup de volume et de temps. Ce qui va à l'encontre de notre recherche d'optimisation des matériaux utilisés. Mars Xhouse V2 propose une alternative à cette couche de reprise. En créant une tour concave, l'expansion des murs les met en compression et non plus en traction. Le déplacement entre les éléments est réduit, ce qui augmente l'étanchéité de la structure. La charge verticale de la tour Xhouse V2 est assurée par un réservoir d'eau situé à son sommet.

La tour Xhouse V2 travaille essentiellement en hauteur. Cette tour de 5 étages est fortement élancée et doit donc développer une concavité horizontale pour bien fonctionner. Plus la tour est élancée, plus le mur qui doit reprendre la pression interne est grand. Or, nous avons vu par nos modélisations que cette stratégie est à éviter.

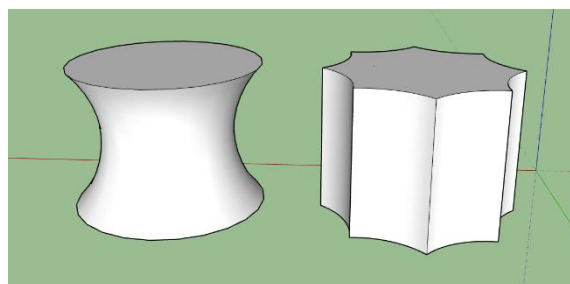


Figure 49 : Concavité horizontale (gauche) et concavité verticale (droite)

Il est plus simple de s'élever d'un ou deux étages et puis d'exploiter la dimension horizontale que de chercher à augmenter la hauteur. Le fait de rester relativement bas ne demande pas de concavité horizontale non plus. Nous pouvons dès lors nous contenter de murs verticaux avec une concavité verticale. Ce qui facilite la gestion de la pression. En changeant le sens de la concavité de la sorte, nous simplifions également la construction de l'habitat. Nos murs, relativement bas ne demandent aucun matériau en porte à faux pour son installation.

Nous faisons donc les choix suivants :

- **La structure se limite à un étage**  
Nous limitons le flambement.
- **Nous utilisons de la concavité verticale**  
Nous évitons le porte-à-faux et assurons une gestion de la pression interne optimale.

Avec cette stratégie, la concavité générera des contraintes internes dans les murs. Dans la mesure où nos modèles nous ont montrés que nous sommes bien en deçà des contraintes admissibles, une bonne gestion des dimensions des murs devrait suffire pour les reprendre, quitte à les renforcer sur les sections les plus sensibles.

- **La structure fait, au minimum, un droxel d'épaisseur**  
En accord avec nos analyses, le modèle de notre droxel structurel couplé à la concavité assure des déplacements minimums et des contraintes admissibles par le PEHD.  
Les zones sensibles comme les arêtes entre chaque zone de concavité (voir **Figure 49**) peuvent être doublée d'un deuxième droxel en cas de besoin.

La question de la variation thermique est plus délicate. La fiabilité de nos résultats d'analyse étant discutable, nous retenons uniquement la problématique de l'expansion. La limitation de celle-ci dépendra du matériau de construction final, qu'il s'agisse de PEHD, de béton de régolithe ou d'un autre matériau composite synthétisable sur la Lune. L'emplacement de l'habitat influencera également grandement l'amplitude thermique auquel il sera soumis. En général, assurer un gradient de 100 [K] à 150 [K] est envisageable, gradient que beaucoup de matériaux sont capables de reprendre.

- **Nous choisirons un site de construction avec un gradient thermique de maximum 150 [K]**  
Ce choix diminue considérablement l'impact de la chaleur sur l'habitat. L'expansion thermique est similaire à l'expansion due à la pression mais nos résultats nous imposent la prudence.

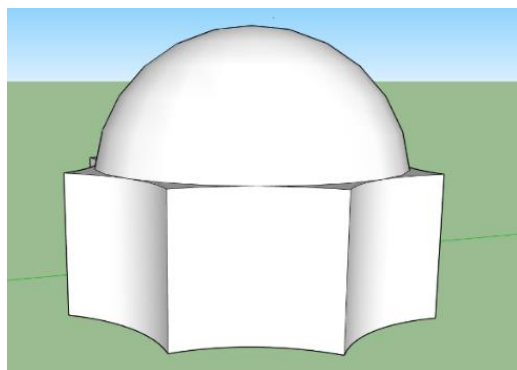


Figure 50 : Niveau 2b de l'habitat lunaire

- **Niveau 2 : Un silo concave surmonté d'un dôme pour mettre les murs en compression lors de la pressurisation et se servir de la tendance naturelle du dôme à résister à une charge hydrostatique**

---

### 3.3.1.3 NIVEAU 3 : MODULABILITÉ ET HUMAIN

Les concepts de Mars Incubator et de Zopherus introduisent les habitats modulables. Partir d'une structure existante pour y ajouter de la surface habitable. Ajout de surface qui peut se faire de façon continue de sorte à obtenir un habitat qui évolue dans le temps et l'espace. Le gain de temps est considérable, de l'extraction des matériaux, à leur mise en place sur l'habitat.

L'impact sur le confort de l'humain n'est pas négligeable. Plus la surface accessible de façon continue<sup>i</sup> est grande, plus le confort est grand. La distinction entre espace de travail, de vie et privé devient possible. Ce qui crée une atmosphère de vie saine pour les équipages qui séjournent dans l'habitat.

En plus de se servir de la structure initiale comme point de départ pour une extension, nous pouvons également envisager de réutiliser les murs porteurs. Mars Incubator et Zopherus lient leurs différents modules par des sas mais ne considèrent pas la possibilité de joindre les modules et de se servir de la structure une 2<sup>ème</sup> fois.

En théorie, cela impliquerait un surdimensionnement initial du mur afin qu'il puisse reprendre 2 fois sa charge initiale. Or ici, si nous collons les habitats, le mur en question devient un mur interne et n'est plus soumis au différentiel de pression et de températures auxquels il était initialement soumis. L'ajout d'un habitat collé augmenterait la résistance global en formant un bloc. Chaque habitat rajouté à ce bloc le rendra plus robuste. D'une part car le nombre de murs surdimensionnés augmente et d'autre part car le nombre de murs extérieurs diminue.

- **En suivant cette logique, notre habitat final sera un bloc de 9<sup>ii</sup> modules agencé en spirale**  
Nous limitons ainsi les murs extérieurs et réutilisons les murs déjà en place pour les modules en construction.

---

<sup>i</sup> C'est-à-dire la surface accessible sans combinaison spatiale.

<sup>ii</sup> Choisir 9 habitats nous permet de proposer une séquence de construction demandant de moins en moins d'efforts au fur et à mesure de l'avancement du bloc. Séquence de construction illustrée dans la section **Phases de construction**.

Chaque module est indépendant dans sa construction et son état final. C'est-à-dire qu'il n'a pas besoin des autres modules pour assurer son bon fonctionnement. En plus de pouvoir accueillir des équipages dès la fin du premier module, chaque module requiert de moins en moins de murs pour être terminé.

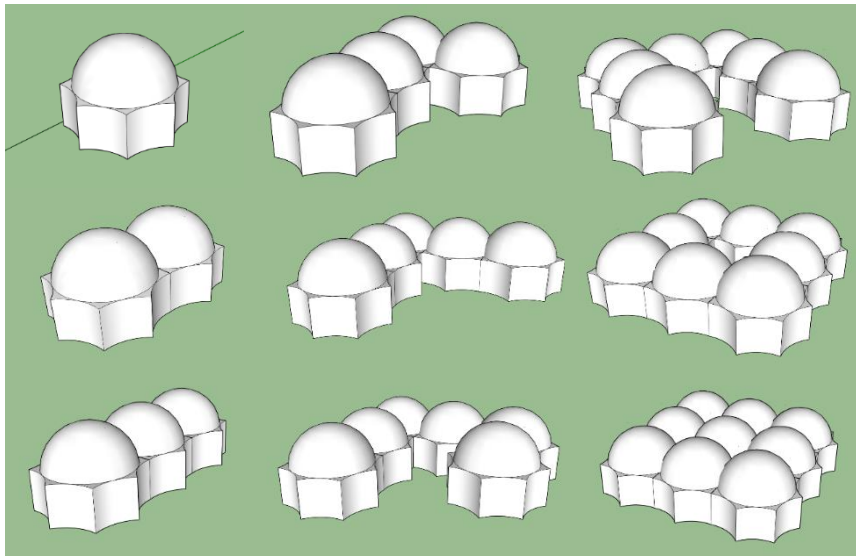


Figure 51 : Niveau 3 de l'habitat lunaire

Les murs extérieurs devenant intérieurs sont surdimensionnés. Nous pourrions les simplifier en considérant que leur exposition aux éléments sera de courte durée. Nous ne le ferons pas pour la simple raison que si un module venait à être défaillant et qu'il faille le dépressuriser, les modules adjacents doivent pouvoir résister à la variation de contraintes.

- **Niveau 3 : Création d'un bloc de 9 modules où chaque module est joint à ses voisins garantissant une surface habitable continue tout en réutilisant les murs déjà en place**

---

#### 3.3.1.4 NIVEAU 4 : OUTILS DE CONSTRUCTION

En dernier lieu, il nous reste à adapter cette idée aux outils de construction que nous avons à disposition, un droxel imprimé en PEHD.

Lors de notre étude de la droxelisation, la finesse de la forme droxelisée a été mise en avant. Reproduire des habitats de 5 à 20m de large avec le droxel que nous avons défini ne permet pas une finesse nécessaire pour créer des formes courbes de qualité.

En conséquent, le modèle évolue pour n'avoir plus que des angles nets et des surfaces planes. Les surfaces verticales sont relativement simples à convertir en tracé rectiligne sans perdre l'esprit du modèle comme le démontre la **Figure 52**.

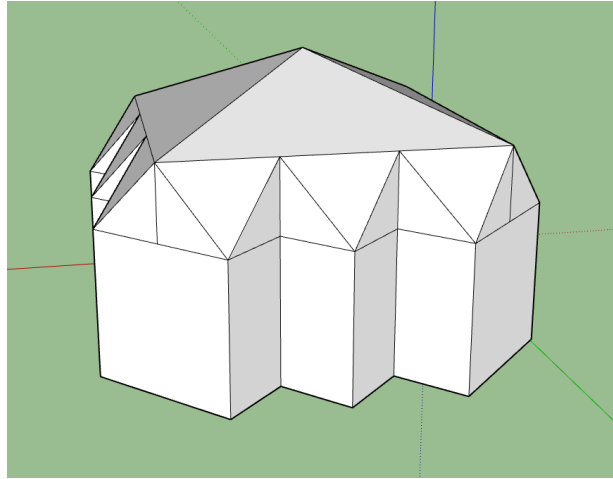


Figure 52 : Niveau 4a de l'habitat lunaire

Cependant, la conversion du dôme faisant office de toiture en pyramide est un problème. Les surfaces planes de la pyramide sont trop élancées, les déformations en leur milieu seront trop importantes. Comme l'ont montré nos analyses, il faut minimiser la taille des surfaces planes si nous voulons contrôler les déformations. Avec l'idée de réduire la taille des surfaces planes, deux options sont proposées. Celles-ci complexifient la création de la toiture mais assurent un déplacement acceptable.

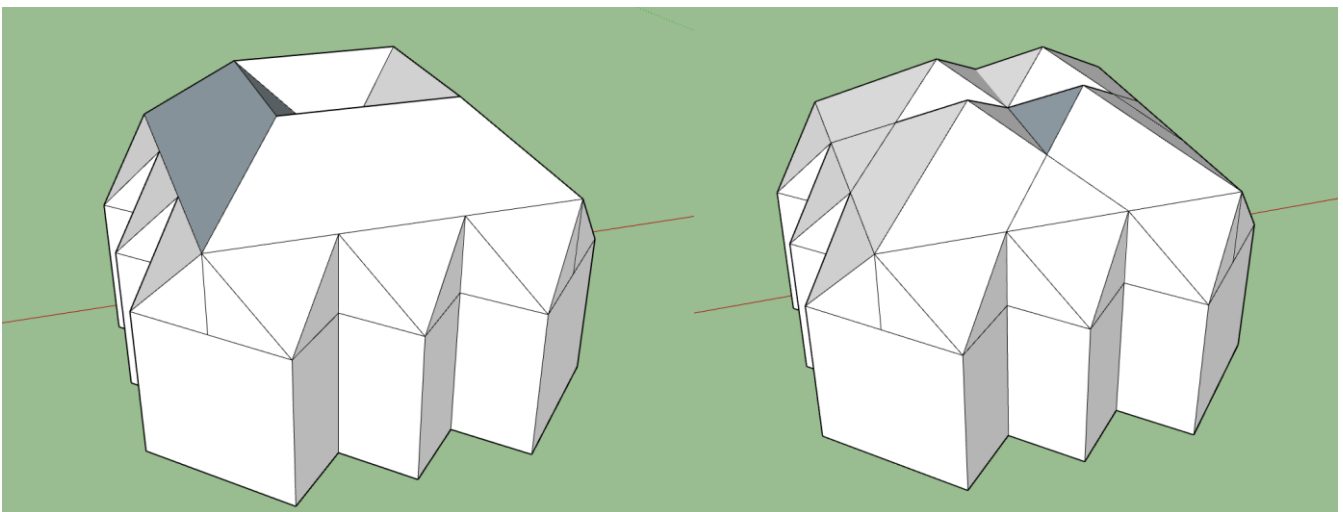


Figure 53 : Niveau 4b de l'habitat lunaire - Toit prismatique (gauche), toit multi pyramidal (gauche)

➤ **Nous faisons le choix de la 2<sup>ème</sup> option, un toit multi pyramidal (droite)**

Celle-ci demande légèrement moins de droxels et facilite une potentielle mise en tension des toits et des murs via les quatre sommets. L'Annexe X reprend les déformations et répartitions des contraintes de ce modèle.

Vient enfin le choix des dimensions finales. En suivant une procédure similaire à la section **Droxelisation** et en l'appliquant à notre modèle, nous pouvons déterminer les dimensions finales.

➤ **Nous obtenons les dimensions de 8 [m] de large par 6 [m] de hauteur**

Procédure que consiste à choisir la taille de l'habitat sur base de la surface proposée, du nombre de droxels requis et du temps de construction approximé. L'Annexe W reprend les graphes utilisés pour

déterminer ces dimensions. Les dimensions finales sont reprises dans le **Tableau 10**. Chaque module offrira une surface habitable de 101 [m<sup>2</sup>] et l'habitat total fait 909 [m<sup>2</sup>].

<b>Dimensions d'un module</b>	
<b>Dimensions</b>	<b>Valeur [m]</b>
Largeur	8
Hauteur des murs	3
Hauteur du toit	3
Hauteur total	6
<b>Dimensions de l'habitat complet</b>	
Largeur du module	24
Hauteur des murs	3
Hauteur du toit	3
Hauteur totale	6

**Tableau 10 : Dimensions finales de l'habitat**

Cela correspond à un module de 2 étages<sup>i</sup> répété 9 fois.

- **L'habitat prendra 1004 jours à être complété et sera composé d'un total approximatif de 23958 droxels**

Le premier module mettra 153 jours à être construit. Après quoi, un nouveau module sera ajouté tous les 106 jours en moyenne.

Le **Tableau 11** reprend un exemple de planning de livraison.

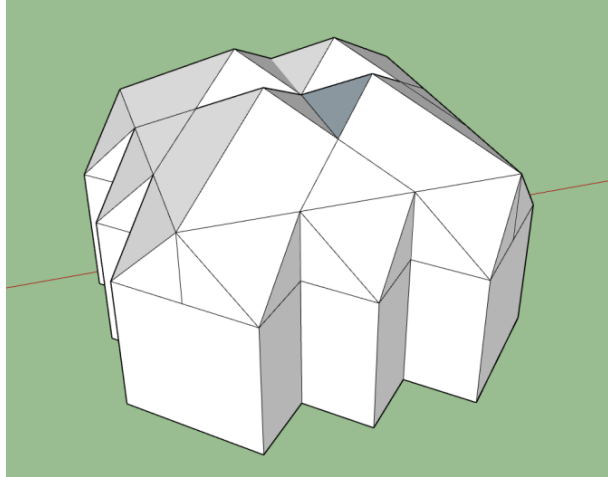
<b>Planning de livraison des modules</b>		
<b>Module N°</b>	<b>Temps nécessaire pour construire les module – [jours]</b>	<b>Temps cumulé – [jours]</b>
Module 1	153	153
Module 2	122	275
Module 3	109	385
Module 4	122	507
Module 5	109	616
Module 6	122	738
Module 7	109	848
Module 8	78	926
Module 9	78	1004

**Tableau 11 : Planning de livraison des modules et de l'habitat complet**

L'avantage d'un tel habitat modulable est que sa construction peut être interrompue et reprise à tout moment. Chaque module est capable de subvenir à ses besoins sans l'aide de ses voisins. La taille finale du bloc de modules peut être adaptée en fonction des besoins des missions lunaires, du temps alloué ou des fonds disponibles.

- **Niveau 4 : Le module de référence est adapté au droxel pour n'avoir que des surfaces planes et rectilignes**

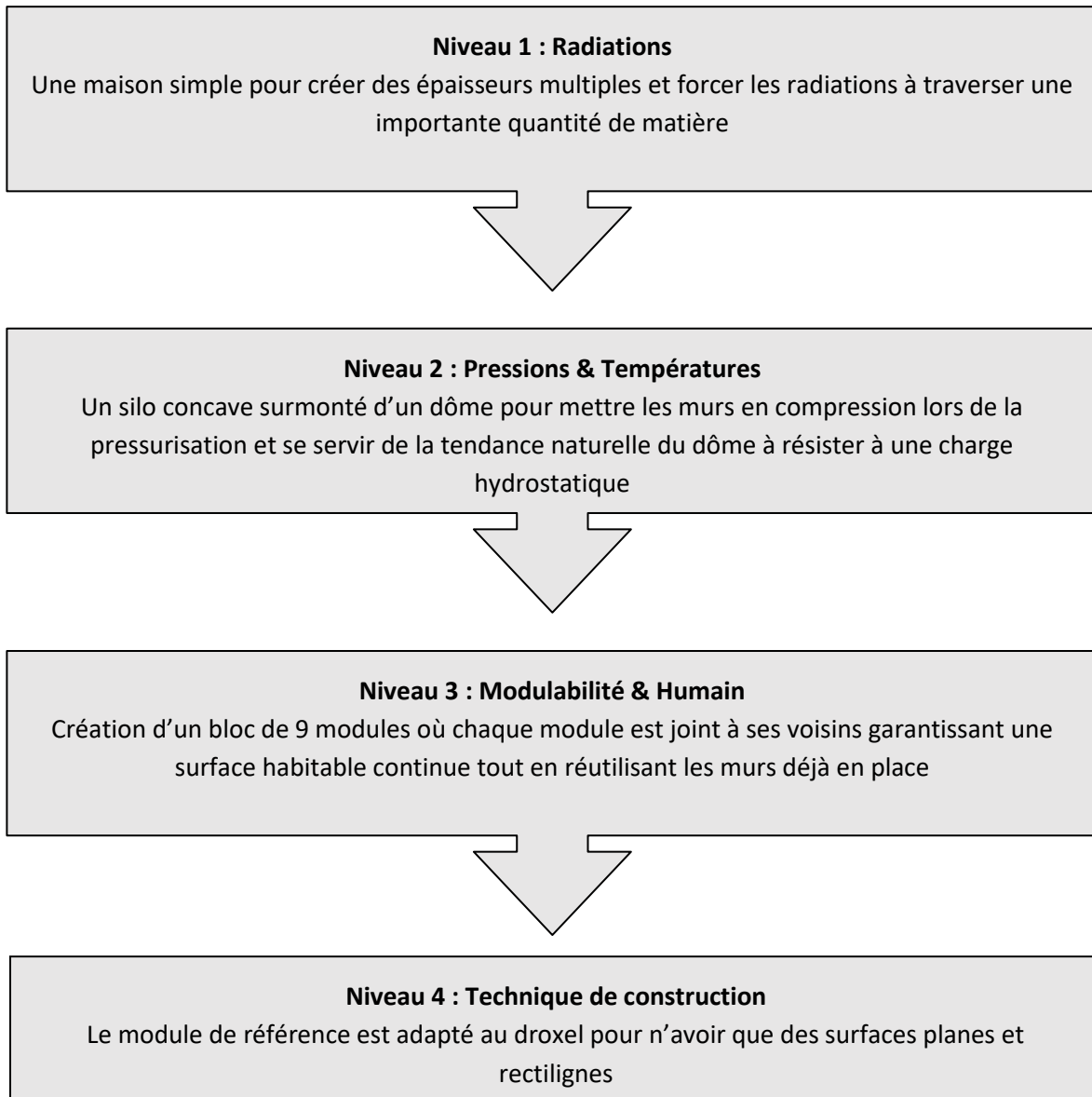
<sup>i</sup> Un rez-de-chaussée et un étage supérieur.



**Figure 54 : Niveau 4c de l'habitat lunaire - Module 1**

---

### 3.3.1.5 RÉSUMÉ



---

### 3.3.1.6 RENDUS

Voici une série de rendus du modèle sur site afin de mieux visualiser l'objet final.

