

VIVRE AILLEURS  
ARCHITECTURE EXTRA-TERRESTRE ET  
SES APPORTS POUR NOS VILLES  
SUR TERRE.

MEYER Claire

Directeurs du mémoire : DUFASNES Emmanuel et WETZEL Jean-Paul

ENSAS 2017



VIVRE AILLEURS  
ARCHITECTURE EXTRA-TERRESTRE ET  
SES APPORTS POUR NOS VILLES  
SUR TERRE.

Mot clés : Architecture, Aérospatiale, Autosuffisance, Ville, « Ecologie spatiale », Durable,

Photo de couverture: *Moon-West near side* © NASA/JPL, ID: PIA00224-1996

MEYER Claire

Directeurs du mémoire : DUFRASNES Emmanuel et WETZEL Jean-Paul

ENSAS 2017

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>I. De l'imaginaire à la réalité : les débuts de l'exploration spatiale</b>	<b>9</b>
<b>1) L'aérospatiale à la lisière entre sciences et fiction</b>	<b>9</b>
<b>2) Le développement des stations spatiales</b>	<b>14</b>
a) Saliout	15
b) Skylab	17
c) Space Shuttle	19
d) Mir	20
e) La Station Spatiale Internationale :	20
<b>3) Une théorie de l'architecture spatiale</b>	<b>24</b>
<b>II. La base lunaire</b>	<b>26</b>
<b>1) Architecture de l'extrême, se préparer à quitter la Terre grâce aux simulations</b>	<b>26</b>
a) Biosphère 2	27
b) Concordia (Station d'hivernage)	29
c) NEEMO (sous-marin)	31
d) HI-SEAS (Hawaï ; ESA)	33
e) Mars 500	35
<b>2) SHEE un module lunaire pour la Terre</b>	<b>38</b>
<b>3) Comment construire sur la Lune</b>	<b>40</b>
a) Les défis de l'environnement lunaire	40
b) Ergonomie de l'habitat	42
<b>4) Deux scénarios pour créer une base lunaire</b>	<b>47</b>
<b>III. Les apports pour la ville de demain.</b>	<b>52</b>
<b>1) Entretiens : « Space-Earth continuum. Réalité ou fiction ? »</b>	<b>52</b>
a) Ondrej Doule	52
a) Barbara Imhof et son agence Liquifer	53
<b>2) Concepts pour la ville de demain</b>	<b>58</b>
a) Le concept de « City as a Spaceship »	58
b) La <i>Starship city</i> par Astudio	63
c) Réalisations	67
<b>3) Ces bâtiments intégrant les technologies spatiales</b>	<b>69</b>
<b>Conclusion</b>	<b>74</b>

<b><i>Remerciements</i></b>	<b>77</b>
<b><i>Annexes</i></b>	<b>78</b>
<b>Tableau comparative des stations orbitales</b>	<b>79</b>
<b>Lunar Base Design Workshop</b>	<b>81</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>82</b>
<b><i>Bibliographie</i></b>	<b>84</b>
<b><i>Filmographies</i></b>	<b>87</b>
<b><i>Webbographie</i></b>	<b>88</b>

## Introduction

Quel rapport entre l'aérospatiale, ses technologies et la Terre ? Comment la recherche spatiale évolue-t-elle et influence-t-elle notre quotidien ? Quelles relations y a-t-il entre notre planète et le vide interstellaire ? Entre les technologies et ces différents milieux ?

Comment la recherche spatiale évolue et influence-t-elle notre quotidien et permet des avancées autant sur Terre que dans le cosmos ?

Ce document réalisé en 8 mois se penche sur les points communs entre l'architecture, l'aérospatiale et la ville de demain. Il vise à dresser un état des opinions actuelles et des hypothèses ou théories suivies. Il interroge essentiellement la question de l'existence d'un lien entre l'architecture de l'aérospatial et la *smart city*, ainsi que de sa pertinence. Dans quelle mesure les deux domaines peuvent-ils s'entraider ? Existe-t-il des coopérations et des projets déjà en œuvre ?

Ce travail s'est déroulé dans le cadre d'une coopération entre l'International Space University (ISU) basée à Illkirch et l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg (ENSAS). Les deux établissements sont également instigateurs d'un réseau scientifique thématique (RST) du nom d'ARCHES, Architecture en milieux extrêmes.

Ce réseau s'intéresse à tous types d'innovations mises en place pour des milieux extrêmes, que ce soit l'Espace ou d'autres planètes, mais aussi les lieux hostiles sur Terre : les océans, les fonds marins, les déserts, les montagnes ou les zones glaciaires. Son but est de relever les défis actuels et futurs en créant une plateforme exploratoire et pluridisciplinaire au niveau national et européen pour échanger des connaissances, des informations et des innovations. Les membres d'ARCHES regardent de ce fait des projets utopiques et novateurs tel que le SeaOrbiter de Jacques Rougerie, VegetalCity de Luc Schuiten, la Base lunaire de Foster + Partners, et d'autres encore.

Dans ce contexte, notre point de recherche se focalise sur les architectures ayant été mises au point sur notre planète dans le but de prévoir et favoriser l'exploration spatiale ainsi que les projets lunaires en découlant. Ce document aborde également la question de la continuité technologique Terre-Espace et des apports mutuels possibles des deux disciplines.

Au sujet de l'utilité des recherches spatiales, l'astronome René Dejaiffe écrivait en 1972 un article dans la revue *Ciel et Terre*, sur l'impact du programme spatial américain sur l'aménagement et les services sur Terre. Il y listait bons nombres d'apports pour la vie quotidienne, qui bien que non liés à l'architecture prouvent, qu'il serait faux de croire que la reprise de la colonisation de notre système solaire n'apporte pas d'avancées dans de nombreux domaines.<sup>1</sup>

Les agences spatiales publient des articles et des ouvrages présentant des spin-offs de technologies spatiales ayant trouvé une application sur Terre. La NASA consacre même un site Internet à son programme de transfert de technologies.<sup>2</sup> En parallèle, une grande majorité des recherches menées à bord de la station spatiale internationale (ISS) sont faites pour améliorer directement notre vie de tous les jours.

Ainsi, l'intérêt des découvertes scientifiques et technologiques pour notre planète n'est plus à prouver. Mais cela peut-il aussi être le cas pour la construction ? La ville ? L'architecture ?

L'architecte a-t-il un rôle à jouer ?

C'est sur ces questions que furent basées les premières recherches de ce mémoire.

---

<sup>1</sup>Dejaiffe (René), 1972, p.73.

<sup>2</sup> <https://spinoff.nasa.gov/>

Après le premier pas de l'homme sur la Lune, il semblait que la conquête de l'Espace se soit arrêtée. Bien que l'exploration de notre système solaire ait continué, il ne s'agit depuis que de sondes, de satellites et de robots. Depuis la fin des missions Apollo, les Hommes ayant été envoyés dans l'Espace n'ont pas dépassés les orbites terrestres basses où se situent les stations spatiales.

L'envie de mettre les pieds sur une autre planète était pourtant présente. À la NASA, les projets ont été plusieurs fois repoussés mais jamais annulés. Les agences spatiales rêvent d'atterrir sur Mars. Aujourd'hui, l'objectif semble atteignable, si l'on croit la NASA qui prévoit un vol vers Mars pour les environs de 2030. À travers cette course à la conquête de Mars, la Lune a trouvé un intérêt nouveau aux yeux des astronautes. Elle sera l'avant-poste pour les départs vers Mars, une base permanente pour expérimenter la vie extra-terrestre avant de nous éloigner plus de notre « maison ».

Les défis à relever sont nombreux : développer de nouvelles fusées et de nouveaux matériaux pour rendre le voyage possible, résoudre la question de la production et du stockage d'énergie, mais surtout développer un habitat permanent offrant confort et protection. Ainsi, aujourd'hui, le bien-être et la qualité architecturale nécessaires à la réussite de ces missions posent question. Sur des missions longues, le facteur humain apparaît au premier plan.

À l'image de Barbara Imhof, architecte - chercheuse membre de l'association Space Architecte, plus en plus d'acteurs du domaine spatial voient l'architecture comme un facteur important pour ce type de missions.

« Dans les missions spatiales humaines de longue durée, le facteur humain et son environnement dans l'Espace deviendront essentiels à la viabilité de la mission. [...] L'interaction entre les humains et leur environnement le plus proche - l'habitat - sont des facteurs cruciaux pour le succès de la mission. »<sup>3</sup> Cet avis est partagé par la journaliste d'architecture Ruth Slavid : « Dans ce cas [celui des missions longue durée], le rôle des architectes est de concevoir une structure fonctionnelle qui offre une qualité de vie dont dépend la santé mentale des résidents. »<sup>4</sup>

La reprise de projets de colonisation de grande ampleur devra atteindre des enjeux de performance énergétique et de production d'énergie écologique encore non résolus à grande échelle sur Terre. Une ville sur Mars ou sur la Lune devra produire elle-même sa nourriture, mais aussi ses matières premières. Certaines ressources étant inexistantes loin de la Terre — il n'y a sur la Lune et Mars ni pétrole, ni gaz, ni uranium, cela implique une source de production d'énergie renouvelable.

Ces contraintes viennent évidemment des conditions liées à l'Espace mais aussi des lois du Traité de l'Espace (1967) imposant le principe de non-interférence, de non-dégradation et de non-contamination. Celui stipule qu'il faut limiter l'impact et la pollution sur place afin de ne pas altérer l'environnement et donc fausser le résultat des recherches.

Les conditions pour implanter une colonie et la vie sur la Lune sont ainsi dictées par l'autosuffisance et la nécessité d'un impact minime. On peut parler d'une « écologie spatiale » qui peut nous rappeler les projets de ville durable et nous amène donc à notre sujet : de l'Espace à la ville de demain.

---

<sup>3</sup> Imhof (Barbara) and Mohanty (Susmita), 2004

Traduction de l'extrait suivant: « In long-duration human space missions, the human factor and their in-space environment will become crucial to mission viability. [...] Interaction between humans and their closest environment- the habitat- are crucial factors for mission success. » p.83

<sup>4</sup> Slavid (Ruth) sur le projet Moon Base Two de Architecture & Vision 2009

Pour aborder cette question, nous nous intéresserons dans un premier temps à l'évolution de l'habitat spatiale, cela autour des colonies imaginaires et des stations réellement mises en orbite. Dans un deuxième temps, nous nous pencherons sur l'avenir de l'exploration intersidérale. Nous questionnerons les recherches actuelles menées pour aller sur la Lune, ainsi que les préparatifs réalisés sur Terre dans ce but. Ceci inclut de créer des architectures dans des milieux extrêmes pour recréer les conditions auxquelles seront soumis les astronautes. Nous aborderons l'aspect technologique mais aussi psychologique de ces missions. Enfin, nous verrons au travers d'entretiens et d'études de cas, comment les concepts de colonies orbitales et lunaires inspirent des architectes pour construire notre ville de demain.

Toutes ces parties sont construites sur un va-et-vient entre étude de cas et théorie.

Par souci de clarté du propos en raison de la polysémie du mot *espace*, celui-ci sera toujours écrit avec une majuscule initiale lorsqu'il s'agit du milieu au-delà de l'atmosphère respirable de la Terre.

# I. De l'imaginaire à la réalité : les débuts de l'exploration spatiale

## 1) L'aérospatiale à la lisière entre sciences et fiction

La littérature a commencé l'exploration de l'Espace avant les premiers succès de la conquête spatiale. La science-fiction a créé des structures spatiales intrigantes comme les vaisseaux planétaires, les stations et les colonies spatiales. La première nouvelle de science-fiction écrite par un scientifique le fut en 1615 par l'astronome allemand, Johannes Kepler. Appelée *Somnium*, elle relate un voyage vers la Lune.

Le roman de Jules Verne *De la Terre à la Lune* publié en 1865, présente une architecture spatiale conceptuelle dans les détails. Cette dernière a inspiré les premiers pionniers dans la construction de navettes. Le « canon lunaire » proposé dans le texte, peut être considéré comme le premier lanceur spatial. Le canon pouvait lancer un objet à 16,5km/s. Une fois freiné par l'atmosphère, Jules Verne avait calculé que l'habitacle atteindrait la Lune à une vitesse résiduelle de 11km/s.<sup>5</sup>

Au 20<sup>e</sup> siècle, plusieurs réalisateurs ont proposé des films avec des degrés de détails et des références scientifiques plus ou moins poussées. Avec les avancées technologiques, certaines des idées visionnaires présentées en science-fiction ont le potentiel de devenir réelles ou le sont déjà.

Afin de voir le chemin parcouru d'une part, mais aussi pour s'inspirer de l'imaginaire d'autre part, les agences spatiales s'intéressent aujourd'hui aux images visionnaires venant de la science-fiction.

Dans ce but, l'agence spatiale européenne (ESA) a demandé à la Maison d'Ailleurs à Yverdon-les-bains en Suisse de réaliser une étude sur la littérature, les illustrations et les magazines de science-fiction. Ces recherches sont menées dans le cadre d'une étude créée en 2002 par l'ESA et appelée « Technologie innovante de la science-fiction pour les applications spatiales » (*Innovative Technologie from Science Fiction for Space Applications*).

La Maison d'ailleurs détient la plus grande collections de littérature de ce type au monde.

Elle s'est principalement intéressée au magazine *Amazing stories*, premier véritable magazine de science-fiction édité à partir de 1927. Le but était d'y déceler des idées rendues possibles au regard des techniques actuelles, et de dresser un bilan des vues d'artistes qui avaient joué un rôle dans le développement des techniques spatiales.

La liste des éléments devenus réalité est longue : « les lanceurs de projectiles ultra-rapides (1865), les rétrofusées (1869), les dispositifs d'atterrissage sur les planètes (1928), les ailerons de stabilisation aérodynamique (1929), les sorties dans l'Espace, les combinaisons pressurisées, la construction de stations spatiales orbitales complètes disposant de quartiers d'habitation et régulièrement desservies (1945), les télécommunications par satellites géostationnaires (1945) » ; pour ne citer qu'une partie de ceux évoqués par l'étude.

Ce travail montre aussi ce que l'humanité n'a pas encore réussi, et qui pourtant est dans l'imaginaire populaire depuis plusieurs décennies : coloniser une autre planète ou construire une colonie dans l'Espace. Une présence humaine permanente dans l'Espace est cependant maintenue grâce à l'ISS, concrétisant les premières idées de station spatiale du scientifique russe Konstantin Tsiolkovski en 1902.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup>Imhof (Barbara) and Mohanty (Susmita), *Musings Towards a new genre in [space] architecture*, Kunst, 2004, p.24 à 28

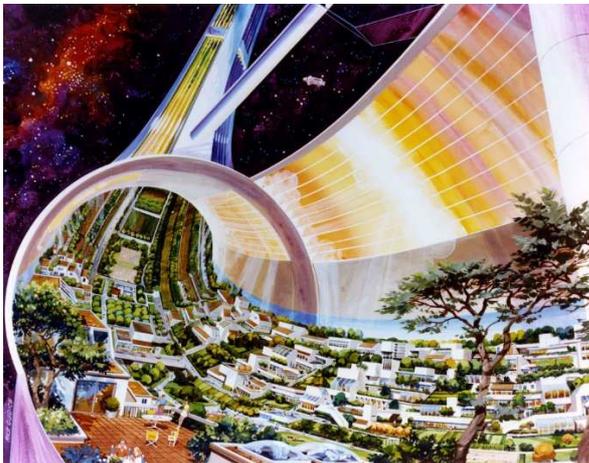
<sup>6</sup> Raitt (David) et Wärmbein (Barbara), *L'espace entre science et fiction*, ESA publications, 2004, <http://www.esa.int/esapub/br/br205/br205f.pdf>

De son côté, la NASA s'intéresse aussi aux inventions de la science-fiction. L'Institut des concepts avancés de la NASA s'est penché sur « l'ascenseur spatial » décrit par de Arthur C. Clarke dans *Les Fontaines du paradis* en 1979. Il pense que ce système complexe d'anneaux orbitaux relié à la Terre par des câbles pourrait être rendu possible grâce aux avancées en nanotechnologie. Des nanotubes de carbones seraient assez résistants pour faire ces câbles.

En 1975, la NASA tint une université d'été sur le thème de la colonisation, en partenariat avec l'université de Stanford. Ce groupement rassemblait des ingénieurs, des physiciens, des sociologues et des architectes sur la question d'une vie possible dans l'Espace. Le directeur du programme, le physicien Gérard K. O'Neill, y présente un concept de station spatiale aujourd'hui connu sous le nom de Tore de Stanford.

L'idée est de réaliser une station en forme d'anneau d'1,800 km et d'une épaisseur de 130 m. La station positionnée au point Lagrange 5 pouvait accueillir jusqu'à 10 000 personnes. La station tourne sur elle-même en une minute afin de créer une gravité artificielle permettant à l'Homme d'y vivre sans altération ni impact sur sa santé.

Pour cela, O'Neill s'inspire d'une idée émise en 1961 par Arthur C. Clarke dans son livre *Les Gouffres de la Lune*, preuve que la science-fiction est déjà une source d'idées à l'époque.



1. Vue artistique de l'intérieur d'une station en forme de tore de Stanford peinte par Don Davis, crédits NASA Ames Research Center



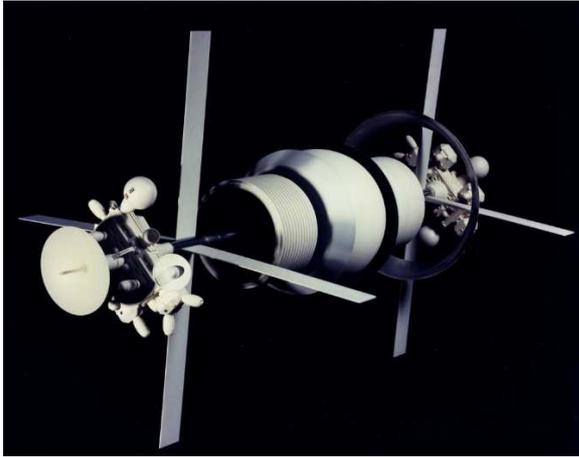
2. Vue extérieure du tore de Stanford par Don Davis, crédits NASA Ames Research Center

Les résultats de cette université d'été ont été publiés par la NASA sous le nom de *Space Settlements : A design Study*, (NASA Publication SP-413). O'Neill proposait d'utiliser des matériaux issus des minerais lunaires comme le titane, le silicium et l'aluminium. Un miroir géant aurait servi à concentrer la lumière solaire pour chauffer la colonie.<sup>7</sup>

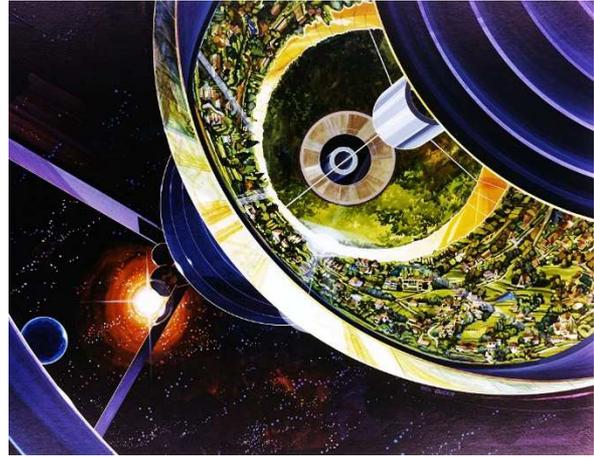
O'Neill n'est pas le seul ni le premier à s'intéresser à la question d'une colonie spatiale. En 1929, J. D. Bernal propose de créer un lieu sphérique pour accueillir également jusqu'à 10 000 personnes. Son projet, appelé sphère de Bernal, mesure 500 m de diamètre et tourne sur elle-même pour recréer une gravité semblable à celle de la Terre à son équateur. Au début du 20<sup>e</sup> siècle, un projet similaire de 30 m de diamètre avait été présenté par l'ingénieur slovène Hermann Noordung dans son livre *Le problème du vol spatial*.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Skeet (Jason), 1999, transcription de la visioconférence, <http://www.lyber-eclat.net/lyber/aaa/utopie.html>

<sup>8</sup> Tate (Karl), 2013, <http://www.space.com/22228-space-station-colony-concepts-explained-infographic.html>



3. Projet de sphère par John Desmond Bernal, © NASA Ames Research Center



4. Intérieur d'une station de type sphère de Bernal peint par Rick Guidice, © NASA Ames Research Center

Le Tore de Stanford continue à inspirer aujourd'hui comme le prouvent les résultats du concours proposé par la NSS (National Space Society). En 2006 et 2008, les gagnants de la section « Colonisation orbitale » ont proposé des projets inspirés du Tore de Stanford : « Vademecum » présenté en 2006 a des dimensions similaires au projet d'O'Neill ; « Abalakin » est un large tore imaginé par Alexander Preuss (2008). Tous les résultats sont disponibles sur : <http://www.nss.org/settlement/calendar/2008/gallery.htm><sup>9</sup>

Le grand public connaît ce concept de ville dans l'Espace grâce à son intégration dans certains films.

Ainsi, dans le film *Elysium*, réalisé en 2013 par Neil Blomkamp, l'élite habite en orbite dans une colonie ressemblant au tore de Stanford tandis que le reste de l'humanité se bat sur Terre pour survivre. Au début du film de Stanley Kubrick *2001 : l'Odyssée de l'espace* (1968) –inspiré d'une nouvelle de A. C. Clarke-, une station annulaire est aussi représentée mais les personnages ne s'y arrêtent pas. On voit cependant plus tard un cosmonaute courir dans le vaisseau circulaire Explorateur 1.

Autre film ayant eu plus de succès, *Interstellar* de Christopher Nolan (2014) montre quant à lui non pas l'aspect extérieur de la colonie mais l'intérieur. Cette vision de l'intérieur de la Station Cooper laisse penser que, spatialement, elle fonctionne cependant sur les mêmes principes. Lors de son arrivée à la station dans le film en orbite de Saturne, le personnage principal découvre par la fenêtre de sa chambre d'hôpital ce nouveau monde. Le fait que les enfants jouant au baseball cassent la fenêtre de la maison située au-dessus d'eux laisse penser que le diamètre de la sphère n'est pas très important. Un peu plus tard une vue d'ensemble alors qu'il se rend dans sa maison nous montre la perspective sur le tube du tore.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> National Space Society, galerie des résultats du concours 2008, <http://www.nss.org/settlement/calendar/2008/gallery.htm>

<sup>10</sup> Nolan (Christopher), *Interstellar*, Warner Bros et Paramount Pictures, 169 minutes, 2014.



5. Station Elysium. Source : [www.moviesdeskback.com](http://www.moviesdeskback.com)



6. La station Cooper dans le film *Interstellar*.

Si la Station Cooper est le dénouement du film et marque la résolution de la crise, les villes futuristes sont largement liées à des dystopies.

Ces villes sont le reflet de la société décrite dans les films, décadentes, hyper-technologiques ou autoritaires, dans un monde sclérosé et classifié où la nature est absente voire détruite.

Les films présentent plusieurs sortes de villes que l'on pourrait classer en : les villes en orbite (comme nous venons de le voir) ; les villes souterraines ; et les villes verticales.

Les villes souterraines sont les moins répandues. Elles se basent sur un scénario post-incident nucléaire ayant tout détruit. On peut citer *The Island* réalisé en 2005 par Michael Bay, et *THX 1138* de George Lucas datant de 1971.

L'image la plus répandue est celle de la ville verticale remplie d'engins de transport volants.

Cette ville vertigineuse est souvent la division visuelle de la pyramide sociale.

Les pauvres sont en bas dans les rues, tandis que les riches vivent au sommet et ne se déplacent qu'à bord de transports volants ne touchant plus le sol. Ce sont des villes vertigineuses et déshumanisées, loin de l'échelle humaine.

Cette image atteint son apogée dans *Star Wars* où Coruscant est une ville-planète, mais ce retrouve dans d'autres films non moins connus, comme *Metropolis* de Fritz Lang (1927), *Blade Runner* de Ridley Scott (1982) adapté de la célèbre roman de Philip K. Dick *Les androïdes rêvent-ils de moutons électriques ?* en 1968, *Le cinquième élément* de Luc Besson (1997), ou encore *Minority Report* de Steven Spielberg (2002).<sup>11</sup>

On retrouve aussi cet imaginaire en littérature comme par exemple dans *Ravage* de Barjavel (1943).

<sup>11</sup> Usbeck & Rica, « La ville dans les films de science-fiction », 2013, <http://www.demainlaville.com/la-ville-dans-les-films-de-science-fiction-12/>



7. La ville de Coruscant dans *Star Wars*. Source : <http://www.demainlaville.com/la-ville-dans-les-films-de-science-fiction-22/>



8. Scène de *Métropolis*. Source : <http://blogs.ubc.ca/urbs/files/2013/09/metropolis-jpg>

Un autre thème sur lequel la science-fiction nous parle de l'imaginaire collectif est la robotique ou les systèmes de transport.

L'analyse de l'intérieur des vaisseaux peut être intéressante car l'équipage peut y être soumis à plusieurs formes de gravité. C'est le cas par exemple dans le roman *Rocket Ship Galileo* de Robert A. Heilein où les trois astronautes partent vers la Lune. Leur vaisseau est alors utilisé en gravité terrestre et lunaire mais aussi en apesanteur.

Dans *2001 : l'Odyssée de l'espace*, l'on voit plusieurs intérieurs de vaisseaux différents. Les espaces y sont vastes, très soigneusement rangés et d'un blanc immaculé. Stanley Kubrick et A. C. Clarke ont fait beaucoup de recherches pour rendre leur film crédible. Cela en fait une bonne source d'inspiration pour l'aérospatiale.

*Interstellar* a aussi été réalisé avec soin.

Bruno Jardin, ingénieur chez EADS pour Ariane 5, « trouve qu'il n'y a pas beaucoup d'erreurs scientifiques » dans le film. Les séquences de décollage ou d'amarrage des vaisseaux entre eux sont réalistes. Seule la taille de la fusée d'origine est exagérée. Pour lui, « *Interstellar* a une justesse et un contenu requis afin de servir d'inspiration à la science. » La justesse des supports de science-fiction est importante car si les scientifiques sont dans une impasse, « [...] qu'en face d'eux il y a l'inconnu, l'imagination et le cinéma leur servent de béquille. »<sup>12</sup>

Ce réalisme n'est cependant pas toujours de mise comme l'explique Marc Cohen. « Une grande partie de la science-fiction abandonne rapidement la composante scientifique et glisse dans une fantaisie insoutenable. Le film hollywoodien *Planète rouge* [d'Antony Hoffman, 2000] en est un exemple. Il utilise le noyau de protection contre les eaux *Truncated Octahedron* de mon concept de véhicule interplanétaire de 1997, mais il se débarrasse de l'enveloppe extérieure qui protégerait l'équipage de tous les autres risques, comme l'absence d'atmosphère »<sup>13</sup>

Beaucoup de films connus comportent des erreurs, on pourrait ainsi citer *Star Trek* ou *Star Wars* où les passagers ne ressentent jamais les effets de l'apesanteur.

<sup>12</sup> Konbini, 2014, <http://www.konbini.com/fr/entertainment-2/interstellar-ingenieur-spatial-cinema/>

<sup>13</sup> Imhof (Barbara) and Mohanty (Susmita), 2004, p.32

Traduction de l'extrait « Much of science fiction quickly abandons the science component and quickly slides into unsupportable fantasy. One example is that the Hollywood movie Red Planet uses the Truncated Octahedron watershielding core from my 1997 Interplanetary vehicle concept but it gets rid of the outer shell that would protect the crew from all the other hazard-such as lack of atmosphere. »

## 2) Le développement des stations spatiales

Parmi les rêves de colonies planétaires ou orbitales, pour l'instant seules les stations spatiales sont déjà devenues réalités. Les premières stations ont rejoint le ciel dans les années 1960.

Depuis la première station Saliout, les stations spatiales n'ont cessé de s'agrandir, prenant de l'ampleur afin d'accueillir toujours plus d'équipements scientifiques. Les volumes des stations sont devenus de plus en plus généreux sans forcément donner plus d'espace aux « pièces » de vie. Cet agrandissement a vu l'apparition de nouveaux équipements mais aussi la disparition de certains suite au développement de nouveaux produits.

Cependant, en dehors de leur taille et des techniques embarquées qui ont évolué au rythme des progrès sur Terre, les stations sont restées identiques sur certains points : une structure de tous temps de métal dérivée des vaisseaux spatiaux et un approvisionnement énergétique réalisé grâce à des panneaux solaire couplés à des batteries.

Ces stations sont relativement proches de la Terre. Elles sont placées dans la zone des orbites terrestres basses appelée en anglais LEO (*Low Earth Orbit*). L'ISS, seule station opérationnelle aujourd'hui vole, par exemple, à 400 km au-dessus de nos têtes : elle est donc plus proche de nous que n'importe quels satellites qui sont placés sur des orbites plus hautes. Les satellites servant au positionnement GPS sont à environ 20 200 km tandis que l'orbite géostationnaire se situe à plus 35 700 km.

L'ISS est l'objet gravitant artificiellement le plus proche de la Terre. Toutes les stations orbitales ont été lancées dans les couches les plus basses des orbites terrestres car elles sont situées sous la ceinture de Van Allen. Cette ceinture concentre des particules chargées venues du Soleil qui sont détournées de la Terre grâce à son champ magnétique. Ses particules ayant un impact mortel sur l'Homme, il est plus simple de ne pas avoir à la traverser pour atteindre la station.<sup>14</sup>

Petit tour historique et architectural de l'évolution de ces habitats. (cf. Tableau des caractéristiques en annexe)

---

<sup>14</sup> Wikipédia, Low Earth Orbit, mai 2017, [https://en.wikipedia.org/wiki/Low\\_Earth\\_orbit](https://en.wikipedia.org/wiki/Low_Earth_orbit)

## a) Saliout

Le programme Saliout regroupe 7 stations. Saliout 1 fut la première station soviétique mais aussi mondiale.

Ce programme est engagé suite au succès des programmes Vostok (12 avril 1961) puis Voskhod (6 octobre 1964) qui envoyèrent les premiers hommes dans l'Espace. Youri Gagarine devient le premier humain dans l'Espace le 12 avril 1961 à bord de Vostok 1. Dans le contexte de la guerre froide de l'époque, ces triomphes sont importants pour les Russes puisque les deux missions sont menées à bien avant leurs concurrents américains Mercury (5 mai 1961) et Gemini (23 mars 1965). Ce contexte est favorable à un projet plus ambitieux. Avec Saliout, le but est de réaliser une base dans l'Espace permettant une présence humaine prolongée.<sup>15</sup>

De 1971 à 1991, il y a eu 7 Saliout ; cependant, la configuration même de la station n'a pas beaucoup changé. Ce n'est qu'à partir de Saliout 6 que la station s'agrandit.

Les premières stations pesaient entre 20 et 25 tonnes, ce à quoi s'ajoutait le poids du vaisseau Soyouz apportant l'équipage. Elles faisaient 23 m de long et un peu plus de 4 m de diamètre. Elles pouvaient accueillir jusqu'à 3 astronautes.

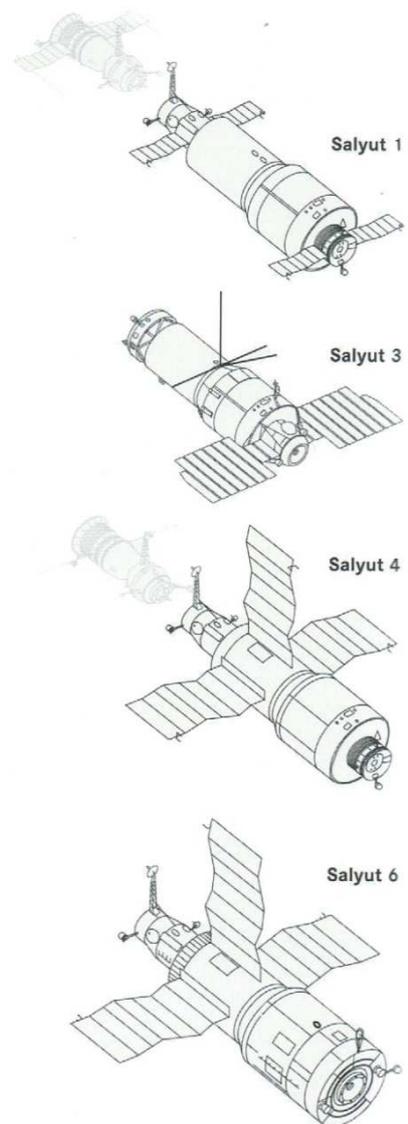
Au départ, le programme est un programme militaire et se nomme Almaz. Sous ce nom, l'union soviétique lance un programme à but militaire pour une plate-forme de reconnaissance en orbite terrestre basse. Cette décision prise en octobre 1964 est surprenante dans un contexte où l'attention est tournée vers la conquête de la Lune.

Le programme est confié à l'ingénieur et physicien Vladimir Chelomeï car il dispose alors du lanceur le plus puissant de l'époque : l'UR-500, connu sous le nom de fusée Proton.

La station devait comporter ; un télescope d'un mètre de diamètre, un vaisseau appelé TKS qui signifie vaisseau de transport des ravitaillements ; ainsi qu'un module d'environ 20 tonnes appelé OPS pour l'acronyme russe de Station orbitale Pilotée, qui contenait toutes les installations de surveillance.

L'équipe de Chelomeï prend cependant du retard car elle n'a pas d'expérience sur le développement de véhicule spatial. Le lancement prévu pour 1968 fut impossible. Chelomeï est donc amené à collaborer avec l'équipe de son ancien rival Korolev, dirigée par Vasile Mishin, équipe qui était responsable du programme soviétique pour amener des hommes sur la Lune. La station est rebaptisée Saliout et est basée sur les modules et la technologie des Soyouz. Le programme militaire Almaz est arrêté un temps mais pas supprimé. De ce fait, certaines stations Saliout seront aussi des stations Almaz, c'est-à-dire à visée militaire, et porteront plusieurs noms.

