
LE RÔLE DE L'ARCHITECTE SPATIAL

L'ÉMERGENCE D'UNE NOUVELLE ARCHITECTURE DE L'ENVIRONNEMENT EXTRÊME

Remerciements

Je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé durant cette année et demie de rédaction de mon mémoire. Je voudrais remercier en tout premier ma directrice de mémoire, Elisabeth Essaïan, pour sa disponibilité et son aide, ainsi que de m'avoir permis de m'intéresser à un sujet peu conventionnel et passionnant. Je remercie aussi Marina Rotolo, Laetitia Overney et Rachida Abikchi pour leurs conseils. Je les remercie toutes les quatre pour l'encouragement et le soutien qu'elles m'ont apporté. Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes qui m'ont permis d'accéder à des ressources rares. Je remercie notamment Karine Fournier, responsable de la médiathèque de l'ENSA Paris-Belleville, qui a fait acheter par l'école *Space habitats and Habitability* de S. Häuplik-Meusburger (2021). Je remercie spécialement Sandra Häuplik-Meusburger pour sa disponibilité et les réponses qu'elle m'a accordées au travers de notre entretien. Je remercie aussi toute ma famille et mes amis pour leur constant soutien et pour la relecture de mon mémoire.

Sommaires

INTRODUCTION

PRÉAMBULE	8
ETAT DU SAVOIR	10
HYPOTHÈSE	11
TERRAINS D'ÉTUDE ET PÉRIODE	12
CORPUS	14
MÉTHODE	14
VOCABULAIRES SPÉCIFIQUES	15

1. LES CONTRAINTES ET PRINCIPES FONDATEURS DE L'ARCHITECTURE SPATIALE AUXQUELS L'ARCHITECTE DOIT FAIRE FACE

1.1. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET LEUR EFFETS SUR LE CORPS ET LA PSYCHOLOGIE HUMAINE

1.1.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES ENVIRONNEMENTS EXTRÊMES (EE) ET LEUR EFFETS SUR LE CORPS HUMAINS	18
1.1.2. DIFFICULTÉS PSYCHOLOGIQUES ET SOCIALES QUE SUBISSENT LES HABITANTS DES ENVIRONNEMENTS EXTRÊMES EN CONFINEMENT ET ISOLEMENT (ICE)	22

1.2. UN PROCESSUS DE CONCEPTION CONTRAINT L'INGÉNIERIE SPATIALE

1.2.1. UNE CONCEPTION CONTRAINT PAR LA TECHNIQUE ET LE PROGRÈS	28
1.2.2. UNE CONCEPTION QUI SUIT DES NORMES AÉROSPATIALES	36

1.3. UTILISATION DES MÉTHODES DE RECHERCHES ARCHITECTURALES OU SUR LE RETOUR D'EXPÉRIENCE

1.3.1. L'ÉTUDE DE DESIGN DES HABITATS ANALOGUES SIMULANT ET IN-SITU EN ICE TERRESTRES	42
1.3.2. UNE ARCHITECTURE CUSTOMISÉE GRÂCE RETOUR D'EXPÉRIENCE DES ASTRONAUTES	52

2. LA FORMATION PROGRESSIVE D'UNE NOUVELLE DISCIPLINE PAR LES ARCHITECTES

2.1. UN TRAVAIL DE TÂTONNEMENT DES PIONNIERS CONSULTANTS EN ARCHITECTURE SPATIALE

2.1.1. WERNHER VON BRAUN : L'UTOPIE DE LA GRAVITÉ ARTIFICIELLE	62
2.1.2. GALINA BALACHOVA : LE TRAVAIL SUR LA COULEUR DANS L'ORIENTATION DANS L'ESPACE	67
2.1.3. RAYMOND LOEWY : UN CONFORT QUI PASSE PAR L'ATTENTION AUX OBJETS	70