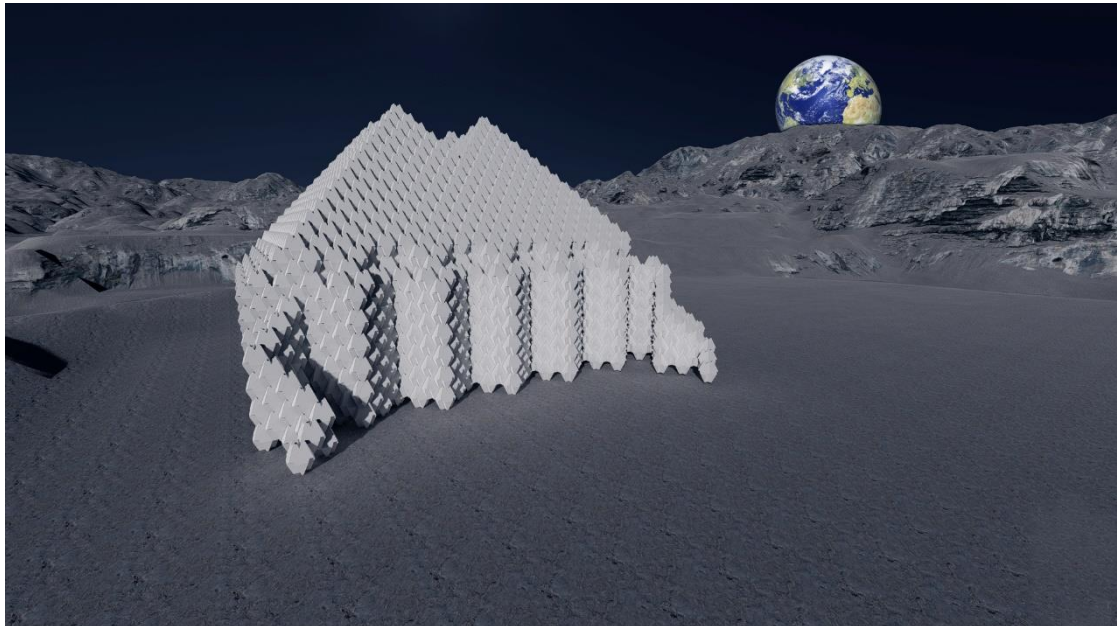


Figure 55 : Habitat final - Module 1

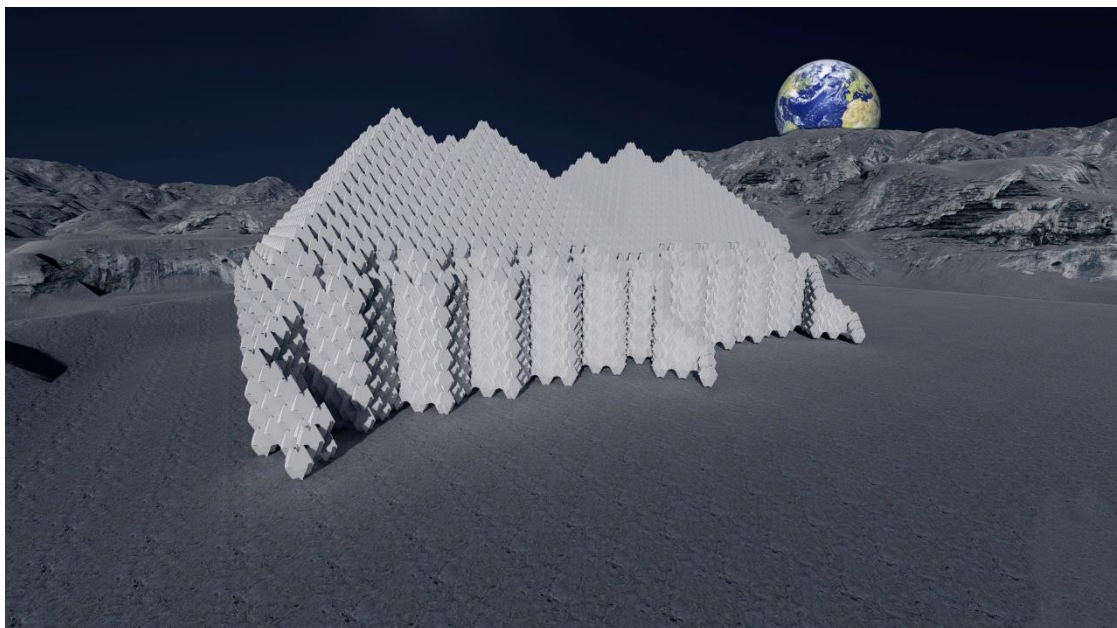


Figure 56 : Habitat final - Module 1 et module 2

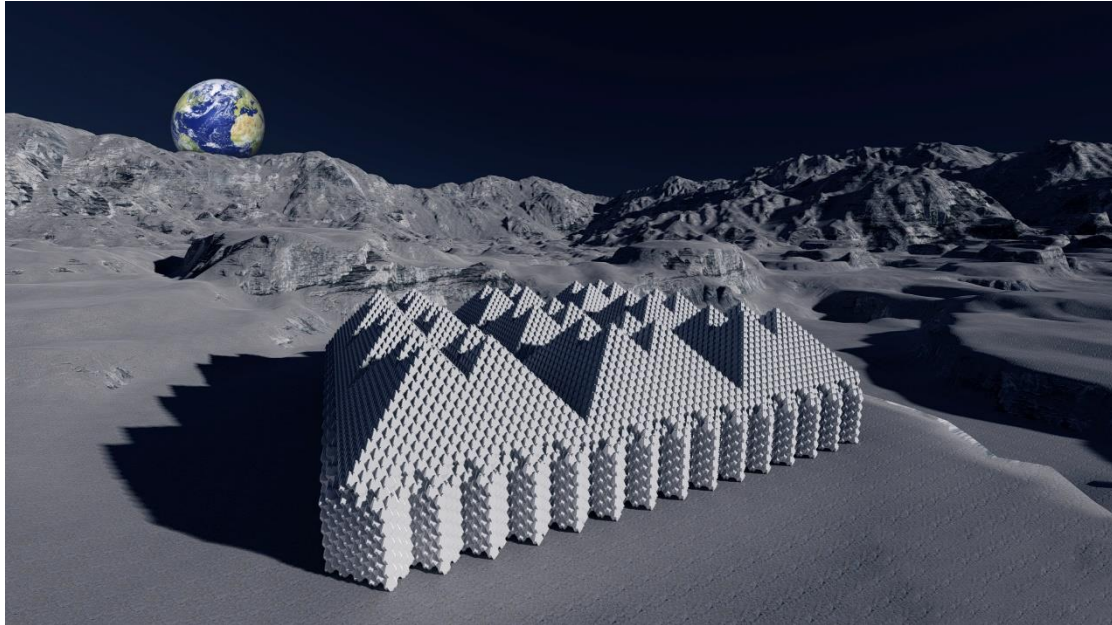


Figure 57 : Habitat final – Bloc complet

---

### 3.3.2 QUESTIONS TECHNIQUES EN SUSPENS

Les questions qui suivent sont des points qui n'ont pas été abordés directement dans cette étude. Pour fournir un modèle complet à terme, un travail complémentaire sur ceux-ci sera nécessaire.

#### 1. Etanchéité

L'habitat proposé par Mars Incubator évoque le problème d'étanchéité entre ses panneaux préfabriqués. En effet, en utilisant une technique de pose discontinue de matériaux, il nous faut assurer une jonction parfaite entre tous les éléments si nous ne voulons pas que l'habitat présente des fuites d'air qui assure la viabilité de l'environnement.

Nous avons limité les déplacements de notre modèle au maximum. Mais même de l'ordre du millimètre, un tel déplacement est problématique. Nos modèles sont faits de murs continus, comme expliqué plus tôt, or ici nous travaillons avec des droxels. Le déplacement sera conditionné par la qualité des joints. Un joint trop faible favorisera une augmentation de ce déplacement. Il doit être contrôlé si nous ne voulons pas risquer de dépressuriser l'habitat.

Différentes pistes sont envisageables. Mars Incubator, par exemple, exploite la mise en tension de ces éléments préfabriqués les uns avec les autres. Mise en tension qui est assurée par l'extérieur de la structure. C'est-à-dire que chaque panneau est « cousu » à son voisin et que le câble qui les lie est mis en tension. Le risque de cette méthode est que l'effort se retrouve localisé en quasi-totalité dans le câble et non plus dans l'élément structurel initial.

Nous pourrions repenser cette idée pour notre modèle en droxels. Le toit de notre habitat est composé d'une multitude de pyramides. Pyramides qui peuvent être mises en tension via leurs sommets. La force appliquée génèrerait une charge verticale qui se propagerait dans le toit et enfin les éléments verticaux. En couplant cette méthode avec un joint entre chaque élément, synthétisable in situ de préférence, le déplacement serait contrôlé et minimisé.

Il ne s'agit là que d'une possibilité parmi d'autres pour répondre à ce besoin. Des recherches plus approfondies méritent d'être faites sur la question pour étudier leurs faisabilité et leurs résultats.

## **2. Fondations**

Comment sécuriser notre habitat sur le sol lunaire ? La composition du sol lunaire n'est pas connue en profondeur. Seuls les premières dizaines de centimètres, en certaines localisations, ont été analysées. Des répliques du sol lunaire, basées sur les échantillons ramenés existent tel que le JSC-1 par exemple. Répliques sur lesquelles toute une batterie de tests a été fait.

Les résultats de ces tests ne permettent cependant pas de savoir précisément ce que nous aurons une fois sur place. La façon dont l'habitat sera sécurisé sur place, son tassement, ... dépendent des futures missions d'exploration géologique et géotechnique.

Si nous faisons l'hypothèse que des fondations superficielles sous forme d'un radier suffisent, comment allons-nous les mettre en place ? Le droxel n'est pas le candidat idéal dans cette situation. Nous faut-il prévoir l'acheminement de machines capables de couler ou imprimer le radier ou une solution basée sur le matériel que nous aurons à disposition est envisageable ? La même question se pose pour des pieux. A nouveau, des plus amples réflexions sont nécessaires sur ce point pour en tirer une conclusion.

Le travail de l'équipe de « Mars Science City »<sup>37</sup> évoque des options possibles pour ancrer un habitat sur le sol martien. Leurs recherches pourraient constituer une première piste intéressante pour développer cette section.

## **3. Stabilité**

Une descente de charge classique n'est pas aussi critique sur la Lune que sur Terre. La gravité étant 6 fois inférieure, la charge verticale subie par la structure est réduite. De plus le droxel est conçu pour assurer une descente de charge optimale vers ses voisins les plus proches tout en restant stable.

Une question éventuelle ici serait plutôt l'interaction des variations thermiques avec ces charges ou encore la question d'une collision éventuelle avec une micrométéorite.

---

### **3.3.3 CONCLUSION**

Le modèle que nous proposons ici n'est pas parfait. Il s'agit ici d'utiliser toutes les connaissances acquises lors de nos analyses sur des concepts existants, des modèles que nous avons étudiés ou encore des données disponibles de l'exploration spatiale.

Loin d'être opérationnel, il nous permet de mettre en avant le chemin qu'il nous reste à faire pour proposer une solution habitable sur la Lune.

### 3.4 CONSTRUCTION DE L'HABITAT

Le bon fonctionnement de notre habitat est également dépendant de sa construction. Si celle-ci est excessivement complexe, le risque d'erreurs ou d'imperfections augmente. Nous couvrirons ici quelques étapes importantes de la construction de notre base lunaire.

#### 3.4.1 SITE DE CONSTRUCTION

Le choix du site de construction varie selon 3 critères :

1. La variation thermique locale
2. La disponibilité des ressources locales
3. La facilité d'approche pour une fusée

En fonction de la région dans laquelle nous nous trouvons, les températures maximales et minimales ainsi que leurs variations dans le temps changent fortement. L'équateur présente le plus grand écart, il y fait 400 [K] le jour et 140 [K] la nuit, changement qui se fait tous les 14 jours<sup>i</sup>. Dans le fond d'un cratère, la température est constante mais égale à 25 [K] car continuellement à l'ombre. Le **Tableau 12** reprend les variations de chaque localisation.

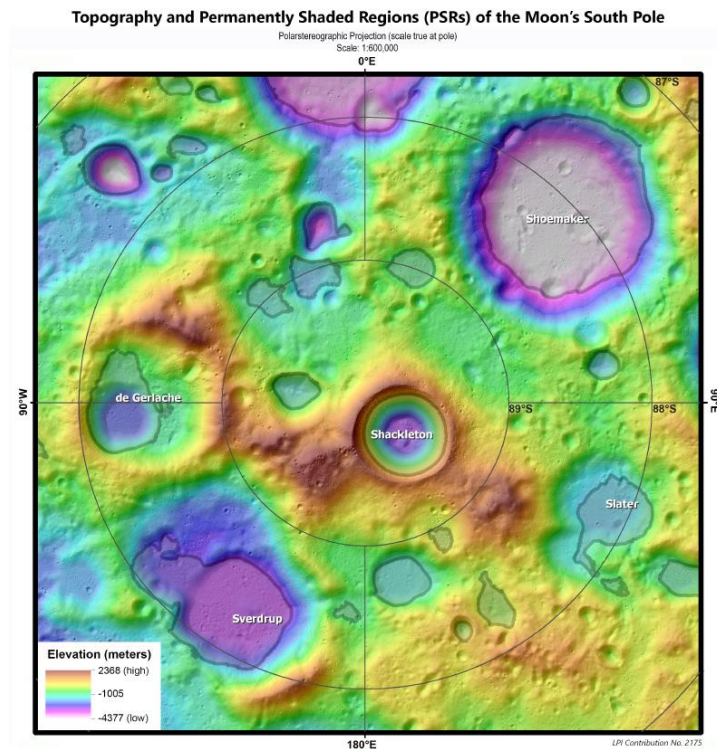
Variations thermiques lunaires			
Emplacement	Maxima – [K]	Minima – [K]	Durée du jour – [jours terrestres]
Pôle Nord/Sud en général	320	90	Variable
Equateur	400	140	14
Au fond du cratère de Shackleton	27	25	Nuit éternelle
Au bord du cratère de Shackleton	320	220	+/- 27

Tableau 12 : Variations thermiques locales sur la Lune

Le cratère du Shackleton est un cratère proche du Pôle Sud, l'orientation et l'élévation de son bord extérieur le mettent dans une situation de Pic de Lumières éternelles. Son contour est exposé au soleil une grande majorité (80-90%) de l'année lunaire.

La variation de températures sur la crête de ce cratère est principalement due au changement de saison. Saisons qui sont applicables partout sur la Lune. Les extrema repris ci-dessus sont les extrema globaux.

<sup>i</sup> 14 jours = Durée du jour lunaire



**Figure 58 : Localisation et exposition du cratère de Shackleton – Crédits : Lunar Planetary Institute**

L'eau est l'une des ressources importantes à obtenir. A la base de nombreux procédés, son extraction est une priorité. Sur base des relevés des satellites lunaires, nous savons que la majorité de l'eau lunaire se trouvent aux pôles et plus particulièrement dans les cratères continuellement à l'ombre.

Enfin, l'approche des sites cités se complexifie au fur et à mesure que nous approchons des pôles. L'équateur est une zone relativement lisse<sup>i</sup> tandis que les Pôles sont plus escarpés.

Après considération des 3 critères, le pôle sud et plus particulièrement le cratère de Shackleton se présentent comme de bons candidats. Dans la mesure où nous sommes capables de nous poser plus ou moins proche de ceux-ci, l'eau serait disponible, la variation thermique serait minimale et l'exposition au soleil maximale. Plusieurs cratères voisins du Shackleton comme celui de Shoemaker sont aussi des candidats de choix à considérer.

### 3.4.2 PHASES DE CONSTRUCTION

Le choix du droxel comme outils de construction ainsi que la modulabilité de notre base impliquent quelques ajustements lors de la construction. La manière dont les droxels s'imbriquent entre eux ne permet pas de rajouter un mur vertical à un mur vertical existant. Pour se positionner, un droxel va s'imbriquer par le haut sur l'élément en dessous de lui. Le suivant viendra ensuite s'imbriquer par-dessus lui et le coincer.

<sup>i</sup> Entre autres grâce à la présence d'étendues lisses de lave solidifiée.

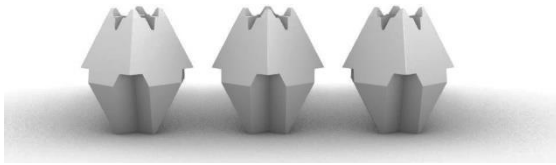


Figure 59 : Processus de mise en place : niveau 1  
Crédits : Baptiste Roiseux

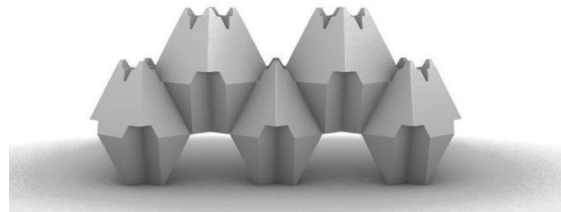


Figure 60 : Processus de mise en place : niveau 2  
Crédits : Baptiste Roiseux

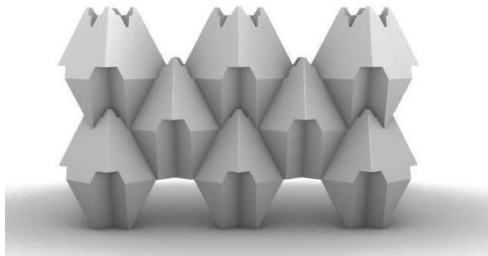


Figure 61 : Processus de mise en place : niveau 3  
Crédits : Baptiste Roiseux

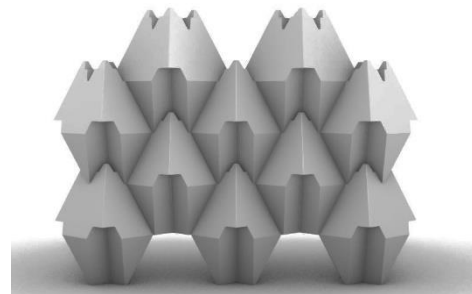


Figure 62 : Processus de mise en place : niveau 4  
Crédits : Baptiste Roiseux

Les **figures ci-dessus** illustrent ce processus. Une fois le mur initial construit, il n'est plus possible de facilement l'élargir. Chaque niveau ajouté vient verrouiller les niveaux inférieurs déjà en place. Ce qui complique l'agrandissement d'un mur horizontalement. Si nous partons de la **Figure 62** et que nous cherchons à ajouter un droxel au niveau 1, nous allons rencontrer des difficultés de mise en place. Le quatrième niveau empêche le mouvement de tous les droxels présents sous lui.

Pour insérer le droxel D entre les éléments A et B, il faut soulever l'élément B afin de glisser le droxel D en place. Or le droxel C maintient les droxels A et B en place. Une fois notre mur mis en tension et l'habitat pressurisé, une telle opération est délicate comme le montre la **Figure 63**.

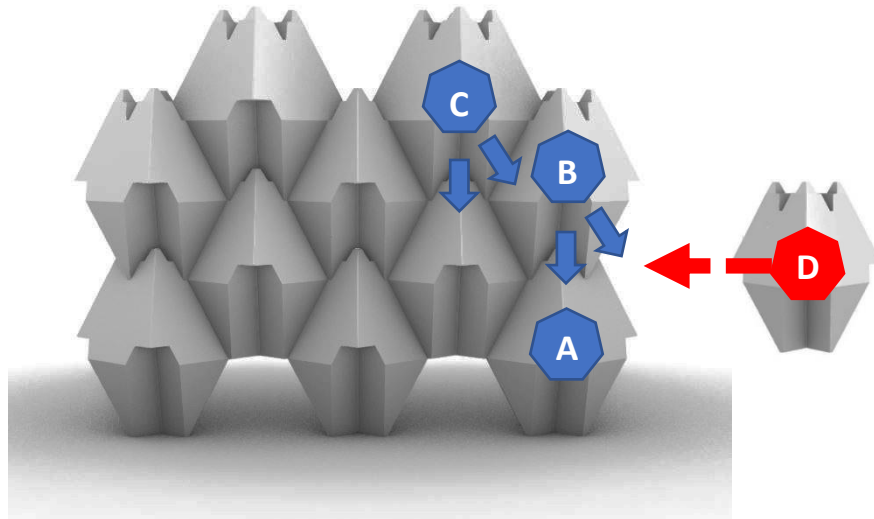


Figure 63 : Problème de mise en place des droxels

La solution à ce détail d'assemblage serait d'initier le mur vertical voisin au module en construction ; solution imagée sur la **Figure 64**. Au lieu d'uniquement construire le mur du module 1 (rectangle noir) lors de la construction du module, nous devons également placer tous les droxels présents dans la moitié inférieure des murs du modules 2 (triangle bleu).

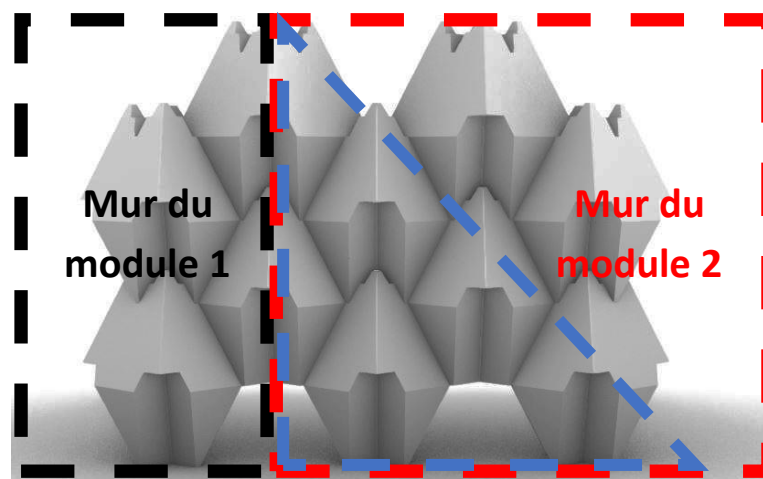


Figure 64 : Solution au problème de mise en place des droxels

En procédant de la sorte, nous ne devons plus soulever de droxels pour en imbriquer un nouveau. Cela implique de produire plus de droxels lors de la construction des premiers modules. Droxels qui serviront une fois la construction des modules suivants commencée.

La construction de la base lunaire imaginée, module par module, suivrait le processus suivant.

## 1. Phase 0 : Terrassement

La surface minimale initiale à terrasser pour commencer les travaux est un carré de 2 modules de large. Quatre modules car il faut l'espace pour le module en construction mais également le dépassement des murs des 2 modules voisins.

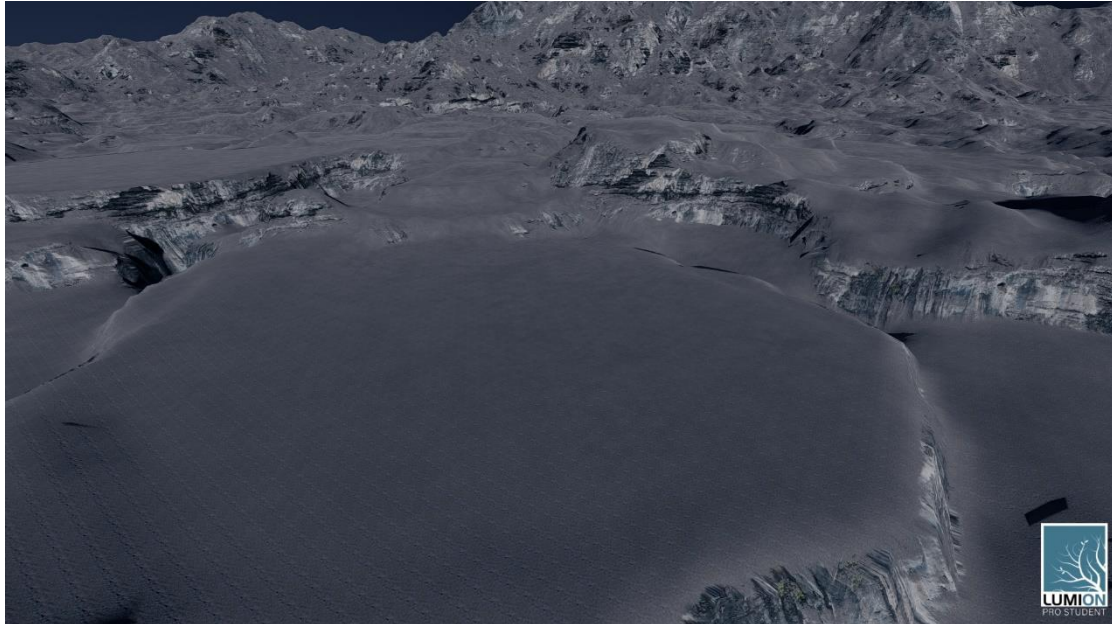


Figure 65 : Phase 0 – Surface de l'habitat

## 2. Phase 1a : Pose des premiers droxels

La première couche de droxels, une fois les fondations installées, reprend les murs du module comme ceux des voisins.