Le programme civil est codé DOS (*Longue Duration Station*) et le programme militaire OPS.



9. Comparaison des dimensions de certaines stations Saliout. Source Hänplik-Meusburger, 2011, p.46

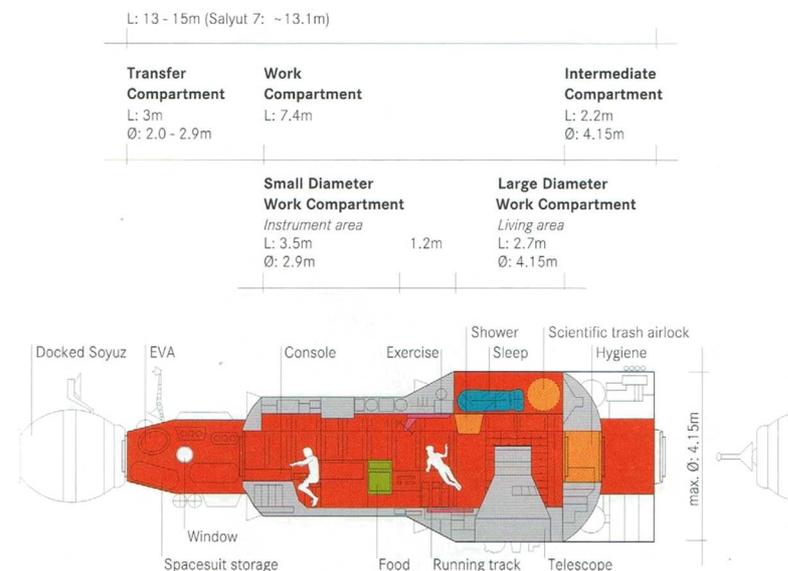
<sup>15</sup>Wikipédia, Programme Voskhod, 2016, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme\\_Voskhod](https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme_Voskhod)

Du premier Vostok jusqu'à la station Mir, le travail sur l'agencement intérieur revient à Galina Balaschowa. À travers son design, elle recréa une impression de sol et de plafond en opposant des couleurs claires (plafond) et des couleurs foncées (sol). Pour elle, il était impératif de créer un environnement pour les astronautes qui leur rappellerait leur environnement habituel sur Terre. Elle alla jusqu'à peindre des aquarelles mais elles furent détruite lors de la rentrée dans l'atmosphère.<sup>16</sup>

Le premier Saliout est lancé le 19 avril 1971 et ne sera en service que six mois.

La première équipe arrive à s'arrimer à la station mais ne peut pas y rentrer suite à un problème électrique qui empêche l'ouverture du sas. Ils reviennent après moins de six heures dans l'Espace. Le 3 juin 1971, la seconde équipe réussit à pénétrer dans la station. Le 18 juin, un feu électrique se déclare. Il est vite asphyxié mais cela provoque quand même la rentrée prématurée des cosmonautes, le 29 juin. Malheureusement, le Soyouz se dépressurise sur le retour et les trois astronautes meurent.

Par la suite, il est donc décidé que les cosmonautes porteront un scaphandre pressurisé lors du lancement et du retour sur Terre. C'est toujours le cas aujourd'hui.



Les scaphandres étant encombrants, le nombre de membres d'équipages chute à deux.

Le programme Saliout ne rencontre un réel succès qu'à partir de la troisième station lancée le 26 juin 1974 et qui sera opérationnelle pendant 213 jours. Cependant, ce succès arrive après la réussite des Américains à lancer la station Skylab. À partir de Saliout 3, les stations russes coexistent avec la station américaine.

10. Coupe de la station Saliout 5 avec répartition des activités. Source Hänplik-Meusburger, 2011, p.49

À partir de Saliout 6 et 7, la station est plus grande : 30 m de long pour 36 tonnes, et comporte un second port d'amarrage ; elle peut donc recevoir 2 Soyouz, un sas pour les sorties extra-véhiculaire et une douche. La possibilité d'amarrer plusieurs véhicules ouvre la voie d'une architecture modulaire. Dès ces stations, dites de seconde génération, on peut réellement commencer à parler de vol longue durée puisque les deux stations comptabilisent chacune plus de 600 jours d'occupation. Elles pouvaient respectivement accueillir 4 et 6 personnes.

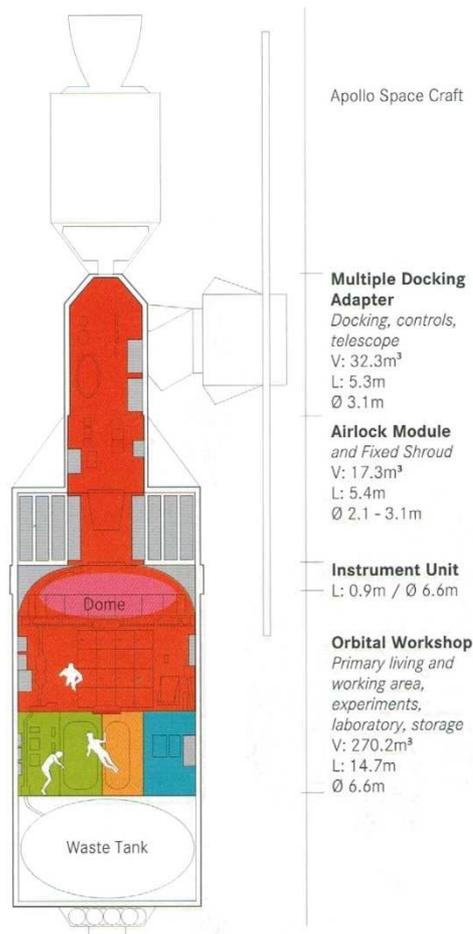
Dans la Saliout, toutes les fonctions sont regroupées dans le module de vie : il n'y a pas possibilité de séparer les activités. La station est constituée d'un cylindre au diamètre variable. Le diamètre maximum est atteint à l'arrière de l'espace de travail (4,15 m). Les sacs de couchage sont amarré à la structure, placé à « gauche et à droite » de cette partie plus large. L'endroit est choisi pour avoir une vue d'ensemble sur la station. C'est aussi dans cette partie que se trouvait la douche. L'eau sous pression aspergeait les astronautes tandis qu'au sol elle était aspirée enfin de recréer l'impression

<sup>16</sup> Meuser (Philipp) (dir), 2013, p.134

d'eau coulant vers le bas et non flottant sans gravité. Mais la douche devait être montée et démontée à chaque utilisation. De ce fait, cela prenait à peu près toute la journée et les cosmonautes ne prenaient donc de douche qu'une fois par mois.

Une partie « serre » permettait la culture de quelques plantes, pour la production de nourriture, d'oxygène mais aussi simplement pour le plaisir.<sup>17</sup>

## b) Skylab



11. Coupe de la station Skylab et de la répartition des activités. Le rouge représente les espace de travail, le rose les lieux de détente. En vert le coin repas, en jaune le stockage des déchets et en bleu les dortoirs. Source : Häuplik-Meusburger (Sandra), 2011, p. 57

Skylab est la première station spatiale américaine. Le but de la station est de créer et de tester le fonctionnement d'un environnement de travail et de vie pour une longue période, le tout de manière autosuffisante en ne nécessitant pas de fréquents ravitaillements.

De 1973 à 1979, la station Skylab orbite à 430 km d'altitude soit près deux fois plus haut que les stations Saliout (220, 240 et 360 km). Elle est plus volumineuse avec 77 tonnes, 26 m de longueur et 6,6 m de diamètre. Pour sa construction, les Américains ont réutilisé le matériel restant des missions Apollo. C'est donc sur les bases des vaisseaux Apollo et de la fusée Saturn V qu'est construit Skylab. Cependant, le programme avait été initié en 1965 avant les premiers pas sur la Lune.

L'espace de vie et de travail, l'OWS (*pour Orbital Workshop*) est un réservoir d'hydrogène reconverti provenant du troisième étage de la fusée Saturn V, d'où ses dimensions exceptionnelles qui ne seront plus égalées par la suite (14 m de long et 6,6 m de diamètre).

Le designer industrielle Raymond Loewy s'occupe de la conception intérieure. Il mène huit études sur l'habitabilité du module. Il explique l'influence positive du design intérieur sur la vie de l'équipage dans une lettre à George Mueller (administrateur pour les vols habités à la NASA) en 1974.

Skylab comporte un port d'amarrage (*Multiple docking système* ou MDA), et un télescope solaire (ATM pour *Apollo Telescope Mount*).

L'énergie est produite par le système à bord par le biais de panneaux solaires. Le fonctionnement en autosuffisance a nécessité le développement d'un système recréant un environnement viable nommé *Life support system* (LSS) qui est la base du système actuel de l'ISS (*ECLSS, Environnement Control and Life Support System*).

<sup>17</sup> Häuplik-Meusburger (Sandra), 2011, p 101,142 et 206

Skylab est la première station à avoir des dortoirs séparés. Le compartiment pouvait accueillir trois personnes. L'idée avait été évoquée chez les Soviétiques mais rencontra un refus de la part de certains astronautes. Selon le cosmonaute Valentin Lebedev, « vous ne pouvez pas séparer les gens les uns des autres. La proximité durant les longues missions est cruciale. Les membres de l'équipage peuvent réagir plus rapidement en cas d'urgence. »<sup>18</sup>

Le design de Raymond Loewy prévoyait que la séparation avec le compartiment suivant soit traitée différemment à chaque fois, afin de leur donner une identité différente.

Le principe de la douche et des toilettes reste globalement identique au Saliout. Les inconvénients aussi : pour les astronautes ranger et nettoyer la douche est une perte de temps. Cependant, contrairement à Saliout, un espace séparé est dédié à l'hygiène, de même que l'espace de repos est séparé de l'espace de travail. Pour le nettoyage de la station, les astronautes possédaient de petits aspirateurs portables. Enfin, les astronautes disposaient d'une vraie « pièce » pour prendre leur repas.<sup>19</sup>

Lors du lancement, le bouclier anti-météorite ne se déploie pas correctement et bloque un des panneaux solaire. La puissance électrique est insuffisante pour assurer la climatisation et la température monte jusqu'à 49 °C.

La première équipe sur place (mission Skylab 2) déploie une protection thermique en mylar et nylon. Ainsi, la température descend à 24 °C. Il n'arrive pas à débloquer le panneau solaire mais le programme scientifique de la mission est tout de même entièrement réalisé malgré le peu d'énergie disponible. Ce programme comprend l'observation de la comète Kohoutek et six sorties extravéhiculaire.

Au final, trois missions seront hébergées dans la station de respectivement 28, 59 et 83 jours. Elles auront permis d'accumuler beaucoup d'informations photographiques sur la Terre (46 000 photographies) et sur le Soleil (180 000).

À la fin de la mission Skylab 4, la station est placée sur une orbite « parking » dans le but d'une réutilisation ultérieure lorsque le Space Shuttle sera opérationnel. Le Space Shuttle est un vaisseau réutilisable qui peut atterrir sur Terre comme un avion. Cependant, son développement prend du retard. Comme il n'est pas prêt, Skylab est détruite en rentrant dans l'atmosphère en 1979.



12. Photo de l'espace de vie des astronautes. Source Wikipédia

<sup>18</sup> *Idem*, p.101

Traduction de l'extrait suivant « You can't separate people from each other. The closeness during long term missions is crucial. Crew members can act faster in emergencies. »

<sup>19</sup> *Id.*, p.102, 150 et 208

### c) Space Shuttle

Le Space Shuttle était un véhicule américain réutilisable. Il devait servir à faire la navette avec la station Skylab. Finalement, il fut mis en service plus tard que prévu et fut utilisé pour rejoindre la station Mir puis plus tard l'ISS. Il a également servi de plateforme pour la construction de l'ISS. Il a aussi été utilisé pour réparer des satellites défectueux ou endommagés.



13. Le Space Shuttle amarré au node Harmony de la station spatiale internationale. Source Wikipédia



14. Premier atterrissage du Shuttle Columbia le 14 avril 1981. © NASA

La navette est à la fois un habitat en soi, puisqu'elle peut transporter sept personnes dans un volume habitable de 66 m<sup>3</sup> et un cargo de ravitaillement. Son autonomie lui permettait de faire des missions de 17 jours. Lors de son retour, l'atterrissage se fait à la manière d'un avion.

La décision du président Nixon de financer le programme Space Shuttle a été une déception pour certains Américains. « Le projet de la navette m'est apparu comme un signe de défaitisme. Au lieu de nous appuyer sur les techniques qui nous avaient permis d'aller sur la Lune pour continuer vers Mars, on a construit un engin qui n'allait nulle part. » Ann Druyan, directrice de la création sur la mission interstellaire voyageur à la NASA.<sup>20</sup>

Il a existé cinq versions du Space Shuttle : Challenger, Columbia, Discovery, Atlantis et Endeavour. Le premier a été mis en fonction en 1981, la dernière mission a été réalisée en 2011. Un sixième Shuttle nommé Enterprise a été construit pour les tests atmosphériques et les entraînements mais n'a jamais volé. Au cours du programme, deux navettes furent perdues lors d'accidents : Columbia en 2003 et Challenger un 1986. La plus longue mission s'est déroulée en 1996 et a duré plus de 17 jours.

Le volume habitable était réparti sur deux niveaux. Il faisait 4 m de long, 2,7 m de large à l'avant et 3,7 m de large à l'arrière. Le fuselage de la navette est réutilisable ainsi que les boosters qui sont repêchés en mer puis reconditionnés pour de nouvelles utilisations.

L'espace de vie dispose de six grandes fenêtres à l'avant et de quatre à l'arrière pour voir la cargaison et surtout pour guider le vaisseau lors des rendez-vous et des amarrages à d'autres véhicules ou stations. À l'étage supérieur se trouvent les zones de contrôle de navigation ; l'espace de vie se trouve à l'étage inférieur. Dans cette partie-ci, l'équipe dort, mange, se lave et a accès à la cargaison.

Pour dormir, les sacs de couchage sont accrochés à une des parois du Shuttle. Les astronautes peuvent aussi dormir dans le sas ou dans le cockpit.

<sup>20</sup> Série documentaire Howard (Ron), Grazer (Brian), *Mars* : épisode 6, National Geographic, 52 minutes, 2016.

## d) Mir



15. Photo de la station Mir. Source Wikipédia

Mir est la première station spatiale internationale bien qu'elle n'avait pas été conçue dans ce but. Elle a accueilli 105 cosmonautes de onze nationalités différentes. À la base, elle est prévue pour deux personnes pour au maximum une mission d'un an. Au final elle a été utilisée pendant 15 ans avec jusqu'à six personnes à bord.

Mir est souvent traduit par *paix* ou *monde*. Le directeur du programme Shuttle Mir, Frank L. Culbertson a pourtant proposé une autre traduction en 1996 au congrès de l'association des explorateurs de l'espace. À savoir que ce serait une référence à l'utilisation original du mot 'mir' qui se réfère à un concept de village, où « [...] les habitants vivent proche les uns des autres pour mieux partager les ressources. »

Avec sa silhouette en T caractéristique, elle a un volume utile d'environ 380 m<sup>3</sup> pour 135 tonnes environ. Elle est composée de 6 modules et peut recevoir plusieurs vaisseaux en même temps. Comme la station n'était prévue que pour deux, elle ne comprenait que 2 cabines en russe kayutkas. Ces dernières étaient entièrement équipées avec des sacs de couchage, des rangements pour les effets personnels, un espace pour écrire, un miroir et la possibilité de décorer sa « chambre ». Les autres astronautes devaient donc se trouver de la place quelque part dans la station. Dans Mir, pas de douche mais une salle de bain séparée avec une unité pour se laver les mains et les cheveux. Pour l'hygiène corporelle, un savon sans rinçage était utilisé. En 1989, un compartiment comportant une douche est apporté avec le module Kvant 2. Mais le système n'est pas très efficace et la douche est finalement démontée pour laisser la place à un girodyne. Cependant, avant cela, elle avait été convertie en sauna et utilisée comme tel. Comme pour Skylab, un espace privilégié était destiné aux repas.<sup>21</sup>

## e) La Station Spatiale Internationale

La Station Spatiale Internationale est la plus grande construite à ce jour avec 6 modules et 3 nodes (modules nœuds) de 900m<sup>3</sup>. Deux des modules sont des modules de fonction (Zarya et Zvezda), tous les autres sont des laboratoires.

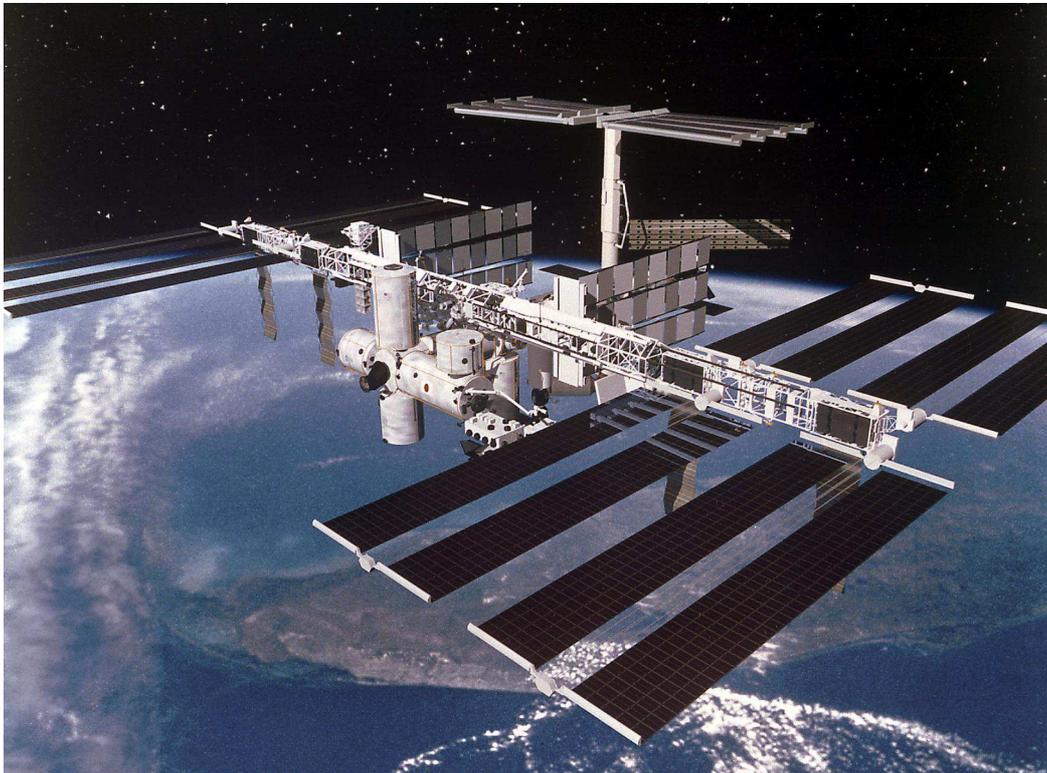
Initialement, l'ISS est un projet à l'initiative de la NASA. La station devait s'appeler Alpha. En 1979, la NASA prend conscience qu'il faut abandonner Skylab car le projet Space Shuttle arrivera avec trop de retard. La station est donc détruite et un nouveau programme est lancé pour la station Alpha.

En 1982 le *Space Station Task Force* est mis en place. Cette commission se charge du design et débute son étude en 1983 avec la création du *Space station Concept Development Group* (CDG).

---

<sup>21</sup> Häuplik-Meusburger (Sandra), 2011, p.106-107,164-169, et 212-213

Au fur et à mesure, le projet inclura l'ESA, la Japon (l'agence se nommant alors NASDA), le Canada et certaines agences européennes nationales (Italie, Pays-Bas et Allemagne). La Russie n'entre dans le projet qu'après la chute du mur en 1989 : c'est alors que le projet devient pleinement international et que la station change de nom. Le premier module nommé *Zarya* fut d'ailleurs lancé par les Russes depuis la base de Baïkonour le 20 novembre 1998.



16. Vue d'ensemble de l'ISS. © NASA ID 9802669-1998

Le module *Zarya* sert de *Functional Base/Cargo Block* (FGB) : c'est-à-dire qu'il contenait les systèmes principaux de productions et gestion de l'énergie, de communications et de contrôle de l'altitude aussi longtemps que les autres modules n'étaient pas rattachés. Aujourd'hui, il est utilisé pour le stockage et comme système de sauvegarde.

Le module de Service *Zvezda* est le centre structurel et fonctionnel des Russes sur l'ISS. Il comporte le système électrique du *Life Support system* : le système de contrôle de vol et de propulsion et le système de traitement des données. Il est utilisé pour les EVA. Du point de vue du design, c'est une version améliorée du module *Mir-Core*.

Une fois ces deux modules fonctionnels mis en place, les différents laboratoires et modules de jonctions ou nœuds (*nodes*) furent envoyés.

Le laboratoire américain *Destiny* fut le premier module scientifique de l'ISS. Il est connecté aux trois nœuds. Il renferme l'unité de refroidissement de l'ISS, le MELF (*Minus Eighty Degree Laboratory*) ainsi qu'un télescope.

Au nœud 3 *Tranquility* est accroché la *Cupola*. C'est une coupole d'observation permettant l'observation de la Terre. C'est le lieu préféré des astronautes sur l'ISS. Au nœud 2 *Harmony* sont accrochés le module européen *Columbus* et le module Japonais *JEM* (pour *Japan experiment module*) aussi appelé *KIBO*. Ce dernier est spécialisé dans le développement de matériaux et dans les expériences sur la vie. Les Japonais disposent aussi de leur propre module logistique accroché à *KIBO*.

Columbus renferme les expérimentations sur les matériaux, la physique des fluides (*Fluid Science Laboratory* ou FSL), la physiologie humaine (dans *l'European Physiology Module* ou EPM) et les technologies. Ce module renferme aussi le Biolab.

Les modules américain, européen et japonais sont construits sur le principe de racks (étagères) modulables et reconfigurables. La largeur fixe est de 1,05 m. La longueur et la profondeur peuvent changer. (ex. US. longueur max 2,1 m et 0,9 m de profond.)

Pour Kibo et Columbus, les racks ne sont pas si longs. Les racks « internationaux » sont aussi plus courts. Les modules ont été apportés petit à petit au fil des années. La station dans sa configuration actuelle existe depuis 2011.

Comme dans Mir, seules 2 cabines privées ont été prévues pour le repos de l'équipage et ce jusque fin 2008. Les autres astronautes devaient se trouver de la place autre part dans l'ISS. Ils pouvaient se retrouver parfois très loin du reste de leur équipe, dormant dans le module Zvezda. De la fin des années 1990 à 2001, des prototypes de logements déployables pouvaient cependant être testés dans le module Destiny. À la fin de l'année 2008, quatre kayutki supplémentaires ont été installées dans Harmony et JEM afin d'avoir un espace privatif pour les six résidents permanents. Les visiteurs utilisent des sacs de couchages.

L'ISS est la première station à ne pas être équipée d'une douche. Du savon et du shampoing sans rinçage sont utilisés, ce sont les mêmes produits utilisés dans les hôpitaux pour l'hygiène des personnes âgées. Les toilettes sont un système amélioré de ceux présents dans Mir. Les locaux consacrés à l'hygiène sont localisés dans Zvezda et Destiny.<sup>22</sup>

L'espace repas est également localisé dans Zvezda, ce qui en fait le module de vie de l'ISS. C'est la première station ayant un module entièrement consacré aux tâches non scientifiques. Les repas peuvent être choisis selon l'envie dans le menu russe, américain, japonais ou européen. Rapidement, les aliments n'ont plus de goût faute à la perte d'odorat dans l'espace et ce sont les plats les plus épicés qui sont privilégiés ou les sauces pouvant leur donner du goût.

À travers ce tour d'horizon, on constate qu'en dehors de l'ISS, le travail et les activités de la vie quotidienne ne sont pas séparées. Cela peut créer un sentiment d'inconfort chez les astronautes qui ne peuvent de ce fait se créer un espace d'intimité ou se retirer lors des vols longue durée. Même dans l'ISS, seule l'équipe résidente a un espace individuel ; les autres doivent se trouver une place. Et l'on peut se retrouver à tout faire dans le même espace comme l'explique Pedro Duque astronaute à l'ESA : « [on] ne peut pas rentrer chez soi pour dormir. Comme le laboratoire est dans une région éloignée, il faut dormir à l'intérieur et manger à l'intérieur [...]. Il y en a même qui restent dans le laboratoire jusqu'à un an. De temps en temps, vous avez envie de sortir, de voir quelque chose d'autre, d'ouvrir la fenêtre pour prendre de l'air frais, mais ce n'est pas permis. Dans ce laboratoire, les fenêtres ne peuvent jamais être ouvertes, et l'air est recyclé à travers des filtres. »<sup>23</sup> Cette organisation empêche une réelle séparation du travail et de la détente. Pour Pedro Duque, il serait important d'avoir un lieu dans la station qui ait un autre aspect, une autre esthétique où l'on pourrait vraiment se vider la tête du travail.<sup>24</sup>

L'ISS doit continuellement être ravitaillé et les équipes présentes sont renouvelées tous les six mois. Plusieurs véhicules sont donc utilisés. Aussi longtemps que le Space Shuttle était en place,

---

<sup>22</sup> *Idem*, p. 108, 172 à 177

<sup>23</sup> *Id.*, p. 109

Traduction de l'extrait suivant « Let's add another factor: it's not possible to go home to sleep. As the lab is in a remote region, one has to sleep inside it and eat inside. There are even those who stay in the lab for up to a year. Every now and then one feels like going out, see something else, have a walk open the window to get some fresh air, but that is not allowed either. In this lab the windows can never be opened, and the air gets recycled through filters. »

<sup>24</sup> Film documentaire Schmitzer (Ulrike) und Widter (Matthias), *Space architecture: Architektur für den Weltraum* (Architecture pour le cosmos), 3sat, 44 minutes 32 secondes, 2007

c'était l'une des navettes utilisées pour ramener les équipages en plus des Soyouz. Il y a toujours un Soyouz en place à la station, en cas d'urgence, qui est changé tous les six mois.

Les ravitaillements de l'ISS se font quant à eux grâce à plusieurs véhicules différents. Le Progress, un véhicule russe, est utilisé pour le ravitaillement et les livraisons de propergols. C'est le seul à pouvoir amener du carburant à la station — celui-ci est utilisé pour alimenter les moteurs qui servent à corriger la trajectoire de la station ou à la déplacer sur une autre orbite. Le vaisseau européen Automated Transfer Vehicle (ATV), qui fonctionne sans pilotage humain, effectue le ravitaillement en l'eau, en l'air, et ramène le matériel nécessaire pour les expériences. Jusqu'en 2010, il amenait aussi du propergol. En 2008, l'ATV « Jules Verne » atteint la station pour la première fois.<sup>25</sup>

Le cargo Dragon de Space X, l'HTV Japonais et le cargo Cygnus envoient quant à eux essentiellement des cargaisons de matériels scientifiques.<sup>26</sup>

Ainsi au fil du temps les stations se sont développées, offrant des espaces plus généraux pour pouvoir accueillir plus de personnes. Une séparation a été faite entre les lieux de travaux et les espaces privés. Dans l'ISS tout un module est consacré pour la vie de l'équipage mais cela reste peu face aux modules laboratoires. Les astronautes sont donc toujours confrontés à un manque d'intimité. D'avenir si les séjours s'allongent ou que l'équipe s'agrandit, ce besoin devra être pris en compte lors de la conception de la base.

---

<sup>25</sup> CNES, 2010, <https://cnes.fr/fr/web/CNES-fr/11496-plus-que-les-progress-pour-ravitailer-l-iss-en-carburant.php>

<sup>26</sup> Benazdia (Norédine), juillet 2011, <http://fr.ubergizmo.com/2011/07/10/qui-va-ravitailer-la-station-spatiale-internationale.html>

### 3) Une théorie de l'architecture spatiale

Avec le premier workshop de réflexion sur la base lunaire, le Lunar Base Design Workshop réalisé en 2002, l'agence spatiale européenne (ESA) a attiré l'attention sur une nouvelle forme d'architecture spatiale.<sup>27</sup>

Le workshop a été un succès et la publication qui l'a suivi ont montré, d'après l'architecte Hannes Stiefel, le potentiel de ce sujet, mais surtout a ouvert une porte à une nouvelle discipline de l'architecture spatiale.<sup>28</sup>

Susmita Mohanty appelle cette nouvelle discipline *Trans-gravity*. Architecte, elle est cofondatrice de l'entreprise Earth2Orbit ainsi que de Liquifer et a travaillé sur le projet Shuttle Mir et sur l'ISS.

Avec cette nouvelle discipline architectural *Trans-gravity*, l'occasion pour elle de revenir sur les différentes étapes du développement de l'aérospatiale et de son architecture. Elle classifie et nomme des périodes antérieures ce qui lui permet de lui donner une définition.

*Trans-gravity* est présentée comme le troisième genre de l'architecture spatiale.

En premier vient l'architecture du *voyage de l'esprit*, cela correspond aux utopies, autant qu'aux films et à la littérature que nous avons évoquée plus tôt, où se mélangent fiction et faits scientifiques. « Le Voyage de l'esprit » commence en 1865 pour Susmita Mohanty. Elle cite une longue liste d'ouvrages et de films, mais ne s'attarde pas sur les concepts utopiques de la NASA ou des articles de magazines. Elle s'intéresse au lien entre le premier genre et ce qui touche la population en masse - les livres et les films étant des médias à fort impact.

La deuxième période est nommée architecture *Man-in-a-can*. C'est celle des premiers vaisseaux spatiaux habités. Son commencement est situé vers 1961. Les espaces habitables des premiers vaisseaux étaient très restreints, ce qui donnait l'impression aux astronautes de vivre dans une « boîte à sardine » d'où la dénomination de cette architecture.

La structure et les technologies embarquées y étaient très largement dérivées des technologies militaires du fait du lien étroit entre les programmes civil et militaire de l'époque. Ces stations sont construites par les agences spatiales et leurs associés industriels. Les facteurs principaux pris en compte lors de la conception étaient la sécurité, la démonstration technologique et la médecine ; l'habitabilité était secondaire. Cependant, avec l'augmentation de la durée des missions, il devint nécessaire d'augmenter l'espace habitable - ceci incluant le besoin d'un regard architectural plus poussé. Après le succès de l'amarrage de deux Soyouz, de nouvelles possibilités s'ouvrent pour les stations orbitales avec plusieurs modules présents et amarrés entre eux.

« Depuis le lancement de la première station orbitale en 1971, les volumes des stations spatiales ont considérablement augmenté, depuis le module Saliout jusqu'à la configuration à modules multiples de l'ISS actuelle. Cependant, le programme d'architecture est resté largement constant. »<sup>29</sup>

Pour Susmita Mohanty, cela vient du fait que les agences spatiales sont un domaine dominé par les ingénieurs, et qu'ingénieurs et architectes ne se comprennent pas toujours. Pour elle, à l'avenir, ils auront besoin de trouver un moyen de se comprendre pour faire avancer l'habitat spatial.

---

<sup>27</sup> cf. résumé du workshop en annexe

<sup>28</sup> Imhof (Barbara) and Mohanty (Susmita), 2004 p.4-6

<sup>29</sup> *Idem*, p.30.

Traduction de l'extrait « Since the launch of the first orbital station in 1971, space station volumes have increased dramatically from the one module Salyut to the multiple-module configuration of the current ISS. However, the architecture program has remained largely constant »

C'est l'un des points essentiels requis pour arriver au troisième genre.

Cette nouvelle façon d'aborder l'architecture pour le cosmos, appelé par Susmita Mohanty « Trans-gravity », est apparue à la fin des années 1990. Ce nouveau genre prend en compte l'architecture spatiale comme l'extension naturelle de la pratique architecturale sur Terre. L'avancée de ce type d'architecture se fait par des architectes qui ne sont pas forcément liés à une agence spatiale et à leurs partenaires industriels, permettant la réalisation de nouveaux concepts et designs.

Les architectes qui participent possèdent leur propre agence, ne sont pas isolés du développement de l'architecture contemporaine et sont libres d'expérimenter avec les nouvelles technologies - comme la réalité augmentée par exemple.

Cela permet une continuité et une extension de l'architecture terrestre pour l'architecture spatiale. De la même façon, cela crée un retour d'expérience pour améliorer l'architecture sur Terre. Ces architectes se concentrent sur la création d'espace dans trois milieux à la force de gravité différentes : 1 G (Terre), 0 G (vide interstellaire), 1/x G (la Lune, Mars) ; d'où le nom de *Trans-gravity*.<sup>30</sup>

Cette philosophie est fondée sur une continuité de travail et de pensée entre la Terre et l'Espace. Cette continuité se base sur des connaissances, des techniques et des concepts communs. C'est le nouveau paradigme d'une architecture qui crée aussi un retour d'informations pour la Terre. À la manière de vases communicants, les actions se passant sur Terre ou dans l'Espace sont censées s'entraider et s'apporter des informations et de nouvelles bases utiles.

Cette vision de l'architecture en lien étroit avec l'architecture terrestre cherche à faire disparaître la séparation des deux pratiques en utilisant la polysémie de l'adjectif « spatial ».

« Qu'est-ce que l'architecture spatiale ? Il est vrai que je ne sais toujours pas avec certitude. Le terme semble être un pléonasm, puisque la conception de l'espace est réellement l'objectif de l'architecture. Ainsi, l'architecture spatiale est l'architecture *tout court* – non? »<sup>31</sup> Hannes Stiefel

Cette architecture, bien qu'à ses débuts, est déjà soutenue par des institutions éducatives telles que l'université de Vienne en Autriche dont l'auteur cite quelques projets.

Les partenariats et l'accélération de la convergence de l'architecture vers de nouveaux médias et technologies doivent permettre la genèse des projets de demains comme les futures bases lunaires.