2.2. LES ÉLÉMENTS DE COMPOSITION DE L'ARCHITECTURE SPATIALE CONTEMPORAINE

2.2.1. LA CHAMBRE	74
2.2.2. LA CUISINE	80
2.2.3. LA SALLE DE BAIN	82
2.2.4. LE SALON ET LES LOISIRS	89

2.3. LES OUTILS DE LA RECONNAISSANCE DU MÉTIER D'ARCHITECTE SPATIAL

2.3.1. LES ACTEURS QUI SOUTIENNENT LA RECONNAISSANCE DU MÉTIER D'ARCHITECTE SPATIALE	92
2.3.2. LES CONCOURS D'ARCHITECTURE SPATIALE : TERRAIN DE PROGRÈS DES AGENCES D'ARCHITECTURE SPATIALE	98

CONCLUSION 106

BIBLIOGRAPHIE 108

ANNEXES 112

Introduction

PRÉAMBULE

Le désir d'habiter l'Espace est motivé par le besoin naturel de l'homme d'explorer de nouveaux environnements. Afin d'y "habiter", l'homme a dû développer l'architecture spatiale. Cette dernière est issue d'une progression rapide de l'aéronautique vers l'astronautique dans les années 1950. L'architecture spatiale prend aussi en considération les projets théoriques et fictifs qui ont annoncé son apparition durant les décennies précédentes. Il faut attendre le nouveau millénaire pour que l'architecture Spatiale soit pleinement reconnue lors du Congrès Mondial de l'Espace à Houston en 2002, où la Charte du Millénaire est ratifiée et la définition d'Architecture Spatiale est officialisée :

Architecture spatiale, n.f. :

Théorie et pratique du design et de la construction d'environnement habité dans l'Espace.

(World Space Congress, Houston, 2002)

Le travail d'un architecte spatial est donc de rendre vivable et confortable la boîte technique qu'est l'habitat spatial. En revanche, projeter un habitat spatial présente peu de similarité avec une maison. Les besoins sont les mêmes mais d'autres besoins tout aussi vitaux s'ajoutent dans un environnement de grande hostilité. Il faut noter que tous les sujets qui s'appliquent à l'architecture terrestre s'appliquent à l'architecture spatiale, à la différence que l'on doit souvent ajouter des complexités et des sous-sujets techniques à cette dernière. Le métier de l'architecte est remis en question et ce dernier doit adapter sa pratique à de nouvelles demandes.

L'ingénieur et l'architecte travaillent main dans la main mais possèdent des rôles bien différents. Le premier est formé à la technique, tandis que le deuxième suit une formation de design. Jusqu'à aujourd'hui, le rôle de l'architecte spatial relève de celui du consultant dans l'intégration technique, financière et stratégique des projets spatiaux. Les principales questions techniques ont été répondues durant les décennies précédentes. Ainsi, le design et le confort pourraient bientôt jouer un rôle plus central, ou pour ainsi dire, les architectes.

Il est possible de catégoriser les productions d'architecture spatiale selon différents types de classements. Plusieurs architectes ont déjà tenté d'établir une théorie de l'architecture spatiale, et chacun propose une catégorisation différente. Selon l'Institut Américain d'Aéronautique et d'Astronautique (AIAA), l'architecture spatiale est composée de trois catégories fonctionnelles: les véhicules de lancement, les modules pressurisés (recouvrant les activités humaines et divisés en sous-catégories telles que les espaces de vie, de travail, quai d'embarquement, ...) et les infrastructures de support (structure, divers générateurs, espaces techniques de contrôle, ...).

Il est possible de classer les habitats spatiaux par leur méthode constructive : pré-intégration (construit et assemblé sur Terre, taille et poids limité, directement utilisable), préfabriqué (pièces fabriquées sur Terre puis assemblées dans l'Espace), ISRU ou Utilisation de Ressources In Situ (production sur place de bâtiment et produit à partir des ressources à disposition). L'architecture spatiale peut aussi être catégorisée selon son domaine d'implantation : architecture d'apesanteur, sur d'autres corps célestes ou l'architecture de l'imagination fictive. L'architecture spatiale est un domaine pionnier dans lequel des architectes s'immergent et viennent se questionner sur la nature profonde de leur profession. C'est donc cette interrogation qui va nous guider :

En quoi l'apparition de l'architecture spatiale redéfinit-elle le métier d'architecte ?