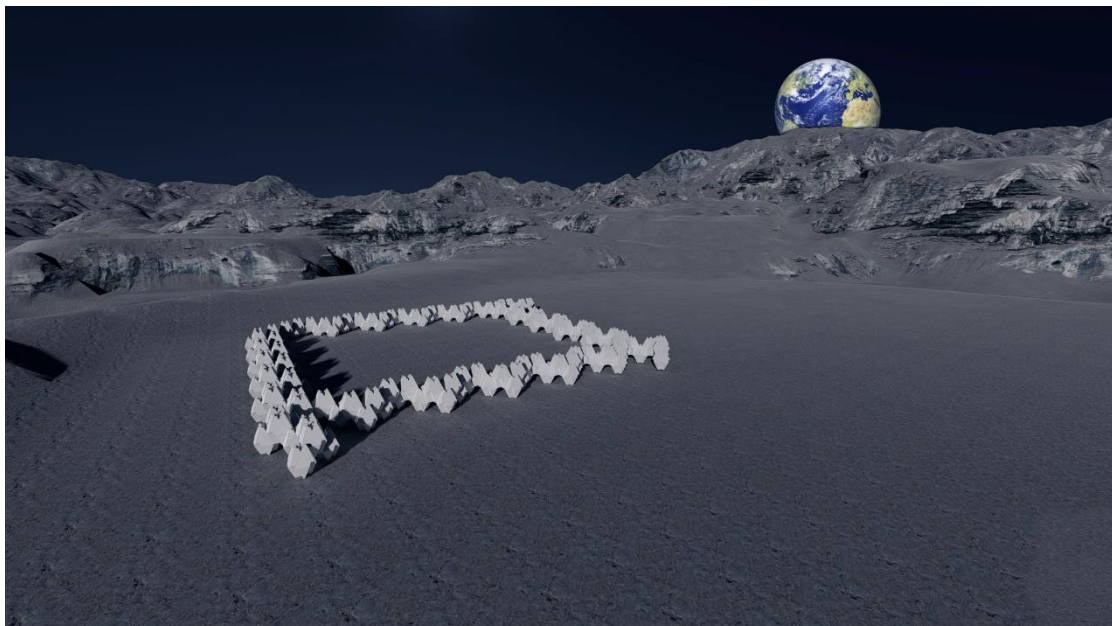


Figure 66 : Phase 1a – Module 1 – Première couche

### 3. Phase 1b : Finalisation des murs

La **Figure 67** illustre les murs d'un module finalisés ainsi que les murs partiels des modules voisins.

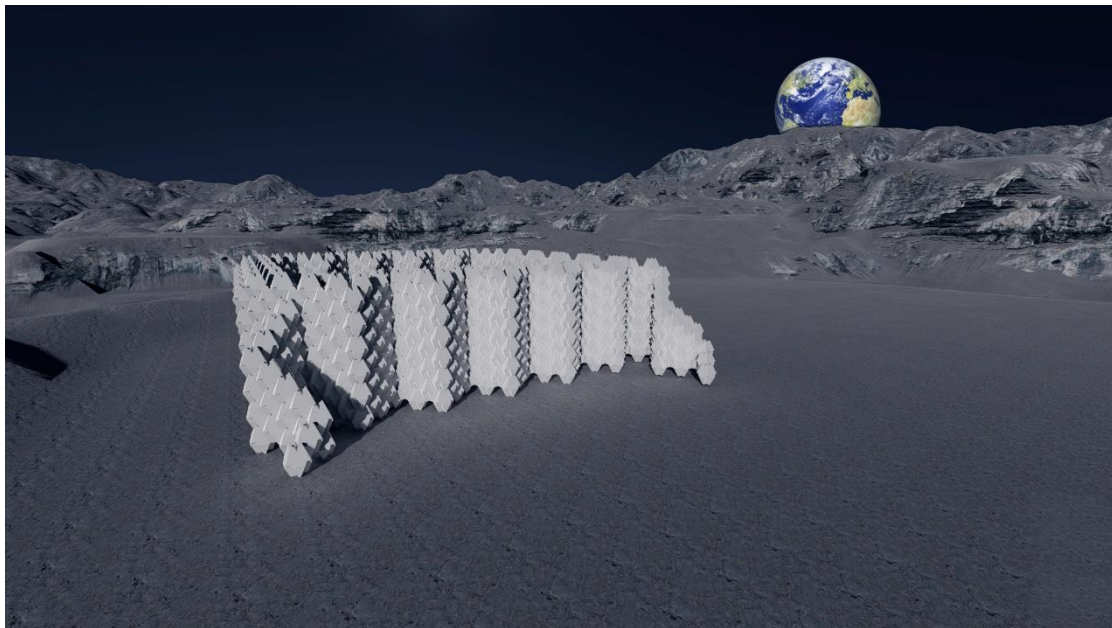


Figure 67 : Phase 1b – Module 1 – Murs complets

### 4. Phase 1c : Toit

Une fois le toit du premier module mis en place, nous pouvons mettre les droxels en tension via les sommets du toit et pressuriser l'habitat. La première surface de 100m<sup>2</sup> est maintenant complète et peut être aménagée pour accueillir un équipage.

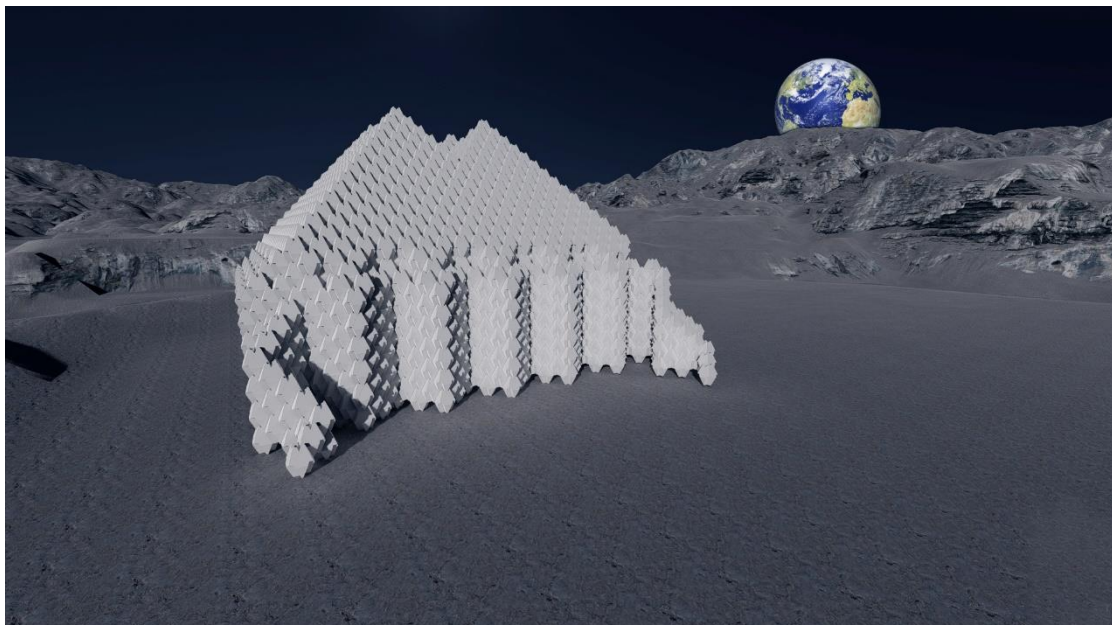


Figure 68 : Phase 1c – Module 1 – Toit

### 5. Phase 2 : Module 2

Le processus de construction du second module est relativement similaire. En partant des murs préinstallés, sa construction est plus rapide que lors du module 1.

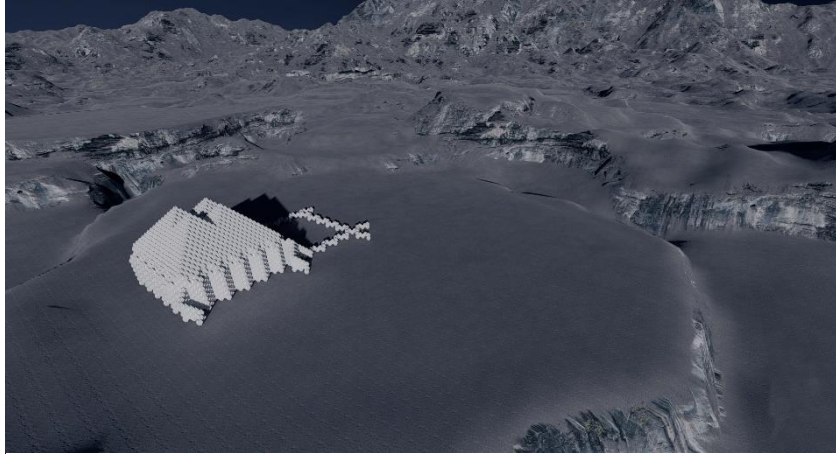


Figure 69 : Phase 2a – Module 2 – Première couche

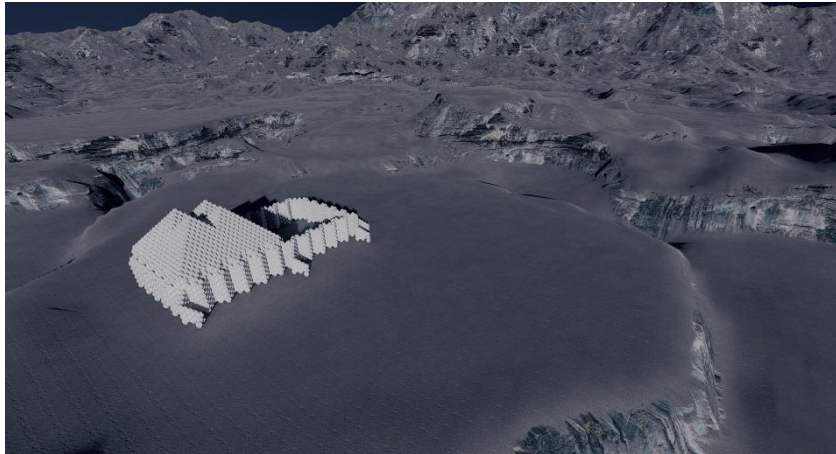


Figure 70 : Phase 2b – Module 2 – Murs finalisés

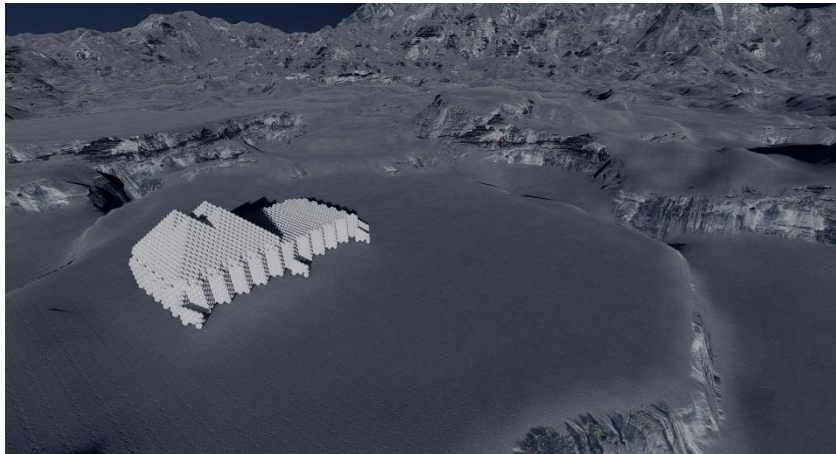


Figure 71 : Phase 2c – Module 2 – Plancher

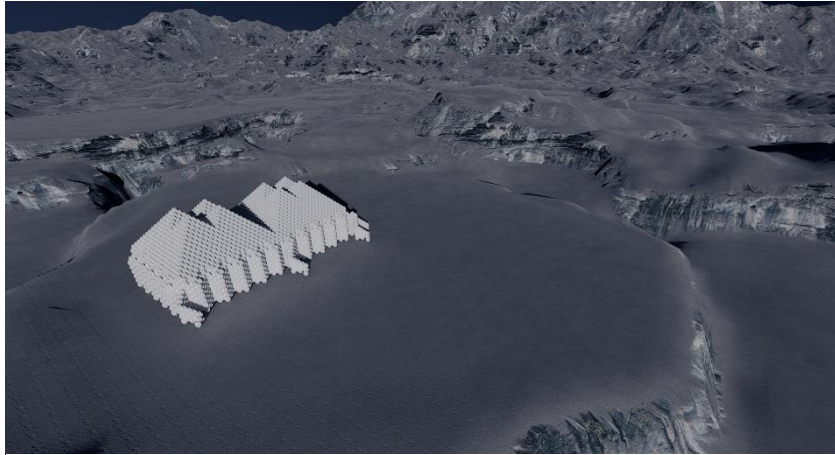


Figure 72 : Phase 2d – Module 2 – Toit

#### 6. Phase 3 à 7 : Modules 3 à 7

Les modules 3 à 7 viennent compléter l'anneau extérieur de l'habitat, ajoutant tous les 106 jours en moyenne 100m<sup>2</sup> de surface habitable.



Figure 73 : Phase 3a – Module 3 – Première couche



Figure 74 : Phase 3b – Module 3 – Toit

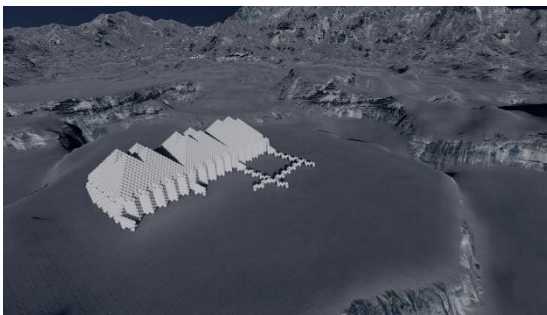


Figure 75 : Phase 4a – Module 4 – Première couche

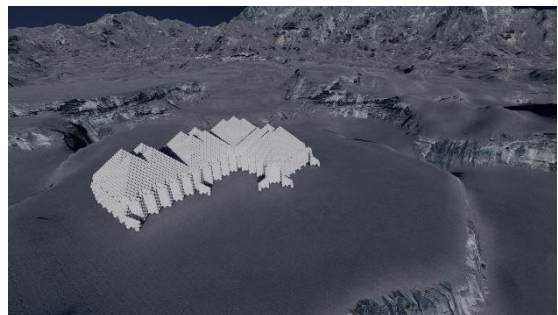


Figure 76 : Phase 4b – Module 4 – Toit



Figure 77 : Phase 5a – Module 5 – Première couche

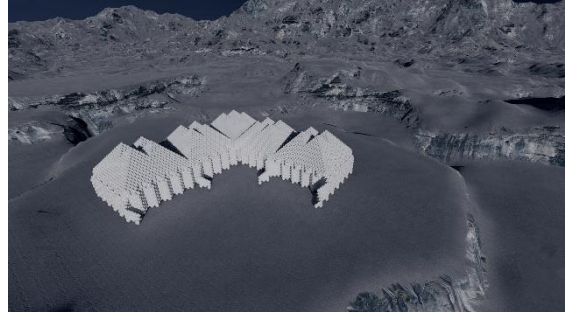


Figure 78 : Phase 5b – Module 5 – Toit



Figure 79 : Phase 6a – Module 6 – Première couche



Figure 80 : Phase 6b – Module 6 – Toit



Figure 81 : Phase 7a – Module 7 – Première couche



Figure 82 : Phase 7b – Module 7 – Toit

## 7. Phase 8 à 9 : Modules 8 et 9

Les 2 derniers modules sont les plus rapides à terminer. Seuls les toits doivent être mis en place.

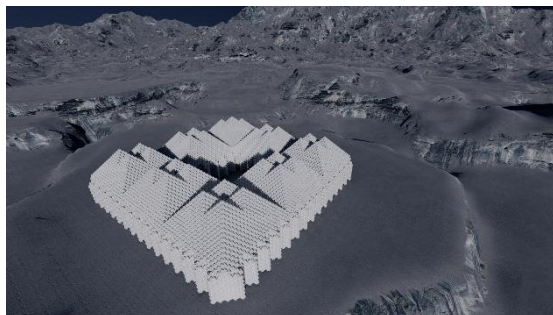


Figure 83 : Phase 8 – Module 8 –Toit

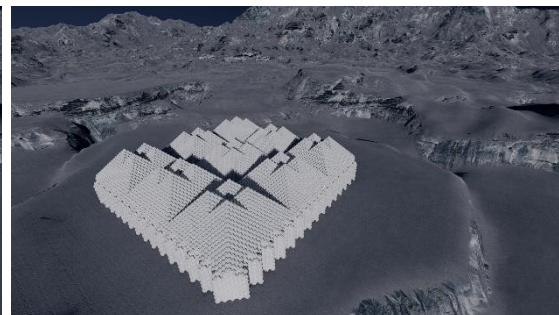


Figure 84 : Phase 9 – Module 9 – Toit

Enfin, après 1004 jours de construction, la base lunaire a 909 m<sup>2</sup> de surface habitable à proposer aux différentes missions lunaires qui y séjourneront.

### 3.4.3 INTÉGRATION D'UN ÉQUIPAGE

Chaque module offre 2 espaces carrés de 50m<sup>2</sup> chacun où l'attribution des espaces se ferait en fonction du niveau de radiation.

Le premier étage pourrait accueillir, par exemple, un bloc de 3 chambres (en vert) au centre ainsi qu'un bloc sanitaire, des rangements (en rouge) dans les encoches créées par la structure et un espace de circulation (en jaune) entre les 2. Le bloc central se trouverait dans une zone de « Niveau 2 à 3 » tandis que les rangements et les circulations dans une zone de « Niveau 1 ».

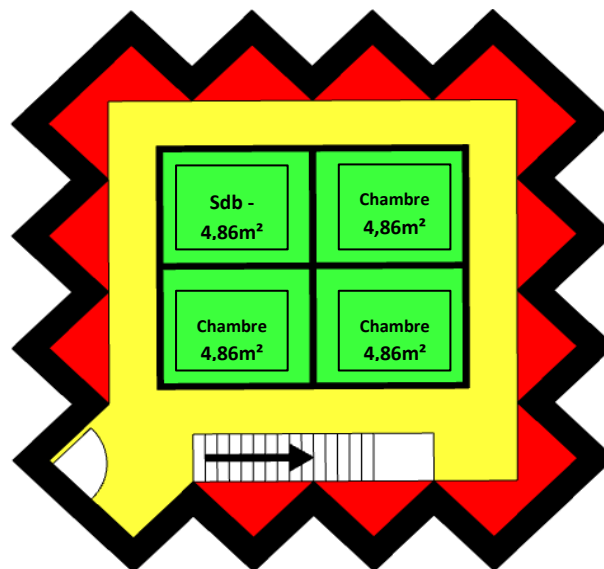


Figure 85 : Proposition d'aménagement - Rez de chaussée

Le second étage, de « Niveau 1 » partout pourrait être composé d'un laboratoire, un espace technique dans une moitié et d'un espace ouvert avec cuisine et lieu de vie commun dans l'autre moitié. Espace commun qui reprendrait une table pour les repas comme les réunions mais qui pourrait aussi être converti en salle de sport en fonction des moments de la journée.

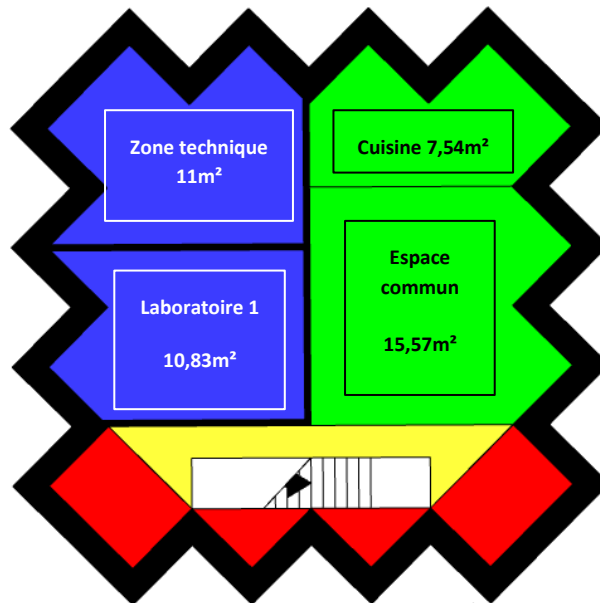


Figure 86 : Proposition d'aménagement - 1er étage

Cet agencement d'un module est purement fictif, il s'agit de montrer que l'espace est utilisable mais surtout qu'un module s'autosuffit si c'est nécessaire. Chaque module complémentaire ajouté à l'habitat sera un ajout considérable de confort.

### 3.5 COMPARAISON AVEC LES CONCEPTS EXISTANTS

Pour terminer, nous comparons notre solution avec les différents concepts développés dans le cadre des concours de la NASA. Le but est de mettre en avant les solutions mixtes proposées par chacun. Chaque habitat n'a pas le même degré de développement sur tous les besoins.

#### 3.5.1 SOUMISSION AU CANEVAS

Comme pour les structures présentées dans le chapitre 2, nous analysons notre structure selon les mêmes critères. La grille d'analyse est disponible dans l'**Annexe U**. La fiche technique n'a pas son utilité ici, le raisonnement précédent explique en détail le fonctionnement de l'habitat.

#### 3.5.2 COMPARAISON

La synthèse comparant tous les habitats est disponible en **Annexe V**.

La grille d'évaluation référencée ci-dessus met en avant un point principal :

**1. Chacun des habitats présentés dans ce travail est conçu autour d'un point principal. Ce qui limite le développement des stratégies de réponses aux autres besoins**

Mars Ice House se concentre sur la création d'un habitat lumineux en travaillant avec de la glace. Mars Xhouse V1 cherche à optimiser la gestion de la lumière sans compromettre son bouclier radiatif. Mars Xhouse V2 adresse le problème de la pression interne avec une tour concave. Zopherus et Mars Incubator écartent la technique de l'impression 3D extérieure et développent des modules de production sous scellés. L'habitat ESA cherche à minimiser la transformation de matière première pour économiser l'énergie et les machines. Enfin, nous adressons le besoin de modulabilité en introduisant le droxel au panel des techniques de construction lunaire.

La différence majeure entre notre concept et les habitats existants est que nous nous cherchons à répondre aux faiblesses mises en avant sur chacun d'eux. Aux concepts qui se veulent inflexibles et n'offrent aucune modification dans le temps, nous avons travaillé un habitat qui peut s'adapter selon les besoins. Aux habitats dont la qualité d'impression est potentiellement problématique, nous avons choisi la préfabrication.

En revanche, en agissant de la sorte, nous devons maintenant considérer d'autres faiblesses. La pose de matière discontinue (construction par pose de bloc de matière indépendant) soulève la question de l'étanchéité et de la gestion de la pression interne. Le déplacement sera plus difficile à maîtriser. Un joint parfait doit être étudié. Le temps de construction de notre modèle est également important. A titre de comparaison, Mars Xhouse V2 estime sa construction à 60 jours pour 100m<sup>2</sup>. Nous avons estimé la période de construction du premier module à 153 jours.