---

<sup>30</sup>*Id.*, p. 32-33

<sup>31</sup> *Id.*, p.4 Traduction de l'extrait

« What is space architecture? Admittedly, I still don't know for sure. The term seems to be a pleonasm, since the designing of space actually is the goal of architecture. Thus, space architecture is architecture *tout court* – right? »

## II. La base lunaire

### 1) Architecture de l'extrême, se préparer à quitter la Terre grâce aux simulations

Le corps humains est adapté pour notre planète seulement ; loin de la Terre, il doit faire face à des milieux des plus hostiles. Il est soumis à des températures extrêmes variant rapidement, il ne peut pas y respirer et les radiations cosmiques sont dangereuses pour son patrimoine génétique. En dehors de cela l'isolement, le confinement et les problèmes techniques, sont des sources de stress permanentes.

L'objectif des missions analogiques est de diagnostiquer, anticiper et contrecarrer les possibles dangers et problèmes liés à l'Espace.

Ces dangers sont répertoriés par la NASA en 5 catégories :

D'un côté les différences de gravité, qui modifie le fonctionnement des fonctions vitales. En apesanteur les efforts sont réduits, en conséquence le rythme cardiaque et la circulation sanguine ralenti et les muscles s'atrophient. L'isolement et le confinement créent des tensions entre les membres de l'équipage, à long termes cela est source de stress et d'ennui.

L'environnement extérieur hostile est un danger permanent et les rayonnements cosmiques peuvent créer des lésions graves à l'ADN et être source de maladie. Enfin la distance de la Terre est perçue comme un danger inconnu essentiellement en ce qui concerne les voyages vers Mars. En effet personne ne sais quel impact cela aura sur les premier colons de plus voir leur planète mère.

Sur Terre, ces différentes composantes ne sont pas présentes en même temps et différents lieux sont de ce fait utilisés pour les simulations. D'un côté les milieux arides pour leur ressemblance avec le sol martien, comme le volcan Mauna Loa. D'autre part les océans où l'on ne peut respirer et les déserts pour la différence importante de température entre la nuit et le jour comme le désert de l'Utah. La variation rapide de température est en effet une caractéristique du cosmos non négligeable. Sur la Lune la température descend jusqu'à -150 °C dans les parties à l'ombre et monte jusqu'à 150 °C au soleil. Sur Mars la température varie entre -120 °C et +20 °C.

Ces simulations sont essentielles car elles permettent d'étudier un des facteurs les plus importants et surtout le plus difficile à prévoir sur la mission : le facteur humain.

L'isolement crée des effets psychiques pouvant être dévastateurs. La désocialisation des membres d'équipage peuvent amener à ne plus reconnaître les lois établies à ne plus comprendre les ordres et le but de ce que l'on fait. « On n'est pas à l'abri d'un coup de folie.<sup>32</sup> »

Cela est déjà arrivé dans le passé lors de la mission Skylab. Les astronautes font grève car ils trouvaient que le contrôle au sol leur donnait trop d'ordres, leur laissait trop peu d'initiatives et trop peu de loisirs. Une solution a été trouvée mais le contact entre les équipes est resté tendu pendant tout le reste de la mission qui a été écourtée. Lors la mission Saliout 5, il y eu un affrontement au couteau. De telles situations, si elles arrivaient sur la Lune - ou lors du voyage vers Mars où la distance rendrait une médiation impossible - auraient des conséquences terribles.

Ainsi les agences spatiales réalisent autant de missions analogues que possible pour pouvoir former des équipes performantes et leur donner de meilleures conditions de travail. D'autres domaines scientifiques apportent aussi des informations sur l'isolement et le confinement. C'est le cas de la station Concordia. Lieu d'hivernage en Antarctique, les recherches qui y sont menées,

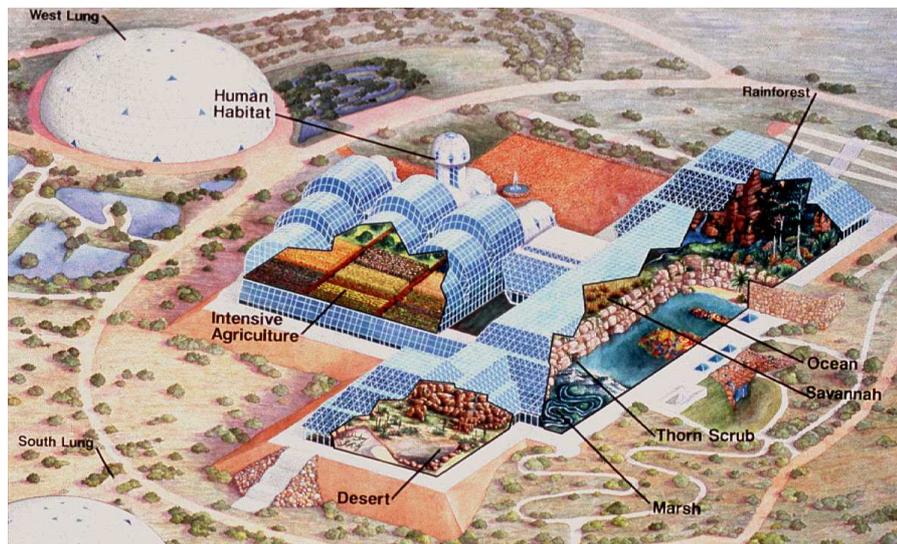
---

<sup>32</sup> Pihen (Alexandra), mai 2017, p.47 à 66

essentiellement sur le climat, n'ont pas de lien direct avec l'aérospatiale. Cependant, les chercheurs y sont aussi confrontés à un isolement total.

## a) Biosphère 2

L'expérience Biosphère 2 a été réalisée en Arizona en 1991. Le bâtiment et la mission portent le nom de Biosphère 2 en référence à la Terre nommée Biosphère 1. Biosphère 2 est une immense serre recréant sept environnements différents. Le but était d'expérimenter pendant deux ans une existence coupée du reste du monde fonctionnant en autonomie. Cela devait permettre de mieux comprendre les rouages de l'équilibre et le fonctionnement de notre biosphère naturelle. Ce devait aussi être un centre de recherche et de développement pour des technologies d'autosuffisance permettant la colonisation spatiale. Le programme a coûté cent cinquante millions de dollars. C'était la première expérience visant à savoir si une vie en communauté était possible dans un espace confiné. Elle devait permettre de mesurer la faisabilité de la création de nouveaux écosystèmes ou de systèmes de vie autonomes dans le cosmos et sur d'autres planètes, entre autres Mars.



17. Axonométrie présentant les différents environnements recréés dans Biosphère 2.  
Source : <http://biosphere2.org>

Tout commence en 1984 lorsque Margaret Augustine et Edward Bass achètent le Sunspace Ranch. Leur but est d'y construire, au nom de la Space Biosphere Ventures, Biosphère 2, une invention de John P. Allen. Ce dernier est ingénieur système et ingénieur en écologie, métallurgiste et écrivain. Il a été le chef de recherche pour le développement de Biosphère 2. Le projet est validé en 1984 suite à une conférence où 60 scientifiques et ingénieurs du monde entier se sont prononcés sur la faisabilité du projet.

Avant la construction de la serre finale un module-test a été construit et trois simulations courtes de quelques jours s'y sont déroulées jusqu'en 1989. Suite à cela, les travaux ont débuté. La même année lors d'une conférence internationale, la Biosphère est reconnue comme une nouvelle science, celle des systèmes matériellement fermés, mais énergiquement et informatiquement ouverte.

En septembre 1991 huit scientifiques, quatre hommes et quatre femmes sont entrés dans une serre de 1,27 ha pour une durée de 2 ans. Avant de commencer, neuf essais préliminaires d'une semaine

avaient été réalisés. Dans cette serre sont recréés artificiellement un marais, une savane, un désert de 1 400 m<sup>2</sup>, une forêt tropicale avec 90 espèces d'arbres, un océan de 2 600 m<sup>2</sup> et ses coraux, des terres agricoles, la résidence de l'équipe. L'atmosphère devait rester inviolée, les « bionautes » devant assurer eux-mêmes l'autarcie alimentaire en cultivant la nourriture.

Un test d'étanchéité est réalisé en décembre 1991 révélant un taux de fuite inférieur à 10 % par an.<sup>33</sup>

La mission ne sera pas une totale réussite quant à la vie en autonomie. Les 2 000 m<sup>2</sup> de terre agricole n'ont permis de produire que 80 % des besoins nutritionnels. Le régime était essentiellement végétarien, le lait, la viande et les œufs provenant des animaux de la ferme. Dans l'ensemble, l'agriculture et la transformation des aliments occupaient environ 45 % du temps de l'équipage. Les membres de l'équipage ont perdu environ 10 à 20 % de leur poids initial au cours des six premiers mois de la mission avant de se stabiliser.<sup>34</sup>

Selon Roy L. Walford, l'un des « Bionautes, » les terres agricoles n'ont pas suffi à produire la nourriture à cause du mauvais ensoleillement des années 1991 et 1992 mais aussi à cause de l'expansion de certains insectes ravageurs. Cependant, leur régime alimentaire était de très bonne qualité car comprenant moins de calories mais plus de nutriments essentiels. Ils sont ainsi devenus les premiers sujets d'une étude sur la nutrition humaine.<sup>35</sup>

L'équipage fut confronté à un autre problème majeur : un déclin d'oxygène de l'ordre de 0.3% par mois. Le sol utilisé pour Biosphère 2 était très riche en matière organique, ainsi la respiration des micro-organismes présents dans le sol fit chuter la teneur en dioxygène, faisant passer le taux normal de 21 % à 14 %. Une partie du CO<sub>2</sub> rejeté par les micro-organismes réagissait quant à lui avec le béton de la structure pour former du carbonate de calcium.<sup>36</sup>

La baisse d'oxygène fut contrôlée jusqu'à 14 % afin de tester l'adaptation du corps humain à une faible concentration en oxygène. Les contrôles ont montré que jusqu'à 16 %, l'équipe fut peu affectée. Cette découverte a des implications majeures dans les explorations sous-marines et planétaires.

De l'oxygène est finalement injecté dans le système en janvier 1993 alors que cela fait plus d'un an que la mission est en cours.<sup>37</sup>

Le fonctionnement en autarcie n'a donc pas réussi. De tous les systèmes mis en place, seul celui de recyclage de l'eau et de la pression atmosphérique a fonctionné. Mais ces problèmes inattendus ont permis de faire de nouvelles études sur le fonctionnement humain.

Après la fin de la mission et face aux difficultés rencontrées, M. Bass décide de changer d'approche scientifique dans une direction prenant moins en compte l'écologie. Cela crée un conflit dans l'équipe de direction. Edward Bass reste finalement seul à la direction mais la deuxième mission sera un échec. Suite à cela le projet et le lieu sont confiés à l'université de Columbia qui y réalise toujours des expériences aujourd'hui. Elle y mène des études sur les écosystèmes réductionnistes en mettant l'accent sur les niveaux de CO<sub>2</sub>.<sup>38</sup>

---

<sup>33</sup> The University of Arizona, <http://biosphere2.org/visit/about-biosphere2/history>

<sup>34</sup> Résumé de Silverstone (S.E.), Nelson (M.), 1996, p.49-61

<sup>35</sup> Walford (Roy L.), Mars 2002, p. 259 à 263

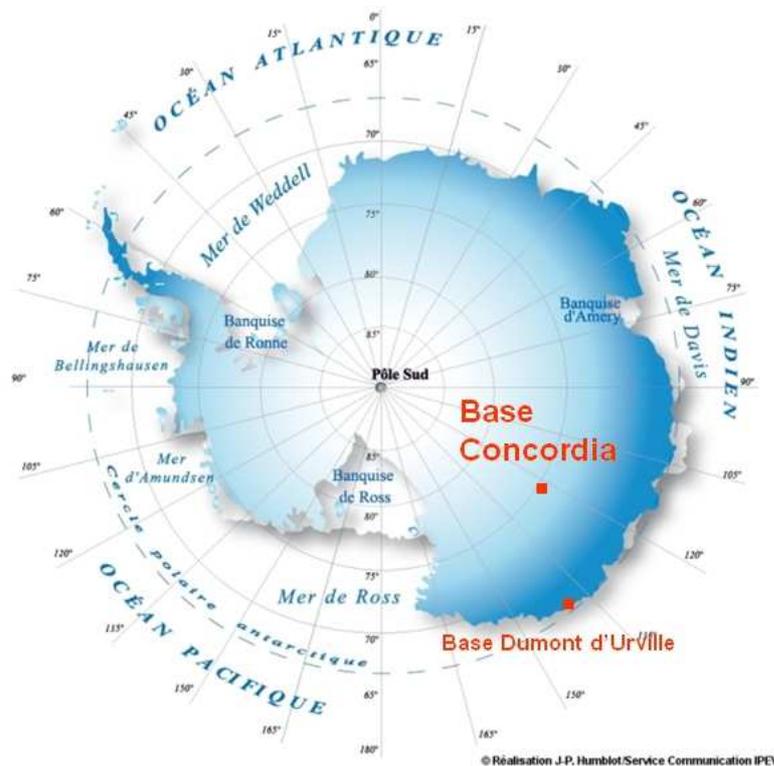
<sup>36</sup> Severinghaus (Jeffrey P.) et al., janvier 1994, p. 33 à 40

<sup>37</sup> Walford (Roy L.), Mars 2002, p. 259 à 263

<sup>38</sup> Augustine (Margaret), Allen (John) et Alling (Abigail), 1988, <http://www.biospherics.org/biosphere2/chronology/>

## b) Concordia (Station d'hivernage)

La station Concordia est un centre de recherche isolée sur le plateau continental Antarctique, elle se situe à 1 100 km de la base française de Dumont d'Urville et à 1 200 km de la base italienne Terra Nova Bay. C'est la seule base permanente européenne placée à l'intérieur des terres, les autres sont placées sur la côte. Le site a été choisi pour son atmosphère stable et pure facilitant les observations astronomiques et les études de la composition de l'atmosphère et des fluctuations de la couche d'ozone. Le site est aussi placé sur le tracé de la grande partie des satellites défilant à orbite polaire.



18. Position de la Base Concordia sur la calotte Antarctique. © Service de Communication IPEV, J.-P. Humblot

2005. Elle a coûté 34 millions d'euros. Le Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a labellisé la station « Très Grande Infrastructure de Recherche » (TGIR).<sup>40</sup>

Les équipes d'hivernage sont renouvelées chaque année et sont composées de plusieurs chercheurs et techniciens, d'un médecin et d'un cuisinier.

Au sein de la station, des recherches sont menées dans le domaine de la glaciologie et de la paléoclimatologie, en chimie et en physique de l'atmosphère, en astronomie - car l'atmosphère rare et stable y crée l'un des meilleurs sites d'observation sur Terre-, ingénierie et médecine. L'ESA participe au soutien de programmes dans le domaine de la médecine et du comportement humain en milieu confiné. Elle collabore également avec l'IPEV, sur le plan technologique, pour la mise au point de prototype de traitement des eaux usées de la station.

La structure de la station fut la première en son genre. Elle est composée de deux cylindres reliés entre eux par une passerelle. L'ensemble repose sur des pilotis à vérin qui permettent de surélever

La gestion et la conduite des programmes de la station appartiennent à l'institut Paul Emile Victor (IPEV) et au Programme National de recherche en Antarctique de l'Italie PNRA. Pendant l'hiver, moment où elle est coupée du reste du monde la base accueille 16 personnes. Le reste de l'année, elle peut accueillir jusqu'à 60 personnes grâce à l'ajout de structures éphémères à l'extérieur.<sup>39</sup>

Placée à 3 200 m d'altitude, la température de l'air y est d'environ -50 °C pouvant descendre jusqu'à -80 °C. L'accès à la base se fait par avion ou convois de tracteurs pour l'équipement lourd.

Le projet de réalisation a débuté en 1998 et la base a ouvert en

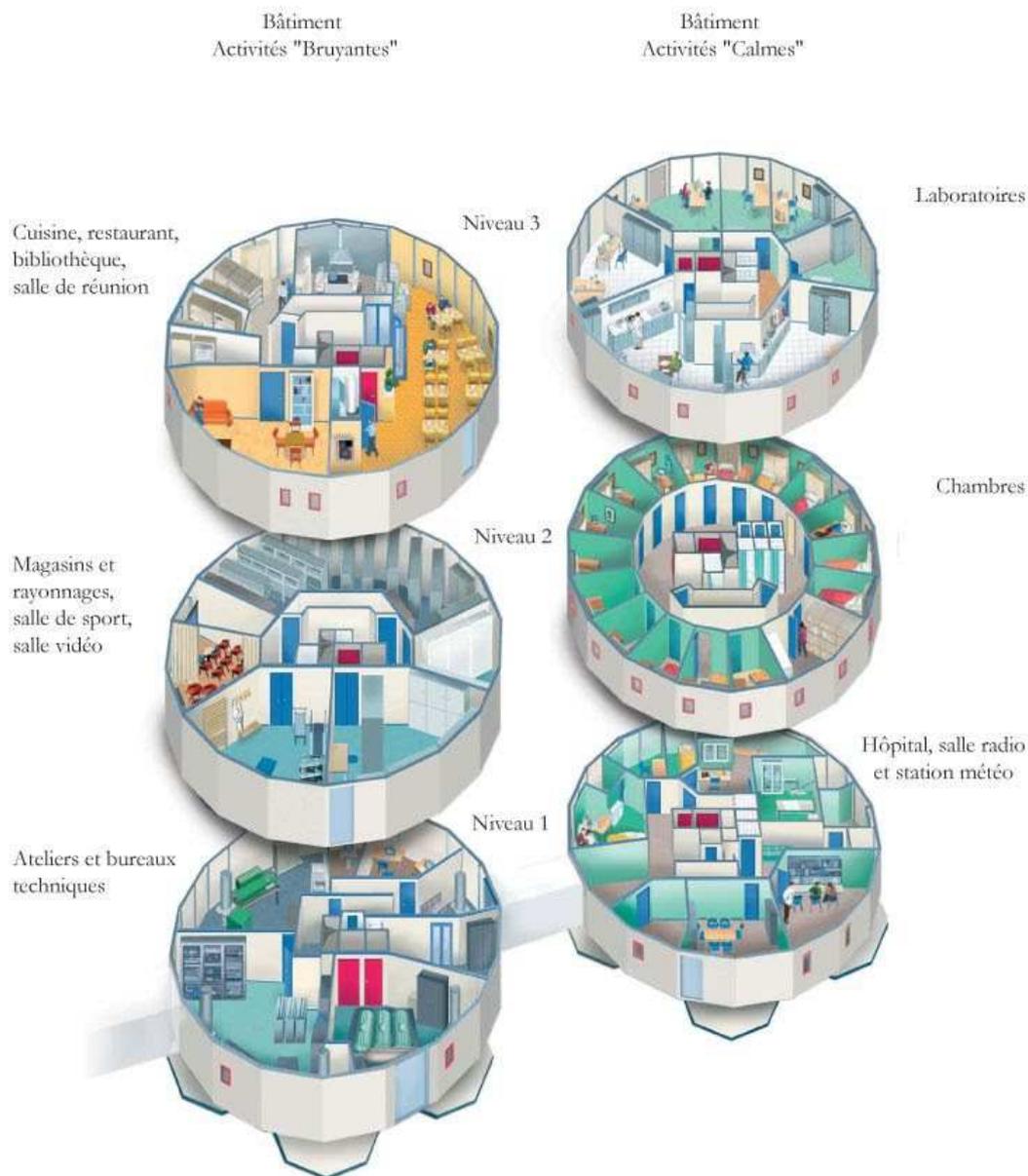
<sup>39</sup> Institut polaire Français, Concordia, <http://www.institut-polaire.fr/ipev/infrastructures/les-bases/concordia/>

<sup>40</sup> MENESP, « Basse antarctique franco-italienne CONCORDIA », <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid99405/base-antarctique-franco-italienne-concordia.html>

la station au fur et à mesure de la chute de neige. Cela limite la création de congères devant les fenêtres et garde la station toujours à niveau avec le sol extérieur pour simplifier les sorties. La station comporte 3 bâtiments : deux sont surélevés et sont les lieux de vie et de travail ; le dernier abrite la centrale électrique. Les salles sont regroupées entre elles en fonction des bruits que génèrent les activités qui s'y déroulent. Un des cylindres est dédié au calme, on y retrouve l'hôpital et les chambres. L'autre concentre les activités « bruyantes » comme le réfectoire et les ateliers techniques.

Les deux structures principales ne sont pas des cylindres mais des polygones de 18 côtés posés sur six pilotis qui peuvent soulever le bâtiment jusqu'à 15 m de haut.

Les deux bâtiments principaux sont reliés au niveau du premier étage. Constitués d'une charpente métallique, ils sont recouverts de panneaux isolants qui permettent de conserver une température agréable à l'intérieur malgré une différence de 100 °C entre l'intérieur et l'extérieur.<sup>41</sup>



19. Axométrie élatée de la base. Source <http://www.technweb.info/documents/station-concordia>

<sup>41</sup> AMAEPF, Station Concordia –Dôme C., <http://www.amaepf.fr/concordia/le-dome-c>

Le bâtiment a pour but de réduire autant que possible son impact sur l'environnement. En cela, il se plie au règlement du Traité sur l'Antarctique et aux recommandations du protocole de Madrid.

Pour ce faire, tous les déchets sont recyclés. Les gaz d'échappement sont filtrés et la consommation en carburant est optimisée.

La centrale électrique est située suffisamment loin des deux autres bâtiments pour que les émanations ne perturbent pas l'observation de l'atmosphère et ne faussent pas les données collectées.

L'ESA a participé à la mise en place du système de traitement des eaux usées et des déchets. Les eaux grises sont séparées des eaux noires. Les eaux grises sont nettoyées par ultra et nano-filtration puis traitées par deux stades d'osmose inverse ; tandis que les eaux noires sont stockées avec les déchets de nourriture dans une unité de fermentation anaérobie. Les boues obtenues à l'issue des différentes étapes du retraitement sont congelées puis stockées afin d'être rapatriées en fin de mission.<sup>42</sup>

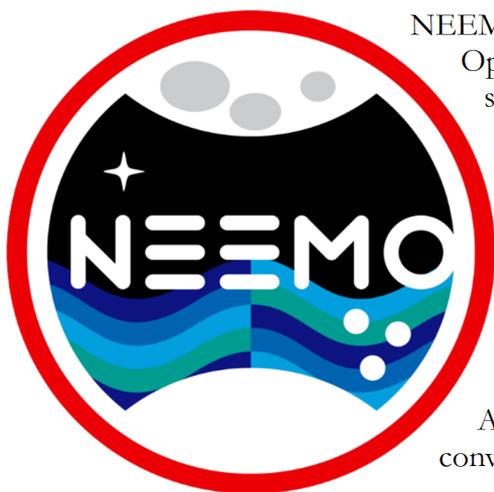
L'ESA soutient également la recherche sur la médecine et le comportement humain en milieu confiné.

Lors d'une interview pour le magazine Science et Vie, Claire Le Clavez responsable technique de la base Concordia raconte son expérience.

L'isolement lié à l'hivernage a un impact psychologique lors de la mission mais cela continue une fois de retour chez soi. Elle explique qu'une fois rentrée « on ne peut pas tout raconter, nos proches ne comprennent pas nos anecdotes ». Pendant l'hivernage les scientifiques doivent gérer le manque d'intimité. Si certains disent qu'il faut être solitaire pour s'adapter à ces situations Claire Le Clavez pense que « il faut surtout aimer vivre avec les autres ».

Le plus dur est de gérer les situations de crise car « on ne peut pas savoir à l'avance comment on va réagir à un stress intense ». Lors d'un black out électrique ceux qui ont mal géré le stress sont devenus un poids pour les autres. Les problèmes pouvant être nombreux lors d'une mission vers Mars, cela lui fait dire qu'il faudra vraiment en choisir les membres soigneusement.<sup>43</sup>

### c) NEEMO (sous-marin)



NEEMO qui signifie NASA Extreme Environment Mission Operation, est une mission se déroulant dans un laboratoire sous-marin. Astronautes, ingénieurs et scientifiques peuvent séjourner jusqu'à trois semaines dans le laboratoire Aquarius au cours d'une de ces missions. Les membres de l'équipage, au nombre de six, sont nommés « Aquanautes », c'est-à-dire des explorateurs restant 24h ou plus sous l'eau.<sup>44</sup>

Le laboratoire Aquarius est utilisé depuis 2001. Au jour d'aujourd'hui, 21 missions NEEMO s'y sont déroulées. Aquarius et son environnement fournissent une analogie convaincante pour l'exploration spatiale puisque l'eau est

<sup>20</sup> Ecusson du programme NEEMO. © NASA

<sup>42</sup> Godon (Patrice), Cucinotta (Nino), *Concordia une nouvelle station permanente sur le plateau antarctique*, <http://www.diagonale-groenland.asso.fr/pdf/Concordia.pdf>

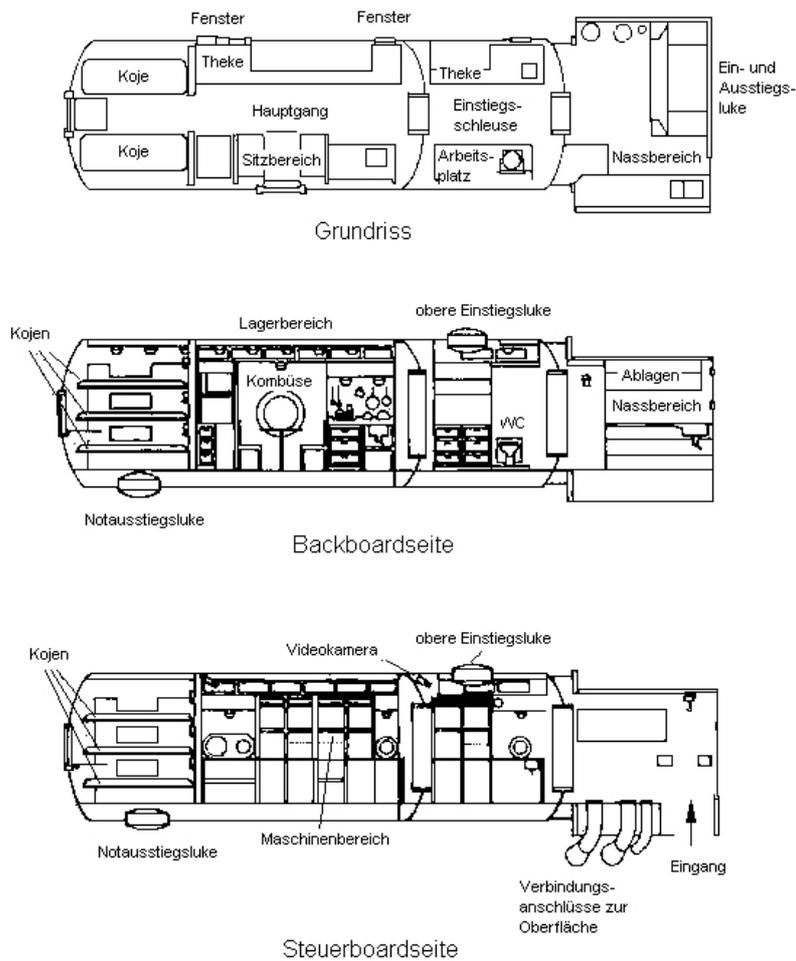
<sup>43</sup> Pihen (Alexandra), *Op. cit.*, Interview de Claire Le Clavez, p.65

<sup>44</sup> NASA, Document sur les missions Analogue, 2011

l'élément qui recrée le mieux ce qui s'approche de l'apesanteur. Tout comme le cosmos, le monde sous-marin est un lieu hostile et étranger pour l'être humain. Tout explorateur non protégé peut y mourir car on ne peut pas y respirer, c'est un lieu isolé, où l'on ressent peu la gravité. Au cours des missions NEEMO, les « aquanautes » peuvent simuler une existence dans un vaisseau spatial et tester des techniques appropriées pour de futures missions dans l'Espace. Les conditions sous-marines ont l'avantage supplémentaire de permettre à la NASA de pouvoir « charger » les aquanautes lors des sorties extérieures pour simuler la gravité présente sur la Lune ou sur Mars.

Contrôlé par l'Université internationale de la Floride (FIU), Aquarius est situé à 5,6 kilomètres de Key Largo dans le sanctuaire maritime national de Florida Keys. Il est déployé à côté de récifs coralliens à une profondeur de 19 mètres sous la surface.

La base Aquarius comprend l'habitat, le laboratoire sous-marin et une plate-forme d'observation des océans. Les aquanautes passent la majorité de la mission dans la base qui n'est grande que de 120 m<sup>2</sup> et comprends 6 couchettes ce qui amplifie un peu plus l'analogie à une station orbitale. Le module est maintenu à la pression ambiante à l'extérieur ce qui permet aux Aquanautes d'explorer de façon illimité les eaux alentours. Ils doivent toutefois passer par des paliers de décompression lors de leur remontée à la surface.<sup>45</sup>



21 Plan et coupe du module Aquarius. Source : Wikipédia

<sup>45</sup> Loff (Sarah), About NEEMO, 2015, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/NEEMO/about\\_neemo.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/NEEMO/about_neemo.html)

La plupart des missions se sont déroulées au printemps et en été sur une durée de une à deux semaines. Seules quatre d'entre elles ont été réalisées en septembre et en octobre.

Comme le précise la NASA, NEEMO est une mission, pas une simulation. Bien que tout y soit fait pour ressembler à une mission spatiale, des recherches spécifiques sont menées sur place. Ainsi l'équipage NEEMO 21 a effectué des tests avec un mini-séquenceur d'ADN et a collecté des échantillons pour des études sur la biologie marine et la géologie pendant les sorties et participer à un projet de restauration de corail.

Bien entendu, l'analogie avec des missions spatiales est exploitée autant que possible.

Par exemple l'équipe NEEMO 14 a pu essayer la prise en main et le test d'équipement, d'outils et de véhicules que la NASA pourrait être amenée à utiliser sur d'autres planètes ou sur la Lune. NEEMO 21 va également tester les retards de communication semblables à ceux qui seraient rencontrés dans une mission sur Mars.

Aquarius est aussi utilisé pour tester et optimiser le design des futures combinaisons spatiales ainsi que la sécurité de mécanisme et des interfaces que doivent utiliser les équipes.<sup>46</sup>

#### **d) HI-SEAS**

Les expériences HI-SEAS, pour Hawai'i Space Exploration Analog and Simulation, sont dirigés par la NASA à Hawaï mais reçoivent aussi des astronautes de l'ESA.

L'habitat est isolé sur le site de Mauna Loa à Hawaï à environ 2 500 m d'altitude. Il est installé sur la pente nord du volcan, dans une ancienne carrière abandonnée suite à l'effondrement d'un tube de lave. Le site présente plusieurs avantages : il est quasiment dépourvu de végétation, la faune y est aussi absente, et il n'y a aucune trace d'activité humaine, ni sites archéologiques ni traces pratiques culturelles. Il est situé à distance de toutes habitations et ne peut être vu afin que l'isolement soit respecté. Enfin, le sol rocailleux et essentiellement basaltique présente des similitudes avec Mars. Du fait de son analogie, il est possible d'effectuer des travaux de terrain similaire à ceux possible lors d'une exploration et de tester des robots.

Le temps à Hawaï étant frais et sec et variant peu, le site est accessible toute l'année ce qui permet de réaliser des expériences de longues durées, ce qui n'est pas possible dans d'autres lieux de simulation comme NEEMO par exemple.

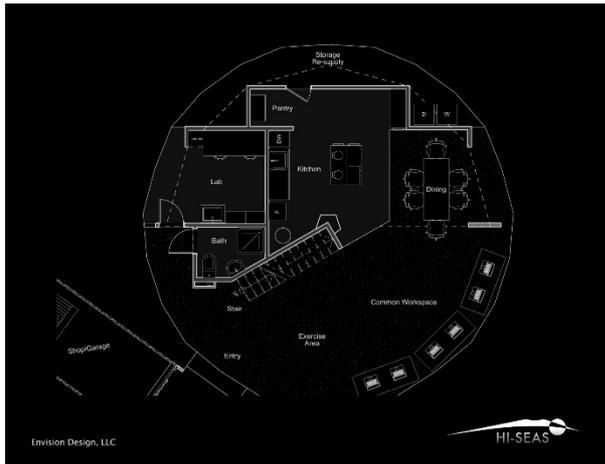
L'accès à l'habitat se fait par un chemin de terre. Il est composé d'un dôme fourni par Pacific Domes International et d'une structure interne de 2 étages conçue par V. Paul Ponthieux de Envision Design qui a été construite par la Blue Planet Foundation.