ETAT DU SAVOIR

Le métier d'architecte subit deux crises qui ont transformé les limites de son champ d'action. L'architecte possède un passé commun avec l'ingénieur avant de s'émanciper vers une profession d'esthétisme : "l'architecture de façade". L'architecture vécue une prise de conscience écologique et technologique. Ces deux facteurs déchirent toujours aujourd'hui le métier.

Richard Buckminster Fuller est un précurseur de l'écologie contemporaine. En avance sur son temps, il prend conscience de la limitation des ressources terrestres et prône la manière d'utiliser les ressources à notre disposition dans son *Manuel d'utilisation du vaisseau spatial Terre ou Operating Manual for Spaceship Earth* (1969) en anglais. Par sa référence à la Terre comme un vaisseau spatial, il tente de transmettre l'idée que sans maintenance, le vaisseau ou la Terre tombe en décrépitude. Sa théorie créa de nombreux adeptes. Son étude de la Terre comme un système fermé, aujourd'hui appelé écosystème, inspire une équipe de scientifiques à réaliser l'expérience d'un écosystème réduit. Le projet de Biosphere 2, en considérant que la Terre est la biosphère 1. Le but de cette équipe est de comprendre comment fonctionne un écosystème indépendant.

Autant les progrès techniques ont soutenu l'évolution de l'architecture, autant l'arrivée du numérique un choc pour certains architectes. Antoine Picon explique l'apparition de l'air numérique par la société de l'information¹. Les recensements et le maintien des registres d'arrivée de migrants aux Etats-Unis sont autant de raisons qui ont poussé les ingénieurs à inventer des technologies d'enregistrement et de stockage de données. L'ordinateur comme système de stockage de données naît avant nos écrans digitaux des années 1970. Le numérique a d'abord proposé des scénarios notamment sur l'évolution climatique et économique du monde. A l'instar des écrits de Bruno Latour, le numérique aujourd'hui est un flux, un réseau planétaire extension d'individu à "cyborg"².

Le principe d'architecture météorologique développé par Philippe Rahm est une sorte de couture entre l'écologie et le numérique. L'architecture est la protection de l'humain face à la nature. Grâce aux outils de mesure et à la technologie contemporaine, il est possible de recréer une écologie intérieure. Philippe Rahm dans son livre *Architecture météorologique* (Editions Archibooks, 2009) liste les quatre paramètres à maîtriser pour l'artificialisation des intérieurs : la chaleur, l'humidité, la lumière et l'air. Il est possible de signaler au corps un environnement artificiel sans matière, uniquement grâce à ces paramètres, matières de l'invisible. L'Hormonorium, le pavillon de la Biennale de Venise de 2002, procure cette expérience. Les quatre paramètres sont réglés sur ceux de la montagne (lumière blanche au sol pour imiter la neige, 14% Oxygen équivalent à une altitude de 3000m, baisse de l'humidité, ...) afin d'en recréer l'atmosphère.

¹ PICON, Antoine, *Culture numérique et architecture, une introduction*, Birkhäuser Basel, 2010

² PICON, Antoine, *La ville, territoire des cyborgs*, éditions de l'Imprimeur, 1998