En conclusion, chaque habitat adresse un défi technique différent au détriment d'autres. La définition de l'habitat optimal est variable. Le nôtre s'en rapproche si nous considérons le problème des radiations et de l'humain mais s'en éloigne si nous favorisons la gestion de la pression ou le temps de construction. Le même raisonnement peut être fait sur toutes les structures évoquées dans ce travail.

La finalité de ce travail était l'étude de la conception d'une base lunaire mais également le cheminement nécessaire pour atteindre cet objectif. Passer du référentiel terrestre au référentiel spatial impose une série d'adaptations à nos habitudes. L'intérêt de cette étude vient avec le début d'une nouvelle ère de conquête spatiale. Les récentes avancées technologiques ainsi que l'arrivée de nouveaux intervenants privés a relancé la course à l'espace et en conséquent, le besoin de structures extraterrestres.

Nous avons travaillé en 3 chapitres. Dans le premier, nous avons défini notre nouveau référentiel de construction et identifié les défis techniques associés. Dans le second, nous avons fait l'état de l'art des structures en cours de développement et disponibles à l'analyse. Enfin, le troisième chapitre travaille la quantification des défis relatifs au référentiel défini et la conception d'une base lunaire. Cet habitat final fait office d'illustration du travail cité ci-dessus. En regroupant les apprentissages faits, nous avons pu mettre en avant les tenants et aboutissants d'un projet de structure spatiale.

Pour résumer, nos conclusions, au fur et à mesure de ce travail, sont les suivantes :

### **1. Du premier chapitre nous retiendrons une destination pour notre base et des conditions locales**

La Lune est le candidat le plus raisonnable à ce jour. La difficulté d'y acheminer du matériel nous impose de favoriser l'utilisation des ressources in situ autant que possible. D'un point de vue technique, nous devons considérer une intense exposition aux radiations, un différentiel de pression de 100 [kN/m<sup>2</sup>] et un gradient thermique de l'ordre de 300 [K].

### **2. Du second chapitre nous tirons une série de 6 leçons**

#### *2.1. Besoin de redondance dans l'outillage de construction*

Le transport du matériel de construction est difficile. Il nous faudra minimiser le nombre d'engins nécessaires sur place et créer une redondance de ces mêmes machines en prévention de l'usure qu'elles subiront.

#### *2.2. Sélection de matériaux élargie*

L'exploitation du sol lunaire pour la production de fuel, d'hélium 3 ou autres produits crée de nombreux sous-produits utilisables en construction. Le panel de matériaux disponibles ne sera donc pas réduit au simple béton de régolithe.

#### *2.3. Limiter le nombre de techniques de construction*

Dans la même optique que la redondance, le nombre de machines disponibles est limité. Optimiser notre habitat autour du minimum de techniques de construction possibles permet de ne nécessiter qu'un nombre limité de machines différentes.

#### *2.4. Utilisation d'un bouclier radiatif multicouches*

Le bouclier radiatif multicouche semble être la meilleure stratégie de protection contre les radiations. En forçant celles-ci au travers de multiples épaisseurs de matières, nous pourrions suffisamment les atténuer et créer un environnement viable.

#### *2.5. Qualité de construction*

Les conditions extérieures de la Lune, comme présentées dans le premier chapitre, sont extrêmes. Garantir le bon fonctionnement des machines dans ce milieu est complexe, garantir une qualité de construction par pose continue de matière l'est tout autant.

Le processus de production doit être déterminé en prenant ce paramètre en compte.

### 2.6. Modularité

Enfin, la modularité de l'habitat permet de créer un habitat flexible. Plus celui-ci est flexible, plus il est simple de l'adapter aux besoins des missions et des équipages. En plus de créer une économie de matière première, la flexibilité permet également de facilement considérer le critère humain dans le design d'un habitat.

Ces 6 points ont orienté notre réflexion pour la conception proprement dite de notre habitat.

### 3. Dans le troisième chapitre, nous créons un habitat lunaire

Construit dans le référentiel lunaire et sur bases des apprentissages cités ci-dessus, nous sommes en mesure de présenter l'habitat suivant :

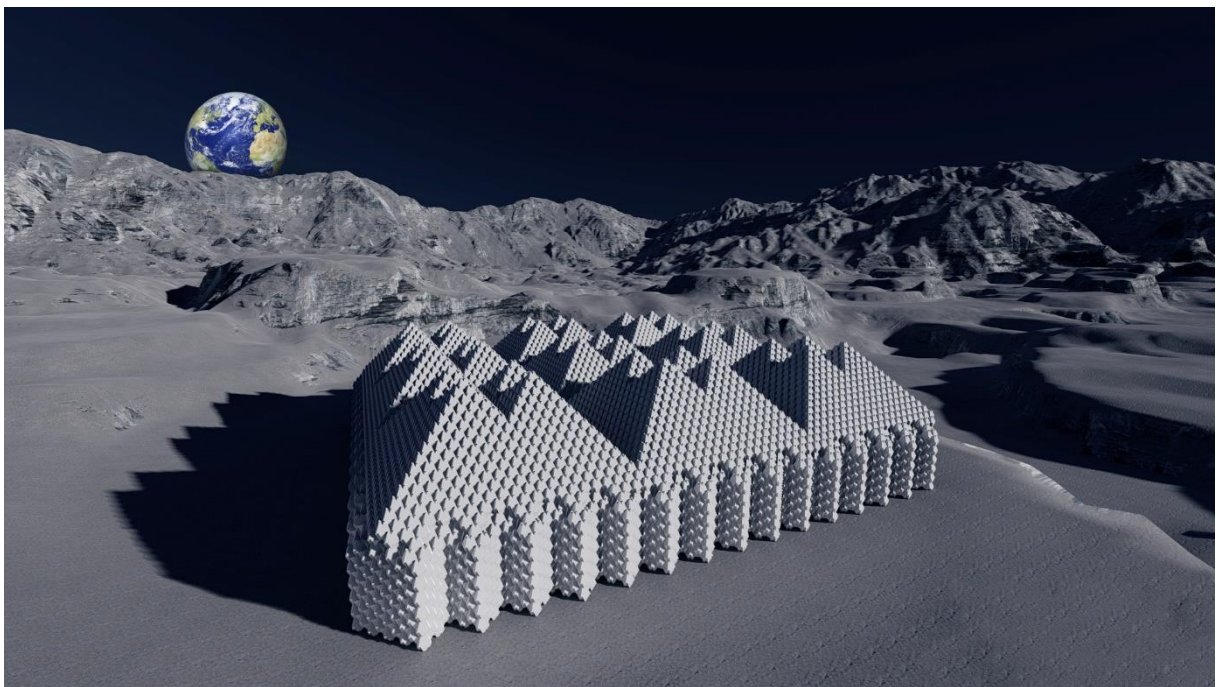


Figure 87 : Habitat final

Modulaire, notre habitat est construit à base de droxels. Droxels que nous pouvons préfabriquer sous scellé pour garantir une qualité d'impression constante. Les multiples murs, toits et sols apportent la protection contre les radiations nécessaire pour assurer un environnement à plusieurs niveaux d'exposition. La modularité nous permet d'offrir une surface de 101 [m<sup>2</sup>] tous les 106 jours en moyenne pour arriver à un total de quelques 909 [m<sup>2</sup>] de surface habitable.

La réflexion derrière ce concept est faite pour favoriser sa flexibilité. L'habitat est fonctionnel même à 50% de sa construction. Une mise à l'échelle est également possible, offrant la possibilité de l'adapter aux capacités des fusées, des missions et de leurs financements.

Enfin, le processus de décision derrière notre habitat minimise l'impact du choix des techniques de construction. Exclure le droxel pour se réorienter sur des imprimantes 3D mobiles est possible avec un minimum de modifications.

Le raisonnement final de cet exposé rejoint la conclusion suivante :

Le peu voire l'absence de données sur les sites lunaires et leurs ressources in situ nous force à calibrer nos modélisations avec des hypothèses issues du référentiel terrestre. Une validation de ces hypothèses en conditions lunaires est nécessaire. Les technologies de construction utilisables sur la Lune dépendront de la matière primaire disponible in situ et des procédés de transformation possibles. A nouveau, cette question demande des informations sur les conditions locales.

Pour finir, nous avons fait une hypothèse forte quant à notre processus de construction. Notre habitat lunaire est basé sur une idée d'automatisation du processus de construction. Or un tel processus n'est pas encore opérationnel sur Terre, comment pourrait-il l'être sur la Lune ? Des projets d'habitats imprimables sur site sont en développement. Des projets de construction par drones ou via des bras articulés pilotés à distance commencent également à être étudiés. La question n'est plus de savoir si ce concept verra le jour sur Terre mais de savoir quand et comment verra-il le jour ? Cette utilisation nouvelle de l'automatisation pourrait amener avec elle des innovations intéressantes dans le monde de la construction.

## 5 RÉFÉRENCES

1. Cambridge University. SPACE | signification, définition dans le dictionnaire Anglais de Cambridge. Accessed May 23, 2020. <https://dictionary.cambridge.org/fr/dictionnaire/anglais/space>
2. Drake N. Where, exactly, is the edge of space? It depends on who you ask. *National geographic*. Published online December 20, 2018. Accessed May 23, 2020. <https://www.nationalgeographic.com/science/2018/12/where-is-the-edge-of-space-and-what-is-the-karman-line/>
3. NASA - Jet Propulsion Laboratory. Mission Voyager - Did You Know? Accessed May 23, 2020. <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/did-you-know/>
4. Zell H. The Heliosphere. NASA. Published March 2, 2015. Accessed May 23, 2020. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/Heliosphere.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Heliosphere.html)
5. NASA - Jet Propulsion Laboratory. Voyager - Mission Status. Accessed May 23, 2020. <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/>
6. Planetary Science Communication team. In Depth | About the Moon. Moon: NASA Science. Accessed May 24, 2020. <https://moon.nasa.gov/about/in-depth>
7. CNEOS. Glossary - Astronomical unit. Accessed May 24, 2020. <https://cneos.jpl.nasa.gov/glossary/au.html>
8. Robert Frost - NASA. How Much Of A Threat Is Space Debris To The ISS? Forbes. Accessed May 24, 2020. <https://www.forbes.com/sites/quora/2019/03/28/how-much-of-a-threat-is-space-debris-to-the-iss/>
9. Meghan Bartels. Micrometeoroid impact on ISS. Space.com. Published August 30, 2018. Accessed May 24, 2020. <https://www.space.com/41684-dangerous-micrometeoroids-impacts-space-station.html>
10. Whipple FL. Meteorites and space travel. *The Astronomical Journal*. 1947;52:131. doi:10.1086/106009
11. Dr Alastair Gunn. How do spacecraft avoid asteroids and meteoroids? *BBC Science Focus Magazine*. Accessed May 24, 2020. <https://www.sciencefocus.com/space/how-do-spacecraft-avoid-asteroids-and-meteoroids/>
12. Atkinson N. Keeping Astronauts Safe from Meteoroids. Universe Today. Published March 29, 2011. Accessed May 24, 2020. <https://www.universetoday.com/84482/keeping-astronauts-safe-from-meteoroids/>
13. ESA. Types of orbits. Published March 30, 2020. Accessed May 24, 2020. [http://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits)
14. Dunbar B. Why Space Radiation Matters. NASA. Published April 13, 2017. Accessed May 24, 2020. <http://www.nasa.gov/analogs/nsrl/why-space-radiation-matters>
15. European Commission. Radiological Maps - Natural radiation. Accessed May 24, 2020. <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Atlas.aspx>

16. Radiological Society of North America. Patient Safety - Radiation Dose in X-Ray and CT Exams. Accessed May 24, 2020. <https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=safety-xray>
17. Tran L. How NASA Prepares Spacecraft for the Harsh Radiation of Space. NASA. Published June 7, 2019. Accessed May 24, 2020. <http://www.nasa.gov/feature/how-nasa-prepares-spacecraft-for-the-harsh-radiation-of-space>
18. Hoffpauir D. Understanding the Potential Dangers of Spacecraft Charging. NASA. Published December 29, 2016. Accessed May 24, 2020. <http://www.nasa.gov/offices/nesc/articles/understanding-the-potential-dangers-of-spacecraft-charging>
19. Planetary Science Communication team. Planets - Our solar System - NASA. NASA Solar System Exploration. Accessed May 25, 2020. <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview>
20. NASA - Jet Propulsion Laboratory. Let's Go to Mars! Calculating Launch Windows Activity. NASA/JPL Edu. Accessed May 25, 2020. <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/lets-go-to-mars-calculating-launch-windows/>
21. Zimmer C. Scott Kelly Spent a Year in Orbit. His Body Is Not Quite the Same. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2019/04/11/science/scott-mark-kelly-twins-space-nasa.html>. Published April 11, 2019. Accessed May 25, 2020.
22. Seemangal R. Space Radiation Devastated the Lives of Apollo Astronauts. *Observer*. Published July 28, 2016. Accessed May 25, 2020. <https://observer.com/2016/07/space-radiation-devastated-the-lives-of-apollo-astronauts/>
23. SpaceX - Falcon Heavy. Accessed May 25, 2020. <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>
24. SpaceX - Falcon 9. Accessed May 25, 2020. <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/>
25. SpaceX - Starship. Accessed May 25, 2020. <https://www.spacex.com/vehicles/starship/>
26. NASA. NASA - Durability of Materials - MISSE. Accessed May 25, 2020. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/misse.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/misse.html)
27. Jones HW. The Recent Large Reduction in Space Launch Cost. :10.
28. Frazier R. How to Protect Astronauts from Space Radiation on Mars. NASA. Published September 30, 2015. Accessed May 25, 2020. <http://www.nasa.gov/feature/goddard/real-martians-how-to-protect-astronauts-from-space-radiation-on-mars>
29. mars.nasa.gov. The Rover's Temperature Controls. Accessed May 26, 2020. <https://mars.nasa.gov/mer/mission/rover/temperature/>
30. Hickey GS. Thermal Insulation for Mars Surface Exploration. In: ; 1997:972466. doi:10.4271/972466
31. Kestelieir D. Human Centric Approach to Space Exploration. Published online 2018:4.
32. Morris M, Ciardullo C, Lents K, et al. Mars Ice House: Using the Physics of Phase Change in 3D Printing a Habitat with H<sub>2</sub>O. In: ; 2016.

33. Yashar M, Ciardullo C, Morris M, Pailes-Friedman R, Moses R, Case D. Mars X-House: Design Principles for an Autonomously 3D- Printed ISRU Surface Habitat. In: ; 2019.
34. Harbaugh J. Team Zopherus. NASA. Published August 2, 2018. Accessed May 26, 2020. [http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial\\_challenges/3DPHab/Zopherus-image8](http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/Zopherus-image8)
35. Mars incubator. Mars Incubator. Accessed May 26, 2020. <https://www.marsincubator.com/>
36. Dr. Sheila Ann Thibeault. Radiation Shielding Materials Containing Hydrogen, Boron, and Nitrogen: Systematic Computational and Experimental Study - Phase I. :31.
37. Brandt-Olsen C, Coward A, Horswill D. Mars Science City – Designing a future habitat in space. Published online 2018:8.

Annexe A : Maladies spatiales versus terrestres.....	108
Annexe B : Fiche technique - Canevas.....	109
Annexe C : Comparatif des types d'habitats .....	110
Annexe D : Grille d'évaluation - Canevas .....	111
Annexe E : Fiche technique N°1 - Mars Ice House .....	112
Annexe F : Grille d'évaluation N°1 - Mars Ice House.....	115
Annexe G : Grille d'évaluation - Mars Xhouse V1.....	118
Annexe H : Grille d'évaluation N°2 - Mars Xhouse V1.....	121
Annexe I : Fiche technique N°3 - Mars Xhouse V2 .....	123
Annexe J : Grille d'évaluation N°3 - Mars Xhouse V2 .....	126
Annexe K : Fiche technique N°4 - Zopherus .....	128
Annexe L : Grille d'évaluation N°4 - Zopherus.....	130
Annexe M : Fiche Technique N°5 - Mars Incubator .....	132
Annexe N : Grille d'évaluation N°5 - Mars Incubator .....	135
Annexe O : Fiche Technique N°6 - ESA Moon Base .....	137
Annexe P : Grille d'évaluation N°6 - Esa Moon Base.....	139
Annexe Q : Tableau comparatif des concepts existants .....	140
Annexe R : Sous-produits de l'extraction minière de l'hélium 3 .....	142
Annexe S : Comparaison des tendances des répartitions de contraintes : Dôme et Pyramide.....	143
Annexe T : Différences d'agencements de droxels pour des murs d'épaisseur simple, double et triple .....	144
Annexe U : Grille d'évaluation N°7 - Base Lunaire .....	145
Annexe V : Tableau comparatif des modules existants et de l'habitat imaginé .....	147
Annexe W : Droxelisation de l'habitat final.....	149
Annexe X : Déformations et répartitions des contraintes du module final .....	150

**Table 2 A comparison of some space-related health concerns with medical issues on Earth**

Research area	Space	Earth
Bone	Bone loss and increased fracture risk Increased kidney-stone formation Injury to soft connective tissue	Osteoporosis and other bone disorders
Cardiovascular	Postflight orthostatic intolerance Cardiac atrophy Heart rhythm disturbances	Orthostatic intolerance Heart disorders, such as sudden cardiac death due to heart rhythm disturbances
Performance/Sleep	Errors due to sleep loss and disruption of the biological clock	Sleep problems due to jet lag, shift work and extended work schedules Accidents due to sleepiness
Immunology/Infection	Activation of dormant viruses in the body Increased infection risk Space flight-related anaemia Interference with wound healing	Immune system disorders Viral outbreaks due to stress conditions (shingles, cold sores) Anaemia and other blood disorders
Muscle	Muscle loss and atrophy	Muscle wasting diseases Muscle weakening due to prolonged bed rest, immobilization, nerve crush injury and ageing
Neurovestibular	Space motion sickness and body orientation problems Re-entry vertigo Postflight dizziness, balance, posture and gaze stability	Vertigo and other balance disorders
Radiation effects	Cancer Damage to central nervous system Cataracts and other diseases	Risks from exposure to naturally occurring and work-related radiation

## **Fiche technique N°0 – Serpentin Lunaire**

<b>Concepteurs</b> : ESA	<b>Cadre</b> : Objectif Lune 2030	
<b>Technologie</b> : Module gonflable	<b>Surface</b> : 100m <sup>2</sup>	<b>Objectif</b> : Lune

### **1. Description du concept**

*\*\*\* Cet exemple est une structure qui n'existe pas. \*\*\**

*La structure est un habitat importé de la Terre et déployé dans une grotte à l'abri des intempéries, où les radiations sont moindres et la température constante.*

*Images : Description de rendus pour illustrer le concept.*

### **2. Innovation / éléments particuliers**

*La membrane importée est de forme cylindrique et se déploie telle un serpent. Le but est d'exploiter la dimension horizontale avec la possibilité de créer des espaces de longueurs différentes. L'idée est de créer un tunnel extensible capable de s'adapter aux différents besoins d'une mission.*

Catégorie	Survie	Durable	Opérationnel
<b>Proportion de ressources terrestres</b>	Dépendance terrestre totale. Ce genre d'habitat serait transporté puis déployé sur place.	Dépendance de la Terre pour les ressources impossibles à synthétiser sur place.	Faible voire nulle.
<b>Proportion de ressources in situ</b>	Très faible voire nulle. Construire avec les ressources locales demande des engins de construction or la majorité du volume transportable disponible est déjà consacré à la structure de l'habitat.	Forte, l'habitat est pensé autour de leurs utilisations.	Maximum
<b>Besoin en cargo : Matériel de construction (rover, imprimantes 3D, ...)</b>	Très faible voire nul. Seuls quelques engins scientifiques seraient inclus dans la mission afin de tester le potentiel de ces méthodes de constructions.	Forte, pour exploiter les ressources in situ, de la machinerie lourde est nécessaire. De l'engin d'extraction minier jusqu'aux machines de construction.	Une fois le matériel essentiel livré, nul.
<b>Evolution possible de la structure</b>	Evolution dépendante des futures cargaisons. Il faut envoyer un module entier pour faire évoluer la structure.	Un faible apport en ressources ex situ permet d'agrandir la structure facilement avec un import de matière minimal.	Infinie, être indépendant de la Terre permet une expansion "sans limite".
<b>Politique</b>	Le cout d'envoi d'un kg de ressources quelconques dans l'espace est extrêmement élevé. Chaque kg envoyé pour une structure non durable est une potentielle perte à long terme. Si l'objectif est de court terme, l'habitat de survie sera le plus efficace.	Accepter que le temps nécessaire avant d'avoir une base fonctionnelle sera long.	Créer une telle colonie demande une somme astronomique ainsi qu'un programme de colonisation international à l'épreuve des conflits terrestres.

Critères	Sous-critères	Nom de la structure	Points forts	Points faibles
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Description du concept</i>	<i>Analyse</i>	<i>Analyse</i>
	Matériel de construction	<i>Description du concept</i>	<i>Analyse</i>	<i>Analyse</i>
	Durée de construction	...	...	...
	Réparation/entretien	...	...	...
<b>2. Structure</b>	Radiations	...	...	...
	Températures	...	...	...
	Pression et gravité	...	...	...
	Poussière	...	...	...
	Sollicitations extraordinaires	...	...	...
<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	...	...	...
	Flexibilité	...	...	...
	Temps d'intégration	...	...	...