Le dôme géodésique fait 10 m de diamètre pour un volume de 4 000 m<sup>3</sup>. Le rez-de-chaussée comprend 260 m<sup>2</sup> utilisables avec cuisine, salle à manger, salle de bains avec douche, laboratoire, salle d'exercice et espaces communs. Le loft du deuxième étage s'étend sur une superficie de 130 m<sup>2</sup> et comprend six cabines séparées et une salle d'eau. En outre, un conteneur d'exportation de 50 m<sup>2</sup> converti en atelier peut être attaché à l'habitat si nécessaire.<sup>47</sup>

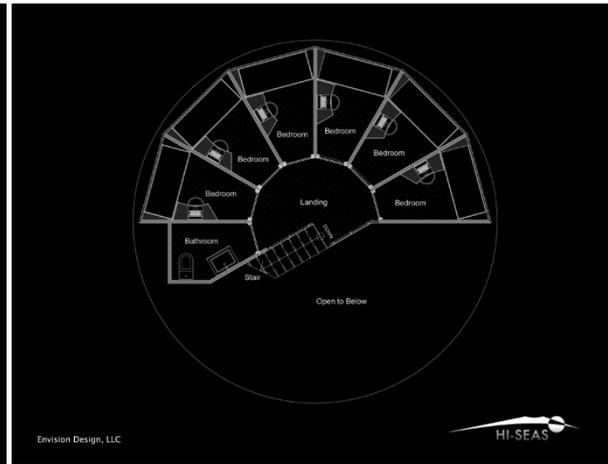
---

<sup>46</sup> Garcia (Mark), NASA Astronauts Train Deep Undersea For Deep Space Missions, 22 Juillet 2016, [Consulté en avril 2017], <https://www.nasa.gov/feature/nasa-astronauts-train-deep-undersea-for-deep-space-missions>

<sup>47</sup> Psysan, The HI-SEA Habitat, 29 avril 2013, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://hi-seas.org/?p=1278>



22 Plan du rez-de-cbaussée, <http://hi-seas.org/?p=1278>



23 Plan de l'étage, <http://hi-seas.org/?p=1278>

La production d'énergie se fait à l'aide de panneaux solaires. Ils produisent 10 kW, localisés au sud de l'habitat, ils sont visibles depuis la fenêtre du laboratoire. Pendant la journée l'excédent charge des batteries qui fournissent de l'électricité une fois la nuit venue. Si les jours sont nuageux et que les batteries ne peuvent pas être chargées entièrement, l'équipe doit mettre en place des stratégies pour limiter la consommation d'énergie. Si la charge des batteries est inférieure à 10 % une pile à combustible à hydrogène prend le relais. En dernier recours un générateur au propane peut être utilisé. Il peut être alimenté pendant plusieurs jours grâce à un réservoir de 4 000 L situé plus loin de l'habitat.

Ce système de multiples formes de secours est directement calqué sur la réalité présente dans l'Espace où plusieurs sources d'énergie doivent être envisagées.

En dehors du générateur à propane, les autres moyens de production sont des solutions envisageables pour une exploration martienne.

Contrairement au fonctionnement électrique, la gestion de l'eau n'a pas été pensée de façon analogique à une mission martienne. L'eau stockée dans deux réservoirs d'environ 2 000 L est renouvelée toutes les 4 à 5 semaines. À l'intérieur de l'habitat, des toilettes sèches sont utilisées, ce qui n'est pas possible dans l'aérospatiale à cause de la gestion des déchets. Les eaux usées sont collectées dans un réservoir pour un traitement ultérieur.

L'équipage des simulations est constitué en fonction des capacités de chacun et des besoins de recherche. Le système de communication reprend les durées de mise pour Mars c'est-à-dire 20 minutes. La communication est donc asynchrone.

Cinq missions ont déjà été réalisées de durée différente, allant de 4 à 8 mois à un an.

L'un des aspects les plus étudié est l'affectation psychologique et sentimentale dû à l'isolement. C'était d'ailleurs l'un des objectifs principaux de la troisième mission HI SEAS ainsi que l'impact du manque d'intimité dans un petit groupe à long terme. La NASA mène ces expériences afin de rassembler des informations qui pourront l'aider à la composition de la future équipe qui ira sur Mars.

D'une mission à l'autre, certaines recherches restent communes comme :

- Fonctionnement en équipe et efficacité ;
- Communication, comportement social ;
- Autonomie ;
- Gestion du stress ;
- Exploration géologique.

À côté de cela d'autres recherches ponctuelles sont poursuivies comme celles sur le stress et la fatigue.<sup>48</sup>

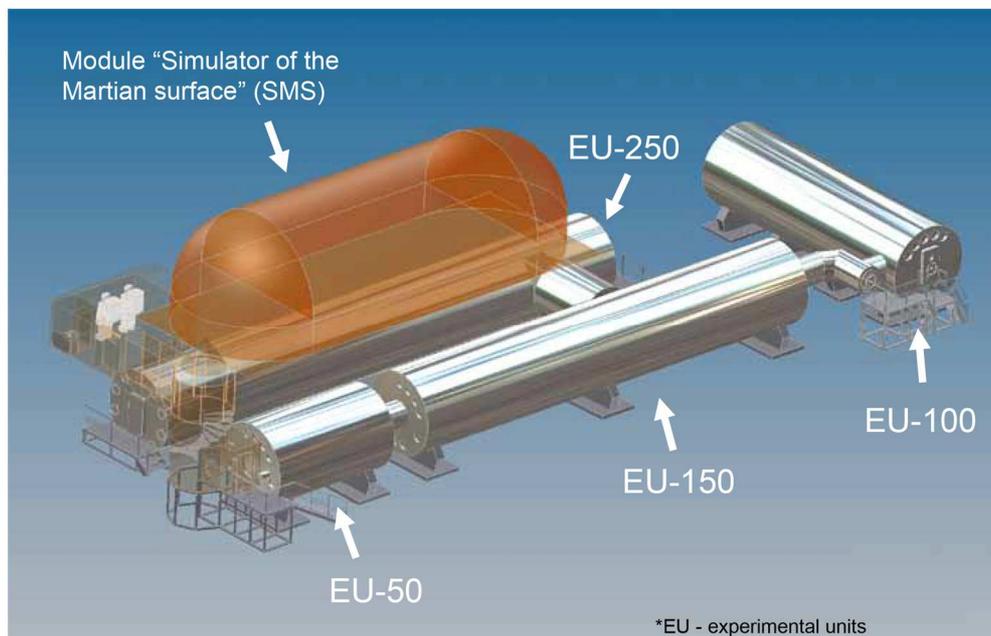
Par exemple lors de la troisième mission ; différentes méthodes de croissance de plantes ont été testées, entre autres des techniques de culture en lumière artificielle ; la lumière du soleil n'étant pas toujours disponible dans l'Espace.<sup>49</sup>

Ces simulations offrent aussi la possibilité de tester de nouvelles technologies que les futurs explorateurs de Mars pourraient utiliser lors de l'expédition vers la planète rouge essentiellement les rovers et les robots. Une mission vers Mars durant environ de deux ans et demie à trois ans, avec environ la moitié de ce temps sur la surface planétaire, rien ne doit être laissé au hasard et toute expérience préalable est utile.<sup>50</sup>

### e) Mars 500

Mars 500 est une expérience conduite par l'Institut pour les problèmes bio-médicaux du RAS et l'Académie des sciences de Russie sous l'égide de l'agence spatiale russe Roscosmos en partenariat avec l'agence spatiale européenne ESA.

Elle comprend une série d'expériences simulant les aspects d'un vol interplanétaire vers Mars dont essentiellement la composante relative à l'isolement à long terme et des simulations de l'arrivée sur Mars. Elle a duré 520 jours d'où son nom, ce qui correspond à un aller-retour vers Mars avec une mission de 30 jours sur la planète même. Auparavant, deux missions-tests plus courtes ont été réalisées. L'expérience s'est déroulée du 3 juin 2010 au 4 novembre 2011. L'équipe était constituée de 6 hommes. Pour l'expérience, une station spatiale avait été créée dans la banlieue de Moscou incluant la capsule du vaisseau, une serre et un module recréant le sol de la planète Mars. Le vaisseau ne comportait pas de fenêtre donc les 6 participants ont été coupés de la lumière du jour pendant un an et demi.



24. Axonométrie de la « station » Mars 500. Source [http://mars500.imbp.ru/en/index\\_e.html](http://mars500.imbp.ru/en/index_e.html)

<sup>48</sup> Engler (Simon), Binsted (Kim), 2016,

<sup>49</sup> Pacific Domes, NASA's Mission Mars Simulation with Pacific Domes, 2016, <http://pacificdomes.com/mission-mars-simulation-in-pacific-dome/>

<sup>50</sup> Sicheloff (Steven), 2015, <https://www.NASA.gov/feature/hi-seas-team-completes-8-month-isolation-mission>

L'ensemble du dispositif MARS 500 était composé de plusieurs modules. Un premier de 50 m<sup>2</sup> (EU-50) qui simulait l'atterrisseur martien pouvant accueillir 3 personnes pour 2 à 3 mois. Un module de 100 m<sup>2</sup> (EU-100) où étaient réalisées les expériences médicales et psychologiques. Un module de 150 m<sup>2</sup> (EU-150) qui était à proprement parler le module de vie avec les 6 couchettes des astronautes. Enfin un module de 250 m<sup>2</sup> (EU-250) utilisé uniquement pour le stockage et incluant également la serre. Enfin un dernier module couplé à l'atterrisseur martien simulait la surface de Mars.

L'expérience avait pour but l'étude de l'interaction entre les participants face à cet « environnement humain » inhabituel du fait du confinement, ainsi que l'obtention des données expérimentales sur l'état de santé et la capacité de travail des humains, restés longtemps isolés. Cela incluait d'étudier le sommeil afin de comprendre comment les astronautes peuvent se reposer efficacement. L'expérience mettait en place les conditions prévues lors du vol martien, les délais de communication, l'autonomie importante des occupants et la limitation des ressources.

Avant la simulation principale, deux simulations-tests plus courtes ont été réalisées. L'une de 14 jours et l'autre, plus longue, de 105 jours. Cette dernière servit à optimiser la préparation de la mission principale pour que celle-ci soit conduite de la façon la plus efficace possible grâce à l'obtention et l'analyse d'informations scientifiques et techniques.<sup>51</sup>

L'équipage vivait au même rythme que les astronautes sur l'ISS : leurs journées étaient constituées de maintenance, d'expériences scientifiques et d'exercices sportifs. Sur la semaine de 7 jours, deux étaient consacrés au repos sauf cas spécial et urgence.

L'événement de la mission fut l'arrivée sur Mars et les simulations au sol. Ceci est arrivé au bout de 250 jours et le groupe a alors été divisé en deux. Trois personnes se sont dirigées dans le module représentant l'atterrisseur pour rejoindre le module recréant le sol de Mars, tandis que les trois autres restaient à bord du vaisseau.<sup>52</sup> Cette séparation de l'équipe était surveillée et attendue car elle intervient lors de la phase d'épuisement, là où le risque de conflit est le plus élevé. La séparation en deux entités peut créer des conflits et de la jalousie puisque les deux parties ne réalisent plus les mêmes tâches.

Un suivi psychologique par l'équipe du professeur Katherine Weiss (professeur de psychologie à la faculté de Nîmes) a été réalisé tous les 15 jours sous forme de questionnaires. La question récurrente de ce questionnaire était « Comment vivez-vous l'isolement, qu'est-ce qui vous manque ? ». Les participants devaient aussi répondre à un questionnaire bimensuel sur l'humeur des derniers jours pour savoir si ils éprouvaient le besoin de s'isoler ou de voir du monde. Karine Weiss rappelle aussi qu'ils pouvaient demander à sortir à tout moment si il le désiré. La mission aurait alors continué sans eux comme si ils étaient morts lors d'un incident dans l'Espace. Après leur retour le suivi a continué pendant un an afin d'éviter un contrecoup. Certains astronautes comme Edwin Aldrin ont fait une dépression à leur retour sur Terre.<sup>53</sup> Le français Romain Charles raconte que malgré les « tensions inévitables, aucune ne s'est installée dans une durée trop longue qui aurait été préjudiciable à la bonne marche du groupe ». Il a fallu « gérer quelques périodes de lassitude et désamorcer les prémices de conflits » mais le groupe est tout de même resté unis. Il raconte que l'anniversaire des ans un de la mission a beaucoup perturbé l'équipage car cela leur a fait prendre

---

<sup>51</sup> SSC RF Institute of Biomedical Problems RAS, 2010

<sup>52</sup> ESA, Mars 500 Quick facts, [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_Spaceflight/Mars500/Mars500\\_quick\\_facts](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Mars500/Mars500_quick_facts)

<sup>53</sup> De la Cruz (Boris), 2011, <http://www.leparisien.fr/societe/mars-500-personne-n-a-voulu-sortir-avant-la-fin-de-la-mission-04-11-2011-1701883.php>

conscience du temps écoulé et du temps qu'il restait. Cette prise en compte du temps était « quelque chose qu[ils] ne faisai[en]t pas, on préférait rester dans le présent et vivre semaine après semaine »<sup>54</sup>  
À l'intérieur du « vaisseau » 3 espaces de réalité virtuelle était en place pour permettre l'expérience d'émotions positives. Le premier « Wellness Park » projetait des environnements destinés à la joie, au calme et à la relaxation, le second « Wellbeing in Nature » des paysages naturels. Le dernier « The Book of Life » était un journal de bord personnel incluant des exercices psychologiques.<sup>55</sup>  
L'expérience fut un succès, il n'y a pas eu de conflit.

Cependant l'expérience a confirmé les désagréments causés par l'isolement déjà relaté en 1954 par Jean Rivolier, médecin des expéditions polaires françaises.<sup>56</sup> Il appelait cela « syndrome mental d'hivernage ». Les personnes isolées pour un certain temps passent par différentes phases qui peuvent à termes devenir dangereuse pour la mission.

Premièrement la phase d'euphorie du départ, celle de partir à l'aventure.

Après environ 2 mois, la phase d'alarme correspond à un moment de frustrations où peuvent survenir des remords. Les participants pensent à ce qu'ils ont laissé derrière eux. La phase de résistance qui survient après fait peser le poids de la routine sur l'équipe. La présence des autres peut devenir une gêne et entraîner la dépression ainsi que de l'agressivité. Enfin vient la phase d'épuisement. L'équipage est plus tolérant et a retrouvé un équilibre mais est aussi moins actif ; or, c'est à ce moment qu'il faudra atterrir sur Mars. Cet événement majeur pourrait renforcer les liens à l'approche du but mais aussi faire ressurgir certaines des tensions apparues précédemment. Dans le passé des conflits ont entraîné la fin de missions. Lors de l'expérience Skylab c'est un mouvement de grève qui a été observé de la part des astronautes, car ils trouvaient que Houston leur laissait trop peu d'initiative et leur donnait trop de travail. Le contrôle au sol a donc un rôle important dans le déroulement des événements, cependant il n'aura aucun pouvoir lorsque les délais de communication seront de 20 minutes aux abords de Mars.

Les résultats de Mars 500 montrent aussi que l'isolement à des répercussions non seulement psychologiques mais aussi physiques. En effet, face au stress le corps somatise. Il crée des troubles du sommeil, des maux de tête, des problèmes digestifs, sans qu'on sache pourquoi cela provoque un épaississement des artères. Le même syndrome est observé pour les astronautes à bord de l'ISS et n'aurait donc peut-être rien à voir avec les conditions hypogravitique de l'Espace.<sup>57</sup>

Si les simulations sont des outils précieux, elles ont tout de même des limites qui peuvent remettre en cause jusqu'à leur résultats.

Ainsi le journalsite Adrien Denèle, dans son article au sujet de la fin de l'expérience HI-SEAS 4, rappelle que les simulations ne peuvent pas recréer de réelles situations de stress, ce qui modifie aussi l'impact psychologique. Les risques ne sont pas représentés et le fait de savoir que l'expérience peut être évacuée en cas d'urgence limite la peur de l'imprévu. Enfin, les contraintes liées à l'apesanteur et aux radiations reste totalement absentes.<sup>58</sup>

---

<sup>54</sup> Decourt (Rémy), 2012, <http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronautique-mars-500-astronaute-romain-charles-raconte-520-jours-experience-36881/>

<sup>55</sup>Roscosmos, 2012

<sup>56</sup> Pihen (Alexandra), 2017, p.62

<sup>57</sup> Pihen (Alexandra), *Idem*, p.62

<sup>58</sup> Denèle (Adrien), août 2016, <https://www.cieletespace.fr/actualites/un-an-sur-mars-ou-presque-c-est-fini>

## 2) SHEE un module lunaire pour la Terre

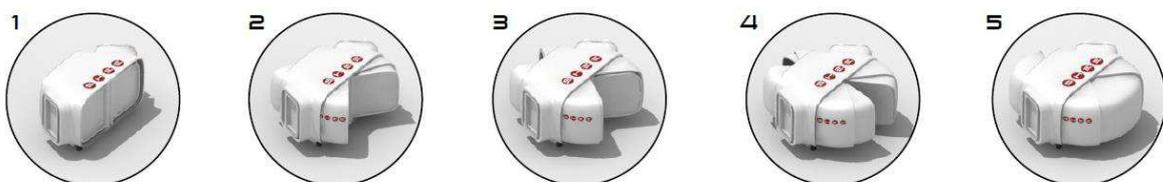
Les différentes simulations nécessitent la mise en place de module recréant des habitats spatiaux. Pour que la simulation soit de qualité, il faut que ces derniers aient les mêmes caractéristiques et soit équipées des mêmes techniques, que pour une mission réelle. Ainsi, les membres de la simulation peuvent tester de nouveaux outils pour les futures missions, s'entraîner à la maintenance, etc.

SHEE fait partie de ce type d'abri. Bien que conçu dans le but d'être uniquement utilisé pour des simulations sur Terre, il a été entièrement étudié pour pouvoir être envoyé sur la Lune. Lors de la création du module, ces dimensions ont donc été limitées. Le module SHEE est dimensionné pour pouvoir voyager à bord du lanceur Ariane 5. La capsule pourrait accueillir deux à trois modules.

Le projet a été lancé le 1<sup>er</sup> janvier 2013 et a duré trois ans avec un budget total de 2,9 millions d'euros. Comme de nombreux projets en aérospatiale, son nom est un acronyme : SHEE pour *Self-deployable Habitat for Extrem Environment* (Habitat auto-déployable pour environnements extrêmes). Chaque module peut accueillir deux personnes, ils peuvent être reliés entre eux afin d'accueillir plus d'occupants.

Le consortium SHEE regroupe sept acteurs. L'ISU (université spatiale internationale) en tant que coordinateur. Spin architecture comme membre fondateur du consortium et responsable des plans du projet et de la définition des stratégies de conception. Liquifer Sytem Group pour l'architecture, le design, l'ingénierie et la prise en compte du facteur humain. Ainsi que Space application, l'université de Tartu en Estonie, Comex et Sobriety.

Outre les missions analogues, SHEE a aussi été développé pour pouvoir être utilisé dans des situations d'urgences. En cas de catastrophe naturelle, sa capacité de déploiement rapide est un atout pour mettre à disposition un abri aux sinistrés. Le module peut être mis en place partout sans besoin immédiat de se connecter à une infrastructure existante, grâce à une autonomie pouvant aller de 24 heures à 2 jours maximum.



25. Etapes de l'ouverture du module. Source shee.eu

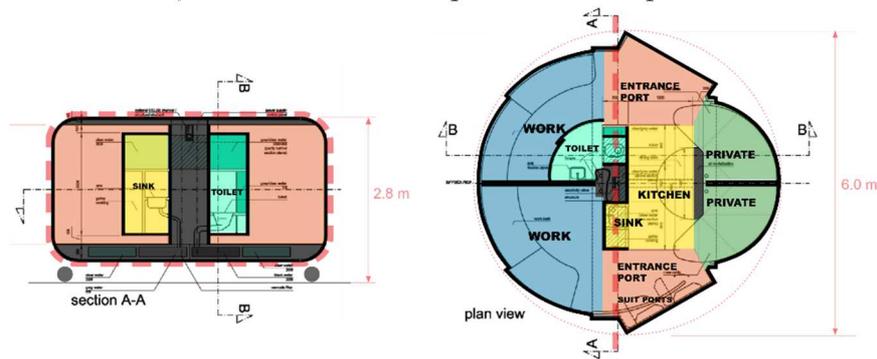
SHEE est un module de seconde classe de type déployable.

Dans sa version compact, le module a les dimensions d'un conteneur de transport de 2,4 x 2,8 x 6 m. Une fois ouvert, sa largeur est doublée, offrant 50 m<sup>3</sup> soit 28 m<sup>2</sup> habitable pour une masse de 5 500kg.

Le volume est divisé en cinq zones : le sas d'entrée, deux zones de travail, deux couchettes privatives, une cuisine, et une cabine de toilette. Du mobilier escamotable est intégré à la structure. En dehors de la cuisine, toutes les sections peuvent être modifiées pour accueillir d'autres fonctions comme une serre ou une station médicale.

Le projet intègre également un nouveau concept mis en place pour lutter contre la contamination de l'environnement intérieur après les EVA (sortie extra-véhiculaire). À la place d'un sas pressurisé

contenant les combinaisons, celles si sont directement attaché à l'extérieur contre la structure. Ainsi, les scaphandres restent toujours à l'extérieur, ce qui limite les risques de contaminations.



26. Plan et coupe du module. Source : shee.eu

L'habitat n'est pas pressurisable, ni étanche à l'air, mais permet de simuler partiellement un système de gestion et de contrôle de l'environnement comme il y en a dans les stations spatiales<sup>59</sup>. Ce système nommé ECLSS pour *Environment Control and Life Support System* ne fonctionne dans SHEE qu'en partie en circuit fermé.

Il a une capacité de 24 heures à environ deux jours en circuit fermé, et de deux semaines en circuit ouvert. Le circuit ouvert prévoit l'ajout d'une source d'énergie permettant de recharger les batteries de 600 Ah. Ces batteries dispensent l'énergie nécessaire au déploiement initial.

Cela est cependant suffisant pour former les membres de l'équipage à l'utilisation de tels équipements.

La structure a été réalisée avec des composants structurels utilisés dans l'industrie de la navigation. Ces matériaux, tous ignifugés, possèdent une structure en nid d'abeilles limitant les risques de propagation d'un impact dans la structure. Cette structure fournit aussi une isolation thermique et acoustique.



27 Photo prise lors de la mission analogue Moonwalk, <https://room.eu.com/article/project-moonwalk>

À la fin du projet en janvier 2016, le module a été déclaré comme complet et accessible aux scientifiques et ingénieurs pour des missions analogues. La première mission de ce type a été réalisée en avril 2016 à Rio Tinto sous le nom de MOON WALK FP-7<sup>60</sup>

<sup>59</sup> University of Tartu, SHEE Newsletter 1 et 2, <http://shee.eu/press>

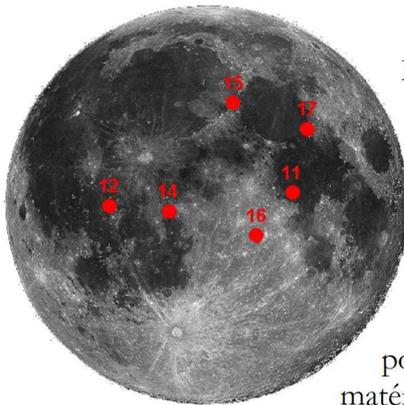
<sup>60</sup> DR Weiss (Peter) and all, 2013

### 3) Comment construire sur la Lune

#### a) Les défis de l'environnement lunaire

L'orbite de la Lune oscille entre 356 000 et 399 000 km de la Terre. Les hommes qui iront s'y poser arriveront après trois jours et demi de voyage. Le site privilégié pour un habitat sur la Lune étant le pôle Sud, ils se poseront dans une partie encore non explorée de l'astre. Pour l'instant, les zones étudiées se situent dans les régions proches de son équateur. Des explorations ont été menées dans ces lieux de 1969 à 1972, soit en seulement trois ans, par les missions Apollo 11, 12, 14, 15 et 17.

Le choix du pôle Sud s'explique de plusieurs façons, outre le fait qu'il s'agisse encore une région inexplorée. Le pôle Sud est un des rares lieux sur la Lune qui échappe au cycle des 14 jours de lumière suivi de 14 jours de nuit. Là-bas, la nuit n'est que de 12 h, ce qui permet d'utiliser l'énergie solaire pour alimenter la station. De plus, la présence de glace d'eau est avérée dans le cratère Shackleton. Cela a été confirmé par les radars de la sonde LRO. Le fond du cratère de 20 km de diamètre et 4,2 km de profondeur contiendrait 22 % de glace d'eau.<sup>61</sup> Contrairement aux personnes qui iront sur Mars, les astronautes pourront bénéficier d'une aide et d'un contrôle à distance de la part de la Terre puisque le délai de communication est d'environ deux secondes.



28. Position des différentes mission Apollo.  
Source Doule (Ondrej), 2017, p.30

La Lune ne possédant pas d'atmosphère, l'environnement y est proche du vide, les températures y sont extrêmes : entre -170 °C et +130 °C.

L'absence d'atmosphère fait que, contrairement à la Terre, il n'y a pas de protection aux radiations mais aussi ni de convection de l'air. Cela veut dire pas de vent, mais aussi que les changements de température y sont rapides et violents ; très froid à l'ombre ou lorsqu'il fait nuit, très chaud au soleil. L'habitat lunaire devra donc posséder une bonne isolation thermique et être constitué de matériaux supportant un tel écart de température. L'absence de convection pose un autre problème : les parties ne peuvent être refroidies naturellement il faut donc prévoir un système de refroidissement pour éviter que la chaleur rayonne à l'intérieur du

système et que l'on arrive à une surchauffe de l'habitat. L'absence d'atmosphère induit aussi que l'être humain sera exposé à des radiations. Ces radiations proviennent des événements solaires extrêmes (SPE pour *solar particle event*) ; c'est-à-dire les éruptions solaires et les vents solaires que cela crée, mais aussi des rayonnements cosmiques.

Or, le corps humain ne peut pas supporter plus de 5 rem de radiations par an, tandis que sur la Lune, sans protection, la dose peut atteindre 30 rem par an.<sup>62</sup>

Enfin, l'absence d'atmosphère rend aussi la Lune plus vulnérable aux météorites, même les plus petites.

La surface de la Lune est couverte de régolithe, une épaisse couche de poussière composée de débris de roches. Sa composition la rend « collante » électrostatiquement, abrasive et cancérigène. Son aspect « adhésif » a représenté un réel problème pour les missions Apollo pour éviter la contamination des équipements, de l'habitat et la détérioration des outils de surface.

<sup>61</sup> Martin (Emilie), juin 2012, <https://www.cieletespace.fr/actualites/decouverte-de-glace-au-pole-sud-de-la-lune>

<sup>62</sup> Doule (Ondrej), 2017

Selon les données d'Apollo, les 10 à 20 premiers centimètres sont très fins et volatiles, puis le régolithe devient plus grossier : sa densité augmente varie entre 0,8 et 2,15 g/cm<sup>3</sup>. Composé en majorité de Silice (SiO<sub>2</sub>) avec 56 %, il contient aussi de l'oxyde de fer, d'aluminium et de magnésium.

Son épaisseur n'est pas constante sur toute la surface de l'astre : dans les maria la couche est de 5 m contre 10 m dans les plateaux.<sup>63</sup>

Les plateaux correspondent aux parties blanches et brillantes sur la surface de la Lune tandis que les parties sombres correspondent aux maria. Les zones sombre contiennent plus de métaux lourds tels que le fer et le titane ; les croûtes, plus claires, plus d'éléments légers comme le calcium, le magnésium et le silicium.<sup>64</sup>

Les architectes spatiaux qui concevront la base lunaire devront imaginer un moyen de limiter la pénétration des poussières dans les mécanismes et les environnements habitables. Cela sera nécessaire pour limiter les pannes mécaniques et toutes les actions que cela inclut : maintenance accrue, réparations et réapprovisionnement. La contamination possible de l'habitat est particulièrement préoccupante en raison des effets nocifs du régolithe sur la santé de l'équipage.<sup>65</sup>

L'existence de tremblement de Lune est aujourd'hui vérifiée. La cause des séismes les plus violents n'est pas connue alors que les plus faibles seraient liés aux impacts de météorites ou au choc thermique causé par les rayons du Soleil. La connaissance d'activité sismique est une donnée importante dans le cas d'un scénario de colonisation de cavités naturelles. En effet le risque d'éboulement doit alors être pris en compte.

La Lune en tant que base avancée de la Terre a un intérêt. Pour l'observation de l'univers d'une part car elle s'y fait sans atténuation atmosphérique, l'implantation idéale serait sur la face cachée de la Lune. D'autre part, pour ses ressources minières pourraient s'avérer intéressantes pour la Terre. La présence en abondance d'Hélium 3 sur la face cachée de la Lune est confirmée. Hors cet élément peu présent sur Terre, deviendrait indispensable si la technique de fusion nucléaire venait à être maîtrisée.

Enfin, une base lunaire serait un lieu de tests, voire dans certains scénarios de lancement, pour une mission vers Mars.

---

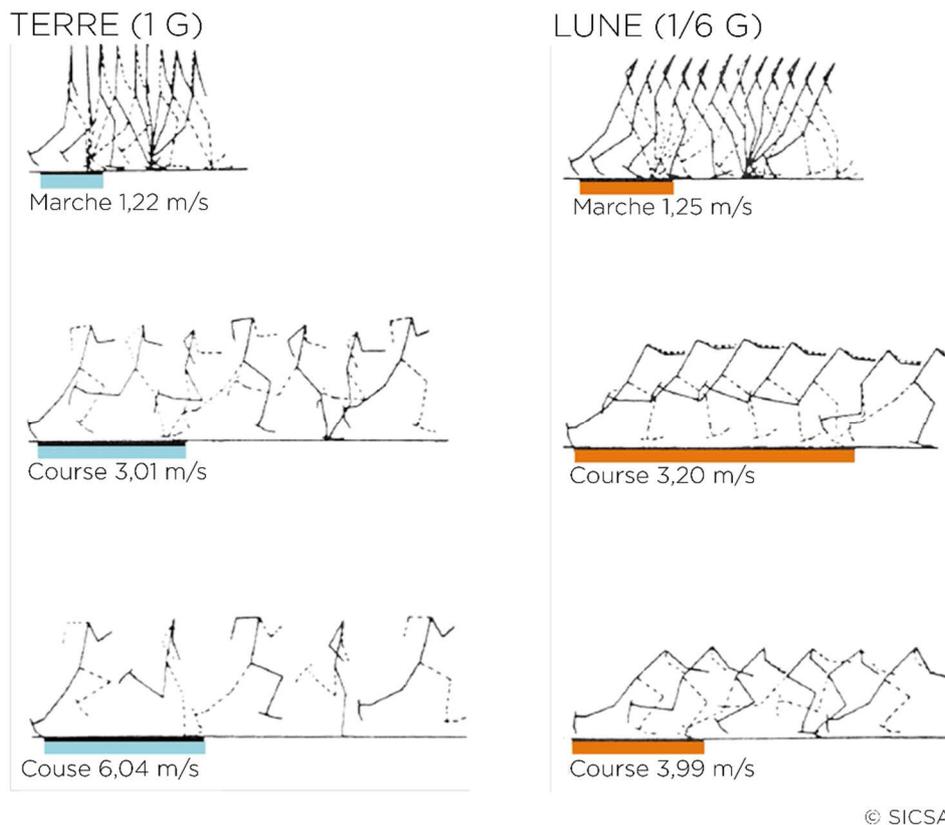
<sup>63</sup> Meyer (C.), Lunar Regolith, NASA Lunar Petrographic Educational Thin Section Set, 2003, <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/letss/regolith.pdf>

<sup>64</sup> Vidéo de Jaumann (Ralf), et Katherine Joy, ESA Lunar Exploration, <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/218>

<sup>65</sup> Howe (Scott) & Scherwood (Brent), 2009

## b) Ergonomie de l'habitat

L'architecture lunaire devra inventer une nouvelle ergonomie relative à la gravité six fois plus faible qui modifie la mobilité du corps. Seules les vidéos réalisées lors des missions Apollo permettent d'analyser la façon de se déplacer sur la Lune. La marche et la petite course y seraient plus efficace, en revanche, une course rapide ne permet pas d'aller aussi vite que sur Terre. Les déplacements verticaux sont également facilités, ainsi la NASA prévoit une hauteur de 4m pour un habitat lunaire dont au minimum 3 m à 3,5 m utilisable.<sup>66</sup>



29 Comparatif des moyens de déplacement sur la Terre et la Lune, © SICSA

La nécessité de se prémunir des radiations et un élément contraignant la conception. Le choix du matériaux pour les contrer est déterminant pour le transport, le coût, la forme et la mise en place. L'hydrogène liquide est un matériau très efficace pour se prémunir des dangers des radiations, mais étant difficile à transporter et à contenir, cette solution n'est pas retenue. Des problèmes similaires se retrouvent avec l'eau, autre matériau efficace dont le transport serait coûteux et ajouterait des charges considérables. L'aluminium a des vertus limitées en tant que protecteur, mais a l'avantage d'être facilement applicable comme feuille ou directement comme élément structurel.

Enfin, le béton de régolithe, ou même une couche de cette roche présente sur place, peut être utilisée, l'avantage étant que la ressource se trouve in situ. Sur la Lune, 2 m de sol lunaire ou 1 m d'eau pourrait stopper les radiations les plus dangereuses.<sup>67</sup>

<sup>66</sup> Rousek (Tomas), Eriksson (Katarina), Doule (Ondrej), 2011, p.4

<sup>67</sup> Doule (Ondrej), *Op. cit.*, 2017, p.26 à 28

Le volume nécessaire varie en fonction de la taille de l'équipage, la durée de la mission et les activités. Aujourd'hui, la NASA MSIS (*Man-Systems Integration Standards*) prévoit une taille minimale d'environ 20 m<sup>3</sup> par personne.<sup>68</sup>

Une mission longue durée de surface a des exigences strictes par rapport à des missions orbitales. Il faut prévoir des véhicules de transfert et d'exploration de la planète.

Chaque type d'habitat requiert une autre approche architectural et conceptuel mais ont en commun de devoir créer un environnement viable pour les gens qui y vivent et y travaillent.

Les exigences communes sont :

- Sûreté et sécurité de l'équipage
- Soutien psychologique et physiologique acceptable pour les humains
- Des modes de défaillance structurelle fiables (par exemple, une fuite avant rupture)
- Pouvoir être testé avant d'être mis en service
- Compatibilité avec les systèmes de lancements disponibles
- Facilitation de l'entretien
- Maintenance facile
- Longue durée de vie.