Cette maîtrise de l'environnement et des technologies est essentielle pour l'architecture des environnements extrêmes. Ce type d'architecture met en lumière la dimension de haute technologie, et tourne l'attention vers des figures d'architectes ayant un lien fort avec le monde scientifique comme Jacques Rougerie ou Vincent Callebaut. Un petit nombre d'architectes s'est penché sur le cas de l'Espace et mettent particulièrement en avant la présence de l'humain dans l'architecture, au travers de l'ergonomie et du design. Les premiers livres de théorie sont écrits sur le sujet par notamment, Sandra Häuplik-Meusburger (entretien en annexe), Olga Bannova, A.Scott Howe, et Brent Sherwood. Cet environnement insondable et si complexe qu'il semble irréel est d'un intérêt particulier aujourd'hui en raison de la planification de la colonisation de Mars et de la Lune, cette étape dont nous sommes plus proches que la plupart des personnes ne peuvent l'imaginer. Ces missions nécessitent des habitats particuliers. Les recherches avec comme mot clé "logement" ou "housing" présentent des résultats peu concluants avec trop peu de références. Une des clés des ressources de ce mémoire est le mot "habitat" (similaire à l'anglais).

HYPOTHÈSE

Les architectes cherchent à appliquer leur expertise sur un nouveau domaine développé par les scientifiques et les ingénieurs. Le principe fondateur de l'architecture moderniste formulé par Louis Sullivan "Form follows function" se transposerait en architecture spatiale par "form follows function designed by engineers". L'architecte applique son savoir-faire afin de chercher de nouvelles solutions et des méthodes pour améliorer le confort spatial. L'ingénieur crée l'abri essentiel à la survie de l'homme dans l'Espace. Sa réponse est technique et subvient à tous les besoins vitaux humains. Le but de l'architecte serait de développer par le design cette machine de survie en une maison vivable et confortable. Le travail de l'architecte dans le domaine spatial est actuellement centré sur la recherche, à la différence de l'architecture terrestre qui est un métier d'exécution et d'application. En 70 ans de pratique, l'architecture spatiale est restée confinée à la théorisation. La recherche est peut-être une inévitable finalité du métier dans le domaine spatial. Pourtant le rêve des architectes spatiaux est de pouvoir un jour appliquer leur théorie. L'hypothèse est que le métier d'architecte spatial est un métier de chercheur, à la différence de l'architecte terrestre qui est un métier autant de pratique que de recherches. L'architecte spatial ne peut plus appliquer sa fonction de créateur de forme et d'esthétisme. A cause de la complexité de l'environnement spatial, il est réduit à l'aménagement intérieur et à la recherche de solutions ergonomique pour le confort humain et sa nécessité pour le secteur aérospatial est remise en question.

TERRAINS D'ÉTUDE ET PÉRIODE

Nous nous intéressons aux projets réalisés que nous confronterons au travail de cheminement du métier d'architecte spatial. Le type d'habitat spatial choisi est celui des stations spatiales réalisées en orbite autour de la Terre : Saliout Station (URSS, 1971-1986), Skylab (Etats-Unis, 1973-1979), MIR Station (URSS puis internationale, 1986-2001), Station Spatiale Internationale ou ISS (depuis 2000). Les stations spatiales sont un terrain intéressant car nous possédons maintenant un retour d'expérience de cinquante ans sur quatre stations construites. En outre, les stations sont d'une nature plus comparable à un habitat que les fusées et les navettes, hybrides entre le moyen de transport et l'habitat.

Le terrain est étudié du point de vue de l'architecte et des designers d'espace ayant pratiqué une démarche architecturale. De plus, les documents scientifiques sont peu exploités dans ce dossier car ils présentent une approche technique d'une trop grande complexité. Les résumés effectués par des architectes-ingénieurs sont utilisés à la place.

La période étudiée va de 1952 (premier projet réaliste de station spatiale par Wernher Von Braun) à nos jours.