## Fiche technique N°1 – Mars Ice House

<b>Concepteurs</b> : SEArch	<b>Cadre</b> : NASA Centennial Challenge 2015	
<b>Technologie</b> : Impression 3D à base de glace	<b>Surface</b> : 92m <sup>2</sup>	<b>Objectif</b> : Mars

### 1. Description du concept

Mars Ice House est un habitat multicouches construit à base de glace subsurface martienne. La structure de l'habitat en partant de l'intérieur est la suivante :

1. L'atterrisseur en guise de noyau central
2. Une couche isolante d'aérogel importé, épaisseur non déterminée
3. Une couche de 10 cm d'épaisseur d'un mélange de glace martienne et de silice terrestre
4. Un volume tampon d'atmosphère martienne
5. Une couche de 10 cm d'épaisseur d'un mix de glace martienne et de silice terrestre
6. Une membrane externe pressurisée en tétrafluorethylène

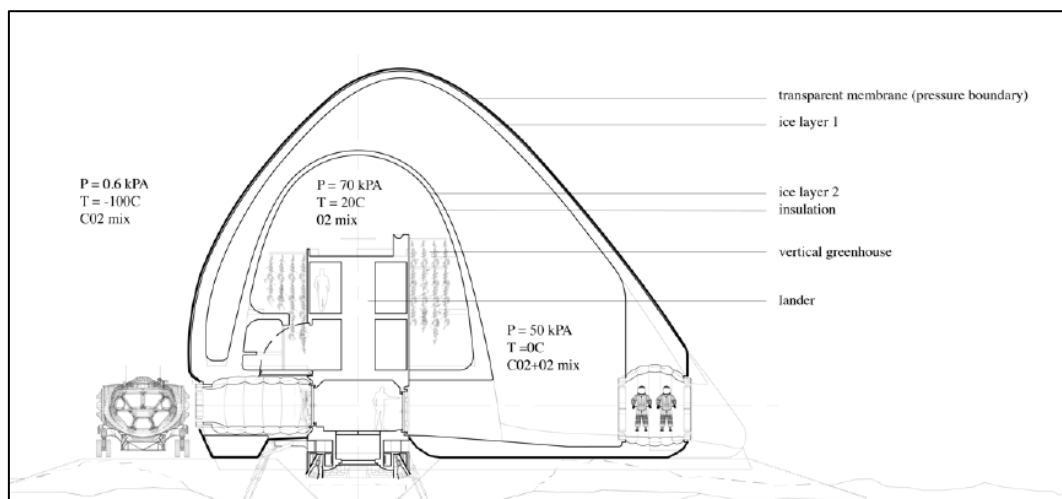


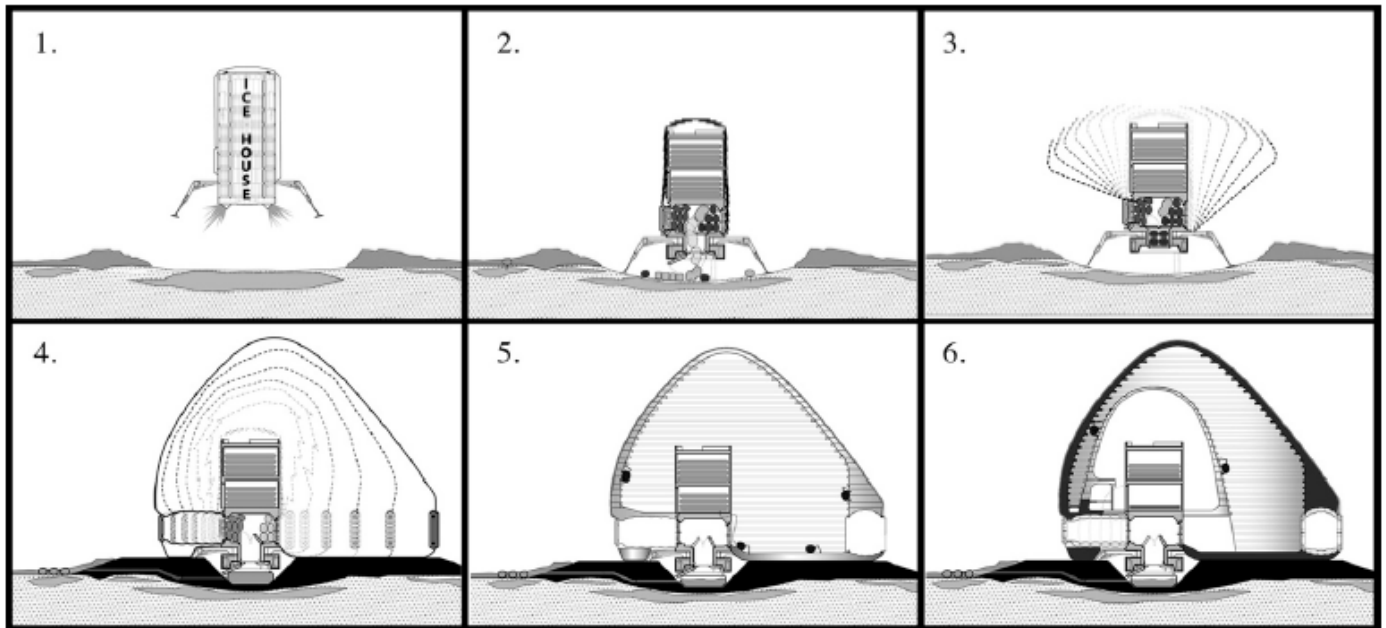
Figure 88 : Coupe schématique de l'habitat – Crédits : Mars Ice House

Ce système de multicouches permet d'assurer une protection optimale contre les radiations au sein de l'habitat ainsi qu'un confort thermique.

La construction de la structure suit le processus suivant :

1. L'atterrisseur se pose sur le site présélectionné.
2. Déploiement des robots excavateurs qui vont préparer le terrain autour du lanceur et récolter la glace nécessaire à la construction. Robots excavateurs voués à rester à l'extérieur de la structure.
3. Déploiement de la membrane pressurisée et des ponts préfabriqués autour du lanceur pour créer un environnement clos.
4. Construction des murs et supports en glace à l'aide d'imprimantes montées sur des rover araignées

Un schéma de la séquence de construction peut se résumer comme suit :



**Figure 7. Concept of Operations and Deployment (1) Vertical Landing (2) Release of robotic water extraction (3-4) Deployment of Pressure Membrane (5-6) Interior Printing with climbing robotics.**

Figure 89 : Séquence de construction – Crédits : Mars Ice House

La structure de la Mars Ice House est autoportante, autant durant sa construction qu’une fois terminée. Aucun support additionnel n’est à prévoir pour la réaliser.

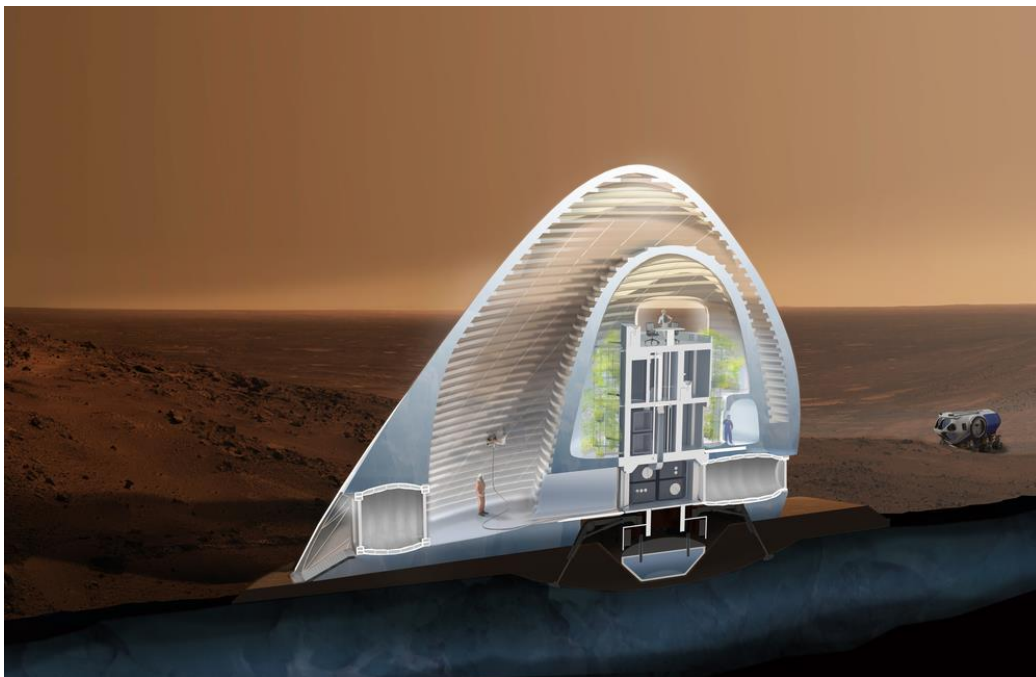


Figure 90 : Rendu du concept – Crédits : Mars Ice House

Enfin, la gestion de la sublimation de la glace vers l’atmosphère martienne est assurée par la membrane extérieure. Celle-ci garantit une pression suffisante pour que la surface externe de la glace ne puisse ni fondre ni se sublimer. La surface interne, celle la plus proche de l’habitat où il fera 20°C est quant à elle isolée via une épaisse couche d’aérogel.

## 2. Innovation / éléments particuliers

Ce modèle présente 3 innovations intéressantes.

### 1. *Le choix de la glace comme matériau de construction*

Contrairement à la majorité des structures extraterrestres, Mars Ice House est basée sur la glace et non la régolithe. La première raison est que du perchlorate,  $\text{ClO}_4^-$  a été relevé dans la régolithe lunaire et martienne, une substance toxique pour les humains qui implique une parfaite isolation de la structure en régolithe. La deuxième raison est que l'impression de la régolithe demande plus d'énergie que l'impression avec l'eau.

### 2. *Les rovers araignées*

Au lieu de se servir d'une imprimante ayant un bras assez grand pour imprimer une structure depuis le sol ou depuis une plateforme montante, les rovers araignées sont des rover qui se servent de la structure elle-même comme échafaudage.



Figure 91 : Spirale guide pour le rover araignée – Crédits : Mars Ice House

Le rover se servirait d'une bordure imprimée sur le mur et peut ainsi monter en même temps que la structure.

### 3. *La membrane externe*

L'intérêt premier de la membrane externe est de créer un environnement de pression et de températures adéquat pour l'impression 3D à base d'eau. Elle permet également d'empêcher la sublimation de la glace vers l'atmosphère martienne.

Le fait de construire au sein d'une membrane permet de se déplacer entre les différents espaces de façon fluide, sans sas ou combinaison complète. Le volume créé par la membrane détermine le volume dans lequel nous pouvons construire. Approche qui diffère des concepts basés sur la régolithe et les modules déployables. L'idée classique est de construire une structure externe en régolithe pour ensuite y déployer une membrane pressurisée.

## Grille d'évaluation N°1 - Mars Ice House

Critères	Sous-critères	Description	Points forts	Points faibles
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : Membrane, silice et aérogel In situ : Eau</i>	<i>La proportion de matériaux importés est faible et facilement transportable. La silice et l'aérogel sont très compactables. L'énorme avantage du mix eau/silice est sa recyclabilité. En faisant fondre le mélange, l'eau se sépare naturellement de l'additif. Ce qui rend le mélange recyclable à 100%.</i>	<i>La taille de la membrane limite l'expansion de la structure dans le temps. Une membrane et un lanceur représentent ensemble un seul habitat, il n'y a pas la possibilité de coupler une membrane à une autre.</i>
	Matériel de construction	<i>Rover excavateurs et minibuilders</i>	<i>Les minibuilders ne sont pas limités par la taille de la structure. Les rover excavateurs, voués à rester hors de l'habitat pour ne pas le contaminer peuvent être réutilisés pour la préparation d'autres habitats. Ce qui représente un volume économisé considérable dans une fusée.</i>	<i>La taille maximale de structures est dépendante de la longueur de tuyaux disponibles pour alimenter les minibuilders.</i>
	Durée de construction	<i>Non déterminée</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
	Réparation/entretien	<i>Via les minibuilders</i>	<i>Les minibuilders ont la capacité de faire de la maintenance sur la totalité de la structure grâce à leur bordure en spirale montant jusqu'au sommet.</i>	<i>Seule la face intérieure de la couche externe et la face extérieure de la couche interne sont accessibles. Les autres faces, les plus susceptibles de sublimer ou se liquifier sont rendues inaccessibles par la membrane et l'isolant.</i>
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>Protection assurée par 20cm de glace, un volume</i>	<i>La glace bloque les ondes de courtes longueurs d'ondes et laisse passer la lumière</i>	<i>/</i>

		<i>tampon d'atmosphère martienne et une couche d'isolant</i>		
	Températures	<i>Système multicouches</i>	<i>La combinaison de la glace, du volume tampon et de l'isolant est prometteuse. Le volume tampon entre les couches de glace, rempli d'atmosphère martienne est à 0°C et l'habitat à 20°C. La variation de température sur Mars est donc plus facilement amortie.</i>	<i>Gestion thermique de la glace délicate, une erreur et la structure fond ou sublime.</i>
	Pression et gravité	<i>La membrane externe reprend les efforts de la pression interne</i>	<i>Avoir une membrane externe crée un immense volume à la même pression, ce qui permet de construire sans la contrainte du différentiel de pression. La membrane assure la reprise de tous les efforts de traction.</i>	/
	Poussière	<i>Problème non considéré</i>	<i>Même si non considéré, le volume tampon représente une sécurité supplémentaire.</i>	/
	Sollicitations extraordinaires	<i>Problème non considéré</i>	/	<i>Que se passe-t-il si la membrane externe est percée ? Comment la réparer avant une dépressurisation complète ? Comment atteindre la zone endommagée si celle-ci se trouve 10m de hauteur ?</i>
<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Fiche technique</i>	<i>La glace permet d'éviter l'effet bunker et de favoriser les interactions avec le monde extérieur. La présence d'un volume tampon hors de l'habitat est un plus pour les expériences scientifiques en atmosphère extraterrestre. Les astronautes disposent d'un plus grand espace pour faire des manipulations sans devoir porter de combinaisons intégrales.</i>	<i>La glace peut également donner un sentiment de vulnérabilité vis-à-vis de la planète visitée. Une anomalie dans l'isolation ou la pressurisation peut rendre la structure instable rapidement.</i>

	Flexibilité	<i>Constructions centrées sur le lanceur et limitée par la membrane.</i>	<i>La membrane garanti des conditions moins extrême et permet d'augmenter les possibilités de construction intérieures.</i>	<i>Le fait que l'habitat soit confiné dans un espace clos rend toute expansion impossible. La seule flexibilité de la structure est que plusieurs "tours" peuvent être imaginées autour du noyau central.</i>
	Temps d'intégration	<i>Temps de construction et d'intégration inconnus</i>	/	/

## Fiche technique N°2 – Mars Xhouse V1

<b>Concepteurs</b> : SEArch+ & Apis Cor	<b>Cadre</b> : NASA Centennial Challenge 2015	
<b>Technologie</b> : Impression 3D à base de régolithe	<b>Surface</b> : N/A	<b>Objectif</b> : Mars

### 1. Description du concept

Mars XHouse V1 est un habitat en 2 parties, une structure externe en régolithe et 2 modules gonflables importés en dessous de la coque en régolithe.



Figure 92 : Rendu du concept - Crédits : Mars Xhouse V1

La structure de l'habitat peut être décrite de la façon suivante :

1. 2 couches de régolithe se superposant formant la coque externe de protection comme illustré sur la **Figure 94**
2. 2 modules gonflables y sont déployés, indépendants l'un de l'autre
3. Un sas relie les 2 modules

La construction de la structure suit le processus suivant :

1. L'atterrisseur se pose et décharge le matériel
2. Les bras d'impression se mettent en place et les rovers d'excavation aménagent le site pour les fondations tout en récoltant la régolithe nécessaire à la construction
3. Impression des fondations
4. Déploiement des modules gonflables et des SAS de connexion
5. Impression de la double coque en régolithe

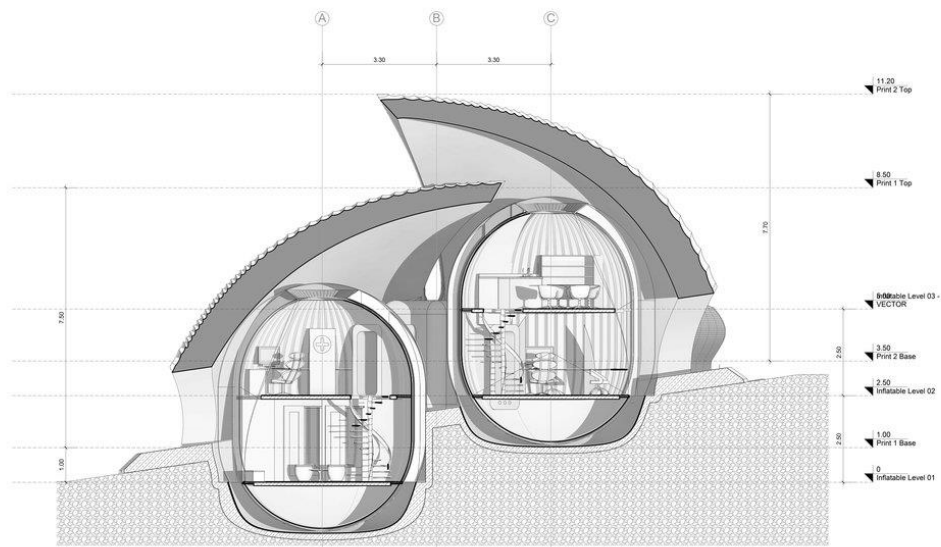


Figure 94 : coupe schématique – Crédits : Mars Xhouse V1

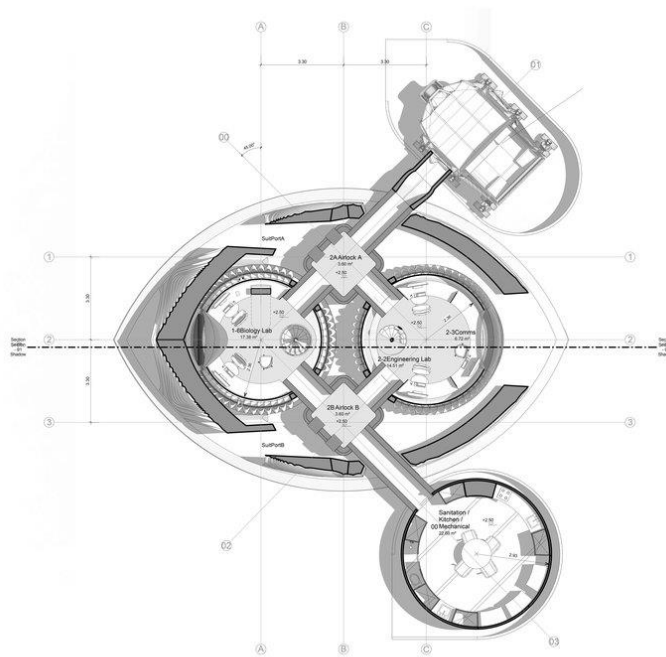


Figure 95 : Vue du dessus – Crédits : Mars Xhouse V1

Enfin, la structure proprement dite de la coque est pensée pour optimiser les ouvertures vers l'extérieur, l'intégration de la lumière et le protection contre les radiations. L'occupation des espaces et leurs fonctions ont défini la protection nécessaire.

## 2. Innovation / éléments particuliers

### 1. La gestion de la lumière naturelle et des radiations.

L'emplacement des ouvertures dans la structure permet de favoriser la pénétration de la lumière sans compromettre la protection contre les radiations. Les radiations horizontales doivent traverser une plus grande portion de l'atmosphère martienne et sont donc moins puissantes. Ce qui permet des ouvertures pour la lumière. Il en va de même pour le chevauchement des coques, l'ouverture horizontale permet de faire rentrer de la lumière et de la diffuser dans l'habitat.

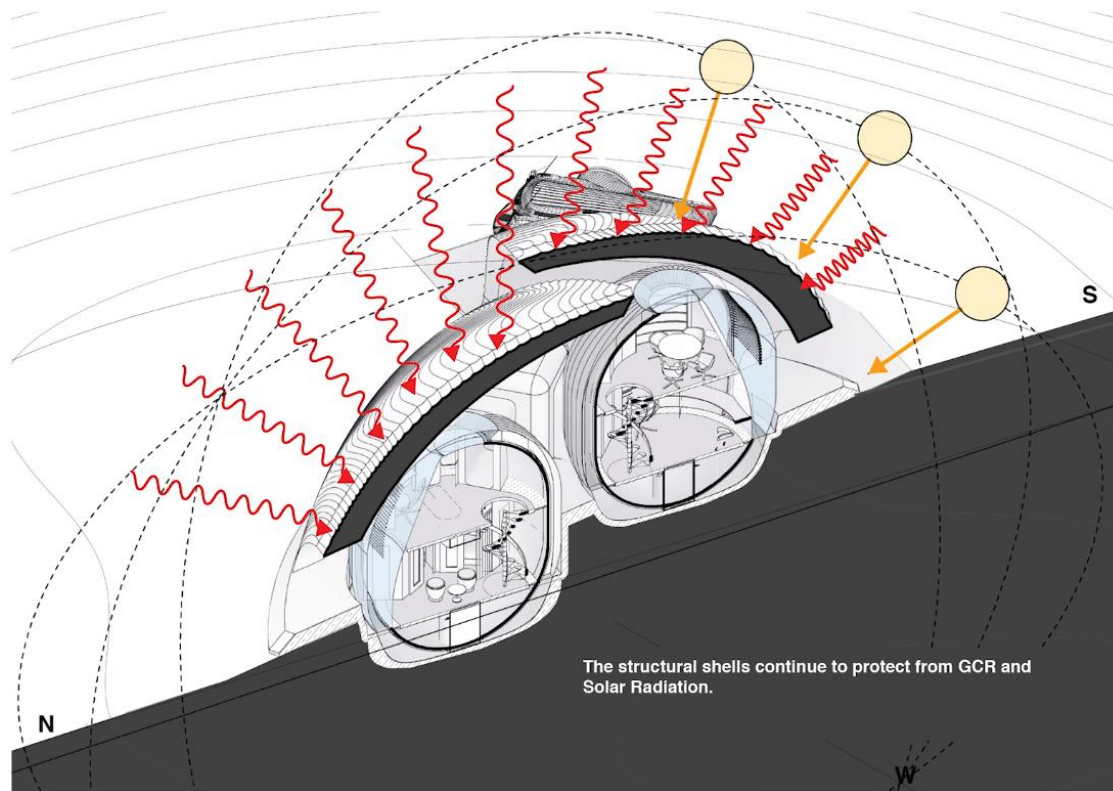


Figure 96 : Gestion de la lumière – Crédits : Mars Xhouse V1

<b>Grille d'évaluation N°2 - Mars Xhouse V1</b>				
<b>Critère n°</b>	<b>Sous-critère n°</b>	<b>Description</b>	<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : SAS et modules gonflables In situ : régolithe</i>	<i>Le béton n'est pas sollicité en traction.</i>	<i>L'évolution de l'habitat est conditionnée par les apports en modules terrestres.</i>
	Matériel de construction	<i>Bras d'impression mobiles, Rovers excavateurs</i>	<i>Une fois déployé, ils peuvent servir pour une multitude d'habitat.</i>	<i>La taille des bras limite la taille des structures.</i>
	Durée de construction	<i>Non déterminée</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
	Réparation/entretien	<i>Via les bras d'impression mobiles</i>	<i>La face externe de la coque peut facilement être renforcée ou réparée étant donné qu'elle est accessible à 100% par les robots.</i>	<i>Une défaillance d'un module gonflable nécessite des apports terrestres pour sa réparation. Un manque de pièces de rechange ou l'incapacité de produire la pièce sur place entrainerait la ruine du module.</i>
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>Système de double coque en régolithe</i>	<i>Chaque espace est protégé selon son utilisation.</i>	<i>/</i>
	Températures	<i>Problème non considéré</i>	<i>Le béton est capable de reprendre une charge thermique conséquente. La fissuration de la coque n'entraîne pas la ruine de l'habitat, ce qui est un avantage considérable. Coque qui met les modules à l'ombre en continu et assure une température plus uniforme.</i>	<i>L'épaisseur des modules gonflables semble trop faible pour jouer un rôle isolant et faciliter la gestion de la température interne.</i>
	Pression et gravité	<i>Modules gonflables et SAS</i>	<i>Les modules terrestres reprennent la traction due à la différence de pression. Traction qu'un le béton martien non renforcé ne sait pas reprendre. La</i>	<i>/</i>

			<i>structure en régolithe fonctionne uniquement en compression.</i>	
	Poussière	<i>Modules gonflables et SAS</i>	<i>Chaque section de l'habitat peut être isolé du reste en cas de contamination.</i>	/
	Sollicitations extraordinaires	<i>2 sorties de secours vers l'extérieur, un rover et 2 zones dites de sécurité sont prévus.</i>	<i>L'équipage a le temps de se mettre en combinaison pour évacuer l'habitat en toute sécurité.</i>	<i>Ces zones ne sont pas prévues pour abriter l'équipage pendant une longue période.</i>
<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Fiche technique</i>	<i>L'étude de la lumière permet d'augmenter les ouvertures sur l'extérieur ainsi que l'apport de lumière naturelle.</i>	/
	Flexibilité	<i>Modules gonflables et double coque en régolithe</i>	/	<i>Les espaces et leurs utilisations sont prédéfinis. Il n'y a pas de place pour une évolution de l'habitat, que ce soit de l'intérieur ou vers l'extérieur.</i>
	Temps d'intégration	<i>Temps de construction et d'intégration inconnus</i>	/	/

## Fiche technique N°3 – Mars Xhouse V2

<b>Concepteurs</b> : SEArch+ & Apis Cor	<b>Cadre</b> : NASA Centennial Challenge 2015	
<b>Technologie</b> : Béton de régolithe renforcé	<b>Surface</b> : N/A	<b>Objectif</b> : Mars

### 1. Description du concept

Mars Xhouse V2 a l'allure d'une tour aux murs concaves. La forme générale permet de compenser le fait que le béton est peu renforcé tout en étant capable de reprendre de la traction.