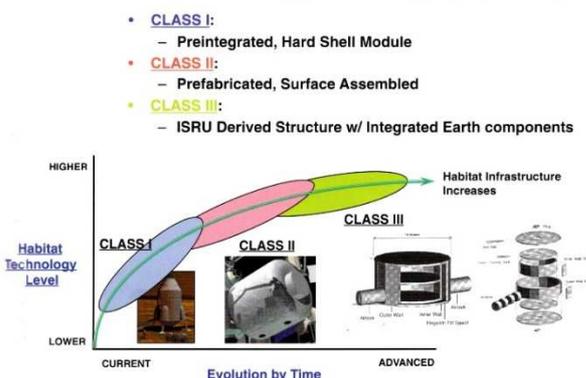
Où qu'il soit, l'habitat doit pouvoir produire air, eau et nourriture, contrôler la température et la ventilation, l'hygiène personnelle et la production de déchets.

Depuis les années 1990, la possibilité d'implanter un village sur la Lune est étudiée. Les différentes technologies d'habitation possibles pour leur création sont séparées entre trois classes. Cette séparation a été faite en 1997 par Cohen et Kennedy et présentée lors du congrès international d'astronautique en 2002.

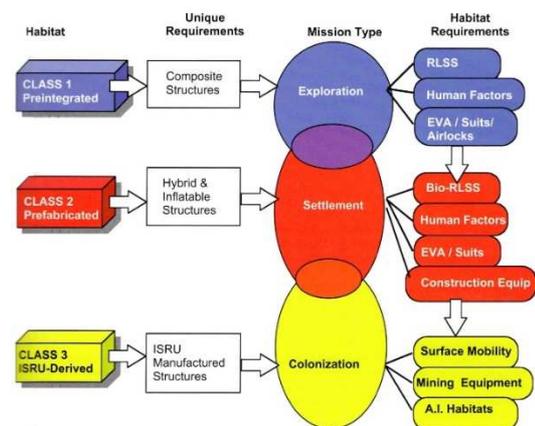
Ces trois classes nécessitent chacune d'autres avancées technologiques et sont aussi liées à des scénarios d'installations différents ou bien à différents stades de la colonisation lunaire.

Cette classification distingue : les structures prêtes à l'emploi, les éléments préfabriqués, et les structures fabriquées in situ à partir des matériaux trouvés sur place.

### Habitation Technology Strategy (Options)



30. Graphique montrant le lien entre avancées technologiques et classes d'habitat. Source Howe (Scott) & Scherwood (Brent), 2009, Chapitre 1



31. Classe d'habitat lien avec le type de mission et d'activités envisagés. Source Howe (Scott) & Scherwood (Brent), 2009

<sup>68</sup> Rousek (Tomas), Eriksson (Katarina), Doule (Ondrej), *Op cit.*, p.4

Les éléments pré-intégrés ou prêts à l'emploi correspondent aux modules utilisés jusqu'à présent dans la construction des stations spatiales.

Ils sont entièrement fabriqués et construits sur Terre : tout y est assemblé, intégré, afin qu'ils soient fonctionnels dès leur lancement dans l'Espace. Les équipements sont testés avant le lancement afin d'assurer l'utilisation immédiate.

Leurs dimensions sont limitées par la capacité du lanceur tout autant en poids qu'en volume. Ces modules sont de ce fait cylindriques et de relativement petite taille. Par exemple, le module russe Zvezda de l'ISS mesure 13,1 m pour 4,15 m de diamètre.

Avantage non négligeable cependant, une fois déposé sur la Lune, ces volumes offrent une protection immédiate à l'équipage qui n'a pas besoin de prévoir du temps pour la construction de l'habitat.

Pour l'instant, ces types de modules sont les seuls habitats à avoir été envoyés sur la Lune.

L'atterrisseur lunaire de la mission Apollo 11 et des suivantes faisait partie de cette catégorie.

Les modules préfabriqués (classe 2) quant à eux sont manufacturés sur Terre mais non utilisables en l'état. Ils doivent être déployés et assemblés sur place. Il existe deux principes, les modules gonflables et les modules déployables. Ces derniers sont peu étudiés car ils sont encore assez proches des modules de la classe 1 : le poids reste donc un problème majeur. Le simulateur SHEE entre dans cette catégorie. De plus, le fonctionnement de ces éléments déployables fait qu'ils ne peuvent pas être ouverts puis fermés plus de cinq fois. Cependant, il est également vrai qu'ils ne sont pas voués à être déplacés.

Les structures gonflables sont beaucoup plus légères et, une fois dépliées, bien plus grandes que leur emballage d'origine. La taille du module final ne dépend donc plus des capacités du lanceur. Ce petit volume présente un avantage considérable lors du lancement car, comparé au module de type 1, cela libère de la place dans la fusée pour transporter d'autres choses, ce qui est plus économique.

Les premières recherches sur ce type de module furent initiées par la NASA sous le nom de TransHab dans les années 1970. En 1980, la NASA créa même un programme appelé « 90 Day Study » qui proposa une sphère de 20 m de diamètre gonflable pour habitat lunaire<sup>69</sup>. Le premier module de ce type nommé BEAM pour *Bigelow Expandable Activity Module* a d'ores et déjà été installé sur l'ISS.

Les habitats de classe 2 n'offrent cependant pas de protection immédiate puisqu'ils doivent tout d'abord être déployés et, si besoin, être assemblés entre eux. L'équipage aidé de robots ou une unique aide robotisée seront nécessaires pour l'achèvement et la mise en service de nombreux aménagements devant être réalisés dans l'Espace.

La majorité des projets de base lunaire présentée aujourd'hui utilise des bases gonflables.

C'est le cas du projet Lunar Base de Bedini & Partners. Dans l'Arca International, Daniel Bedini présente le projet de son agence pour la base lunaire, dont la réflexion est centrée sur la serre. Ils assemblent quatre modules gonflables avec une membrane constituée de 6 épaisseurs qui servent de barrière interne, de couche de contention, de contrôle structurel et de protection contre les radiations.

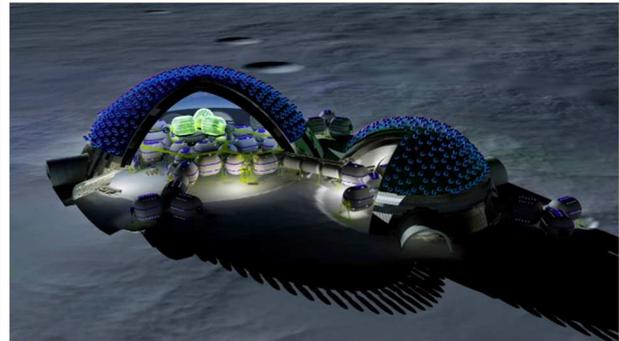
---

<sup>69</sup> Howe (Scott) & Scherwood (Brent), *Op cit.*, p. 7 à 20

L'agence *Architecture et vision* utilise aussi les habitats de classe 2 dans son projet de capital lunaire prévu pour accueillir 60 personnes en 2069.



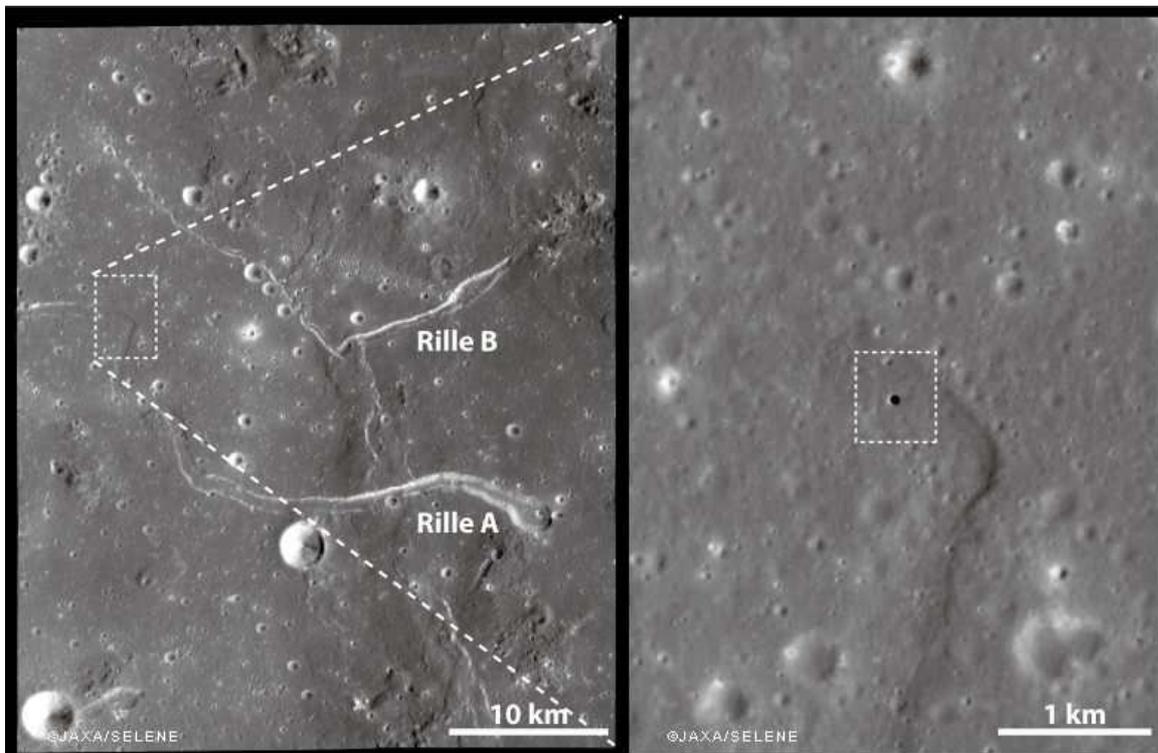
32. Lunar Base par Bedini & Partner. Source *L'Arca International* n° 127 nov-déc 2015, p. 16 et 17



33. Projet Moon Capital © *Architecture & Vision*

La dernière classification, ISRU pour *In Situ Resources Utilisation*, regroupe les habitats réalisés par des techniques in situ. Ces habitats peuvent utiliser les matériaux présents sur place mais aussi le paysage naturel présent. C'est pourquoi plusieurs voies sont suivies actuellement. D'un côté, l'utilisation du régolithe pour réaliser une structure par impression 3D ; d'un autre, la mise en valeur de cavités ou de tubes de laves pour s'y installer à la façon d'habitats troglodytes - la roche servirait alors d'elle-même de protection aux radiations.

La possibilité d'utiliser les tubes de lave est actuellement privilégiée par la NASA car cette solution, qualifiée de « naturelle », permet de s'installer plus simplement sur le site trouvé, ce qui réduit l'impact sur l'environnement ainsi que les travaux. Cela permettrait aussi d'utiliser le même scénario d'implantation sur la Lune et sur Mars. La présence de tube de lave sur notre satellite n'est cependant pas encore confirmée. Pour l'instant les suppositions reposent sur une photo prise par la sonde Kaguya.



34 Photo prise par la sonde Kaguya de ce qui pourrait être un tube de lave, © Jaxa/Selene

L'ESA quant à elle penche pour la mise en place d'un village lunaire à la surface en utilisant le régolithe pour construire la structure en imprimante 3D. L'ESA a même développé deux techniques pour cela, une imprimante 3D et un système utilisant le soleil pour faire fondre le régolithe.

L'habitat de classe 3 s'affranchit totalement des restrictions du véhicule de lancement, la réalisation de grands volumes est possible. En contrepartie, l'envoi de machine pour réaliser la construction est obligatoire.

Elles mettront en place les infrastructures utiles pour la construction et la vie ultérieure dans la base. L'habitat ne peut être testé qu'une fois terminé sur place, ce qui donne moins de sécurité et peut amener à des modifications du calendrier de la mission. Les systèmes critiques (ce terme inclut les différentes technologies créant un environnement viable) sont réalisés et testés au préalable sur Terre, mais leur intégration aux bâtiments peut rester sujette à problème et tout autre aménagement complémentaire est réalisé dans l'Espace.

Pour l'instant, aucun des projets de base étudiés ne reposent totalement sur une architecture de ce type. La majeure partie du temps, des combinaisons entre ISRU et modules préfabriqués sont envisagées. Pour être réaliste, le développement de la base lunaire devra prendre en compte les 3 types de construction.

#### 4) Deux scénarios pour créer une base lunaire

La NASA fut la première à considérer le potentiel des structures textiles dans les années 1960. Le centre de recherche de Langley a développé une station de 7,3 m de diamètre comme prototype pour un module lunaire avec le surnom Moby Dick. Il a même été testé avec succès. Cela a engendré une autre série de projets parmi lesquels on trouve le projet TransHab.

Il a été réalisé par une petite équipe regroupant des architectes et des ingénieurs du centre Johnson de la NASA. L'habitat était prévu pour accueillir six personnes dans le cadre d'un aller-retour vers Mars. C'était donc un habitat utilisé lors d'une période de transit d'où l'abréviation TransHab. Depuis 1997, le concept TransHab a connu plusieurs variations dans sa conception. Une version avait été proposée comme addition à l'ISS mais ne fut finalement jamais réalisée en raison de problèmes budgétaires.

TransHab est une structure hybride qui utilise un cœur central rigide avec une enveloppe extérieure gonflable. Ce concept intériorise la structure et renverse le paradigme d'un exosquelette à celui d'un endosquelette.

Le module prévu pour l'ISS mesurait environ 10,5 m de haut et 7,3 m de diamètre. À l'intérieur de ce cylindre, le volume était séparé en quatre niveaux. Au premier niveau, on trouve essentiellement du stockage et un garde-manger, c'est aussi l'endroit privilégié pour les rencontres sociales et professionnelles. Les quartiers privés de l'équipage ainsi que la réserve d'eau et les salles mécaniques sont au niveau deux. Le troisième niveau est essentiellement constitué de rangements et d'espaces pour la santé et l'hygiène. Enfin le niveau quatre est réduit à un sas pressurisé lié au reste de l'ISS.<sup>70</sup>

Aujourd'hui, l'entreprise Bigelow réalise des modules qui s'inspirent directement de l'architecture de TransHab. Les modules BEAM (*Bigelow Expandable Activity Module*, Module d'activité extensible Bigelow) sont actuellement testés sur l'ISS.

L'entreprise Bigelow a été créée en 1999 par Robert Bigelow et avait pour but de créer un nouveau paradigme pour le commerce spatial et l'exploration via le développement d'habitats gonflables.

La NASA a investi 17,8 millions de dollars dans le projet BEAM. Le module restera accroché au node Tranquility pendant deux ans pour une série de test. Mais BEAM n'est qu'une étape : Bigelow Aerospace veut développer BA 330, un module de 330 m<sup>3</sup> pouvant offrir résidence à 6 personnes. En parallèle l'entreprise travaille aussi sur un projet encore plus grand, Olympus, qui fournira un volume interne de 22 000 m<sup>3</sup>.<sup>71</sup>

BEAM représente une partie du projet BA 330. Le module a décollé en direction de l'ISS, le 8 avril 2016. Ce test a pour but de :

- Démontrer le fonctionnement du lancement, le déploiement, ainsi que les techniques de pliage et d'emballage
- Déterminer la capacité de radioprotection
- Démontrer des performances de durabilité thermique, structurale, mécanique, la performance à long terme de fuite, etc
- Augmenter le savoir-faire sur l'habitat extensible afin de pouvoir en faire évoluer la technologie de façon approprié.<sup>72</sup>

---

<sup>70</sup> Howe (Scott) & Scherwood (Brent), *Op cit.*, p. 81

<sup>71</sup> David (Leonard), mars 2015, <http://www.space.com/28855-inflatable-space-station-habitat-bigelow.html>

<sup>72</sup> <http://bigelowaerospace.com/beam/>

BEAM pèse environ 1360 kg. Il est équipé de différents capteurs et de moniteurs de calcul des radiations. Il est composé de deux cloisons métalliques, d'une structure en aluminium, et de multiples couches de tissu espacées, qui réalisent la protection interne. Il n'a pas de fenêtres. Un premier bilan de BEAM a été dressé après 5 mois sur l'ISS. Le module a été déployé avec succès le 28 mai 2016 et a mis sept heures à atteindre la pression requise. Les capteurs ont indiqué que la pression n'a pas varié au cours de la semaine qui a suivi son expansion. La température s'est révélée un peu plus élevée que prévue, ce qui est plutôt positif.<sup>73</sup>

TransHab a connu une modification afin d'être adapté à une surface planétaire. Le projet ce nomme SinterHab c'est la proposition de la NASA pour un village lunaire.

Le projet Sinterhab prend non seulement en compte les techniques d'impression 3D mais propose aussi un nouveau système de support de vie bio-régénérateur (BLSS). La base est formée à partir de modules de classe 2 et 3. Le hameau lunaire doit accueillir quatre à huit astronautes. L'originalité du projet est qu'il comporte un jardin expérimental nécessaire au développement du nouveau BLSS. Ce jardin se nomme *Green Garden Buffer*. En plus de participer au maintien d'un environnement vivable, il a un effet positif sur la vie de l'équipe. En effet, il est prouvé que la présence de végétation réduit le stress. Le jardin d'hiver a donc un impact psychologique positif et des fonctions récréatives.

Ce jardin est placé devant les espaces de travail afin de recréer l'illusion d'une maison entouré de nature comme sur Terre.

La maintenance de ce jardin requiert environ 2,4 h de travail par jour. Il est partie intégrante du système de maintien de l'atmosphère puisque les plantes participent à la revitalisation de l'atmosphère en créant de l'oxygène et en captant le gaz carbonique, sont utilisées pour le traitement de l'eau et produisent la nourriture de l'équipage.

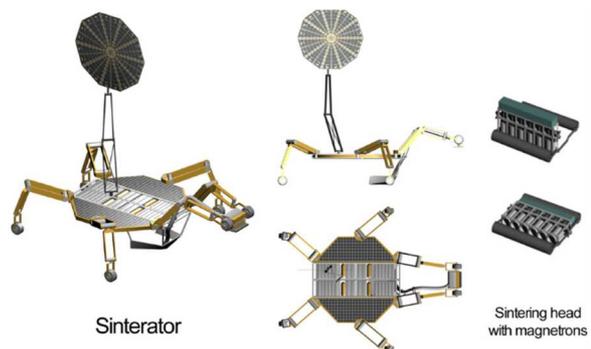
La NASA prévoit par personne :

- 15 à 40 m<sup>2</sup> pour la production de nourriture
- 3 à 5 m<sup>2</sup> pour le traitement de l'eau
- 6 à 10 m<sup>2</sup> pour la production d'oxygène et la régénération de l'air.

Au total, pour huit personnes, il faut 170 m<sup>2</sup> de surface cultivable.



35. 3D de la base montrant les modules et leurs protections de régolithe, © NASA Sinterhab



36. Le Sinterator, la plateforme à six pieds est le rover ATHELE, © NASA Sinterhab

Le système d'impression 3D a été développé par NASA JPL.

Ce système utilise des micro-ondes pour fritter le régolithe. Le terme de frittage vient de la céramique où des poudres utilisées pour la décoration des pièces crée une surface solide, lisse et

<sup>73</sup> Mahoney (Erin), novembre 2016, <https://www.nasa.gov/feature/beam-update-expandable-habitat-reveals-important-early-performance-data>

Et Mahoney (Erin), juillet 2016, <https://www.nasa.gov/feature/beam-facts-figures-faqs>

brillante après avoir été chauffée. Ce terme qui traduit le mot *sintered* en anglais donne son nom à ce projet.

L'imprimante 3D de Sinterator se compose du robot multifonction ATLETTE portant un magnétron à micro-ondes, accompagnée d'un rover Chariot servant de bulldozer.

La machine à micro-ondes utilisée ne diffère pas beaucoup de celles de nos cuisines. Le régolithe ainsi chauffé se vitrifie. Le matériau final résistant mieux à la compression qu'à la traction, il faudra y rajouter des fibres.

Ces techniques utilisant les matériaux in situ sont, du point de vue de la NASA, bien évidemment intéressante pour la base elle-même mais aussi pour l'apport qu'elles auront pour la Terre. Cette réflexion n'inclut pas que les techniques de construction mais aussi les techniques de production d'énergie afin de permettre l'autonomie.

Le Sinterator permet de solidifier la couche de régolithe autour des modules gonflables. Ceux-ci sont au nombre de cinq.

La partie de vie contenant les couchages est située dans le compartiment central pour bénéficier de la protection maximale faces aux radiations par le biais du reste de la base et les stockages de l'eau.

Les laboratoires, les espaces de travail et la serre sont ajustés autour de l'espace de sommeil.

L'aménagement intérieur et l'ameublement devraient en partie être construits par des structures déployables et pliables pour économiser la masse et le volume pendant le transport.

Le design des parties de vie dérive directement des contraintes qui sont exercé sur elles. Les parois doivent supporter une pression d'environ 10 tonnes au mètre carré pour créer une atmosphère égale à celle de notre planète. La sphère étant la géométrie résistant bien à la pression, les compartiments sont sphériques comme des bulles de savon. La jonction entre deux de ces bulles crée des parois verticales, ce qui permet dans chaque partie de disposer de deux murs plans. La structure de ces parois rigides sont directement inspiré de TransHab.<sup>74</sup>

Le projet SinterHab est le premier à proposer un concept pour recréer un écosystème en utilisant des plantes dans l'espace. Ce type de concept devrait se généraliser et prendre de l'ampleur afin de permettre une colonisation efficace.

Il a connu des modifications et une seconde version SinterHab 2.0 existe à présent. Le cargo de la fusée y est directement utilisé comme partie de l'habitat final.

En comparaison, le projet de l'ESA pour la base lunaire comprend une serre mais elle n'est pas utilisée de façon active dans le système de contrôle de l'atmosphère.

Le projet actuellement imaginé comme possibilité par l'ESA assemble les trois types d'habitat. D'un côté, les sas restent des parties solides des modules entièrement fermés. Les espaces de vie et de travail quant à eux sont réalisés grâce à des formes gonflables. Enfin, les dômes sont protégés des micrométéorites et des radiations par une couche de régolithe imprimé en 3D.

Cette couche est actuellement pensée comme imprimée par une tête imprimante mais d'autres solutions sont envisagées pour contrecarrer le problème d'utiliser des liquides dans le vide, comme l'impression solaire ou bien l'impression de petites éléments imbriquables.

L'agence fait partie d'un consortium créé par l'ESA pour l'étude des possibilités d'impression 3D sur la Lune.

---

<sup>74</sup> Rousek (Tomas), Eriksson (Katarina), Doule (Ondrej), *Op cit.*, p.5

La base est située, comme pour tous les projets similaires, au pôle Sud de la Lune en bordure du cratère Shackleton. De là, l'on peut voir le Soleil à l'horizon quasiment en permanence. C'est un point stratégique où la production d'électricité, grâce à des panneaux solaires, est possible.

La base lunaire pour quatre astronautes est construite à partir d'une structure gonflable envoyée sur la Lune à l'intérieur d'un module cylindrique. Une fois sur place, la structure se déploie servant d'échafaudage pour soutenir les couches de régolithe imprimé en 3D. L'imprimante utilisée est la D-Shape inventée par Enrico Dini et produite par Monolite UK. Un robot à tête



imprimeuse dépose successivement des couches de 4 mm de régolithe puis imprime avec une « encre » non-organique à base d'oxyde métallique et de chlorure de magnésium. Ces éléments sont introuvables sur la Lune : il faut donc utiliser le moins de substrat possible par volume de régolithe. De ce fait, les couches sont imprimées de telle sorte à former une structure « éponge ».

1,5 tonnes de matière similaire au sol lunaire ont été créées pour réaliser des tests sur Terre. Cette couche de régolithe de 3 mètre d'épaisseur devrait protéger les astronautes des températures extrêmes, des météorites et des radiations cosmiques.<sup>75</sup>

Ainsi le projet utilise les trois classes d'habitat.

La base sera composée de 3 modules reliés entre eux par des module prêts à l'emploi ayant servi d'emballage pour le trajet. Ces modules font 5 m de haut afin de pouvoir créer deux niveaux. Le premier module servant de support pour la construction du dôme en régolithe est enlevé pour laisser place à un deuxième module comprenant les espaces de vie. Entre le module et le dôme, il y a un espace laissé sous vide d'air qui sert d'isolant.<sup>76</sup>



37. Etapes de construction de la base imaginée par Foster + Partners,  
© Foster + Partners

<sup>75</sup> Foster + Partners, 2013

<sup>76</sup> Foster + Partners, *Op cit.*, 2015, <http://www.fosterandpartners.com/media/2333928/lunar-outpost-design.pdf>

Bien que l'imprimante D-Shape a été testée dans une pièce sous vide pour simuler le vide interstellaire, l'ESA fait des recherches sur une autre technique : l'impression grâce à la lumière solaire. Le projet s'appelle RegoLight, son but est de tester la faisabilité de la fabrication de brique lunaire réalisé en concentrant les rayons solaires pour faire fondre le régolithe.

L'ingénieur Advenit Makaya qui supervise le sujet à l'ESA explique : « Nous avons pris un matériel qui simule le sol lunaire et l'avons chauffé dans un four solaire ».<sup>77</sup>

Des couches successives de 0,1 mm on était porté à 1 000 °C. La vidéo de la fabrication est disponible sur le site de l'ESA.

Le four solaire est installé au centre DLR de Cologne. Les rayons solaires sont concentrés à l'aide de 147 miroirs courbes. L'opération a duré environ cinq heures pour une brique de 20 x 10 x 3 centimètres.



38 Photo de la brique ainsi réalisé, © ESA-G. Porter, CC BY-SA 3.0 IGO

Le matériau utilisé pour remplacer le régolithe est fabriqué à partir de roche volcanique. La technique a pour l'instant été testée dans les conditions atmosphériques terrestres. De prochains essais sont prévus dans un milieu recréant les conditions lunaires.

Par la suite sur Terre, « l'impression 3D de structures civiles utilisant l'énergie solaire et des ressources in situ pourrait favoriser la construction rapide d'abris d'urgence après les catastrophes, en supprimant des chaînes d'approvisionnement longues, coûteuses et souvent inefficaces » précise A. Makaya.

Actuellement, les projets présentés comme les plus réalistes reposent sur des habitats de classe 2. Pourtant, cette technologie n'est pas encore au point. Seule l'entreprise privée Bigelow est allée jusqu'à la réalisation d'un de ces modules. Si le test actuellement en cours sur l'ISS est concluant, elle deviendra la seule entreprise sur le marché à proposer ce type de module. Cependant, cela ne validera les capacités de Bigelow que dans le vide spatial et en apesanteur. L'effet du régolithe lunaire sur la membrane du module est inconnu.

Les diverses voies prises pour l'impression 3D sur la Lune sont quant à elles prometteuses pour une application terrestre. Cela pourrait permettre de construire des bâtiments in situ qu'importe le type de sol, mais aussi de remettre les matériaux locaux au centre de la réflexion.

---

<sup>77</sup> ESA, *Op cit.*, mai 2017,

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Printing\\_bricks\\_from\\_moon\\_dust\\_using\\_the\\_Sun\\_s\\_heat](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Printing_bricks_from_moon_dust_using_the_Sun_s_heat)

### III. Les apports pour la ville de demain.

#### 1) Entretiens : « Space–Earth continuum. Réalité ou fiction ? »

Au fur et à mesure que les séjours dans les stations orbitales s'allongent, la liste des prérequis s'agrandit. Bien qu'elles devaient de tous temps fournir un air de qualité et de l'énergie, aujourd'hui l'ISS recycle aussi l'eau, et la gestion des déchets y est une question importante. Afin de permettre à l'homme de voyager au-delà des orbites terrestres en direction de Mars par exemple il faudra développer des moyens de cultivations dans l'Espace. Des tests sont en cours à bord de l'ISS ou l'équipe 44 a pu déguster la première salade cultivée en apesenteur le 10 août 2015. L'expérience Veg-01 à l'origine de cette avancée est conduite par la NASA à partir de mars 2014.<sup>78</sup>

Ces enjeux se recoupent aussi dans les besoins actuels des grandes villes où l'air et l'eau sont pollués. J'ai eu la possibilité de rencontrer deux architectes du domaine spatiale et de pouvoir leur demander, s'ils voyaient un lien et un intérêt possible entre l'aérospatiale et la ville du futur, et comment cela influençait leur travail.

##### a) Ondrej Doule

Ondrej Doule est architecte à la NASA où il travaille sur le développement d'un concept pour une base martienne. Il est également professeur au Florida Institut of Technologie. Il a réalisé sa thèse sur l'architecture en environnement extrême sur Terre et dans l'Espace. Avec David Wong, il est le rédacteur en chef du magazine sur l'architecture spatiale The Orbit.

En février 2017, il est venu à Strasbourg dans le cadre d'une master class sur la construction d'une base lunaire. La master class s'est déroulée à l'ENSAS en partenariat avec l'ISU, l'ECAM et la Faculté de physique et d'ingénierie de Strasbourg.

Ondrej Doule s'intéresse au lien entre les techniques spatiales et leurs applications sur Terre en technologie durable pour la ville et les bâtiments depuis des années. L'un de ses premiers thèmes de travail a été l'intégration des technologies spatiales dans un habitat sur Terre.

Son agence Space Innovation ou SPIN a été créée en 2011. Son but est d'améliorer la théorie et la pratique liées à la conception basée sur des connaissances dérivées du secteur spatial pour soutenir le développement durable. C'est dans cette optique que SPIN a participé au consortium sur le projet SHEE. Le but de l'agence est aussi de réaliser des activités de sensibilisation à la compréhension de l'exploration spatiale par l'Homme.

Space innovation se concentre sur la conception de bâtiments durables sur Terre - essentiellement des reconversions de friches industrielles, des bâtiments en environnement extrême (que ce soit sur Terre ou pour des habitats orbitaux, lunaire ou martien), mais s'intéresse aussi aux véhicules de transport sous-orbitaux. Cela engendre des travaux adaptés à différents types de gravité : microgravité, hypogravité, hypergravité, ou gravité terrestre.<sup>79</sup>

Ondrej Doule a réalisé quatre projets d'habitations terrestres incluant des technologies spatiales qui sont restés au format papier. Ils sont présentés sur son site Internet <http://www.spaceinnovations.net>

---

<sup>78</sup> Riquel (Charlotte), août 2015, <http://www.bfmtv.com/planete/iss-degustation-de-la-premiere-salade-cultivee-dans-l-espace-906490.html>

<sup>79</sup> <http://www.spaceinnovations.net/main>

Le projet *Custom Family house*, par exemple, est un projet de maison durable basé sur une logique de maison passive combinée à des panneaux photovoltaïques.

Le projet *Minimum Sustainable Office* s'intéresse à la construction d'un bâtiment le plus durable possible. L'empreinte du bâtiment est prise en compte pour qu'il soit le moins invasif possible pour son environnement. Dans cette optique d'impact minimum, les briques du bâtiment préexistant sont réutilisées. L'utilisation d'une isolation en aérogéllules est envisagée.

Du point de vue d'Ondrej Doule, toutes les technologies développées pour l'Espace peuvent avoir un avenir pour la Terre, pour rendre la ville et la Terre durable. Pour voir leur intérêt et pouvoir les adapter, il faut s'intéresser aux questions du contrôle de l'atmosphère, de la température, les dangers extérieurs potentiels comme les radiations cosmiques et le contrôle de la production de déchets.

Mais le lien entre la Terre et l'Espace va au-delà des techniques. L'architecture spatiale est adaptable à tous et partout car c'est une philosophie. Cela n'englobe pas que la technique, mais la réflexion sur la durabilité de respect de la planète.

Pour permettre la généralisation de cette idée, de cette approche de l'architecture, il faut selon lui aussi réfléchir à la vision marketing. Le but étant d'intéresser les personnes ayant le pouvoir et/ou l'argent pour qu'ils investissent dans cette idée et qu'elle puisse ainsi se développer et se propager. Il faut développer une image marketing si l'on veut pourvoir répandre la vision durable.

Dans cette optique, il pourrait être intéressant de faire deux fois le même projet avec et sans technologie et philosophie spatiale et de les comparer.

Les arguments ainsi accumulés pourraient permettre de montrer quantitativement à tous les avantages d'une vision plus durable.

### a) Barbara Imhof et son agence **Liquifer**

Barbara Imhof est architecte, chercheuse à l'université de Vienne en Autriche et journaliste. Elle travaille actuellement à Vienne où elle a également exercé pendant 8 ans en tant que professeur à l'université de Vienne pour la faculté d'architecture.

Avec Susmita Mohanty, elle est la cofondatrice de l'agence **Liquifer**. Elle est membre de l'AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) et un membre fondateur de son secteur dédié aux architectes *spacearchitect.org*, mais aussi membre de l'association *Women in Aerospace*.

J'ai pu la rencontrer à Strasbourg lors d'une conférence mise en place par l'association *Women in Aerospace*. J'ai ainsi pu lui demander si pour elle il existait un lien entre stations spatiales et smart-city ; et si de son point de vue, il était réaliste de penser que les technologies développées pour l'Espace puissent être transposées sur Terre.

Elle souligne qu'il y a de réelles différences entre la Terre et l'Espace. Dans on ne peut recourir à aucune ressource auxiliaire. On doit tout produire soi-même. Il faut donc construire un circuit fermé. De la production à l'utilisation puis viennent le retraitement et le recyclage permettant de réutiliser la ressource.

Cependant, les thèmes qui se retrouvent lors de la création d'un vaisseau spatiale sont les mêmes que ceux que l'on retrouve dans la ville : le ravitaillement en énergie et en nourriture, le traitement de l'eau, le traitement des déchets, la qualité de l'air face à la pollution.

La ville en tant que vaisseau est donc, de son point de vue, une image forte et réaliste.