Frise chronologique : Prève CHOBERT-PASSOT

Fig. I : Station Saliout

Fig. II : Station Skylab

Fig. III : Station MIR

Fig. IV : ISS

(Sources : Roscosmos, NASA, NASA, ESA)

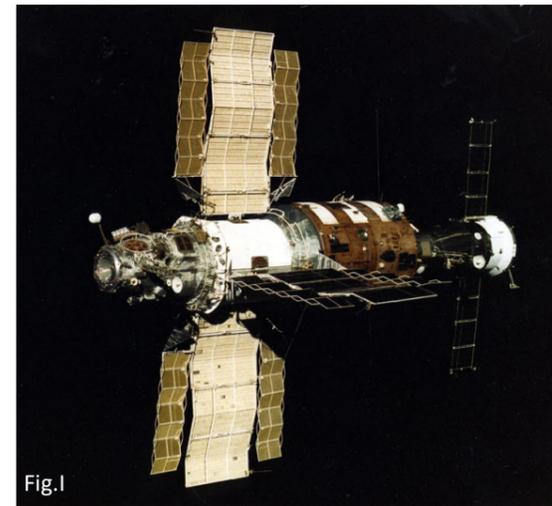


Fig. I



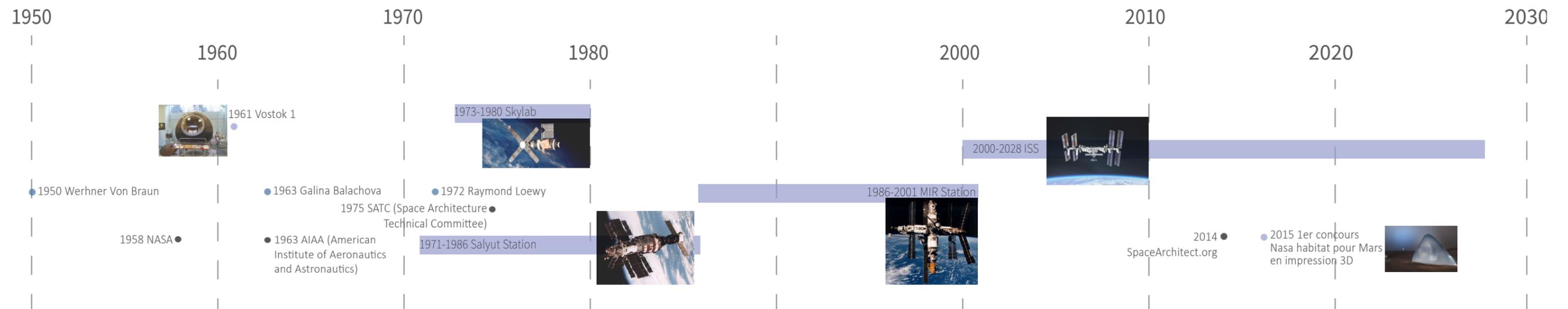
Fig. II



Fig. III



Fig. IV



CORPUS

Production des architectes sur les projets spatiaux (plans, dessins, perspectives, entretiens, ...)

- Normes aérospatiales : Critical Design Review, JSC Standard Procédural et Design, normes SSP, normes ISO et autres réglementation hérité de l'ingénierie aéronautique
- Entretiens d'astronautes et d'habitants d'environnements extrêmes terrestre réalisés par des architectes
- Habitats en ICE terrestres : plans et coupes analytiques réalisés par des architectes et sociologues
- Projets théoriques et prototypes : Station spatiale rotative par Wernher Von Braun (1956), planches d'aménagements des modules Soyouz par Galina Balachova (1956), rapport d'étude pour Skylab par Raymond Loewy&A, ...
- Institutions soutenant la reconnaissance de l'architecture spatiale : SpaceArchitect.org, Institut Américain d'Aéronautique et d'Astronautique (AIAA), ...
- sites internet, colloques, conférences, publications etc
- Concours utopiques contemporains : habitats martiens impression 3D (NASA 2019), habitats martiens impression 3D (ESA), ...
- Entretien avec Sandra Häuplik-Meusburger, architecte spatiale et auteure de livres d'architecture spatiale

MÉTHODE

La méthode d'étude de ce corpus est l'analyse de projets et de documents produits par les architectes et designers ayant une approche architecturale du secteur spatial et de les mettre en perspective face leur faisabilité et aux avancées qu'ils ont pu apporter à l'aérospatial afin d'en extraire le rôle de l'architecte.