La composition de la structure de l'extérieur vers l'intérieur :

1. Une couche structurelle et protectrice de béton de régolithe.
2. Une grillage de fibre de basalte produit localement en guise de renforcement.
3. Une couche d'isolant pour éviter toute contamination de l'habitat par la régolithe.
4. Une vitre enclavée dans la couche intérieure pour limiter les radiations (et permettre la lumière de rentrer).
5. Une couche étanche de polyéthylène à haute densité.

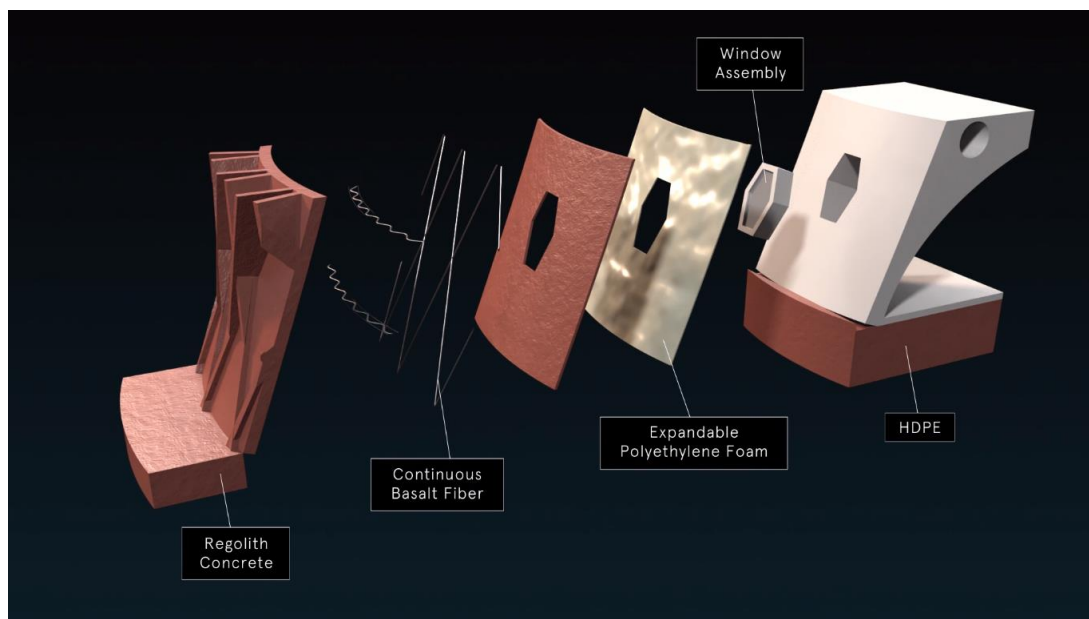


Figure 97 : Composition du mur – Crédits : Mars Xhouse V2

La phase de construction peut se résumer comme suit :

1. Un bras d'impression monté sur une plateforme montante imprime la fondation.
2. Il imprime ensuite le noyau central qui contiendra les espaces mouillés et techniques.
3. La tour proprement dite monte avec un décalage par rapport au noyau central, toujours par impression.
4. Une fois la tour terminée, un dôme est déployé au sommet en guise de toit et est rempli d'eau pour sceller l'environnement.
5. Enfin, l'escalier de secours est imprimé sur le pourtour extérieur de la tour.



Figure 99 : Rendu du concept – Crédits : Mars Xhouse V2

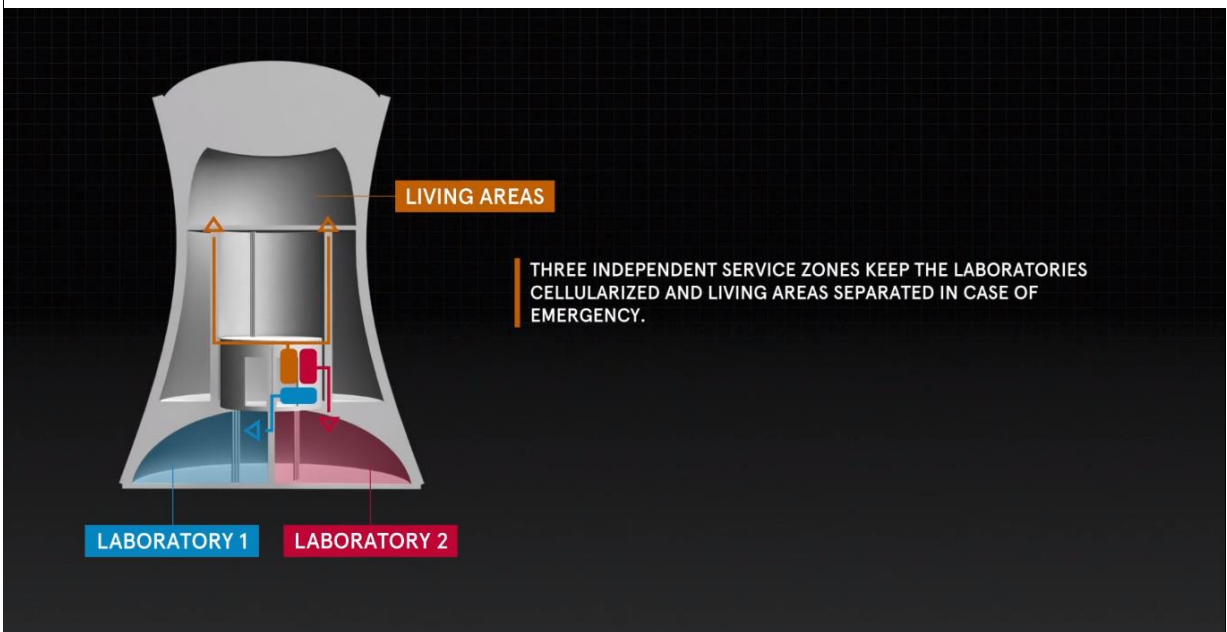


Figure 98 : Circulations – Crédits : Mars Xhouse V2

## 2. Innovation / éléments particuliers

### 1. Structure concave

La forme de la structure permet d'utiliser un béton de régolithe légèrement renforcé en traction. La combinaison avec le dôme rempli d'eau assure un étanchéité et une distribution des forces optimales.

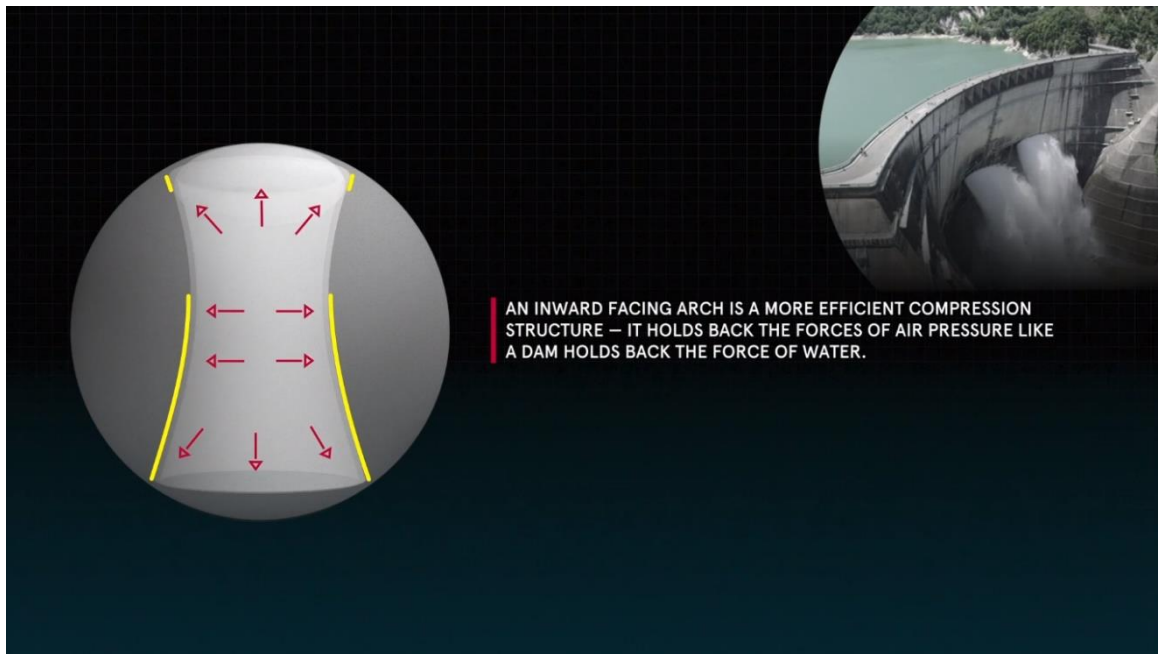


Figure 100 : Schéma des forces de pression – Crédits : Mars Xhouse V2

<b>Grille d'évaluation N°3 - Mars Xhouse V2</b>				
<b>Critère n°</b>	<b>Sous-critère n°</b>	<b>Description</b>	<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : Dôme supérieur In situ : Régolithe, basalt, polyéthylène</i>	<i>La majorité de la structure est basée sur la production locale.</i>	<i>Le dôme est essentiel pour la finition d'un habitat, un apport terrestre pour un nouvel habitat est donc indispensable.</i>
	Matériel de construction	<i>Bras d'impression monté sur une plateforme montante</i>	<i>Possibilité d'impression une tour de plus de 5 étages.</i>	<i>Potentielle instabilité de l'installation et besoin de pompage conséquent pour envoyer le béton au sommet.</i>
	Durée de construction	<i>60 jours</i>	<i>Un équipage pourrait superviser la construction depuis un habitat de survie pendant cette période et assurer la livraison d'un produit fonctionnel.</i>	<i>/</i>
	Réparation/entretien	<i>Bras d'impression monté sur une plateforme montante</i>	<i>La couche protectrice en régolithe est facilement accessible, de même pour la couche intérieure de polyéthylène à haute densité.</i>	<i>Tout défaut d'armatures ou d'isolation de la régolithe est difficilement accessible.</i>
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>Couche protectrice mixte d'épaisseur variable</i>	<i>Chaque espace est protégé sur base de son utilisation.</i>	<i>/</i>
	Températures	<i>Une couche d'isolation</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
	Pression et gravité	<i>Forme hyperbolyque de la tour</i>	<i>La forme des murs est pensée pour reprendre la traction due à la pression en minimisant le grillage de renforcement.</i>	<i>/</i>
	Poussière	<i>SAS</i>	<i>Chaque section de l'habitat peut être isolé du reste en cas de contamination.</i>	<i>/</i>
	Sollicitations extraordinaires	<i>SAS et escalier de secours externes</i>	<i>Chaque section de l'habitat peut être isolé du reste en cas de contamination. Un escalier indépendant de la structure permet également l'évacuation de la structure.</i>	<i>/</i>

<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Fiche technique</i>	<i>L'étude de la lumière permet d'augmenter les ouvertures sur l'extérieur ainsi que l'apport de lumière naturelle.</i>	/
	Flexibilité	<i>Structure principalement imprimée</i>	<i>L'architecture intérieur peut être revisitée en fonction des besoins. Chaque nouvel habitat peut être imprimé en fonction des besoins de la missions qu'il accueille.</i>	<i>Il n'est pas possible de combiner 2 tours ensembles.</i>
	Temps d'intégration	<i>Temps d'intégration inconnu</i>	/	/

## Fiche technique N°4 – Zopherus

<b>Concepteurs</b> : Rogers, Arkansas	<b>Cadre</b> : NASA's 3D Printed Habitat Challenge	
<b>Technologie</b> : Béton de régolithe renforcé en PEHD	<b>Surface</b> : N/A	<b>Objectif</b> : Mars

### 1. Description du concept

L'équipe Zopherus propose un modèle modulaire. Il s'agit d'un ensemble de petits modules reliés entre eux par des sas. Sas et autres éléments d'étanchéités importés depuis la Terre.

La structure se compose simplement d'une couche de béton martien coulé entre 2 couches de PEHD assurant un support pour l'impression en même temps qu'un renforcement. Le béton jouera un rôle structurel ainsi que d'absorption des radiations. La couche de PEHD externe agit comme une protection thermique pour limiter l'influence des variations de températures sur le béton ainsi qu'un apport structurel. La couche d'HDPE interne, structurelle aussi, permet d'isoler la régolithe de l'habitat.

La construction d'un module de l'habitat se fait suivant le processus suivant :

1. Des rovers excavateurs préparent la surface et récoltent la matière première.
2. L'atterrisseur mobile se sépare des moteurs et vient se placer sur le site sélectionné. Il se scelle sur le sol pour créer un environnement fermé, stable pour l'impression.
3. L'impression du module se fait avec un système de 2 têtes, une de PEHD et une de régolithe se servant de la précédente comme support d'impression.
4. Les ouvertures et SAS sont placés pendant l'impression avec des bras robotisés.
5. Une fois le module fini, la capsule d'impression se déplace sur le site suivant et réitère le processus.

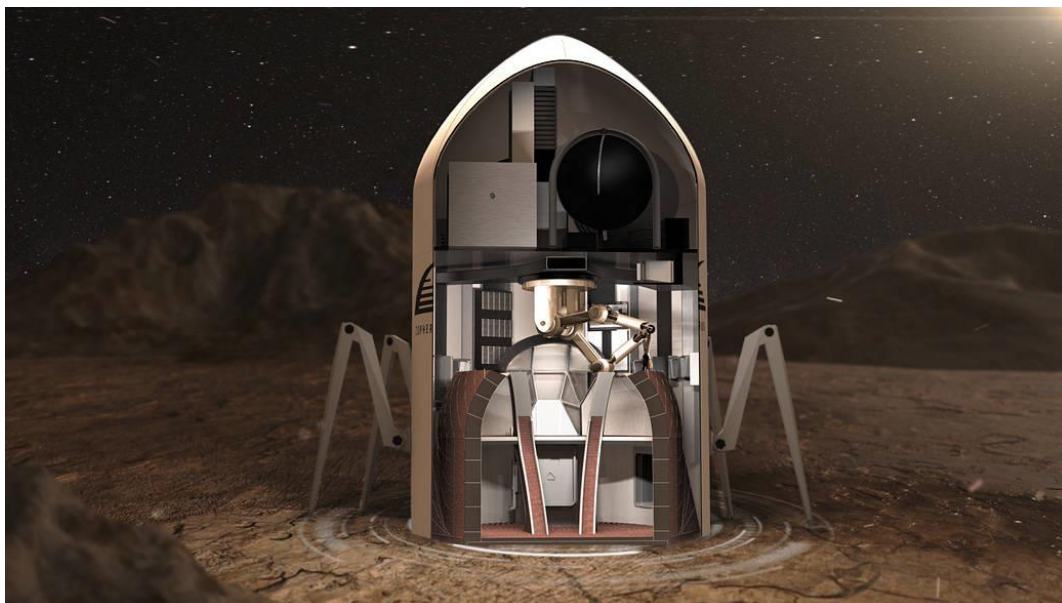


Figure 101 : Impression sous scellé- Crédits : Zopherus

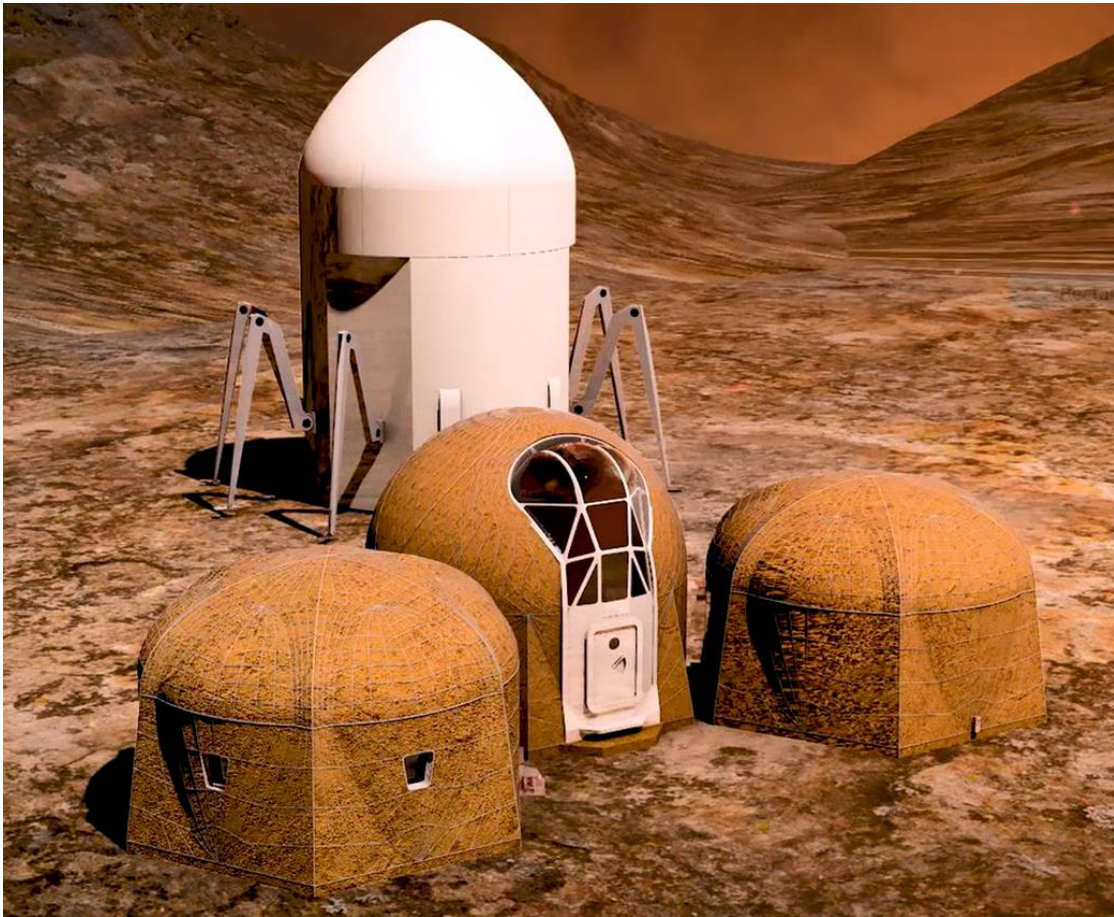


Figure 102 : Rendu du concept – Crédits : Zopherus

## 2. Innovation / éléments particuliers

Le concept présente 2 innovations notables.

### 1. **Un processus d'impression sous scellé**

L'isolation du processus d'impression permet d'assurer que celui-ci se déroulera sans anicroche. Les conditions extérieures n'auront pas d'impact sur la qualité de la structure tandis que l'imprimante est moins sujette à des soucis d'instabilité (dus à des vents forts, un impact, ...). La précision du processus serait potentiellement améliorée.

### 2. **Un concept modulaire**

Contrairement aux précédents modèles, Zopherus peut être étendu à l'infini horizontalement. Le modèle est extensible et uniquement dépendant de son imprimante, capable de se déplacer en fonction des besoins. Les seuls apports terrestres à prévoir sont les SAS de connexions entre les modules. L'habitat est donc ouvert à une évolution de ces espaces au cours de la mission, une perspective très intéressante pour le facteur humain des missions.

<b>Grille d'évaluation N°4 - Zopherus</b>				
<b>Critère n°</b>	<b>Sous-critère n°</b>	<b>Description</b>	<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : SAS In situ : PEHD et béton de régolithe</i>	<i>La dépendance terrestre est minime avec comme seul apport un SAS.</i>	/
	Matériel de construction	<i>Rovers excavateurs et imprimante mobile</i>	<i>L'imprimante sous cloche assure un environnement stable pour l'impression et une qualité de structure supérieure.</i>	<i>La taille des modules est conditionnées par la taille de la cloche.</i>
	Durée de construction	<i>Non déterminée</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
	Réparation/entretien	<i>Rovers excavateurs et imprimante mobile</i>	<i>Les couches d'HDPE sont accessibles depuis l'intérieur et l'extérieur. La taille des modules permet de facilement les isoler en cas de réparation sans compromettre l'utilisation du reste de l'habitat.</i>	/
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>2 couches de PEHD et une de béton de régolithe.</i>	<i>Concept de protection passive, simple et facile à adapter en faisant varier son épaisseur.</i>	<i>Une couche unique, même mixte, offre potentiellement un protection trop faible lors des évènements radiatifs les plus extrêmes.</i>
	Températures	<i>Bardage de PEHD recouvrant la structure</i>	/	/
	Pression et gravité	<i>Étanchéité assurée par l'enveloppe de PEHD intérieure.</i>	/	/
	Poussière	<i>Problème non considéré</i>	/	/
	Sollicitations extraordinaires	<i>Le module d'impression sert également d'abri d'urgence.</i>	<i>Les équipages disposent d'une solution de repli semi-permanent en cas d'accident.</i>	<i>La taille du module est limitée.</i>

<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Fiche technique</i>	<i>Chaque habitat sera composé d'autant de modules que nécessaire et adapté en fonction de la taille des équipages et des besoins des missions.</i>	<i>La taille des modules risque de limiter les différents aménagement possibles sans créer des espaces minuscules.</i>
	Flexibilité	<i>Habitat modulable</i>	<i>L'équipage peut étendre son habitat (dans la mesure de SAS disponibles) et ainsi faire évoluer leur environnement durant leur mission ou de mission en mission.</i>	/
	Temps d'intégration	<i>Temps de construction et d'intégration inconnus</i>	/	/

## Fiche technique N°5 – Mars Incubator

<b>Concepteurs</b> : Mars Incubator	<b>Cadre</b> : NASA Centennial Challenge	
<b>Technologie</b> : Panneaux préfabriqués en régolithe	<b>Surface</b> : N/A	<b>Objectif</b> : Mars

### 1. Description du concept

Mars Incubator est un habitat construit à base de panneaux préfabriqués en régolithe. Les panneaux en question, hexagonaux ou pentagonaux, renforcés de fibre de basalte et recouverts d'une couche interne de PEHD peuvent être moulés selon différents modèles (portes, murs, fenêtres, ...).

Les fondations et autres éléments structuraux maintenant le tout en place sont imprimés en béton de régolithe. Enfin, les panneaux sont mis en pré-tension avec un système de câbles de basalte pour reprendre l'effort dû à la pression interne.