Elle voit cela comme une nécessité pour la ville du futur d'appréhender notre environnement et de le prendre en compte pour minimiser son impact. Mais pour que l'idée gagne de l'importance il faut donner une image forte. Elle suggère qu'actuellement la ville du futur dont on parle sous le nom de smart city ne convainc pas les gens car il n'y a pas d'image forte. Il y a trop de disparités et de visions différentes. En effet, si l'on va par exemple sur le site [smartgrids-cre.fr](http://smartgrids-cre.fr), on y découvre différentes définitions et différentes visions de types de smart city, qui peuvent être complémentaires mais ne le sont pas nécessairement. Cette disparité et diversité d'informations empêche la création d'une image forte. Elle peut aussi limiter l'intérêt des gens à s'investir dans un tel projet puisqu'il est difficile de l'appréhender globalement.

De ce fait, elle pense que l'image de la ville comme vaisseau spatial pourrait susciter l'intérêt par l'imaginaire et la fantaisie que dégagent cette image, mais aussi permettre une compréhension globale de son fonctionnement et de ses enjeux. En cela elle rejoint l'idée d'Ondrej Doule qu'il est nécessaire de trouver un moyen de présenter et de défendre cette vision durable qui puisse convaincre les gens de s'investir dans cette direction.

À partir du moment où le concept et la philosophie d'une ville-vaisseau seront transposés à la smart city, à ce moment-là seulement il deviendra intéressant de réfléchir à la transposition des techniques et des matériaux de l'Espace sur la Terre. Auparavant, cela demanderait des efforts trop dispendieux. En effet, comme précisé plus tôt, sur Terre des ressources sont présentes et l'extérieur n'est pas hostile, contrairement au cosmos. Cela fait que nous avons des moyens plus simples de répondre aux problèmes : des techniques adaptées à la Terre que nous utilisons pour l'instant mais qui consomment plus de matières premières.

À la question de savoir si les agences spatiales participent à ce travail de rapprochement ville-Espace, elle me répondit que les agences spatiales ont compris le lien et les interactions possibles entre leur travail et le développement futur des villes. Des échanges sur ce thème ont lieu lors de conférences, mais pour l'instant la collaboration ne va pas plus loin.

L'agence **Liquifer** se présente comme engagée dans la recherche innovatrice, le développement de produit pour l'espace, ainsi que les habitats et technologies liés à l'Espace. Pour cela, l'agence dispose d'une équipe transdisciplinaire incluant une grande variété d'experts venant de domaines tels que : l'architecture et le design, la robotique, l'ingénierie système avec comme domaine de prédilection tourné vers les satellites de communications.

Elle fut créée en 2003 dans le but d'être « une entreprise nouvelle génération pour la recherche et la conception sur la Terre et dans l'Espace ».

Aujourd'hui Susmita Mohanty la cofondatrice de **Liquifer** dirige un bureau secondaire à Mumbai. **Liquifer** travaille en partenariat avec les agences spatiales, dans le cadre de programmes de l'Union Européenne, mais poursuit également ses propres recherches. La collaboration avec les principales institutions et organisations autrichiennes et européennes aide **Liquifer** à rencontrer et à transmettre des connaissances sur l'exploration et l'habitation spatiale à un large public.

Le nom de **Liquifer** s'inspire de l'hypothèse de « White Mars » développée par le géologue australien Dr. Nick Hoffman sur la base de l'expédition de sonde martienne en 2003. Le modèle de Hoffman suggère la présence de bassins souterrains de CO<sub>2</sub> sur Mars qu'il appelle « liquifer », tout comme les réservoirs souterrains d'eau (H<sub>2</sub>O) sur Terre sont appelés « aquifères ».

**Liquifer** se concentre sur la synergie positive entre la recherche-développement sur Terre et pour l'Espace.

L'on peut classer les principaux projets de l'agence dans trois catégories :

- La recherche et développement pour l'aérospatiale comme par exemple, *Eden ISS*

- La recherche ayant une application possible sur Terre et dans les stations orbitales: *Regolight*
- La recherche sur le biomimétisme et les applications directement développés pour l'architecture terrestre : *LIAR - Living Architecture*

La plaquette de présentation de l'agence mets les différents projets en lien selon en space-earth continuum, qui les lie les uns aux autres et forme une base de connaissance pour les projets futurs.



39. Plaquette de présentation des projets de Liqifier System Group © Liqifier System Group

Pour mieux comprendre leur démarche de *space-earth continuum* on peut s'intéresser à certains de leurs projets.

### Eden ISS :

Le projet *Eden ISS* est un projet de recherche pour réaliser des cultures à bord de la station spatiale internationale. Le résultat de cette expérience pourrait aboutir à de nouvelles formes d'agriculture hors sol.

Il est réalisé en collaboration avec 12 autres acteurs dans le cadre du programme européen Horizon 2020. Le but d'*Eden ISS* est de développer un moyen de production alimentaire sûre pour la station spatiale internationale mais aussi pour les futurs véhicules d'exploration spatiale sur les avant-postes planétaire et lunaire.

Pour cela le programme prévoit la création, l'adaptation, le réglage et le test des technologies de cultures végétales supérieures. Cela inclut un système de livraison des nutriments à la plante, un système d'éclairage à LED haute performance, un système de bio-détection et de décontamination, des procédures et des technologies de contrôle de qualité et de sécurité alimentaire.

L'utilisation des données pour un emploi ultérieur sur Terre fait partie des objectifs clairement listés dans l'article d'introduction sur le consortium *Eden ISS*.

« Objectif 6 : Faire avancer les connaissances liées aux vols spatiaux humains et transformer les résultats de la recherche en applications terrestres, en tirant parti activement des synergies entre les partenaires du consortium spatial et non spatial. »<sup>80</sup>

Ce projet fait donc partie de ceux qui pourraient directement avoir un intérêt sur Terre.

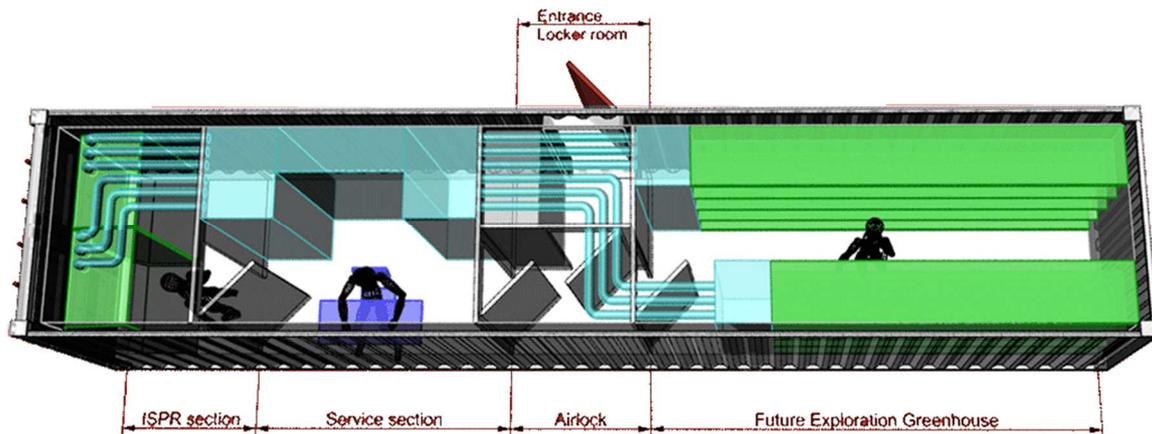
Les recherches ont débuté en 2015. La nouvelle génération de serre ainsi créée sera testée en octobre 2017 en Antarctique à la station d'hivernage allemande Neumayer III, exploitée par l'Institut Alfred-Wegener, avant que les techniques ne soient mises à profit sur l'ISS.

<sup>80</sup> Zabel (Paul) et al., 2015, p. 4

Traduction de l'extrait « Actively advancing knowledge related to human spaceflight and transformation of research results into terrestrial applications, by actively leveraging synergies between space and non-space consortium partners. »,

Le laboratoire test sera placé dans trois conteneurs puis expédié en Antarctique. Le laboratoire se composera de trois « pièces ». La préparation des conteneurs sera réalisée à Brême sur le site de la DLR, le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique.

La section de service abritera les principaux sous-systèmes de gestion de la température et de l'alimentation électrique, de l'air, ainsi que le sous-système de gestion des nutriments et de l'eau. Cette section fournira également un lieu de travail pour les procédures de prélèvement et de contrôle. Une deuxième section contiendra deux systèmes de rack standardisés similaire aux racks utilisés dans l'ISS, c'est pourquoi elle porte le nom d'ISPR pour *International Standard Payload Rack*. Ils serviront essentiellement pour la production des plants.



40. Vue de la disposition des espaces à l'intérieur du conteneur test. © Liquifer System Group 2015

La dernière partie sera la « serre ». Son appellation anglaise est FEG pour *Future Exploration Greenhouse*. Ce sera la partie de production, là où les plants pourront croître sur plusieurs étages jusqu'à maturité et récolte.<sup>81</sup>

Les plantes seront éclairées grâce à un équipement de LED nommé Heliospectra, qui peut éclairer en bleu, en rouge, les deux à la fois - ce qui donne une lumière rose - et en blanc.

Le projet a été présenté à la 45<sup>ème</sup> Conférence internationale sur les systèmes environnementaux (ICES, *International Conference on Environmental Systems*)<sup>82</sup>



41. Conteneur du laboratoire test au centre DLR de Brême. Source : eden-iss.net

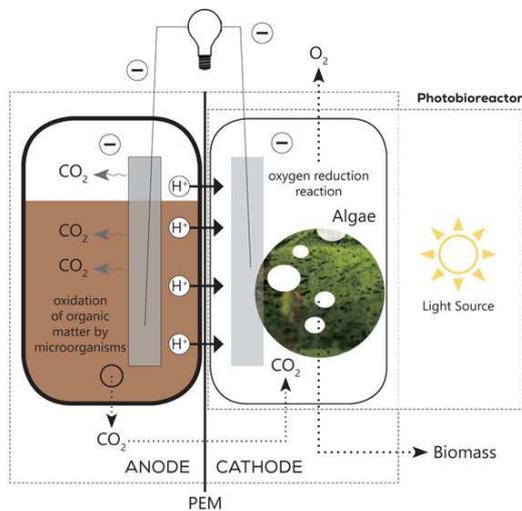
<sup>81</sup> Liquifer Systems Group, Eden ISS, <http://www.liquifer.com/eden-iss/>

<sup>82</sup> <http://eden-iss.net>

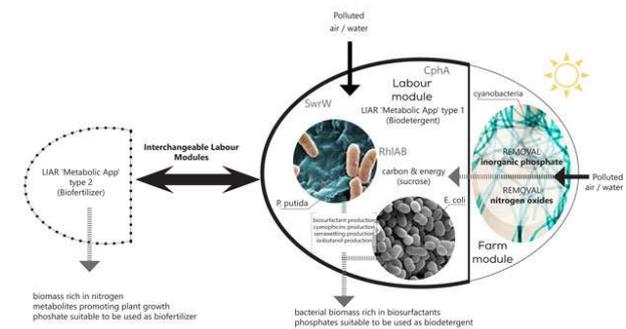
## LIAR :

Le projet LIAR - abréviation de Living Architecture - a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne. Son but est de développer des « briques » capable d'extraire des ressources de la lumière du soleil, des déchets, de l'air et de l'eau. Ces briques produisent essentiellement de l'électricité et récupère le phosphate présent dans l'eau tout en la purifiant. Elles peuvent s'emboîter et créer des « murs de bioréacteurs » qui pourraient ensuite être incorporés dans des logements, des bâtiments publics et des bureaux.<sup>83</sup> Ce projet fait partie des projets de Liquifer directement tourné vers un intérêt pour la ville.

Chaque bloc contiendra une pile à combustible microbienne ou MFC, remplie de microorganismes synthétiques programmables développés par des experts à UWE Bristol. Les cellules vivantes qui composeront le mur seront capables de sentir leur environnement et de lui répondre par une série de mécanismes coordonnés numériquement. Cette pile sera associée à un autre ensemble : le Synthetic Microbial Consortia (SMC). Le MFC est programmé et configuré pour produire de l'électricité, tandis que le SMC purifie l'air et l'eau.



42. Microbial Fuel Cell (MFC), © Liquifer system group



43. Synthetic Microbial Consortia (SMC), © Liquifer system group

« La meilleure manière de décrire ce que nous essayons de créer est un “estomac de vache biomécanique” », a déclaré Rachel Armstrong, professeur d'architecture expérimentale à l'Université de Newcastle, au Royaume-Uni. « Il contient différentes chambres, chacune digérant les déchets organiques dans un but différent, bien que dans l'ensemble lié — comme un système digestif pour votre domicile ou votre bureau. »

<sup>83</sup> Newcastle University, juillet 2016, <http://www.ncl.ac.uk/press/news/2016/07/liarlivingarchitecture/>

## 2) Concepts pour la ville de demain

On l'a vue l'agence Liquifer nourri de nombreux partenariats dans le cadre de projet ayant directement un lien avec l'architecture de demain et l'interpénétration des connaissances spatiales et terrestre. Cependant le travail de Barbara Imhof sur le lien Terre-Espace se retrouve au-delà de son travail en agence.

C'est le cas du concept de « City as a Spaceship » qui au regard de l'entretien que j'ai eu avec elle, semble vouloir participer à l'élaboration de cette image et de cette compréhension forte de la ville de demain.

### a) Le concept de « City as a Spaceship »

Le concept de *City as a Spaceship* ou CAAS, la ville comme un vaisseau spatial, expose la vision et les attentes de Sue Fairburn, designer avec des connaissances en sciences humaine, Susmita Mohanty et Barbara Imhof pour la ville de demain.

En 2007 elles fondent le collectif CAAS puis en 2014 lors du Congrès International de l'Astronautique (*International Astronautical Congress ou IAC*) de Toronto l'article *City as a Spaceship* paraît.

L'IAC réunit tous les ans les acteurs du domaine de l'aérospatiale à travers le monde. L'événement, qui attire plus de 3 000 participants chaque année, a pour but de promouvoir les dernières recherches, découvertes et informations dans les différents secteurs et thèmes de l'aérospatiale. Le congrès se déroule tous les ans dans un autre pays et présente non seulement les dernières avancées dans les domaines des sciences spatiales, de la recherche, de la technologie, de l'exploration, de la réglementation et de l'éducation, mais propose des conférences, des expositions et récompense les travaux d'étudiants en leur offrant une publication.

En 2014 celui de Toronto avait pour thème « Our World Needs Space », *Notre monde a besoin de l'Espace*. Dans ce cadre-là, l'article *City as a Spaceship* nous propose de porter un nouveau regard sur nos villes. Les trois auteures les considèrent comme des vaisseaux spatiaux à part entière, leur appliquant les principes de conception et « d'écologie spatiales » afin de développer un nouveau modèle de développement urbain. La réflexion y est basée sur plusieurs questions :

- If Earth were a spaceship and we were the Astronauts, how would we live differently?  
(*Si la Terre était un vaisseau spatial et nous étions les Astronautes, dans quelle mesure vivrions-nous différemment?*)
- What if living conditions in outer space informed and exchanged the cramped social environments down below, such as the worker-housing and informal settlements in our mega-cities?  
(*Et si les conditions de vie dans l'Espace façonnaient et modifiaient les environnements sociaux exigus ici-bas, tels que les cités ouvrières et les lotissements informels dans nos mégapoles ?*)
- How can space systems inform the structure and workings of extreme urban environments?  
(*Comment les systèmes spatiaux peuvent-ils façonner la structure et les rouages des environnements urbains extrêmes ?*)

Exposant « une vision futur de la ville basé sur des faits scientifiques »<sup>84</sup> cet essai tend à expliquer comment les savoirs accumulés au cours de l'histoire de l'exploration spatiale peuvent nous aider à mieux penser la ville de demain et servir d'inspiration sur Terre.

---

<sup>84</sup> Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), 2014, p. 1

Traduction de « We propose future visions of the city based in science fact »

Le constat de l'augmentation croissante de la population justifie la nécessité de revoir notre mode de planification. Bien que le taux de croissance mondiale soit en train de décroître selon worldometers cela n'empêchera pas la population mondiale d'atteindre 8 milliard en 2024 puis 9 milliard en 2042.<sup>85</sup> D'après l'ONU en 2050, 66% de la population habitera en ville.<sup>86</sup> Cette augmentation de la population ainsi que notre mode de vie actuelle, créent des pressions de plus en plus extrêmes sur notre environnement. C'est donc l'impact de nos activités qui amène la ville à avoir de plus en plus de similitude avec les stations orbitales et qui pousse les auteurs à dire : « Nous voyons l'habitat spatial et les véhicules de transport spatiaux comme analogue aux villes du futur »<sup>87</sup>. C'est pourquoi l'expérience des explorations spatiales que nous avons accumulées doit être « interprétée, transposée et transmise pour servir d'inspiration sur Terre »<sup>88</sup> « Vivre à la fois dans l'Espace et dans les villes denses met en évidence les considérations telles que : la durabilité, le recyclage des matériaux, et le système de régulation des conditions essentielles à la vie. »<sup>89</sup>



44. Vienne dans le futur. © Liquifer system group

Les villes hyper-denses comme New York, Mumbai et Tokyo sont citées en exemple d'espace sous pression devenant de plus en plus hostile à l'homme car pollué. Parallèlement à CAAS, Susmita Mohanty a également rédigé un article sur Mumbai *as a Spaceship*.

Cependant le mot « City » ne doit pas être traduit littéralement par ville. Ici la notion de *City* englobe tous les systèmes ou sous-systèmes qui peuvent être considérés comme clos et de façon globale. Une vision impliquant les systèmes de production et qu'il est possible d'appliquer à petite ou grande échelle ; chaque ville pouvant être composée de plusieurs petites *city*. Megacity, métropoles, village, bidonvilles, maison, bureau, tous peuvent à leur échelle être une *City as a Spaceship*. Ainsi dans son article, S. Mohanty prend comme « vaisseau spatial » Dhavari un bidonville de Mumbai. Elle présente aussi les différentes îles de la ville comme de possibles systèmes de fonctionnement, de

<sup>85</sup> <http://www.worldometers.info/fr/population-mondiale>, [Consulté en avril 2017]

<sup>86</sup> Centre d'actualité de l'ONU, juillet 2014, <http://www.un.org/fr/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects.html>

<sup>87</sup> Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), 2014, p. 1

Traduction de « We view Space habitats and space transport vehicles as analogous to future cities »

<sup>88</sup> *Idem*, Traduction de « accumulates space exploration needs to be interpreted, translated, brokered and curated to serve as Earthly inspiration »

<sup>89</sup> *Idem*, p.2

Traduction de « Living both in space and in dense cities brings into sharp focus considerations such as: sustainability, material recycling, and regenerative life-support. »

production et d'approvisionnement fermés. Chaque île est un *Spaceship* qui ensemble créent la ville de Mumbai.

Si l'on suit cette logique, la Terre serait donc couverte de multitudes de lieux regroupant des habitants et pouvant être considérés comme des entités autonomes, l'intérêt de la CAAS étant d'appliquer la même logique à chaque échelle. Si l'on applique le principe à toutes les échelles cela revient à considérer notre Terre toute entière comme un vaisseau spatial dans son ensemble comme le fait Buckminster Fuller avec son image du « Spaceship Earth ».

En 1969 dans *Operation Manual For Spaceship Earth* il nous présente la Terre comme une machine extraordinaire. En mettant en abyme sa petite taille par rapport au reste de l'univers ainsi que la vitesse à laquelle elle tourne sur elle-même et autour du soleil, il lui donne les caractéristiques que nous donnerions à un vaisseau spatial : un moyen de transport et un habitat fournissant à ses occupants tout le nécessaire pour vivre. Buckminster Fuller souligne que nous ne connaissons ni la destination, ni le mode d'emploi et que c'est peut-être pour cela que nous ne percevons pas notre planète comme un système. C'est pour cela que nous avons jusqu'à présent utilisé les ressources sans compter. Cependant l'absence de manuel ne devrait pas nous empêcher d'en prendre soin. En effet Fuller fait le parallèle avec la voiture. Pour la voiture tout le monde sait qu'il faut remplir le réservoir pour qu'elle fonctionne, changer l'eau ou l'huile. Mais surtout il nous est évident qu'il faut l'entretenir si on veut pouvoir en jouir longtemps. Pourtant nous n'appliquons pas cette logique à notre planète dont le mécanisme est fragile et complexe. Il faut penser la Terre dans son ensemble pour la préserver, d'où l'image du Spaceship.<sup>90</sup>

Une fois le concept de Spaceship Earth mis en place, l'idée de *City as a Spaceship* peut se développer et présenter quels sont les points communs entre la ville et l'habitat spatial qui justifient de faire une analogie.

Que ce soit dans un environnement aussi hostile que l'Espace ou dans les villes hyper-denses les auteurs s'intéressent aux besoins de l'être humain et à son rapport à ce qui l'entoure, et cela passe par :

L'Habitat \_ La Ville \_ L'Air \_ La Nourriture \_ Les Déchets \_ L'Eau \_ l'Atmosphère \_ Le Gaz

Les différents éléments cités font partie de ce que le texte présente comme la notion d'*oikos* idée englobée dans la notion de « City ».

L'ensemble qui est considéré οἶκος n'est autre que le nom en grec ancien pour définir la maison. Il définit la maison dans son ensemble, prenant en compte tout ce qui se réfère à la maison, cela incluant aussi les activités liées à elle, son économie et son écologie. C'est un système.

On peut ainsi tracer un parallèle entre *oikos* et les stations spatiales puissent qu'elles regroupent toutes les thématiques liées à l'habitat de la même façon que cette ancienne notion grec.

Cela permet aussi de mieux comprendre en quelle mesure leur fonctionnement intéresse de nos jours. Elles représentent un lieu pouvant accueillir toutes les activités du quotidien durablement à l'équilibre et autonome. En effet un dysfonctionnement de la qualité de l'air ou de l'eau ne serait pas acceptable dans la station spatiale. La vigilance permanente est donc de mise pour garder cet environnement restreint propre et viable.

« Un vaisseau spatial n'est pas simplement une maison, il ressemble également à un système entier, un système très complexe qui fournit un abri, de l'énergie et de la nutrition, et où les habitants de la maison de même que les animaux, utilisent des technologies spécifiques, ont besoin d'eau et d'air, et produisent des déchets. »<sup>91</sup>

---

<sup>90</sup> Buckminster Fuller (Richard), 1969

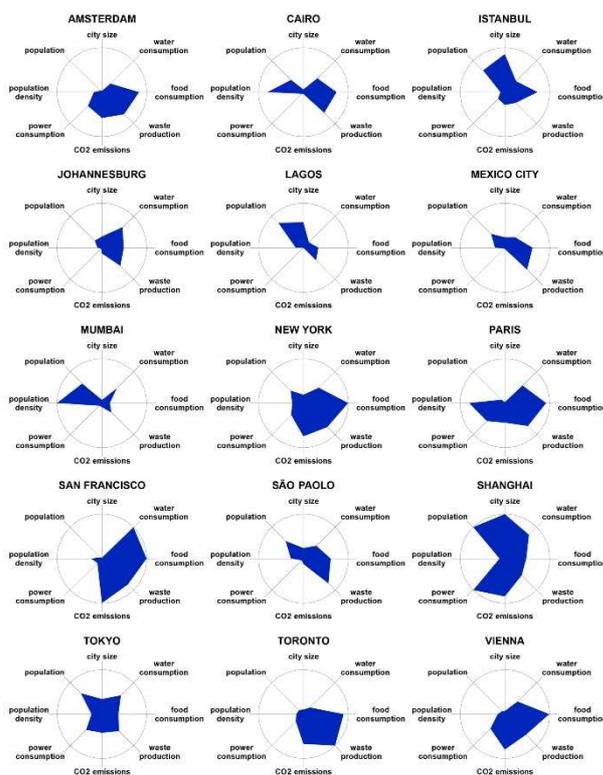
<sup>91</sup> Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), *Op cit.*, p. 4

Traduction de « A spaceship is not merely a house, it also resembles a whole system, a very complex system that provides shelter, energy, and nutrition, and houses inhabitants using specific technology needing water and air, with animals and producing waste. »

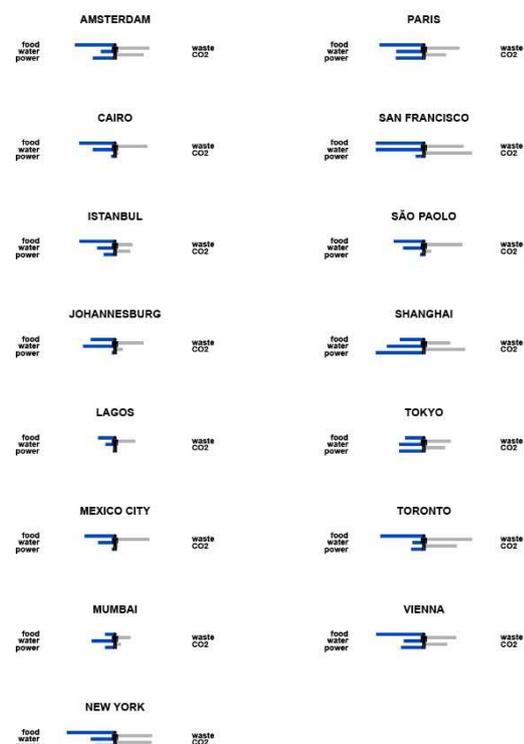
« Les écologies du Système οἶκος Spaceship sont les aspects du logement, de l'énergie, de la technologie, de la nutrition, des habitants, des animaux, de l'air, de l'eau et de la gestion des déchets, chaque écologie étant comprise comme la relation entre les organismes et leur environnement »<sup>92</sup>

À partir de cette définition les auteures ont mis au point leur "écologie spatiale" et ses 5 points d'analyses, puis les ont appliqués à l'étude des 15 plus grandes villes du monde pour les imaginer *as a Spaceship*.

- Shelter as Transformable (*L'enveloppe comme élément transformable*)
- Energy as Renewable (*L'énergie renouvelable*)
- Technology, Automation and Infrastructure (*Technologie, Automatisation et infrastructure*)
- Inhabitants (*Les habitants*)
- Life Support Systems (*Le système de support de vie*)



45. Schéma représentant les points fort et les points faibles des 15 plus grandes villes du monde. Source : Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), 2014, LAC-14-E4.2.8



46. Schéma de consommation et d'émission. Source : Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), 2014, LAC-14-E4.2.8

Pour les auteurs « CAAS est un mouvement métaphorique dans l'urbanisme, une nouvelle façon de penser les modes de vie urbains, les habitudes et les tendances, ce qui, l'histoire nous le dit, ne changent pas facilement. »<sup>93</sup> Elles ont conscience que ce n'est qu'un début, des outils mis en place pour continuer à développer une nouvelle vision.

<sup>92</sup> *Idem*, p.4 « The ecologies of the System οἶκος Spaceship are the interrelationships of the aspects of shelter, energy, technology, nutrition, inhabitants, animals, air, water and waste management, with each ecology understood as the relationship between the organisms and their environment »

<sup>93</sup> *Id.*, p.3 « CAAS is a metaphorical movement in urban planning, a new way of thinking about urban lifestyles, habits and tendencies, which *history* tells us do not change easily. »

« Notre expérience terrestre peut enrichir et influencer nos explorations extraterrestres et vice versa. »<sup>94</sup>

En février 2015 le collectif CAAS réalisait un workshop avec l'artiste KHOJ sous le thème "Imagining your future city". KHOJ est une organisation qui veut favoriser l'apprentissage par l'expérience à l'aide de pratiques artistiques contemporaines et expérimentales. L'un de leurs thèmes de travail principal est le lien entre l'art et la science. C'est dans ce cadre que s'est tenu dans les ateliers KHOJ le workshop entre CAAS et l'artiste Rohini Devasher. Cet atelier était à destination de jeunes de 10 à 12 ans pour les inviter à imaginer leur villes du futur et les sensibiliser à la vision de la ville *as a Spaceship*.

Suite à ce workshop le KHOJ fut pendant 2 semaines l'hôte de l'exposition « The Undivided Mind » de Susmita Mohanty, où les visiteurs ont pu déambuler dans les ateliers « retransformés » en un espace intérieur d'un vaisseau spatial.

L'atelier se trouve à Khirkee, un village de New Dehli. Les visiteurs pouvaient déambuler à travers les liens recréant un laboratoire, un module de science et d'art, le centre de contrôle de la mission, la cuisine, la serre et une salle recréant des environnements virtuels (holodeck), tout en contemplant une série de production artistique sur le lien Espace-Science et Art. L'idée était de juxtaposer les réalités d'une existence en ville avec les conditions extrêmes de vie dans l'Espace.<sup>95</sup>



47. Photo de l'exposition en résidence *The Undivided Mind* au Khoj Workshop. Source : <http://kjojworkshop.org>



48. Photo de l'exposition en résidence *The Undivided Mind*. Source : <http://kjojworkshop.org>

<sup>94</sup> *Id.*, p. 9 Traduction de « Our earthly experience can inform and influence our extra-terrestrial explorations and vice versa. »

<sup>95</sup> Armstrong (Rachel) and all, 2017

## b) La *Starship city* par Astudio

Dans le domaine de l'aérospatiale le comité CAAS n'est pas le seul à réfléchir à l'apport de l'exploration spatiale pour la ville de demain. D'autres agences comme Astudio ou personnalités comme Rachel Armstrong, chercheuse en sciences appliquées, partagent aussi cette vision et construisent leur propre approche.

L'agence Astudio décrit son ambition pour nos villes à travers le nom de *Starship city*. Elle présente des similitudes avec la *City as a Spaceship*. Cependant là où CAAS pose principalement les bases de la réflexion en montrant le lien entre la Terre et l'Espace et en précisant les enjeux et les points sur lesquels nous devons agir, la *Starship city* nous propose d'autres mesures permettant de mettre en place ces changements :

- La création d'une « économie de l'astronaute » selon la vision de Kenneth E. Boulding en 1996
- La création du *sustainable design* dont Serge Chermayeff et Christopher Alexander démontraient la nécessité dans *Community and Privacy* en 1963.
- La création d'une nouvelle vision de l'écologie et d'un autre fonctionnement social
- La nécessité de créer des bâtiments positifs en carbone d'ici 2040. « L'architecture doit devenir adaptative, et réactive au changement de climat, doit réduire le CO<sub>2</sub> et non pas le générer »

Dans *Community and Privacy*, S. Chermayeff et C. Alexander, tous deux architectes et théoriciens peignent un tableau noir du rapport de l'homme à la nature qui engendre la nécessité absolue de concevoir une nouvelle écologie. En effet ils dénoncent l'invasion progressive par l'homme de la nature sauvage détruisant peu à peu la différence entre ville et nature entre domestiqué et sauvage. L'expansion de ce contrôle humain sur la Terre fait, qu'en dehors de lieux aux conditions extrêmes, l'homme est partout. Non seulement il ne peut pas se retrouver seul mais cela entraîne une uniformisation du patrimoine paysagé et naturel et le détruit peu à peu car rien ne résiste à la foule. Pour eux la présence de l'homme empêche la nature de jouer son rôle de ressource, il n'y a plus moyen de s'échapper temporairement de la ville. De plus ils voient l'homme comme un perturbateur l'équilibre de la nature apportant des éléments chimiques destructeurs. C'est la prédominance jusqu'à l'effondrement du modèle. Cela pose le problème de la responsabilité de l'homme, car lorsqu'il aura entièrement fini de modifier la nature il devra concevoir sa propre écologie pour s'adapter à l'environnement qu'il aura lui-même créé.

Si l'homme ne gère pas son changement d'environnement il aura l'impression de se retrouver prisonnier sur sa Terre. C'est ce que Chermayeff et Alexander appellent le syndrome de la capsule.

Ce syndrome est connu dans les stations spatiales ou les sous-marins où la réclusion sans possibilité d'évasion crée une tension nerveuse difficilement supportable.

Or « quand l'homme assumera la responsabilité de la terre entière, et qu'il en contrôlera chaque partie, un syndrome comparable à celui que provoque la capsule spatiale peut se développer.

[...] Seule une conception réfléchie peut aider à éviter des dégradations ultérieures. »

C'est cette conception que les auteurs nomment nouvelle écologie ou *sustainable design*<sup>96</sup>

On comprend donc bien pourquoi Astudio introduit cette thématique à la *Starship city*. Cette image de la ville se base sur les stations spatiales pour préserver la nature qui l'entoure afin qu'elle puisse continuer à jouer son rôle de « ressourceur » émotionnel afin que vivre sur Terre ne devienne pas une contrainte.

---

<sup>96</sup> Chermayeff (Serge), Alexander (Christopher), 1972

En ce qui concerne le fonctionnement économique de la ville du future la *Starship City* se base sur l'expertise de l'économiste Kenneth E. Boulding. Un 1966 il formule l'idée de la *spaceman economy* ou économie de l'astronaute en contraste avec l'économie de la société de consommation déjà en place à l'époque.

Cette dernière qu'il nomme la *cowboy economy* fonctionne en circuit ouvert comme si tout été illimité. Elle correspond à la vision que nous avons de la Terre dans le passé. Pendant la majeure partie de notre existence sur Terre nous l'avons considérée comme une surface plane et infinie. Il y avait toujours quelque chose de neuf à découvrir derrière la frontière de l'horizon ou d'autres lieux où aller en cas de difficulté. Depuis le XVI<sup>e</sup> siècle cependant nous savons que la terre est ronde et l'avons peu à peu accepté. Cela implique qu'elle est une sphère et que son volume est limité.

Or K. Boulding souligne que cela aurait dû nous amener à quitter notre *cowboy economy*. Ecrivant en 1996 il a en effet le recul nécessaire sur les deux révolutions industrielles et sur l'émergence de la société de consommation pendant les trente glorieuses pour dire que nous n'avons pas fait les changements qui s'imposaient pour gérer le passage à des ressources en quantité finie.

Pour lui notre difficulté à concevoir notre monde comme un système fermé vient du fait que dans notre environnement nous n'expérimentons que des circuits ouverts. Notre corps par exemple à besoin d'eau, d'air ou de nourriture provenant de notre environnement pour vivre.