VOCABULAIRES SPÉCIFIQUES

Apesanteur et microgravité

Etat dans lequel les effets de la pesanteur sont annihilés.

(Larousse en ligne)

Architecture spatiale

Théorie et pratique du design et de la construction d'environnement habité dans l'Espace.

(World Space Congress, Houston, 2002)

Environnement Extrême (EE)

Environnement qui possède des paramètres extraordinaires (extrême et inhabituel) physique, psychologique, social (ou interpersonnel) et technologique exigeants qui nécessitent une adaptation humaine importante pour la survie et la performance

(HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space*, Vienne, S.Bishop, Springer, 2021)

Environnement extrême en Isolement et Confinement (ICE)

Environnement extrême reculé, dont la population est en situation d'isolement et de confinement prolongé et dont le déplacement vers l'extérieur est limité.

(HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space*, Vienne, S.Bishop, Springer, 2021)

Espace/espace

Milieu situé au-delà de l'atmosphère terrestre et dans lequel évoluent les corps célestes / Surface, étendue, volume destinés à un usage particulier

(Larousse en ligne)

Habitabilité spatiale

L'habitabilité spatiale fait référence à la manière dont le volume et la géométrie de l'espace habitable affectent les performances, le bien-être et le comportement humains.

(WISE, J., *The quantitative modelling of human spatial habitability*, Ames Research Center, USA : NASA Contractor Report, 1988)

Station Spatiale

Habitat spatial orbital en état d'apesanteur

(Définition personnelle justifiant le terrain d'étude)

1. Les contraintes et principes fondateurs de l'Architecture spatiale auxquels l'architecte doit faire face

Introduction

Dans cette partie, nous allons étudier les pièces sur lesquelles se base le nouveau métier qu'est l'architecte spatial. Le domaine de l'aérospatial est composé de complexités inconnues à l'architecte. Elles forment les prérequis à apprendre avant d'exercer le métier spatial. Les contraintes sont tout d'abord environnementales, psychologiques et sociales, et sont inhérentes au milieu dans lequel l'architecture spatiale se construit. L'architecture spatiale s'est formée après l'ingénierie du même domaine. L'architecte doit donc respecter la marche à suivre instaurée par ses collègues. Il doit donc apprendre un nouveau processus de conception ancré dans des techniques et des réglementations rigoureuses préétablies. Après la maîtrise de ces contraintes et principes externes à sa profession, l'architecte peut transposer certaines de ces méthodes terrestres vers sa spécialité spatiale. Il étudie des habitats analogues dans d'autres environnements extrêmes plus accessibles et dont il peut extraire un retour d'expérience des habitants sur le design établi.

A partir de ses connaissances, l'architecte a pu développer sa branche "céleste".

1.1. Contraintes environnementales et leur effets sur le corps et la psychologie humaine

1.1.1. Caractéristiques physiques des Environnements Extrêmes (EE) et leur effets sur le corps humains

Selon la connaissance humaine actuelle, l'Espace serait l'ICE le plus extrême. L'architecte doit assimiler les contraintes de cet environnement car celles-ci influencent de manière majeure l'architecture spatiale.

Voici la liste des caractéristiques spatiales majeures auxquelles l'architecte doit faire face selon l'AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics).