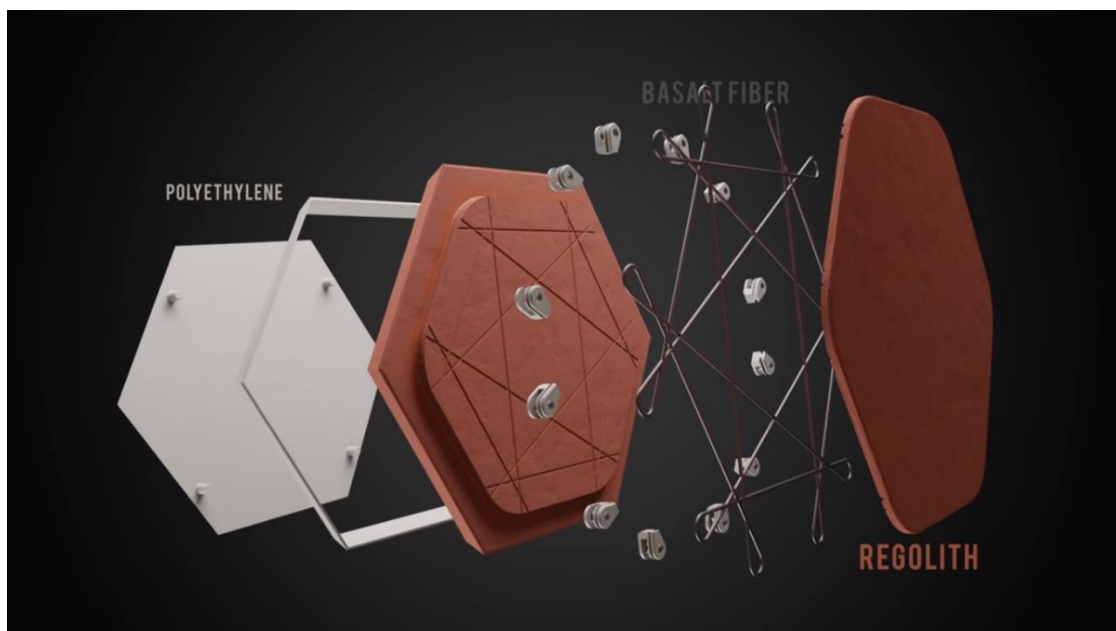


Figure 103 : Composition d'un panneau préfabriqué – Crédits : Mars Incubator

La construction de l'habitat suit le processus suivant :

1. Impression des fondations et des supports structuraux.
2. Moulage de panneaux de régolithe (selon les besoins).
3. Mise en place des panneaux avec l'assistance d'un bras robotisé.
4. Une fois un module fermé, mise en tension des panneaux avec un système de câbles en fibre de basalte.
5. Installation des SAS et pressurisation.

Une fois le site d'impression installé et les premiers modules construits, une expansion de l'habitat est aisément envisageable en répétant le processus précédant.

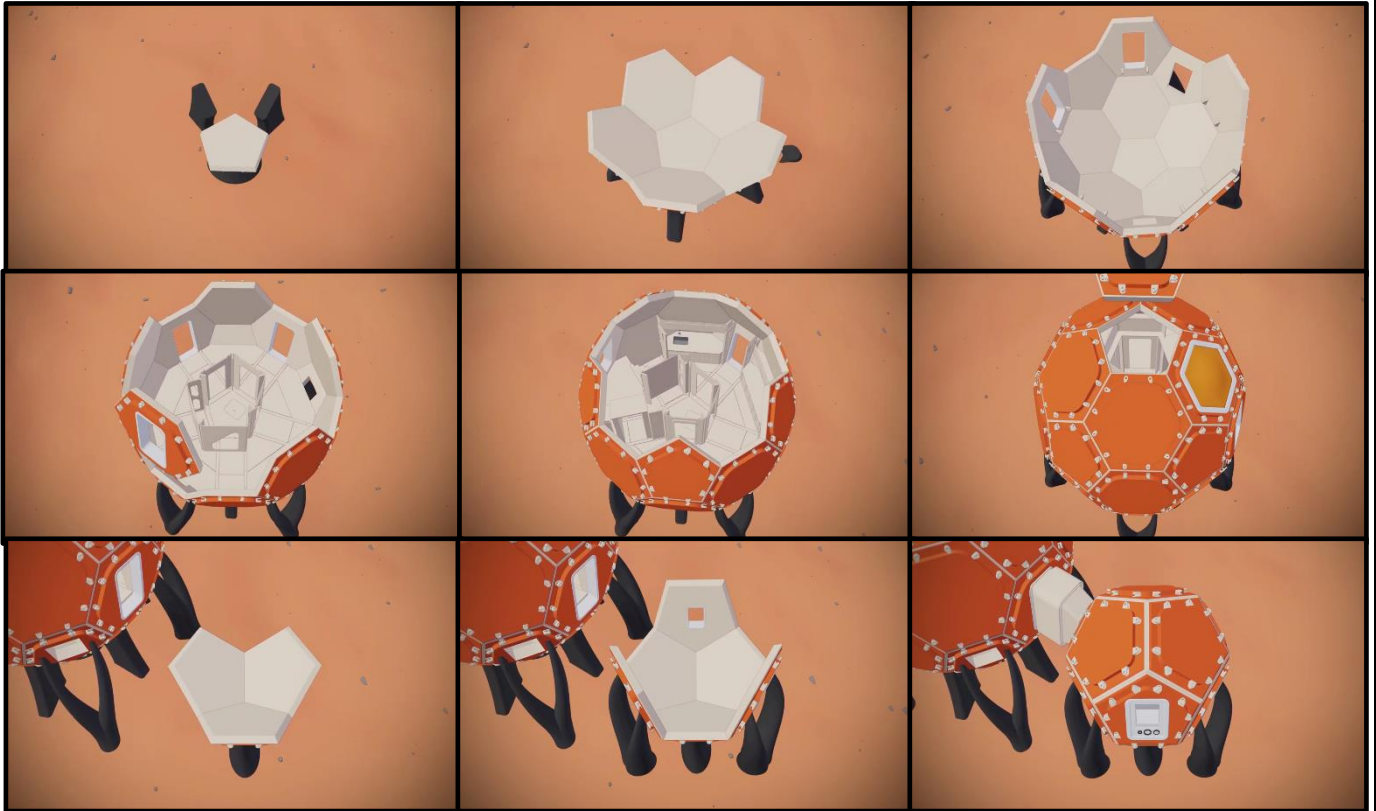


Figure 106 : Processus de construction – Crédits : Mars Incubator

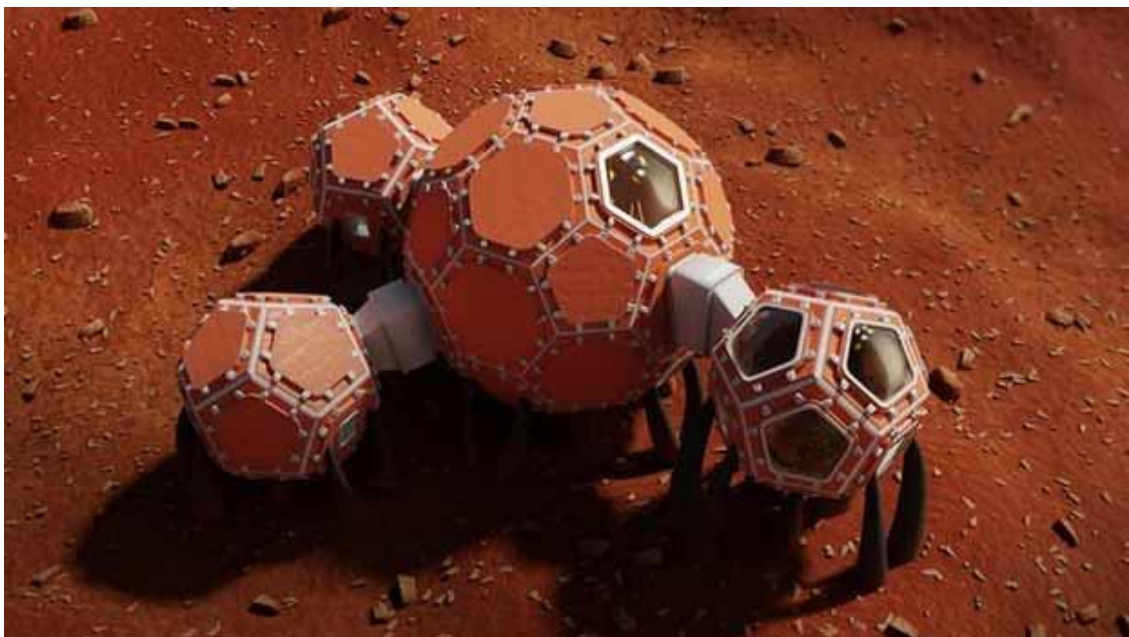


Figure 105 : Rendu du concept – Crédits : Mars Incubator

## **2. Innovation / éléments particuliers**

Mars Incubator propose 2 innovations :

### **1. Des panneaux préfabriqués**

Au lieu d'imprimer les panneaux, ceux-ci sont produits avec un procédé de presse à chaud. Le processus est simple et fiable, ce qui peut être déterminant dans notre situation. A nouveau, le processus de production se déroule dans un environnement clos, à l'abri des intempéries et des variations de qualité qu'elles sont susceptibles de générer.

### **2. Une structure en pré-tension pour reprendre les efforts de la pression interne**

La tension des câbles assure l'étanchéité de l'habitat. Le fait que les panneaux soient initialement en compression leur permet de ne pas générer de traction lors de la pressurisation de l'habitat. Cela évite que le béton, bien que renforcé de fibre de basalte, ait à travailler en traction et puisse potentiellement se fissurer.

<b>Grille d'évaluation N°5 - Mars Incubator</b>				
<b>Critère n°</b>	<b>Sous-critère n°</b>	<b>Description</b>	<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : SAS et système de prétension In situ : PEHD et béton de régolithe</i>	<i>Essentiel pour la finition d'un habitat, le système de prétension pourrait être, à terme, synthétisé en PEHD et ainsi se libérer l'influence terrestre.</i>	/
	Matériel de construction	<i>Rover excavateurs, imprimante 3D et presse à chaud</i>	<i>Une unité de production de panneaux assure une qualité régulière et une grande reproductibilité. Fiabilité essentielle pour une mission extraterrestre.</i>	<i>La taille des panneaux implique l'assistance d'un bras robotisé. Le fait de devoir importé un bras d'impression pour les fondations réduit l'intérêt de s'en défaire pour le reste de l'habitat.</i>
	Durée de construction	<i>Non déterminée</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
	Réparation/entretien	<i>Presse à chaud</i>	<i>Il suffit de remplacer un panneau en cas de dégradation.</i>	<i>Remplacer un panneau implique d'isoler tout un module de l'habitat et de le dépressurisé. L'inconfort généré est conséquent.</i>
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>Panneaux en régolithe</i>	<i>Concept de protection passive, simple et facile à adapter en faisant varier l'épaisseur.</i>	<i>Est-ce que les joints entre les panneaux présentent un risque dans la stratégie de protection ? Est-ce qu'une seule couche de panneaux suffit ?</i>
	Températures	<i>Panneaux en régolithe</i>	/	/
	Pression et gravité	<i>Système de prétension</i>	<i>Les panneaux sont mis en compression afin d'éviter l'apparition de traction dans le béton et le risque de fissuration.</i>	/
	Poussière	<i>Problème non considéré</i>	/	/
	Sollicitations extraordinaires	<i>Habitat modulable</i>	<i>Les modules peuvent être isolés les uns des autres.</i>	<i>Se séparer d'un module, même temporairement revient à retirer un espace considérable à l'habitat.</i>

<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Fiche technique</i>	<i>Ce système de panneaux permet une grande flexibilité quant à l'organisation de l'habitat. Un réarrangement des espaces ou séparations est facilement envisageable.</i>	/
	Flexibilité	<i>Habitat modulable</i>	<i>L'équipage peut étendre son habitat (dans la mesure de SAS disponibles) et ainsi faire évoluer leur environnement durant leur mission ou de mission en mission.</i>	/
	Temps d'intégration	<i>Temps de construction et d'intégration inconnus</i>	/	/

## Fiche technique N°6 – ESA Moon Base

<b>Concepteurs</b> : ESA Habitat	<b>Cadre</b> : Newspace 2060 Pitch 2018	
<b>Technologie</b> : Enfouissement	<b>Surface</b> : N/A	<b>Objectif</b> : Lune

### 1. Description du concept

L'idée derrière ce concept est d'enfouir sous un amas de régolithe des modules gonflables importés. En s'installant dans le fond d'un cratère, le but est d'empiler une série de modules et d'ensuite les recouvrir d'une couche de sol lunaire en guise de protection contre les radiations et de régulateur thermique. La séquence de construction est la suivante :

1. Mise en place et pressurisation d'un module au fond d'un cratère.
2. Recouvrement du module avec de la régolithe.
3. Installation et pressurisation du module suivant.
4. Recouvrement du module avec de la régolithe.
5. Répétition du processus jusqu'au niveau désiré.
6. Impression d'un dôme de protection en béton de régolithe au-dessus de l'entrée.



Figure 108 : Module enseveli – Crédits : ESA Moon Base



Figure 108 : Rendu du concept – Crédits : ESA Moon Base

L'utilisation passive de la régolithe permet d'assurer un bouclier contre les radiations en minimisant sa transformation et donc l'énergie requise.

## **2. Innovation / éléments particuliers**

### **1. Utilisation passive des ressources**

L'approche de l'ESA permet de minimiser l'énergie utilisée. En effet, imprimer avec de la régolithe nécessite la production d'un béton et donc de beaucoup d'énergie. Le point important de cette innovation est qu'il est important de garder à l'esprit que les solutions les plus simples sont parfois les plus fiables.

<b>Grille d'évaluation N°6 - Esa Multilevel buried inflatable Moon base</b>				
<b>Critères</b>	<b>Sous-critères</b>	<b>Description</b>	<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : SAS et système de prétension In situ : Régolithe</i>	<i>Aucun plastique ne doit être produit.</i>	<i>La dépendance terrestre est totale.</i>
	Matériel de construction	<i>Rovers excavateur et imprimante 3D</i>	<i>/</i>	<i>L'option d'imprimer un abri à l'entrée annule l'avantage de se passer d'imprimante 3D pour le reste de la structure.</i>
	Durée de construction	<i>Non déterminée</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>
	Réparation/entretien	<i>Rovers excavateur et imprimante 3D</i>	<i>Rajouter une couche de régolithe inerte est très simple.</i>	<i>Le moindre défaut dans les modules gonflables risque d'entraîner la contamination de l'habitat avec de la régolithe non fixée dans un béton.</i>
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>Couche de régolithe inerte</i>	<i>Couche très épaisse et donc très protectrice.</i>	<i>La pression induite sur les modules est grande.</i>
	Températures	<i>Couche de régolithe inerte</i>	<i>Couche très épaisse et donc très protectrice.</i>	<i>La pression induite sur les modules est grande.</i>
	Pression et gravité	<i>Problème non considéré</i>	<i>/</i>	<i>La pression induite sur les modules est grande.</i>
	Poussière	<i>Problème non considéré</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
	Sollicitations extraordinaires	<i>Problème non considéré</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Fiche technique</i>	<i>L'habitat donne un sentiment de grande sécurité par son épaisseur.</i>	<i>L'effet bunker peut avoir de graves conséquences pour la santé mentale de l'équipage.</i>
	Flexibilité	<i>Modules fixes et enterrés</i>	<i>/</i>	<i>Une fois installé, aucune modification n'est possible dans la structure.</i>
	Temps d'intégration	<i>Temps de construction et d'intégration inconnus</i>	<i>/</i>	<i>/</i>

Critères	Sous-critères	<i>Mars Ice House</i>	<i>Mars Xhouse V1</i>	<i>Mars Xhouse V2</i>	<i>Zopherus</i>	<i>Mars incubator</i>	<i>ESA Moon base concept</i>
<b>1. Caractéristiques générales</b>	1.1. Technologie utilisée	<i>Impression 3D extérieure</i>	<i>Impression 3D extérieure</i>	<i>Impression 3D extérieure</i>	<i>Impression 3D sous scellé</i>	<i>Préfabrication de panneaux</i>	<i>Enfouissement</i>
	1.2. Matière première	<i>Glace</i>	<i>Béton de régolithe</i>	<i>Béton de régolithe renforcé</i>	<i>Béton de régolithe renforcé</i>	<i>Béton de régolithe renforcé</i>	<i>Régolithe inerte</i>
<b>2. Construction et entretien</b>	2.1. Ressources ex situ	<i>SAS, membrane extérieure</i>	<i>SAS, 2 membranes intérieures</i>	<i>SAS</i>	<i>SAS</i>	<i>SAS, système de mise en prétension</i>	<i>Modules gonflables</i>
	2.2. Ressources in situ	<i>Eau</i>	<i>Eau, régolithe, basalt</i>	<i>Eau, régolithe, basalt, HDPE</i>	<i>Eau, régolithe, basalt, HDPE</i>	<i>Eau, régolithe, basalt, HDPE</i>	<i>Eau, régolithe, basalt</i>
	2.3. Matériel de construction	<i>Rovers excavateurs, rovers araignées</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante mobile géante</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante mobile géante</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante intégrée dans la tête du lanceur</i>	<i>Rovers excavateurs, unité de préfabrication</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante mobile</i>
	2.4. Réparation/entretien	<i>Face externe : non accessible Face interne : rovers araignées</i>	<i>Face externe : imprimante mobile géante Face interne : non accessible</i>	<i>Face externe : imprimante mobile géante Face interne : habitacle</i>	<i>Face externe : non accessible Face interne : habitacle</i>	<i>Face externe/interne : remplacement du panneau préfabriqué</i>	<i>Face externe : rovers excavateurs Face interne : habitacle</i>
<b>3. Structure</b>	3.1. Radiations	<i>Protection assurée par 20cm de glace</i>	<i>Système de double coque en régolithe</i>	<i>Couche protectrice mixte d'épaisseur variable</i>	<i>Système de double couche d'HDPE rempli de béton de régolithe</i>	<i>Panneaux en béton de régolithe</i>	<i>Couche de régolithe inerte</i>

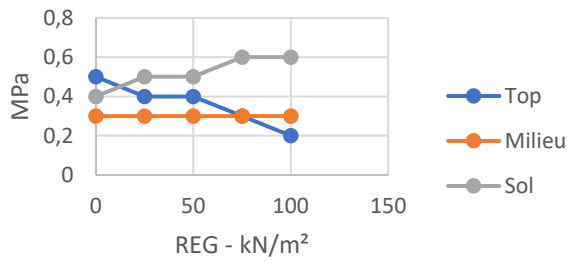
	3.2. Températures	<i>Système multicouches (glace, volume tampon et isolant)</i>	<i>Système de double coque en régolithe</i>	<i>Couche protectrice mixte d'épaisseur variable</i>	<i>Parement reflectif extérieur</i>	<i>Panneaux en béton de régolithe</i>	<i>Couche de régolithe inerte</i>
	3.3. Pression et gravité	<i>Pressurisation de l'environnement complet assuré par la membrane externe</i>	<i>Membranes internes pressurisées</i>	<i>Habitat pressurisé de forme concave pour assure une précompression</i>	<i>Système de double couche d'HDPE rempli de béton de régolithe</i>	<i>Prétension des panneaux</i>	<i>Membranes internes pressurisées</i>
	3.4. Sollicitations extraordinaires	<i>Problème non considéré</i>	<i>2 sorties de secours vers l'extérieur, un rover et 2 zones dites de sécurité</i>	<i>SAS et escalier de secours externes</i>	<i>Le module d'impression sert également d'abri d'urgence</i>	<i>Chaque module peut être isolé de ses voisins</i>	<i>Problème non considéré</i>
<b>4. Humain</b>	4.1. Confort/Qualité de vie	<i>La glace assure un apport lumineux et l'espace tampon offre de la mobilité</i>	<i>La gestion de la lumière assure une vue sur l'environnement</i>	<i>La verticalité donne un sentiment d'espace</i>	<i>Il n'y a pas de limite dans le nombre de modules</i>	<i>Il n'y a pas de limite dans le nombre de modules</i>	<i>Impression de sécurité dans un bunker</i>
	4.2. Flexibilité	<i>Faible, réaffectation des espaces mais aucune expansion possible</i>	<i>Faible voire nulle</i>	<i>Faible voire nulle</i>	<i>Forte, ajout de modules infini</i>	<i>Forte, ajout de modules de taille variable infini</i>	<i>Nulle</i>

ANNEXE R : SOUS-PRODUITS DE L'EXTRACTION MINIÈRE DE L'HÉLIUM 3

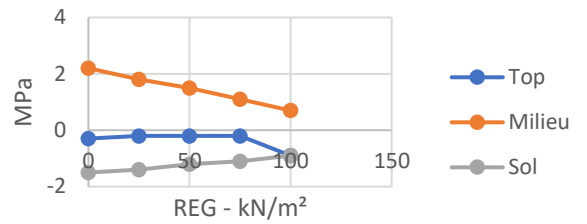
Operation	Regolith (tonnes)	Concentration, ppm (g/metric tonne)				
		He-3	He-4	H <sub>2</sub>	Carbon	Nitrogen
Surface Mining	1	$(6-13) \times 10^{-3}$	20-45	50-60	142-226	102-153
Beneficiate	0.45	$(5-11) \times 10^{-3}$	27	50	166	115
Gas Evolution	0.45	$(4-9) \times 10^{-3}$	22	43 (H <sub>2</sub> ) 23 (H <sub>2</sub> O)	13.5 (CO) 12 (CO <sub>2</sub> ) 11 (CH <sub>4</sub> )	4
Per kg He-3	$1.4 \times 10^5$ (mined)	1 kg	3.1 tonnes	6.1 tonnes (H <sub>2</sub> ) 3.3 tonnes (H <sub>2</sub> O)	1.9 tonnes (CO) 1.7 tonnes (CO <sub>2</sub> ) 1.6 tonnes (CH <sub>4</sub> )	0.5 tonnes
Per Tonne Regolith into Heater	1 (beneficiated)	0.014 g	49 g	96 g (H <sub>2</sub> ) 51 g (H <sub>2</sub> O)	30 g (CO) 27 g (CO <sub>2</sub> ) 24 g (CH <sub>4</sub> )	9 g

Figure 109 : Quantité de sous-produits de l'extraction de l'He<sub>3</sub> - Crédits : NASA

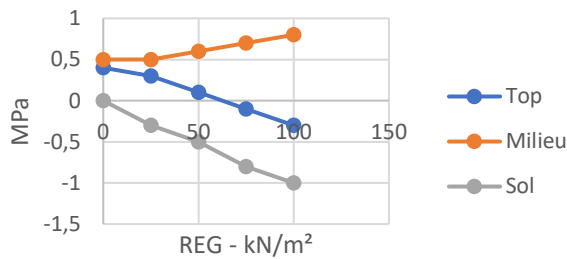
REG -  $\sigma_x+$  - Contraintes - Dome