C'est pourquoi notre économie de cowboy est basée sur l'exploitation et la consommation.

Le but de l'économie de l'astronaute est au contraire de minimiser et non de maximiser. Son nom vient de la philosophie de mise en aérospatiale de tout considérer comme un circuit fermé.<sup>97</sup>

En se basant sur ces opinions et en partenariat avec R. Armstrong, Astudio soumet le projet de la *Tomorrow city* ou ville de demain.

Leur travail a pour but d'aller plus loin dans la définition actuelle de durable et de proposer des solutions pour les villes futures basées sur la pratique. Ces villes sont auto-suffisantes et productives, répondent aux conditions environnementales, génèrent de l'énergie et réduisent les polluants.

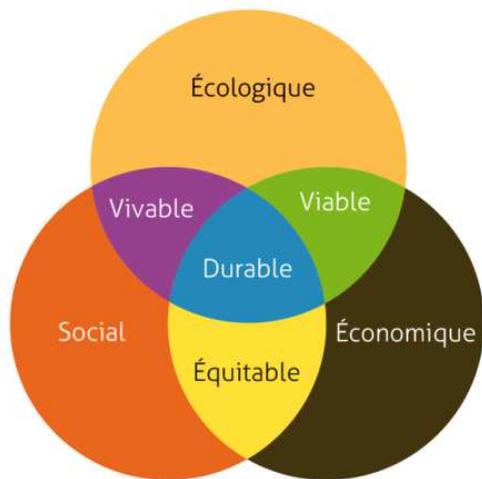
En reprenant les textes de pionniers comme Fuller, Chermayeff et Alexander, ils mettent en exergue que pour ces personnes le but de l'écologie est de conserver les ressources. Ces derniers imaginent l'écologie comme un fonctionnement en écosystème clos, dans un cercle vertueux où les ressources ne sont prélevées qu'une fois puis recyclées à l'infini. Ils dénoncent notre pensée actuelle de l'écologie qui est focalisée sur la réduction des gaz à effet de serre donc essentiellement du CO<sub>2</sub>. Toutes les actions mises en place visent à réduire les émissions de carbone. L'idée de réduire les émissions en CO<sub>2</sub> ou de recycler permet le ralentissement de l'utilisation des ressources mais pas la conservation de celles-ci. Dans le scénario actuel d'accroissement de la population ce n'est donc pas une solution puisqu'à terme les matières premières viennent tout de même à manquer. Aujourd'hui l'accent est mis sur la modification et le perfectionnement de ce modèle existant mais selon Astudio en aucun cas sur la recherche et la mise en place de nouvelles solutions. Cependant si le modèle de base est mauvais même si il en vient à être perfectionné il ne sera toujours pas assez efficace.

En comparaison le circuit fermé va au-delà du recyclage. Le but n'est pas seulement de recycler les parties qui peuvent l'être mais de valoriser l'ensemble des déchets en les utilisant comme matière première pour une autre activité. C'est le principe de « cradle to cradle » (du berceau au berceau)

---

<sup>97</sup> Boulding (Kenneth E.), 1966, présenté au Forum sur les six ressources pour l'avenir et sur la qualité de l'environnement dans une économie en croissance à Washington en 1966.

détaillé par Christopher Alexander, Michael Braungart et Bill McDonough. Aujourd'hui cette vision est largement médiatisée par la Fondation Ellen MacArthur. La ville de demain veut ouvrir une nouvelle voie vers cette réflexion.



49. Schéma du développement durable, Source : [http://stockage.uni-valenciennes.fr/Menet.ACV.BAT20120704/acrbat/chap01/co/ch01\\_010\\_1-1.html](http://stockage.uni-valenciennes.fr/Menet.ACV.BAT20120704/acrbat/chap01/co/ch01_010_1-1.html)

Pour Astudio et R. Armstrong la ville du futur inverse la relation bâtiment-environnement ; le bâtiment ne prend plus seulement dans son environnement mais lui donne en retour. La ville est coplanifiée par des communautés, le gouvernement, les financiers. Cela est permis grâce à une nouvelle forme de gouvernance et de leadership qui encourage les actions participatives et les collaborations interdisciplinaires. Il faut avoir une nouvelle vision collective de la ville.

On retrouve donc dans ce parti pris les piliers du développement durable.

La ville est un système vivant qui repose sur l'équation : Nature + Technologie = résilience

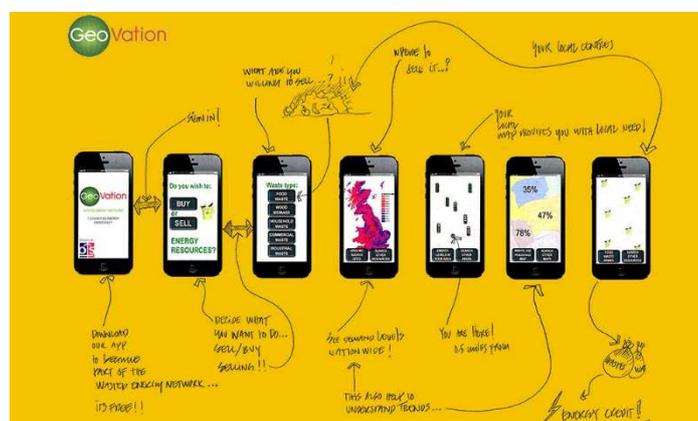
Ville durable = autonome, productive, génère de l'énergie, traite les déchets et l'eau, génère du sol, cultive des aliments - comme nous aurions à le faire dans l'Espace.

### Les projets pour la « Tomorrow city » :

« What if the main economic system of starship cities worked on carbon exchange? »

« Que se passerait-il si le principal système économique de la Starship était basée sur l'échange de carbone ? »

Le flux de carbone dans la ville peut être considéré comme la mesure de la « vie » car le carbone est l'élément présent dans toutes les espèces de l'évolution. Le but étant de comprendre le rôle du carbone dans notre existence pour nous aider à comprendre l'impact de nos actions quotidiennes. Comme application réelle Astudio propose la mise en place *Social Energy Cluster* et *Waste Energy Networks*. Ce dernier n'est autre qu'une plateforme en ligne qui encourage une économie basée sur le traitement des déchets. Elle permet de vendre ou d'acheter des déchets qui peuvent ainsi servir de base pour une autre entreprise et être à nouveau valorisés. Ce système d'échanges informe l'utilisateur de l'impact carbone de son action comme indicateur de succès ou d'échec.



50. Schéma de fonctionnement du Wasted Energy Network, Source : <http://www.astudio.co.uk>

Du côté du design et de l'architecture Tomorrow city voit la nature comme partie intégrante de la ville pouvant répondre à des enjeux climatiques en ville comme par exemple réduire les îlots de chaleur.

Les projets en relation entre la ville et la nature intègrent des processus naturels dans la ville à toutes les échelles : façades, bâtiments, paysages. Ils ont pour noms : « Living Landscapes », « Living Skins » qui s'intéressent au développement de nouvelles façades notamment par l'utilisation d'algues comme protection solaire fabriquant également de l'oxygène et ayant un impact



51. Façade intégrant des Photobioacteur constitué d'algue, Proposition pour le park scientifique de Hong Kong, Source : <http://www.astudio.co.uk>

sur la qualité de l'air, la température et la lumière dans et autour du bâtiment.

« Living Structures » est fondé sur des recherches sur de nouveaux matériaux qui pourraient s'adapter aux besoins et à l'environnement en pouvant se modifier ou s'agrandir au cours du temps. Pour l'instant ces matériaux sont principalement composés de mycélium.

Le mycélium de champignon est un matériau privilégié car il se développe à partir d'une base de matière organique, des sous-produits de l'agriculture suffisent, sans

nécessiter d'énergie et sans crée pas de déchets. Grâce à sa structure filamenteuse c'est un liant naturel qui peut dans certaines conditions être perméable et résistant à l'eau.

Le matériau obtenu ne présente aucuns risques de pollution pour l'environnement puisqu'il est entièrement compostable. Une fois jeté il peut redevenir un nutriment pour une autre forme de vie.

C'est pourquoi l'agence Officina Corpuscoli dans la personne de Maurizio Montati y voit une alternative aux produits plastiques et à la pollution qu'ils engendrent.

Pour présenter cette idée au grand public l'exposition « The Future Of Plastic » a été réalisé.

Elle exhibe toute sorte d'objet du quotidien, essentiellement de la vaisselle, recréé à partir de



52. Image de la vaisselle réalisé pour The Growing Lab / Mycelium. Source : <http://www.fungal-futures.com>

mycélium.<sup>98</sup> Avec son projet *the Growing Lab*, Officina Corpuscoli espère attirer l'attention de l'industrie afin que leur travail dépasse le cadre de la recherche et puisse avoir une application et un impact réel et positif.<sup>99</sup>

Le site Fungal Futures répertories différents projet à base de mycélium pour des applications diverses : textile, matière transparente, vaisselle, chaussure.

<sup>98</sup> Montalti (Maurizio), 2014, [http://www.corpuscoli.com/wp-content/uploads/2014/07/press-release-The-Future-of-Plastic-Growing-Lab-Officina-Corpuscoli\\_Maurizio-Montalti.pdf](http://www.corpuscoli.com/wp-content/uploads/2014/07/press-release-The-Future-of-Plastic-Growing-Lab-Officina-Corpuscoli_Maurizio-Montalti.pdf)

<sup>99</sup> Fungal Futures 01, 2016, <http://www.fungal-futures.com/The-Growing-Lab-Mycelia>

### c) Réalisations

Les représentations de la ville du futur peuvent reposer sur l'imaginaire d'une ville résiliente pouvant s'adapter, produire et se restructurer et se réparer elle-même.

Dans cette optique plusieurs programmes de recherche plus ou moins futuristes sont poursuivis pour de nouveaux matériaux tel que le projet « Living Structures » présentés ci-dessus. Mais aussi les recherches de Rachel Armstrong sur les protobiontes. Le but commun est de créer des matériaux vivants pouvant construire un lieu en grandissant, se réparer sans que le bâtiment souffre de l'usure du temps mais aussi se transformer en fonction des besoins comme rajouter des étages à un bâtiment existant.

En ce qui concerne le mycélium de champignon, il a également été utilisé pour un projet architectural celui du pavillon Hy-Fi, réalisé par The Living MoMa PS1.

Ce pavillon réalisé en 2014 dans le cadre du programme Young Architect du MoMa est constitué de briques 100 % organiques et composables.

Les briques sont réalisées à base de tiges et de feuilles de maïs colorées à l'argile rouge puis découpées en morceaux et mélangées à du mycélium. Puis l'ensemble est placé dans un moule de n'importe quelle forme. L'ensemble remplit la forme créant une brique légère. Ces briques peuvent être « fabriquées » en 5 jours. Cette technique développée en 2007 par Ecovative n'avait jusqu'à présent été utilisée que pour des emballages.

Le pavillon réalisé était composé de trois cylindres coiffés au sommet par les moules métalliques utilisés pour construire les briques. Les moules chauffés au soleil créaient un mouvement d'air pour rafraîchir le pavillon de façon naturelle.

Le challenge de The Living est de créer ainsi un « nouveau paradigme pour le design : auto-assemblable, industriel, compostable, le tout sans énergie et sans déchets »<sup>100</sup>

« Notre structure utilise les technologies biologiques et l'informatique et l'ingénierie de pointe »<sup>101</sup>

La structure est restée en place de juin à septembre et était la première grande structure de ce nouveau matériau exploitant l'incroyable « algorithme biologique » des racines de champignons<sup>102</sup>



53. Intérieur du pavillon Hy-fi. © Kris Graves



54. Vue d'ensemble du pavillon. © Kris Graves

<sup>100</sup> The Living, 2014, <http://thelivingnewyork.com/hy-fi.htm>

<sup>101</sup> Rajagopal (Avinash), 2014, <http://www.metropolismag.com/ideas/technology/behind-livings-100-organic-pavilion-moma-ps1/>

Traduction de « Our structure uses biological technologies and cutting-edge computing and engineering »

« New paradigm for design: self-assembling, industrial, compostable and it all happens with no energy and no waste »

<sup>102</sup> *Idem*, « Our project will be the first large structure made of this new material, » says David Benjamin. « Our organic bricks are exciting because they harness the incredible 'biological algorithm' of mushroom roots and tune it to manufacture a new building material that grows in five days, with no waste, no input of energy, and no carbon emissions. »

David Benjamin l'un des architectes de Hy fi va jusqu'à présenter ces briques une création ouvrant une nouvelle voie à la redéfinition des chaînes d'approvisionnement et de création mondiale de matériaux de construction.

Cependant les propriétés de ce matériau ne sont pas encore connues quant à sa longévité ou son potentiel à être mis en œuvre à plus grande échelle.

### 3) Ces bâtiments intégrant les technologies spatiales

On l'a vu, la philosophie spatiale s'applique peu à peu à la ville. Mais la ville ne peut amorcer une transformation que si cette dernière est également réalisée à l'échelle du bâtiment.

Dans cette optique la *Sustainability Base* ou Base Durable réalisée par la NASA au centre Ames est le premier bâtiment à intégrer des technologies spatiales.

*Sustainability Base* est un ensemble de deux bâtiments réalisés sur le campus NASA AMES Research Center par l'architecte William McDonough + Partners. Construit en 2012, cet ensemble de 4 600m<sup>2</sup> allie architecture bioclimatique et technologie spatiale pour atteindre de hautes performances énergétiques. Il est bâti sur la Campus NASA Ames, l'un des dix centres de la NASA localisé dans la Silicon Valley en Californie. C'est dans ce centre que sont menées depuis 76 ans des recherches en aéronautiques ainsi qu'en sciences et techniques pour l'exploration.

Les buts de NASA Ames sont de :

- Maintenir une expertise dans les domaines de la technologie de l'information, de l'aérospatiale, de l'aéronautique et de l'ingénierie
- Effectuer des recherches dans les domaines spatial, terrestre, lunaire et biologique
- Élaborer un statut pour la NASA dans les petites missions spatiales
- Élargir les partenariats publics et privés
- Contribuer à des technologies d'exploration novatrices, performantes et fiables.

Le centre a été fondé en 1939, d'où le fait que le parc de bâtiments y est ancien. En 2007, la NASA lance un concours « Renovation by Replacement » (RbR) pour remplacer les bâtiments « antiques et inefficaces » par des bâtiments neufs d'une grande performance énergétique.

Chacun des 10 centres de la NASA a participé au concours qui fut remporté par le centre AMES. C'est donc dans ce cadre que fut réalisé le projet Sustainability Base.



55. Perspective de la façade principale. © NASA AMES Center

Au départ, le choix d'intégrer les technologies développées par la NASA n'était pas évident comme l'explique Steven Zornetzer, directeur de Ames, qui dit, en parlant de la première esquisse :

« Ce que j'ai vu était quelque chose de très décevant. C'était un bâtiment très conventionnel qui aurait pu être construit en 1990, et ici nous, la NASA, nous sommes dans le cœur de la Silicon Valley, au 21<sup>ème</sup> siècle ». <sup>103</sup> C'est suite à une conférence de William McDonough que

Steven Zornetzer fait appel aux compétences de l'architecte et que l'idée d'utiliser les technologies spatiales émerge. Le but était de créer un bâtiment fonctionnant autant que possible en boucle fermée, thème de prédilection de W. McDonough, puisque ce pionnier de l'architecture durable cherche à appliquer le principe de « cradle to cradle » à l'échelle d'un édifice.

<sup>103</sup> Palca (Joe) Nov. 2015, <http://www.npr.org/sections/alltechconsidered/2015/11/30/455063420/NASA-uses-lessons-from-space-to-design-an-efficient-building>

Traduction de « What I saw was something that was very disappointing, » he says. « It was a very conventional building that could have been built in 1990, and here we are, NASA, in the heart Silicon Valley, in the 21st century. »

En mettant à profit leurs connaissances ils ont conçu un bâtiment exploitant autant que possible la situation géographique et le climat du site pour minimiser son impact environnemental.

« Travailler en étroite collaboration avec Bill McDonough et son équipe était une source d'inspiration et extrêmement bénéfique. Le processus collaboratif a donné une conception hautement durable et magnifique optimisée pour la performance du bâtiment et représentative de nos valeurs ... Je considère cela comme un prototype d'un bâtiment du XXI<sup>e</sup> siècle. C'est la façon dont nous allons devoir penser à construire à l'avenir. »

– Steven Zornetzer, Associate Director, NASA Ames Research Centre

Le bâtiment veut offrir le bien-être à ses occupants et à la planète. Pour y parvenir, il comprend un mélange de technologies d'innovation venant de la NASA et des techniques présentes dans le commerce.

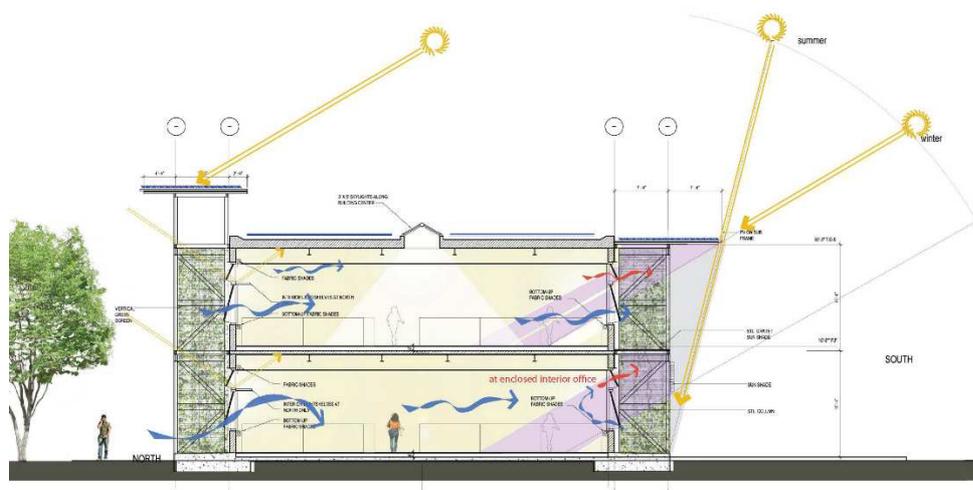
Grâce à cela, *Sustainability Base* a été récompensé par le prix LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) au niveau platine, son niveau le plus élevé. De ce fait, il est reconnu comme l'un des bâtiments les plus « verts » de l'inventaire fédéral. Jusqu'à présent, tout nouvel édifice appartenant à l'état fédéral devait recevoir au minimum la récompense argent du prix LEED.

Conçue non pas pour ne pas nuire à l'environnement mais bien pour lui être bénéfique, *Sustainability Base* tend à réduire de 90 % les besoins en eau par rapport à un bâtiment traditionnel de cette envergure, et produit plus d'énergie qu'elle ne consomme — en l'occurrence le double. Le reste est réinjecté dans le circuit d'approvisionnement du campus.

Le centre de recherche est constitué de deux bâtiments placés en décalé et connectés à leurs extrémités. Leur forme arquée a été étudiée pour tirer profit au maximum de la course du soleil mais aussi du vent dominant arrivant de la baie de San Fransisco.

Des ouvertures placées au niveau des fenêtres permettent l'entrée d'air. Au rez-de-chaussée, les utilisateurs ont la possibilité de régler eux-même la ventilation en ouvrant les fenêtres. Dans les étages c'est le système central du bâtiment qui gère les ouvertures. La nuit, un système de *free cooling* ou refroidissement nocturne est mis en place. Le système central gère automatiquement l'ouverture des fenêtres dès que la température extérieure passe sous le seuil voulu.

Grâce à cela, le bâtiment est rafraîchi de jour comme de nuit de façon naturelle, sans besoin de ventilation mécanique, ce qui supprime le bruit ambiant habituellement généré par ce type d'installations.



56. Métabolisme du bâtiments. © NASA AMES Center

L'utilisation du vent et du soleil montre une approche architecturale bioclimatique. Si la combinaison des deux ne suffit pas au confort des occupants, le chauffage et le rafraîchissement peuvent aussi être générés par géothermie combinée à un plafond radiant.

L'édifice, prévu pour préserver les ressources, a été construit à partir de matériaux locaux recyclables ou recyclés, choisis pour le confort et la santé des résidents. Dans ce but, le sol en chêne du hall d'entrée provient d'un autre bâtiment démolé peu de temps auparavant.<sup>104</sup>

La construction en exosquelette fournit une stabilité sismique mais offre aussi des volumes spacieux avec le minimum de cloisons permettant une pénétration de la lumière du jour en profondeur. Cela maximise l'espace interne utilisable et ajoute de l'ombrage puisque cette structure porte les pare-soleil.

Il y a peu de bureaux individuels, la majorité sont ouverts et collaboratifs. En complément, on trouve des salles de conférence et des salles individuelles sont mises à disposition sur réservation. Les façades aux larges fenêtres captent la lumière du jour et offrent aux occupants une large vue sur le paysage environnant afin de rendre perceptible un des concepts du lieu : la connexion entre les hommes et la nature.



57. Plan du rez-de-chaussée. © NASA AMES Center

La technologie de la NASA se retrouve dans le fonctionnement et la gestion globale du bâtiment. Le système de gestion mis en place n'est pas sans rappeler le *Life Support system* présent dans l'ISS. Dans l'Espace, il gère toutes les constantes nécessaires à la vie, la qualité de l'air, la production d'oxygène, le retraitement de l'eau, le niveau d'humidité et la luminosité, la production d'électricité. Dans *Sustainability Base*, celui-ci prend en compte l'eau, la création d'énergie mais aussi l'apport solaire du point de vue du chauffage et de l'éclairage, éteint ou adapte l'intensité lumineuse en fonction de la présence des occupants, contrôle la consommation en éteignant les appareils en veille.

Le système de gestion de l'eau utilise une mise à niveau pour la Terre du système américain utilisé dans l'ISS. La technologie utilise l'osmose avant et inverse pour nettoyer l'eau grise. De nouvelles

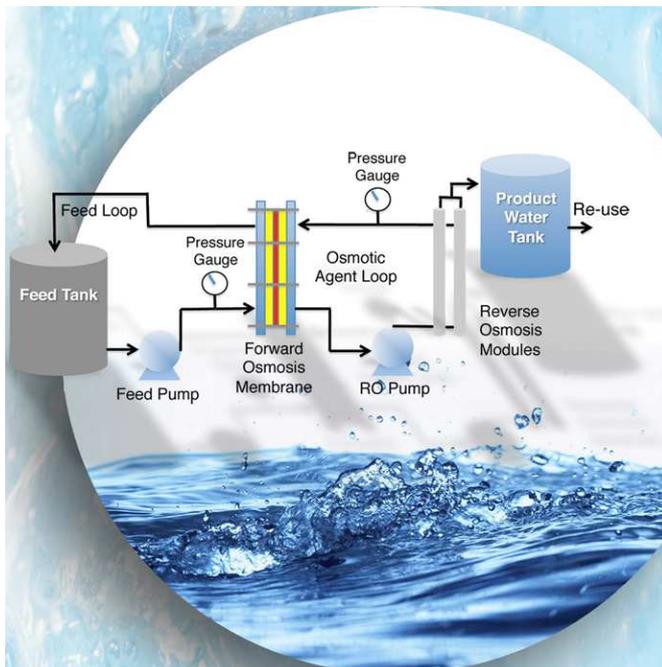
<sup>104</sup> Wiedemann (Darlene), *Living Green*, 2015, <https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livinggreen>

membranes osmotiques ont été spécialement conçues pour le projet. Grâce à un système de double canalisation séparant les eaux grises et les eaux retraitées, l'apport nécessaire en eau potable est réduit de 60 %. L'installation requière moins de 3 gallons (11 litres) d'eau potable par personne et par jour, contre 7 pour la norme de vigueur dans l'industrie.

Pour réduire les besoins d'arrosage, des plantes de la région résistante à la sécheresse ont été plantées. L'environnement extérieur est sculpté par des buttes artificielles qui filtrent les eaux de pluie et referment des cuves de récupération d'eau. Celle-ci est ensuite utilisée pour l'arrosage.<sup>105</sup>

La combinaison de ces deux mesures devait réduire les besoin en eaux de 85 à 90 % en comparaison à des bureaux traditionnels du même type.

Deux ans après la fin de la construction, la journaliste Jennifer Grayson dresse un bilan des résultats atteint avec Steven Zornetzer et Alastair Reilly qui montre que la réduction réelle ne s'élève qu'à 70 %.<sup>106</sup>



58. Fonctionnement du système de nettoyage de l'eau, dossier de presse Living Blue.  
© NASA AMES Center



59. Photo du module osmotique, dossier de presse Living Blue.  
© NASA AMES Center

L'électricité nécessaire au fonctionnement est produite à partir d'une pile à combustible à oxygène et de panneaux photovoltaïques.

La pile à combustible de l'entreprise Bloomenergy, nommée Energy Server ES-5700 est la seconde génération de ce système. La première version a été utilisée par la NASA pour la mission Curiosity sur Mars. Cette technologie est actuellement utilisée par certaines grandes entreprises comme Apple et Microsoft pour approvisionner leurs locaux.

L'ES-5700 peut produire jusqu'à 200 kW à partir d'une réaction alliant air et vapeur d'eau. Par rapport à un autre mode de production d'énergie, telle qu'une centrale gaz, elle a un rendement deux fois supérieur avec 55 %, et réduit l'émission de CO<sub>2</sub> de 40 %.

En plus de cela 432 panneaux photovoltaïque (Sun Power E-19) produisent 87 kW soit en fonction de la saison jusqu'à 30 % de l'énergie demandé par le bâtiment. L'énergie solaire étant la seule

<sup>105</sup> Wiedemann (Darlene), *Living Blue*, 2015, <https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livingblue>

<sup>106</sup> Grayson (Jennifer), 2014, [http://www.huffingtonpost.com/jennifer-grayson/innovation-earth-NASA-tech\\_b\\_5618107.html?utm\\_hp\\_ref=green](http://www.huffingtonpost.com/jennifer-grayson/innovation-earth-NASA-tech_b_5618107.html?utm_hp_ref=green)

source utilisable dans l'Espace la NASA est donc au fait des dernières performances. La série 19 de l'entreprise Sun power est d'après leur site la plus efficace actuellement sur le marché avec un rendement de 19 %.<sup>107</sup>

Le centre Ames ne se contente pas d'une production d'énergie efficace, il cherche aussi à en minimiser la consommation.

Ainsi, tous les luminaires sont à LED et allumés par détecteur. Les appareils tels que les imprimantes et photocopieurs sont mutualisés et mis en réseau pour réduire le nombre d'appareils branchés qui consomment environ 50 % de l'énergie d'un bâtiment pour la NASA. De même, des capteurs contrôlent l'utilisation pour mettre hors tension les appareils inutilisés. Au total, le bâtiment tous usages confondus comprend plus de 2 000 capteurs générant des informations quantifiées. Grâce à eux, des informations sur le fonctionnement de l'édifice sont récoltées. Ce dernier sert de banc d'essai pour le marché des technologies intégrées et doit conduire à des bâtiments plus autonomes pour la NASA et ses partenaires. Ces données servent aussi au bâtiment à optimiser ses performances en réponse aux changements internes et externes.<sup>108</sup>

Le campus NASA Ames n'est pas le seul à avoir des bâtiments anciens qu'il s'agit de restructurer. Le centre NASA Langley, ouvert pendant la première guerre mondiale, rencontre le même problème. La NASA se lance donc dans une campagne de restructuration de ses locaux.

Elle estime que 80 % de son parc immobilier a dépassé son temps de vie. À Langley, le bâtiment le plus ancien a près de 80 ans et l'âge moyen de l'établissement est de 45 ans.

Une stratégie de revitalisation de 20 ans qui appelle à la déconstruction des structures vieillissantes et à la construction d'installations ultramodernes prévoit la transformation de six bâtiments.<sup>109</sup>

Deux d'entre eux sont d'ores et déjà construits. Réalisés par l'architecte Copper Carry, ils sont, comme la *Sustainability Base*, dans la lignée de bâtiment raisonnable écologiquement. Ils ont obtenu la certification grade Or LEED, cependant ils ne suivent pas encore la voie de l'intégration de techniques spatiales.<sup>110111</sup>



60. Façade principale du siège général de NASA Langley. Source <http://www.coopercarry.com>



61. Bâtiment des services d'ingénierie et des technologies intégrées sur le Campus Langley. Source : <http://www.architectmagazine.com/>

<sup>107</sup> Wiedemann (Darlene), *Living Blue*, 2015, <https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livingblue>

<sup>108</sup> Wiedemann (Darlene), *Living Light* 2015, <https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livinglight>

Et Wiedemann (Darlene), *Energy Dieting*, 2015, <https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/energydieting>

<sup>109</sup> Finneran (Michael), NASA Langley's 20-Year Revitalization Plan, 5 décembre 2013, [Consulté en mars 2017], Disponible sur Internet, <https://www.nasa.gov/larc/nasa-langley-s-20-year-revitalization-plan/>

<sup>110</sup> Cooper Cary, <http://www.coopercarry.com/project/NASA-langley-research-headquarters/>

<sup>111</sup> Architect, « NASA Integrated Engineering Services Building », 2015, <http://www.architectmagazine.com/project-gallery/NASA-integrated-engineering-services-building-6536>

## Conclusion

Aujourd'hui, après 40 ans passés en orbite terrestre basse, les regards se tournent à nouveau vers la Lune et vers Mars.

La science-fiction ne cesse pas de faire rêver et l'Homme espère toujours créer une colonie sur la Lune ou rejoindre Mars. Les rêves de tourisme spatial sont toujours présents et des projets de spatioports existent déjà.

Parallèlement, les simulations mises en place pour ces missions font avancer la conception en milieux terrestre extrêmes. En effet, le choix de milieux hostiles par soucis de réalisme avec les conditions spatiales, oblige à développer de nouvelles formes d'habitats. L'autosuffisance, même partielle, réalisée dans ce but peut servir dans d'autres circonstances. Dans des cas de forces majeurs, un module facilement adaptable, déployable et déplaçable tel le SHEE peut sauver des vies. Avec les crises migratoires actuelles, cet aspect des transferts de connaissances de l'aérospatiale à la Terre est non négligeable.

L'autosuffisance est un atout lorsque les infrastructures font défaut mais c'est aussi une opportunité dans le quotidien pour contrer les défis de la surconsommation.

Les techniques développées pour la Lune nécessitent un perfectionnement des techniques d'impressions 3D. Cela pourrait amener de nouvelles techniques d'excellence allant dans la continuité des projets et des ambitions sur Terre. L'entreprise chinoise Winsun a d'ores et déjà imprimé des maisons de 200 m<sup>2</sup> pour 3 500€ à Shanghai. L'entreprise néerlandaise MX3D est en passe de réaliser par impression le premier pont de 7 m de long. Il a été conçu par MX3D à Amsterdam en collaboration avec Autodesk et sa construction doit prendre deux mois.<sup>112</sup>

Le parti pris d'utiliser les ressources locales pour la construction sur la Lune mérite d'être exploré sur Terre et développé à l'avenir afin de construire des bâtiments aux émissions carbone réduites. En effet, pour l'instant, les bâtiments imprimés en 3D n'utilisent pas les ressources des lieux où ils sont construits. Ils sont faits en béton ou en plastique pour certains prototypes, mais certains commencent à s'intéresser à l'utilisation de matériaux in situ.

Dans cette optique, l'entreprise italienne WASP a réalisé une imprimante 3D pouvant imprimer avec comme matériau le sol local. Leur but est d'imprimer à partir de tout type de sol, grâce à un mélange de boue et d'argile. « On met de la terre, de la paille et de l'eau dans une machine à mixer puis le matériau est amené manuellement dans la machine, détaille Massimo Moretti. Nous étudions en ce moment des solutions pour mécaniser ce processus. »<sup>113</sup>

Pour cela, l'entreprise a développé Big Delta, la plus grande imprimante 3D au monde en 2015 : avec ses 12 m de haut, elle peut fabriquer une maison sommaire en une semaine.

« WASP, pour World's Advanced Saving Project, est né en 2012 dans un but très clair : Construire une imprimante 3D capable de réaliser des maisons à partir de matériaux sourcés localement avec des coûts de mise en œuvre quasi-nuls. »<sup>114</sup>

Les scénarios actuels pour la Lune se basent sur des solutions d'implantation différentes, chacune essayant un peu plus de protéger l'Homme des radiations et des dangers extérieurs. Celles pour l'instant privilégiées incluent des impressions 3D mais il existe d'autres possibilités. L'une des solutions non explorée dans ce mémoire, et actuellement envisagée, serait de creuser la roche.

---

<sup>112</sup>Anja François Randriavaniaina, Le premier pont imprimé en 3 D est néerlandais, tom's guide, 30 juin 2015, consulté mai 2017, <http://www.tomsguide.fr/actualite/impression-3d-pont,47727.html>

<sup>113</sup>Elsa Ferreire, La maison 3D écolo à l'européenne, MAKERY, le 6 septembre 2016, consulté mai 2017, <http://www.makery.info/2016/09/06/la-maison-3d-ecolo-a-leuropeenne/>

<sup>114</sup>WASP mise sur l'impression 3D pour bâtir un monde durable, 22 novembre 2016, 3D natives, consulté mai 2017, <http://www.3dnatives.com/interview-wasp-impression-3d-22112016/>

Sujet encore exploratoire du fait de sa complexité, la thèse de Danijela Ignjatovic Stupar y est consacrée et apportera sûrement des réponses.

Nous avons vu que les projets lunaires inspirent les architectes, lesquels imaginent des villes fonctionnantes sur le principe de vaisseaux spatiaux. Dans cette idée, ils s'inscrivent dans la lignée de penseurs tels que Richard Buckminster Fuller. D'utopies, les villes de demain sont passées à l'état de concepts. Face à la réalité du réchauffement climatique ainsi qu'à l'augmentation de la population, la prise en compte de l'impact de nos activités est devenue importante et reste à l'esprit des planificateurs.