L'apesanteur

La caractéristique la plus notable de l'environnement spatial est l'absence de gravité, aussi appelée apesanteur ou microgravité. De l'absence de gravité résulte un flottement des corps et des objets. En termes de structure, cela se traduit par l'absence de descente de charges. Les efforts du corps humain sont considérablement réduits. N'étant plus aussi sollicités, les muscles et le cœur faiblissent, les os perdent en densité, les poumons et les reins changent. Les fluides du corps se déplacent différemment provoquant des nausées (dus à la perte d'orientation de l'oreille interne), perte partielle du goût, de l'odorat et de l'appétit¹. Le corps humain est mis à l'épreuve par la nouveauté que les caractéristiques de l'environnement spatial présentent. Certains effets sont une tentative d'adaptation du corps à son environnement. Par exemple, la force nécessaire pour se déplacer en apesanteur est infime et explique l'atrophie musculaire observée chez les astronautes. Des remèdes pharmaceutiques font l'objet de recherches mais n'ont pas encore prouvé leur efficacité. L'exercice est pour l'instant la solution la plus efficace pour garder un corps sain en micropesanteur. L'environnement en apesanteur redéfinit les positions statiques. Effectivement, le corps flotte dans l'espace et prend une position fœtale. En position neutre (fig.1), toutes les articulations du corps sont légèrement pliées et le cou penche vers l'avant. Le moindre mouvement a des conséquences. Pour y remédier, les architectes et les ingénieurs cherchent à rétablir la verticalité que nous trouvons sur Terre afin d'offrir des repères au corps. Il faut alors construire des espaces en adéquation et inventer différents types de maintien du corps pour chaque activité.