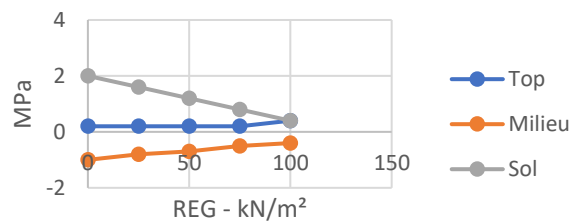
REG -  $\sigma_x+$  - Contraintes - Pyramide



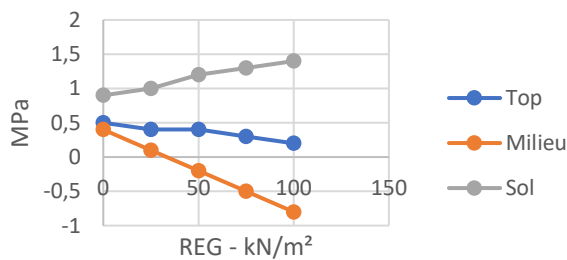
REG -  $\sigma_x-$  - Contraintes - Dome



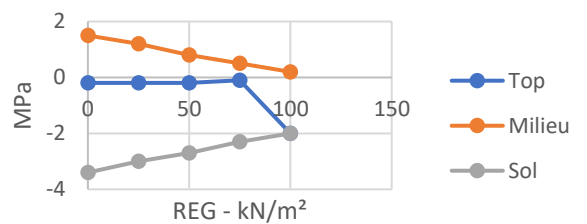
REG -  $\sigma_x-$  - Contraintes - Pyramide



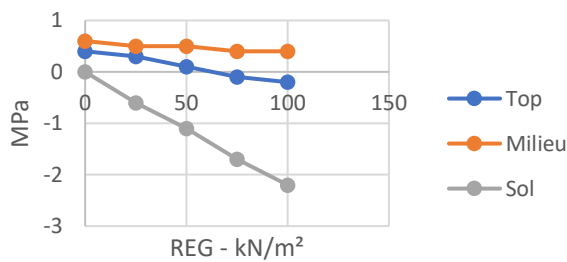
REG -  $\sigma_y+$  - Contraintes - Dome



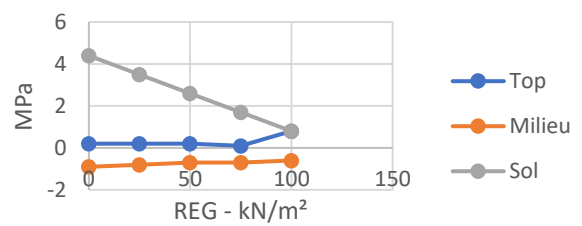
REG -  $\sigma_y+$  - Contraintes - Pyramide



REG -  $\sigma_y-$  - Contraintes - Dome



REG -  $\sigma_y-$  - Contraintes - Pyramide



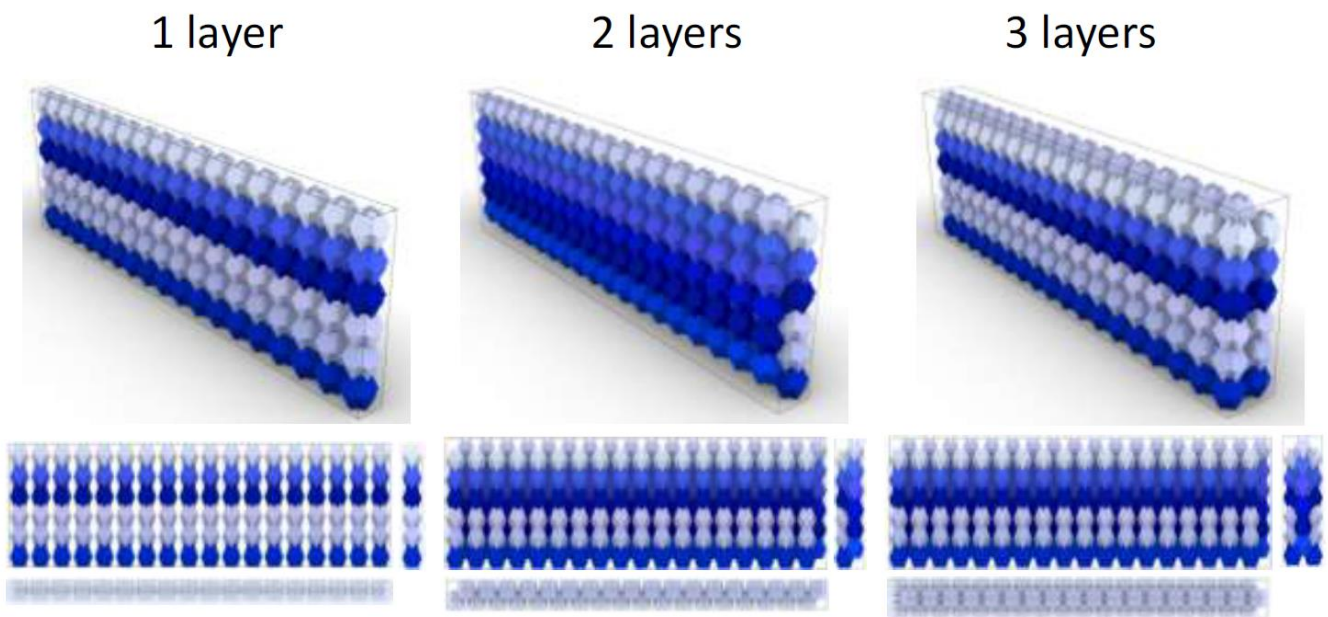


Figure 110 : Différentes agencements de murs de droxels - Crédits : Pierre Latteur

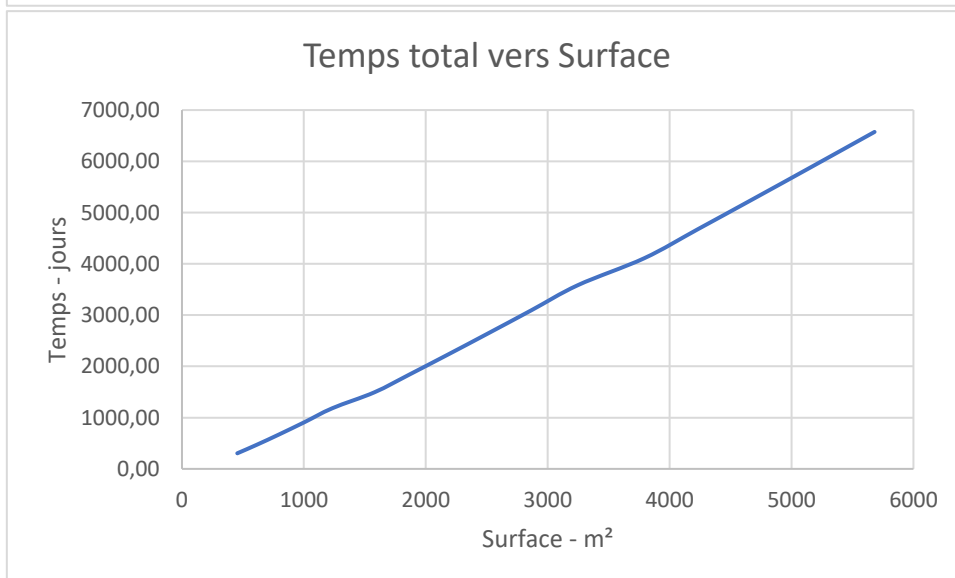
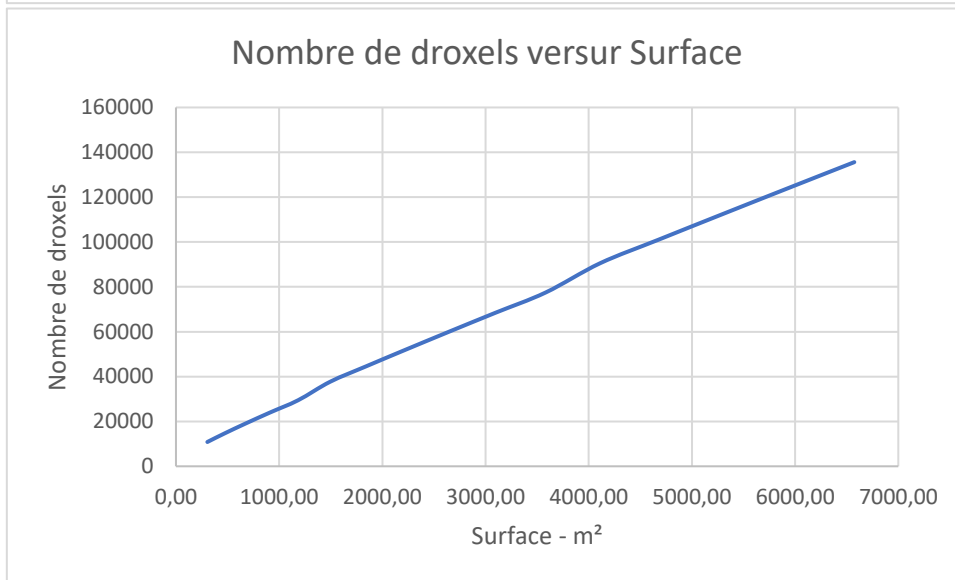
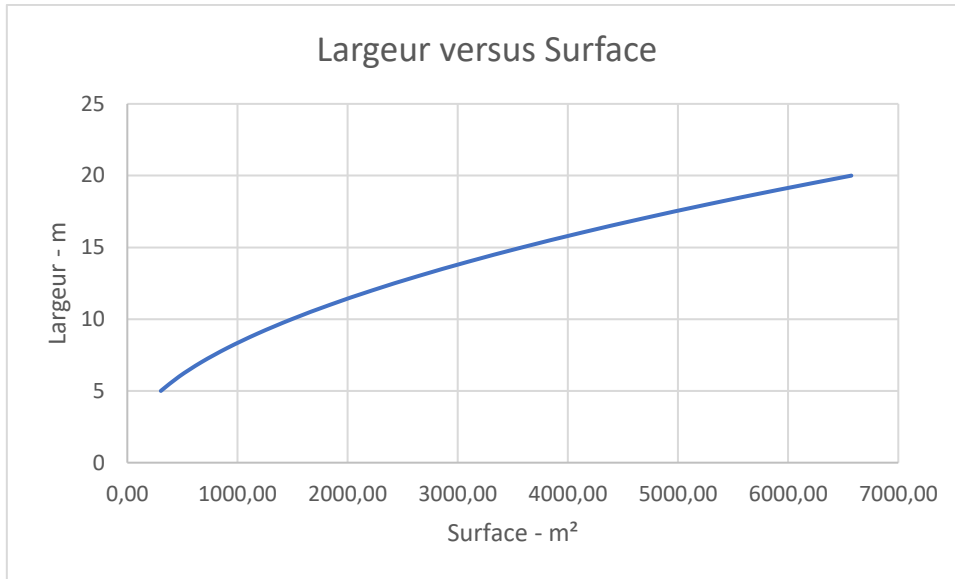
<b>Grille d'évaluation N°7 - Base Lunaire</b>				
<b>Critères</b>	<b>Sous-critères</b>	<b>Description</b>	<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
<b>1. Construction et entretien</b>	Gestion des ressources	<i>Ex situ : Sas, éléments de jonction des modules In situ : PEHD</i>	<i>Un droxel seul mobilise un petit volume de matière. Il est facile à isoler si nous voulons récupérer la matière.</i>	<i>Les joints entre les droxels devront potentiellement être importés.</i>
	Matériel de construction	<i>Rovers excavateurs et rovers araignée</i>	<i>La manipulation et la mise en place des droxels est faite par des rovers araignée. La production du droxel se fait dans des unités d'impression de petites tailles. Toutes les machines nécessaires à la construction ont un volume réduit.</i>	<i>Pour avoir un temps de construction raisonnable, beaucoup de machines doivent être acheminées.</i>
	Durée de construction	<i>1004 jours pour 909m<sup>2</sup>, premiers 100m<sup>2</sup> livré après 153 jours.</i>	<i>L'ajout de surface habitable est continu dans le temps.</i>	<i>Le temps de production d'un habitat est relativement long.</i>
	Réparation/entretien	<i>Via les minibuilders</i>	<i>Chaque module peut être isolé de ses voisins pour y faire des réparations. Chaque module est capable de subvenir seul à ses besoins.</i>	<i>Réparer un module implique de l'isoler du reste de l'habitat et donc de mobiliser un volume considérable.</i>
<b>2. Structure</b>	Radiations	<i>Protection assurée par un bouclier multicouche et attribution de l'usage des espaces en fonction de leur exposition moyenne.</i>	<i>La protection dans les espaces vitaux est maximale.</i>	<i>Tout l'habitat n'est pas protégé de la même façon. Réorganiser les espaces est compliqué.</i>
	Températures	<i>Système multicouches et un emplacement de l'habitat choisi pour avoir une variation minimale.</i>	<i>Les matériaux sont assurés de rester dans un intervalle de travail qui correspond à leurs capacités.</i>	<i>Cette stratégie n'est pas applicable partout. En cas d'emplacement à trop forte variations thermiques, une isolation additionnelle est à prévoir.</i>

	Pression et gravité	<i>La forme de l'habitat est choisie pour minimiser les déplacements.</i>	<i>L'habitat est conçu autour de la problématique de la pression.</i>	<i>Assurer une liaison parfaite entre les droxels est compliqué.</i>
	Poussière	<i>Problème non considéré</i>	/	/
	Sollicitations extraordinaires	<i>La sécurité est assurée par l'épaisseur des murs et la disposition des espaces de circulations.</i>	<i>La modulabilité de l'habitat offre de nombreuses zones de refuges et itinéraires de sortie. Chaque étage serait relié avec au moins un homologue dans les modules voisins.</i>	<i>Multiplier les liaisons entre les modules complique l'isolement des modules les uns par rapport aux autres.</i>
<b>3. Humain</b>	Confort/Qualité de vie	<i>Description de l'habitat : voir Section "Intégration d'un équipage"</i>	<i>La superficie totale de l'habitat permet d'attribuer de grandes surfaces à chaque besoin. Une notion d'espace privé est également possible.</i>	<i>Il faut plus de 3 ans pour avoir accès aux 909 m<sup>2</sup> de surface en une fois.</i>
	Flexibilité	<i>Système d'un bloc de 9 modules</i>	<i>Les modules sont autosuffisants donc le bloc peut être interrompu ou modifié en cours de construction. Rien ne nous oblige à créer 9 modules identiques.</i>	/
	Temps d'intégration	<i>Temps d'intégration inconnu</i>	/	/

ANNEXE V : TABLEAU COMPARATIF DES MODULES EXISTANTS ET DE L'HABITAT IMAGINÉ

Critères	Sous-critères	Mars Ice House	Mars Xhouse V1	Mars Xhouse V2	Zopherus	Mars incubator	ESA Moon base concept	Base Lunaire
<b>1. Caractéristiques générales</b>	1.1. Technologie utilisée	<i>Impression 3D extérieure</i>	<i>Impression 3D extérieure</i>	<i>Impression 3D extérieure</i>	<i>Impression 3D sous scellé</i>	<i>Préfabrication de panneaux</i>	<i>Enfouissement</i>	<i>Impression 3D sous scellé</i>
	1.2. Matière première	<i>Glace</i>	<i>Béton de régolithe</i>	<i>Béton de régolithe renforcé</i>	<i>Béton de régolithe renforcé</i>	<i>Béton de régolithe renforcé</i>	<i>Régolithe inerte</i>	<i>PEHD</i>
<b>2. Construction et entretien</b>	2.1. Ressources ex situ	<i>SAS, membrane extérieure</i>	<i>SAS, 2 membranes intérieures</i>	<i>SAS</i>	<i>SAS</i>	<i>SAS, système de mise en prétension</i>	<i>Modules gonflables</i>	<i>SAS</i>
	2.2. Ressources in situ	<i>Eau</i>	<i>Eau, régolithe, basalt</i>	<i>Eau, régolithe, basalt, PEHD</i>	<i>Eau, régolithe, basalt, PEHD</i>	<i>Eau, régolithe, basalt, PEHD</i>	<i>Eau, régolithe, basalt</i>	<i>PEHD</i>
	2.3. Matériel de construction	<i>Rovers excavateurs, rovers araignées</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante mobile géante</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante mobile géante</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante intégrée dans la tête du lanceur</i>	<i>Rovers excavateurs, unité de préfabrication</i>	<i>Rovers excavateurs, imprimante mobile</i>	<i>Rovers excavateurs, rovers araignées</i>
	2.4. Réparation/entretien	<i>Face externe : non accessible Face interne : rovers araignées</i>	<i>Face externe : imprimante mobile géante Face interne : non accessible</i>	<i>Face externe : imprimante mobile géante Face interne : habitacle</i>	<i>Face externe : non accessible Face interne : habitacle</i>	<i>Face externe/interne : remplacement du panneau préfabriqué</i>	<i>Face externe : rovers excavateurs Face interne : habitacle</i>	<i>Face externe/interne : remplacement du droxel défailant</i>
<b>3. Structure</b>	3.1. Radiations	<i>Protection assurée par 20cm de glace</i>	<i>Système de double coque en régolithe</i>	<i>Couche protectrice mixte d'épaisseur variable</i>	<i>Système de double couche d'PEHD rempli de béton de régolithe</i>	<i>Panneaux en béton de régolithe</i>	<i>Couche de régolithe inerte</i>	<i>Bouclier multicouche</i>

	3.2. Températures	<i>Système multicouches (glace, volume tampon et isolant)</i>	<i>Système de double coque en régolithe</i>	<i>Couche protectrice mixte d'épaisseur variable</i>	<i>Parement réfléchissant extérieur</i>	<i>Panneaux en béton de régolithe</i>	<i>Couche de régolithe inerte</i>	<i>Isolation et importante épaisseur des murs</i>
	3.3. Pression et gravité	<i>Pressurisation de l'environnement complet assuré par la membrane externe</i>	<i>Membranes internes pressurisées</i>	<i>Habitat pressurisé de forme concave pour assurer une précompression</i>	<i>Système de double couche d'PEHD rempli de béton de régolithe</i>	<i>Prétension des panneaux</i>	<i>Membranes internes pressurisées</i>	<i>Forme de l'habitat adaptée aux besoins</i>
	3.4. Sollicitations extraordinaires	<i>Problème non considéré</i>	<i>2 sorties de secours vers l'extérieur, un rover et 2 zones dites de sécurité</i>	<i>SAS et escalier de secours externes</i>	<i>Le module d'impression sert également d'abri d'urgence</i>	<i>Chaque module peut être isolé de ses voisins</i>	<i>Problème non considéré</i>	<i>Nombreux refuges et itinéraires de sortie</i>
<b>4. Humain</b>	4.1. Confort/Qualité de vie	<i>La glace assure un apport lumineux et l'espace tampon offre de la mobilité</i>	<i>La gestion de la lumière assure une vue sur l'environnement</i>	<i>La verticalité donne un sentiment d'espace</i>	<i>Il n'y a pas de limite dans le nombre de modules</i>	<i>Il n'y a pas de limite dans le nombre de modules</i>	<i>Impression de sécurité dans un bunker</i>	<i>Modularité limitée (initialement par 9 modules)</i>
	4.2. Flexibilité	<i>Faible, réaffectation des espaces mais aucune expansion possible</i>	<i>Faible voire nulle</i>	<i>Faible voire nulle</i>	<i>Forte, ajout de modules infini</i>	<i>Forte, ajout de modules de taille variable infini</i>	<i>Nulle</i>	<i>Chaque module peut être différent</i>



ANNEXE X : DÉFORMATIONS ET RÉPARTITIONS DES CONTRAINTES DU MODULE FINAL

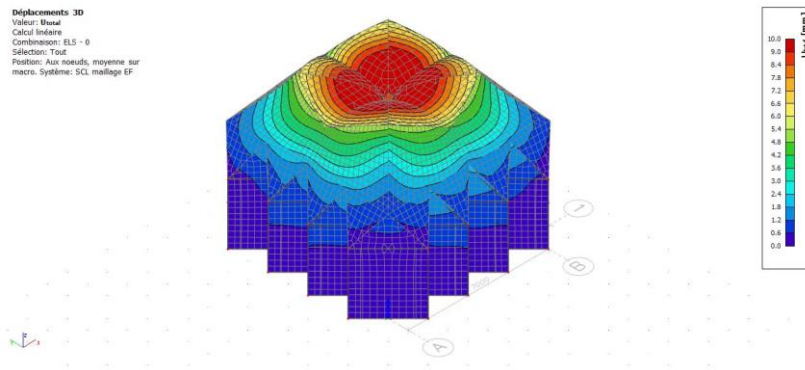


Figure 111 : Niveau 4c de l'habitat lunaire - Module 1 – Déformation sous 0 [kN/m<sup>2</sup>] de reprise

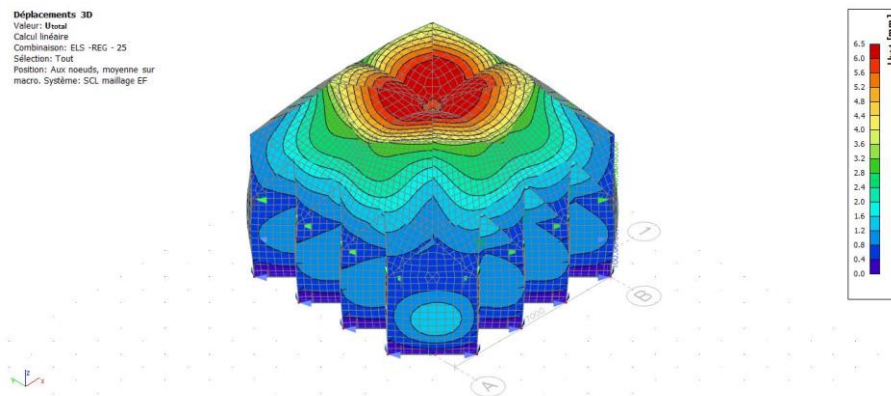


Figure 112 : Niveau 4c de l'habitat lunaire - Module 1 – Déformation sous 25 [kN/m<sup>2</sup>] de reprise

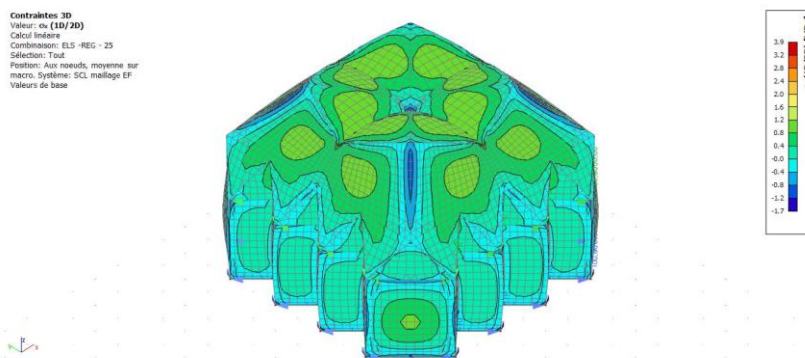


Figure 113 : Niveau 4c de l'habitat lunaire - Module 1 – Répartition des contraintes pour 0 [kN/m<sup>2</sup>] de reprise



UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN  
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | [www.uclouvain.be/epl](http://www.uclouvain.be/epl)