Cette philosophie apporte de nouveaux projets dans les villes polluées. Le projet *Growing Fresh Air* à Dahravi, en Inde, en est un exemple. Ce projet associe trois plantes communes purificatrices d'air pour créer des murs végétaux. L'alliance bénéfique de ces trois plantes a été présentée par Kamal Meattle lors d'un Ted Talks.<sup>115</sup>

Que ce soit *Growing Fresh Air* ou les projets de briques à base de végétaux et de mycélium, il existe des recherches en cours sur les façons de rendre nos modes de vie et nos villes écoresponsables.

Que ce soit la *Starship city* ou la *City as a Spaceship*, ce sont encore des cadres théoriques qui méritent d'être continués et concrétisés jusqu'à trouver une forme de réalisation réelle et matérielle. Quelles sont les moyens qu'il faudra développer pour mettre ces visions en œuvre ? Les projets et les travaux présentés prouvent que de plus en plus d'efforts sont faits pour réduire les pollutions et minimiser l'impact humain sur l'environnement.

Dans cette continuité et pour répondre à certaines questions, il est intéressant de se rapporter au mémoire de Marina Lemberg.

À travers son travail, elle s'interroge sur le lien entre les technologies spatiales et les techniques dites vertes à développer pour être plus écologiques mais aussi au lien green cities - icities. Pour cela, elle s'intéresse aux matériaux, aux systèmes de création de structure et aux moyens de production d'énergie innovants.

Mon travail restant exploratoire, certaines questions restent ouvertes et mériteraient d'être prises en considération.

Il serait intéressant de réaliser un parallèle entre ces images des villes de demain et les définitions actuelles de la smart city. Où se trouve le lien entre les deux visions ? Comment sont-elles compatibles ? À quelle type de smart city peut se référer la *City as a Spaceship* ? Existe-il des projets de smart cities qui lui ressemblent ou s'en approchent ?

Où serait la place des concepts que nous avons étudiés dans les définitions actuelles fragmentées de la ville du futur ? En effet, le terme de smart city regroupe bon nombre de choses : villes connectées, durables, résilientes... Les termes peuvent être associés mais ne sont pas forcément complémentaires. Une ville comme Masdar est connectée et à la pointe des technologies avec leur système de véhicule électrique, l'usage de l'électricité solaire, et ses bâtiments conçus pour être ventilés naturellement. Mais est-elle durable et résiliente ? Construite au beau milieu du désert dans une zone sans ressource en eau, la question se pose.

Les *City as a Spaceship* peuvent-elles, comme l'espère Barbara Imhof, concilier les images divergentes des smart city pour lui donner une image forte plus enthousiasmante pour les populations et les décideurs ?

---

<sup>115</sup> Micro-conférence de Meattle (Kamal), *How to grow fresh air*, Ted Talks, 4 minutes, février 2009, [https://www.ted.com/talks/kamal\\_meattle\\_on\\_how\\_to\\_grow\\_your\\_own\\_fresh\\_air](https://www.ted.com/talks/kamal_meattle_on_how_to_grow_your_own_fresh_air)

Ainsi, l'exploration au-delà de notre planète servira encore longtemps à améliorer notre vie ici-bas. Les recherches faites pour répondre à des besoins du quotidien dans d'autres milieux nous permettent de voir certains problèmes et certaines de nos pratiques sous un autre angle. Par retour d'expérience, cela nous permet de prendre soin de notre « maison », le seul lieu pour lequel nous soyons adaptés : notre *Spaceship Earth*.  
Le lien Space tech – Green tech, aérospatial et ville du futur mérite d'être encore plus largement exploré à l'avenir.

## REMERCIEMENTS

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

En premier lieu, Emmanuel Dufrasnes et Jean-Paul Wetzel pour avoir encadré ce mémoire et m'avoir assistée pendant ces deux semestres.

L'ISU qui m'a permis d'avoir accès à son fonds bibliothécaire, mais aussi aux étudiants et aux enseignants pour le temps et les renseignements qu'ils m'ont fournis, tout particulièrement Marina Lemberg, Danijela Stupar et Hatem Hussein.

Un grand merci à Ondrej Doule qui a pris de son temps pour discuter avec moi et m'a transmis références et pistes de recherches, merci pour sa sympathie et sa rapidité de réponse.

Je remercie également Barbara Imhof d'avoir répondu à mes questions.

Enfin, une pensée toute particulière à mon relecteur qui m'a permis de renforcer la qualité de cet écrit.

## **ANNEXES**

## Tableau comparative des stations orbitales

	<b>Saliout 1 DOS 1</b>	<b>Saliout2 Almaz 1 OPS 1</b>	<b>Saliout 3 Almaz 2 OPS 2</b>	<b>Saliout 4 DOS 3</b>	<b>Saliout 5 Almaz 3 OPS 3</b>	<b>Saliout 6 DOS 5</b>
<b>Agence</b>	Agence spatiale soviétique	Agence spatiale soviétique	Agence spatiale soviétique	Agence spatiale soviétique	Agence spatiale soviétique	Agence spatiale soviétique
<b>Nom du Programme</b>	Saliout	Almaz	Almaz	Saliout	Almaz	Saliout
<b>Lanceur</b>	Proton	Proton	Proton	Proton	Proton	Proton
<b>Lancement</b>	19-avr-71	03-juin-73	26-juin-74	26-déc-74	22-juin-76	29-sept-77
<b>Retour</b>	11-oct-71	29-juin-73	24-janv-75	02-févr-77	08-août-79	16-déc-79
<b>Période habité</b>	23 jours	0	15 jours	28 + 62 jours	49 + 16 jours	6 occupations 683 jours
<b>Altitude</b>	220	240	240	360	240	360
<b>Masse de la Station (Tonnes)</b>	25	25	25	25	25	36
<b>Masse de matériel scientifiques</b>	1,3	1,3	1,3	2	2	2.5
<b>Longueur (m)</b>	23	23	23	23	23	30
<b>Diamètre (m)</b>	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.15
<b>Volume utile m<sup>3</sup></b>	82	82	82	82	82	91
<b>Nombre de ports d'amarrage</b>	1	1	1	1	1	2
<b>Vaisseaux</b>	Soyouz	Soyouz	Soyouz	Soyouz	Soyouz	Soyouz
						Soyouz T
						Progress
						Cosmos
<b>Energie</b>	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire
<b>Nombre d'habitants Max</b>	3	2	2	2	2	4
<b>Nombre de mission reçut</b>	1	0	1	2	4	16
<b>Nombres de Cosmonautes reçut</b>	3	0	2	4	8	33

	<b>Saliout 7 DOS 5-2</b>	<b>Skylab</b>	<b>Mir</b>	<b>ISS</b>	<b>Tiangong 1</b>	<b>Tiangong 2</b>
<b>Agence</b>	Agence spatiale soviétique	NASA	Agence spatiale soviétique	NASA (instigateur) ESA, JAXA, ROSCOSMOS	CNSA	CNSA
<b>Nom du Programme</b>	Saliout	Programme des Applications Apollo	Mir	Alpha		
<b>Lanceur</b>	Proton	Saturn V	Proton		Longue Marche 2F	Longue Marche 2F
<b>Lancement</b>	19-avr-82	14-avr-73	19-févr-86	1998 Module Zarya	29-sept-11	15-sept-16
<b>Retour</b>	07-févr-91	11-juil-79	23-mars-01	Prévu 2025	Prévu pour mis 2017	–
<b>Période habité</b>	5 occupations 892 jours	171 jours entre 1973-1974	3 644 jours entre 1986 - 2000	Depuis 2000	utilisation 2011 à mars 2016	
<b>Altitude</b>	470	430	354-374	400	350	
<b>Masse de la Station (Tonnes)</b>	36	77	130-140	419	8,5	
<b>Masse de matériel scientifiques</b>	2.5	–	–	–	–	
<b>Longueur (m)</b>	30	26	33*31*27,5	110	10,4	
<b>Diamètre (m)</b>	4.15	6.6	4,35	4,5	3	
<b>Volume utile m3</b>	91	270	380	900	15	
<b>Nombre de ports d'amarrage</b>	2	1	3	4	1	
<b>Vaisseaux</b>	Soyouz T	Apollo	Soyouz	Soyouz	Shenzhou	Shenzhou
	Progress		Space Shuttle	Progress		
	Cosmos			Space Shuttle		
				Automated Transfer Vehicle (ATV)		
<b>Energie</b>	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire	Batterie+ Panneaux solaire
<b>Nombre d'habitants Max</b>	6	3	6 pers max 2 pers par équipage permanent 2 pers équipage visiteurs	6 membres résident +équipage visiteur	0	2
<b>Nombre de mission reçut</b>	16	3	28	–	0	–
<b>Nombres de Cosmonautes reçut</b>	26	9	105	–		–

# Lunar Base Design Workshop

Réalisé en 2002 en deux parties :

Première partie à l'European Space Research & Technology Center (ESTEC) de l'ESA au Pays-Bas.

La seconde partie s'est déroulée à l'Institut for Design & Building Construction Hochbau II (HB2) à l'université de Vienne en Autriche.

Entreprises présentes :

- Lunar Explorers Society (LUNEX)
- Moonfront
- Liquifer
- Lunar Architecture

Sponsor :

- ESA-ESTEC
- Agence spatiale Autrichienne
- International Lunar Exploration Working Group (ILEWG)

Le but du workshop était de :

- Créer une base extra-terrestre pour l'exploration humaine et robotique sur la lune.
- Inventer un design innovatif allant au-delà de la structure mais impliquant aussi de caractère durable et modulable.

Le workshop était destiné à 50 étudiants de 16 pays de différentes disciplines (Architecture, ingénierie, médecine, design industriel, physique appliqué et domaine minier)

Ils étaient réparti en 7 groupes devant travailler sur différents scénarios comme par exemple :

- L'exploitation de mine de glace
- Exploitation de mine d'hélium 3
- Production de panneaux solaires
- Télescope lunaire

## Liste des abréviations

AIAA : American Institute of Aeronautics and Astronautics (*Institut américain d'aéronautique et d'astronautique*)

ATV: Automated Transfer Vehicle (*Véhicule automatique de transfert européen*)

BEAM: Bigelow Expandable Activity Module (*Module d'activité extensible Bigelow*)

CAAS : City as a Spaceship (*la ville comme un vaisseau spatial*)

DOS : Durable Orbital Station (*Station orbitale de longue durée*)

DLR: Deutsche Zentrum für Luft-und Raumfahrt (*Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique*)

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

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

EVA: Extravehicular Activity (*Sortie extravéhiculaire*)

FEG: Future Exploration Greenhouse (*Serre d'exploration future*)

FGB: Fonctional Cargo Block

HTV: H-II Transfert Vehicle (*Véhicule de transfert H-II japonais, aussi appelé Kounotori*)

IAC : International Astronautical Congress (*Congrès International de l'Astronautique*)

ICES : International Conference on Environmental Systems (*Conférence internationale sur les systèmes environnementaux*)

IPEV : Institut polaire français Paul Emile Victor

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

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

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

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

LRO : Lunar Reconnaissance Orbiter (*Sonde de reconnaissance lunaire*)

MFC: Microbial Fuel Cell (*Pile à combustible microbienne*)

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

NEEMO : NASA Extreme Environment Mission Operation (*Mission en environnement extrême de la NASA*)

NSS: National Space Society (*Société spatiale nationale*)

OPS: Orbitalnaya Pilotirouyemaya Stantsiya en russe, Orbital Piloted Station (*Station orbitale Pilotée*)

OWS: Orbital Workshop (*Atelier orbital*)

SMC: Synthetic Microbial Consortia (*Groupement microbiens de synthèse*).

TGIR : Très Grande Infrastructure de Recherche

TKS: Transportny Korabl Snabschenija d'après l'abréviation russe, Transport Supply Spacecraft  
(*Vaisseaux de transport des ravitaillements*)

WASP: World's Advanced Saving Project (*Projet de secours mondial avancé*)

# BIBLIOGRAPHIE

## Ouvrages

Armstrong (Rachel) and all, *Star Ark: A living Self-Sustaining Spaceship*, Switzerland, Springer praxis, 2017

Buckminster Fuller (Richard), *Operating Manual for Spaceship Earth*, 1969, Disponible sur Internet, [http://www.designsciencelab.com/resources/OperatingManual\\_BF.pdf](http://www.designsciencelab.com/resources/OperatingManual_BF.pdf)

Chermayeff (Serge), Alexander (Christopher), *Intimité et Vie Communautaire (Titre original : Community et Privacy)*, Paris, Dunot, 1972 pour la traduction française Jacques Engelmann (première édition New York : Doubleday, 1963)

Häuplik-Meusburger (Sandra), *Architecture for Astronauts : An activity-based Approach*, Vienne, Springer-Verlag, 2011

Harland (David M.), Cathpole (John), *Creating the international space station*, Berlin Springer, 2002

Howe (Scott) & Scherwood (Brent), *Out of this World the new field of Space architecture.*, Library of flight, 2009

Imhof (Barbara) and Mohanty (Susmita), *Musings Towards a new genre in [space] architecture*, Kunst, 2004

Meuser (Philipp) (dir), *Architektur für die russische Raumfahrt: vom Konstruktivismus zur Kosmonautik: Pläne, Projekte und Bauten* (Architecture de l'aéronautique russe: du constructivisme à la cosmonautique: plans, projets et bâtiments), Berlin, DOM publishers, 2013

Slavid (Ruth), *Architecture des limites. Construire en milieu hostile, du désert au vide interplanétaire*, Paris, Seuil, 2009 pour la traduction française (première édition ; Extreme architecture, 2009)

## Articles

Bedini (Daniele) « Lunar Base : une approche éco-durable au projet d'une base lunaire. », *L'Arca International*, n° 127 nov-déc 2015, p.8 à 17

Dejaiffe (René), « L'avenir du programme spatial américain ou l'exploration de l'espace au service de l'aménagement de la Terre », in *Ciel et Terre : Bulletin de la société belge d'astronomie, de météorologie et de physique du globe*, Vol 88, 1972, p.73, Provided by the NASA Astrophysics Data System

Pihen (Alexandra), « Vivre dans l'Espace pas si simple », in *Sciences et Vie* n°1196, mai 2017, p.47 à 66

Severinghaus (Jeffrey P.) et al., « Oxygen Loss in Biosphere 2 », in *EOS*, Vol 75, No3, 18 janvier 1994, p33-40

Silverstone (S.E.), Nelson (M.), « Food production and nutrition in Biosphere 2 ; results from the first mission September 1991 to September 1993», in *Advances in Space Research*, Vol. 18 Issues 4-5 1996, p.49-61, résumé de l'article disponible sur Internet, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0273117795008618>

Walford (Roy L.), « Biosphere 2 as Voyage of Discovery : The Serendipity from Inside », in BioScience, Vol 52 No.3, Mars 2002, p. 259 à 263  
Wiley (John) « *Moon Capital-Architecture and Vision* », *L'Arca International*, n°104, janv-février 2012, p.42 à 47

## Publications

Boulding (Kenneth E.), *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, Baltimore, H. Jarrett edition, 1966, Disponible sur Internet  
[http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding\\_SpaceshipEarth.pdf](http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding_SpaceshipEarth.pdf)

Doule (Ondrej), *Architecture Universelle série éducative, Architecture sur les Corps Célestes 1*, Space innovation à Melbourne (Floride), 2017

Engler (Simon), Binsted (Kim), HI-SEAS Media Kit, 17 Janvier 2016, Disponible sur Internet, <http://hi-seas.org/?p=4353>

Fairburn (Sue), Mohanty (Susmita), Imhof (Barbara), *City as a Spaceship*, IAC-E4.2.8, 2014  
Foster + Partners, *Lunar Outpost Design*, Foster + Partners Research & Development, 2015, [Consulté décembre 2016], Disponible sur internet, <http://www.fosterandpartners.com/media/2333928/lunar-outpost-design.pdf>

Godon (Patrice), Cucinotta (Nino), *Concordia une nouvelle station permanente sur le plateau antarctique*, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.diagonale-groenland.asso.fr/pdf/Concordia.pdf>

Montalti (Maurizio), Officina Corpuscoli, *The Future of Plastic*, Dossier de presse, 2 Juin 2014, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, [http://www.corpuscoli.com/wp-content/uploads/2014/07/press-release-The-Future-of-Plastic-Growing-Lab-Officina-Corpuscoli\\_Maurizio-Montalti.pdf](http://www.corpuscoli.com/wp-content/uploads/2014/07/press-release-The-Future-of-Plastic-Growing-Lab-Officina-Corpuscoli_Maurizio-Montalti.pdf)

NASA, *NASA's Analog Missions: Paving the Way for Space Exploration*, Langley Research Center, 2011, NP-2011-06-395-LaRC

Raitt (David) et Warmbein (Barbara), *L'espace entre science et fiction*, ESA publications, 2004, <http://www.esa.int/esapub/br/br205/br205f.pdf>

Roscosmos, *International symposium: Mars 500*, Abstracts Book, Moscou 2012

Rousek (Tomas), Eriksson (Katarina), Doule (Ondrej), *Sinterhab*, Acta Astronautica 74(2012) 98-111, 2011

SSC RF Institute of Biomedical Problems RAS, « *Mars 500* » *Project: 520 day isolation*, Moscou juin 2010, Disponible sur Internet, [http://mars500.imbp.ru/files/presskit\\_mars520\\_eng.pdf](http://mars500.imbp.ru/files/presskit_mars520_eng.pdf)

University of Tartu, *Self-deployable Habitat for Extreme Environments (SHEE): Newsletter 1*, Tartu (Estonie), mars 2014, Disponible sur Internet, [http://shee.eu/pdf/SHEE\\_Newsletter\\_01\\_interactive.pdf](http://shee.eu/pdf/SHEE_Newsletter_01_interactive.pdf)

University of Tartu, *Self-deployable Habitat for Extreme Environments (SHEE): Newsletter 1*, Tartu (Estonie), mars 2014, Disponible sur Internet, [http://shee.eu/pdf/SHEE\\_Newsletter\\_02\\_demonstration.pdf](http://shee.eu/pdf/SHEE_Newsletter_02_demonstration.pdf)

Weiss (Peter) and all, *The SHEE project : Self-deployable habitat for extreme environment test-bed for analog simulations*, Marseille, 2013

Wiedemann (Darlene), *Living Green; Sustainability Base*, NASA Ames research Center, 27 août 2015, Disponible sur Internet,

<https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livinggreen>

Wiedemann (Darlene), *Living Blue; Sustainability Base*, NASA Ames research Center, 27 août 2015, Disponible sur Internet, <https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livingblue>

Wiedemann (Darlene), *Living Light ; Sustainability Base*, NASA Ames research Center, 27 août 2015, Disponible sur Internet,

<https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/livinglight>

Wiedemann (Darlene), *Energy Dieting ; Sustainability Base*, NASA Ames research Center, 27 août 2015, Disponible sur Internet,

<https://www.nasa.gov/ames/facilities/sustainabilitybase/energydieting>

## Mémoire

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

# FILMOGRAPHIES

Jaumann (Ralf), *Crust Formation and evolution*, ESA Lunar Exploration, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/218?ha=247>

Joy (Katherine), *Morphology*, ESA Lunar Exploration, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://lunarexploration.esa.int/#/explore/science/218?ha=245>

Howard (Ron), Grazer (Brian), *Mars*, National Geographique, , 52 minutes, 2016.  
Série de 6 épisodes alternant documentaire et sciences fiction

Meattle (Kamal), *How to grow fresh air*, Ted Talks, 4 minutes, février 2009,  
[https://www.ted.com/talks/kamal\\_meattle\\_on\\_how\\_to\\_grow\\_your\\_own\\_fresh\\_air](https://www.ted.com/talks/kamal_meattle_on_how_to_grow_your_own_fresh_air)

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

Schmitzer (Ulrike) und Widter (Matthias), *Space architecture: Architektur für den Weltraum*  
(Architecture pour le cosmos), 3sat, 44 minutes 32 secondes, 2007

*3D-printing a lunar base*, ESA, 4 minutes 54, 6 novembre 2014, consulté en décembre 2016,  
<https://www.youtube.com/watch?v=pk9PWUGkz7o>

# WEBBOGRAPHIE

## Sites

<http://www.aiaa.org/>  
<http://research.fit.edu/hcdi/publications.php>  
<http://spacearchitect.org/>  
<http://www.spaceinnovations.net/main>  
[www.shee.eu](http://www.shee.eu)  
<https://spinoff.nasa.gov>

## Pages Web :

Actuf, La ville dans les littératures de l'imaginaire, 2011, [Consulté en mai 2017], Disponible sur Internet, <http://actusf.com/spip/La-ville-dans-les-litteratures-de.html>  
AMAEPF, Station Concordia –Dôme C. [Consulté en avril 2017],  
<http://www.amaepf.fr/concordia/le-dome-c>  
Architect, « NASA Integrated Engineering Services Building », in *Architect, the Journal of the American Institute of Architects*, 12 février 2015, [Consulté mars 2017], Disponible sur Internet, <http://www.architectmagazine.com/project-gallery/NASA-integrated-engineering-services-building-6536>

Cooper Cary, NASA Langley Research Center Headquarters, [Consulté mars 2017], Disponible sur Internet <http://www.coopercary.com/project/NASA-langley-research-headquarters/>

Eden ISS, <http://eden-iss.net>  
ESA, Mars 500 Quick facts, Mâj 1 novembre 2011, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet,  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_Spaceflight/Mars500/Mars500\\_quick\\_facts](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Mars500/Mars500_quick_facts)  
ESA, Printing bricks from Moondust using the sun's heat, 3 mai 2017, [Consulté le 9 mai 2017],  
ESA Space engineering & Technology, Disponible sur Internet  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Printing\\_bricks\\_from\\_moon\\_dust\\_using\\_the\\_sun\\_s\\_heat](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Printing_bricks_from_moon_dust_using_the_sun_s_heat)

Finneran (Michael), NASA Langley's 20-Year Revitalization Plan, 5 décembre 2013, [Consulté en mars 2017], Disponible sur Internet, <https://www.nasa.gov/larc/nasa-langley-s-20-year-revitalization-plan/>  
Fungal Futures 01, The Growing Lab/Mycelia, 2016, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.fungal-futures.com/The-Growing-Lab-Mycelia>  
« Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print Structure on the moon », *Press of Foster & Partners*, Publié le 31 janvier 2013

Institut polaire Français, Concordia, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.institut-polaire.fr/ipev/infrastructures/les-bases/concordia/>

Konbini, « On est allés voir Interstellar avec un ingénieur en aérospatiale », 2014, [Consulté en mai 2017], Disponible sur Internet <http://www.konbini.com/fr/entertainment-2/interstellar-ingenieur-spatial-cinema/>

Liquifer Systems Group, Eden ISS, [Consulté en mars 2017], Disponible sur Internet, <http://www.liquifer.com/eden-iss/>

National Space Society, Gallery for 2008 NSS Space Settlement Calendar Art Contest, Mâj le 27 avril 2012, [consulté en mai 2017], Disponible sur internet, <http://www.nss.org/settlement/calendar/2008/gallery.htm>

Pacific Domes, NASA's Mission Mars Simulation with Pacific Domes, 4 janvier 2016, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://pacificdomes.com/mission-mars-simulation-in-pacific-dome/>

Psyau, The HI-SEA Habitat, 29 avril 2013, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://hi-seas.org/?p=1278>

Sputnik, Lacolonisation spatiale, avenir de l'humanité ou utopie?, 7 juin 2016, Mâj 8 juin 2016, [Consulté en mai 2017], Disponible sur Internet, <https://fr.sputniknews.com/photos/201606071025639625-colonisation-spatiale-photos/>

The living, Hy-fi, 2014, [Consulté en avril 2107], Disponible sur Internet, <http://thelivingnewyork.com/hy-fi.htm>

The University of Arizona, Chronologie de Biosphere 2 , [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://biosphere2.org/visit/about-biosphere2/history>

Wikipédia, Programme Voskhod, Mâj le 12 novembre 2016,[Consulté mai 2017], Disponible sur Internet [https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme\\_Voskhod](https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme_Voskhod)

Wikipédia, Low Earth Orbit, Mâj 12 mai 2017, [Consulté le 19 mai 2017], Disponible sur Internet [https://en.wikipedia.org/wiki/Low\\_Earth\\_orbit](https://en.wikipedia.org/wiki/Low_Earth_orbit)

William McDonough+ Partners, NASA Sustainability Base, [Consulté en mars 2017], <http://www.mcdonoughpartners.com/projects/nasa-sustainability-base/>

3D natives, WASP mise sur l'impression 3D pour bâtir un monde durable, 22 novembre 2016, [Consutlé mai 2017], <http://www.3dnatives.com/interview-wasp-impression-3d-22112016/>

## Articles Web :

Augustine (Margaret), Allen (John) et Alling (Abigail), « Chronology of Biosphere 2 », *in Biospherics* , 10 Septembre 1988, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.biospherics.org/biosphere2/chronology/>

Benazdia (Norédine), « Qui va ravitailler la station spatiale internationale? », 10 juillet 2011, [Consulté en mai 2017], Disponible sur Internet <http://fr.ubergizmo.com/2011/07/10/qui-va-ravitailler-la-station-spatiale-internationale.html>

Centre d'actualité de l'ONU, « Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes », NewYork, le 10 juillet 2014, [Consulté en avril 2017], <http://www.un.org/fr/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects.html>

CNES, « Plus que les progress pour ravitailler l'ISS en carburant », 29 novembre 2010, [Consulté en mai 2017], <https://cnes.fr/fr/web/CNES-fr/11496-plus-que-les-progress-pour-ravitailler-l-iss-en-carburant.php>

David (Leonard), « Bigelow Aerospace's Inflatable Habitat Ready for Space Station Trip », in *Space.com*, Publié 19 mars 2015, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet <http://www.space.com/28855-inflatable-space-station-habitat-bigelow.html>

Decourt (Rémy), « Mars 500 : l'astronaute Romain Charles raconte ses 520 jours d'expérience », in *Futura Sciences*, 27 février 2012, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronautique-mars-500-astronaute-romain-charles-raconte-520-jours-experience-36881/>

De la Cruz (Boris), « Mars 500 : "Personne n'a voulu sortir avant la fin de la mission" », in *Le Parisien*, 4 novembre 2011, [Consulté en avril 2017], <http://www.leparisien.fr/societe/mars-500-personne-n-a-voulu-sortir-avant-la-fin-de-la-mission-04-11-2011-1701883.php>

Denèle (Adrien), « Un an sur Mars (ou presque) : c'est fini ! », in *Ciel et Espace*, 29 août 2016, Màj 30 août 2016, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <https://www.cieletespace.fr/actualites/un-an-sur-mars-ou-presque-c-est-fini>

Ferreire (Elsa), « La maison 3D écolo à l'européenne », in *MAKERY*, 6 septembre 2016, [Consulté mai 2017], Disponible sur Internet, <http://www.makery.info/2016/09/06/la-maison-3d-ecolo-a-leuropeenne/>

Garcia (Mark), NASA Astronauts Train Deep Undersea For Deep Space Missions, 22 Juillet 2016, [Consulté en avril 2017], <https://www.NASA.gov/feature/NASA-astronauts-train-deep-undersea-for-deep-space-missions>

Goudet (Jean-Luc), « La seconde vie de Biosphère 2 », *Futura-Science*, 7 juillet 2007, [Consulté décembre 2016], <http://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-seconde-vie-biosphere-2-ecosysteme-incontrole-12259/>

Grayson (Jennifer), « Innovation Earth: Bringing NASA Technology Back to Earth », in *The Huffpost TH Blog*, 25 juillet 2014, Màj 24 septembre 2014, [Consulté mars 2017], Disponible sur Internet, [http://www.huffingtonpost.com/jennifer-grayson/innovation-earth-NASA-tech\\_b\\_5618107.html?utm\\_hp\\_ref=green](http://www.huffingtonpost.com/jennifer-grayson/innovation-earth-NASA-tech_b_5618107.html?utm_hp_ref=green)

Loff (Sarah), About NEEMO, Mise à jour 31 juillet 2015, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, [https://www.NASA.gov/mission\\_pages/NEEMO/about\\_neemo.html](https://www.NASA.gov/mission_pages/NEEMO/about_neemo.html)

Mahoney (Erin), « Beam Update. Expendable Habitat Reveals Important Early Performance Data », in *NASA Journey to Mars*, 21 novembre 2016, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <https://www.nasa.gov/feature/beam-update-expandable-habitat-reveals-important-early-performance-data>

Mahoney (Erin), « BEAM Facts, Figures, FAQs », in *NASA Living in Space*, 17 juillet 2016, [Consulté décembre 2016], Disponible sur Internet, <https://www.nasa.gov/feature/beam-facts-figures-faqs>

Maillet (Benoit) « Histoire-Almaz, les stations spatiales militaires, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet, <http://sketchinspace.blogspot.fr/2015/06/histoire-almaz-les-stations-spatiales.html>

Martin (Emilie) « Découverte de glace au pôle Sud de la Lune », in *Ciel & Espace*, 25 juin 2012, Màj le 27 juin 2012, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <https://www.cieletespace.fr/actualites/decouverte-de-glace-au-pole-sud-de-la-lune>

MENESP, « Basse antarctique franco-italienne CONCORDIA », in *Infrastructure de recherche : sciences du système Terre et environnement*, 1 mars 2016, Màj 5 avril 2016, [Consulté en avril 2017],

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid99405/base-antarctique-franco-italienne-concordia.html>

Meyer (C.), Lunar Regolith, NASA Lunar Petrographic Educational Thin Section Set, 2003, <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/letss/regolith.pdf>

Newcastle University, « Smart bricks will give homes and offices their own ‘digestive system’ », 27 juillet 2016, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.ncl.ac.uk/press/news/2016/07/liarlivingarchitecture/>

Palca (Joe), « NASA Uses Lessons From Space to Design an efficient building », in *All tech considered*, 30 Nov. 2015, [Consulté en avril 2015], Disponible sur Internet, <http://www.npr.org/sections/alltechconsidered/2015/11/30/455063420/NASA-uses-lessons-from-space-to-design-an-efficient-building>

Pangburn (DJ), « The Soviet Architect Who Drafted the Space Race », Motherboard, 18 Août 2015, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet,

<http://motherboard.vice.com/read/the-soviet-architect-who-drafted-the-space-race>

Pierrot (Michaël), « Le programme Skylab », in *Futura Sciences*, 22 avril 2002, Màj le 31 janvier 2016, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet, <http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/astronautique-stations-saliout-skylab-precursseurs-mir-iss-66/page/2/>

Pierrot (Michaël), « Les chiffres des stations », in *Futura Sciences*, 22 avril 2002, Màj 31 janvier 2016, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet, <http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/astronautique-stations-saliout-skylab-precursseurs-mir-iss-66/page/6/#c66>

Pierrot (Michaël), « Les stations soviétiques de première génération Saliout 1 à Saliout 5 », in *Futura Sciences*, 22 avril 2002, Màj 31 janvier 2016, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet, <http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/astronautique-stations-saliout-skylab-precursseurs-mir-iss-66/page/2/>

Pierrot (Michaël), « Les stations soviétiques de seconde génération Saliout 6 et Saliout 7 », in *Futura Sciences*, 22 avril 2002, Màj 31 janvier 2016, [Consulté en décembre 2016], Disponible sur Internet, <http://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/astronautique-stations-saliout-skylab-precursseurs-mir-iss-66/page/4/>

Rajagopal (Avinash), « Behind The Living’s “100 Organic” Pavilion for MoMa PS1 », in *Metropolis*, 2014, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.metropolismag.com/ideas/technology/behind-livings-100-organic-pavilion-moma-ps1/>

Randriavaniaina (Anja François), « Le premier pont imprimé en 3 D est néerlandais », in *tom’s guide*, 30 juin 2015, [Consulté mai 2017], Disponible sur Internet, <http://www.tomsguide.fr/actualite/impression-3d-pont,47727.html>

Riquel (Charlotte), « ISS: dégustation de la première salade cultivée dans l’espace », in *BFM TV : Espace*, le 10 août 2015, Màj 11 août 2015, [Consulté en avril 2017], Disponible sur Internet, <http://www.bfmtv.com/planete/iss-degustation-de-la-premiere-salade-cultivee-dans-l-espace-906490.html>

Siceloff (Steven), HI-SEAS Team Completes 8-Month Isolation Mission, 19 Juin 2015, Màj 31 Juillet 2015, [Consulté en avril 2017], <https://www.nasa.gov/feature/hi-seas-team-completes-8-month-isolation-mission>

Tate (Karl), « A village in orbit : Inside NASA's Space colony concepts », 5 août 2013, [Consulté en mai 2017], Disponible sur Internet, <http://www.space.com/22228-space-station-colony-concepts-explained-infographic.html>

Usbeck & Rica, « La ville dans les films de science-fiction », Demain la ville, 30 septembre 2013, [Consulté en mai 2017], Disponible sur Internet, <http://www.demainlaville.com/la-ville-dans-les-films-de-science-fiction-12/>

Zabel (Paul) et al., « Introducing EDEN ISS- A European project on advancing plant cultivation technologies and operations », ICES-2015-58, juillet 2015, Disponible sur Internet, <https://zenodo.org/record/34391#.WSrsgNyv6Uk>

Et si les recherches menées dans et pour l'Espace changeaient notre façon d'habiter demain ?

Le regard des agences spatiales se tournent à nouveaux vers la Lune et Mars. Un jour des êtres humains habiteront loin de la Terre dans de nouvelles colonies. Ingénieurs, architectes et chercheurs tentent de trouver des solutions pour construire les premières habitations « extra-terrestres ».

Dans ce document, nous aborderons les défis à relever pour aller sur la Lune, quelles sont les solutions d'implantations envisagées, comment l'on se prépare à quitter la Terre, et de quelles façons les architectes se réapproprient ces nouvelles connaissances et comptent en faire une base pour les villes du futur.