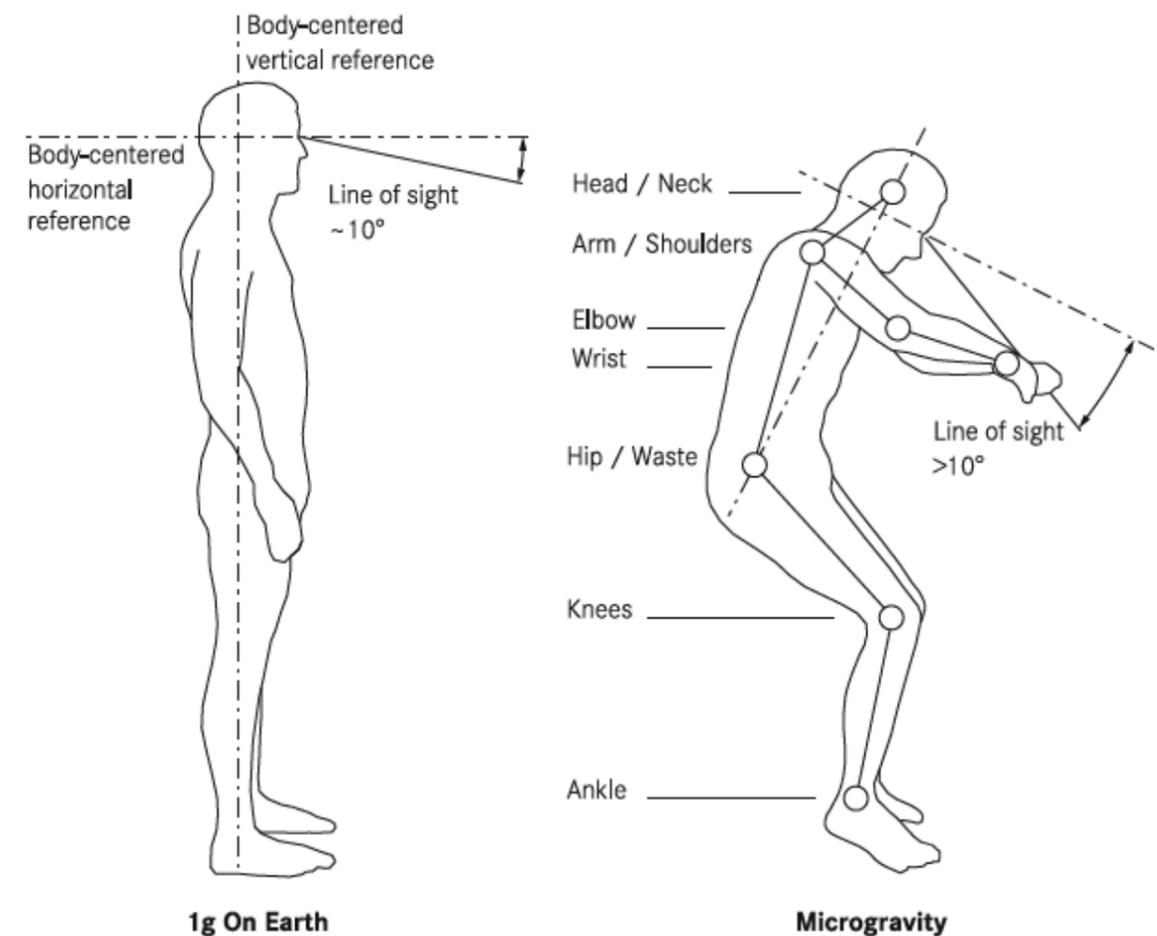


Figure 1 : Comparaison entre le position neutre en gravité terrestre et en apesanteur (Source : S.Häuplik-Meusburger)

¹ HOWE, A. Scott, SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture* (p.25), American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009

Débris orbitaux

Les objets en orbite autour de la Terre se déplacent à 7 km/sec en moyenne s'ils se situent en dehors d'un module pressurisé. Une partie se situe entre 160 km et 2000 km de la surface de la Terre, altitude appelée LEO (Low Earth Orbit). Les stations spatiales se trouvent dans ce cas de figure. En orbite, les objets sont en constante chute libre et ne cessent de tourner sur eux-même. L'ISS, bien que stabilisée, voit son orientation et son altitude régulièrement rectifiées². A cette vitesse, le moindre débris représente un danger. Ces derniers sont très nombreux et varient de la taille d'un satellite abandonné à des poussières générées par la collision d'objets plus gros. Ce type d'évènement est problématique car il démultiplie le nombre de débris et accroît leur vitesse des débris. L'Espace environnant la Terre a fait office de déchetterie durant 70 ans, si bien que les débris sont une raison toute aussi importante de déplacement de l'ISS. Depuis quelques années, on remarque une prise de conscience du danger que représente l'accumulation grandissante des débris spatiaux. L'ESA est devenue leader en matière de réglementations de nettoyage spatial, imposant au sein des agences et entreprises européennes le retrait de l'orbite du matériel devenu obsolète.

Les débris orbitaux représentent donc un problème majeur dans le design d'habitats spatiaux. L'enveloppe extérieure des stations spatiales doit donc être d'une extrême résistance afin de protéger les astronautes d'objets se déplaçant à des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde et souvent de forme acérée.

Vide spatial

La pression atmosphérique de l'Espace est de 0 bar et est appelée vide spatial ou "vacuum" en anglais. Ce vide est plusieurs fois plus important que n'importe quel vide artificiel que l'on peut créer dans les chambres à vide de laboratoire³. Outre le danger lié au manque d'oxygène, l'exposition directe du corps au vide spatial engendrerait l'ébullition de tous les fluides du corps ainsi que l'expansion extrême de ses tissus. Lorsque les astronautes doivent s'aventurer en dehors de la station (sortie extravéhiculaire appelé EVA), les astronautes doivent donc porter un scaphandre qui leur permet de conserver une pression identique à celle de la Terre. On retrouve un phénomène similaire chez les plongeurs dans le cas d'une remontée trop rapide dans laquelle leur poumons peuvent éclater compte tenu de la différence de pression entre les profondeurs et la surface. La différence entre la pression terrestre et spatiale impose donc la pressurisation de tous les modules dans les parties accessibles.

Dans l'Espace, le son ne se diffuse pas car les ondes mécaniques ne peuvent se dissiper directement dans le vide. Ainsi, les sons sont réverbérés dans toute la structure de la station, se dissipant au fur et à mesure.

² HOWE, A. Scott, SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture* (p.7, 25 et 26), American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009

³ HOWE, A. Scott, SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture* (p. 26), American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009

Rayonnements

Dans l'Espace, la lumière du soleil n'est pas filtrée par l'atmosphère comme sur Terre. Les astronautes sont exposés à une portion plus large du spectre lumineux et notamment à une grande intensité de lumière ultraviolette. Cette intensité de lumière peut dégrader le matériel, endommager les tissus organiques et altérer l'ADN⁴.

Les rayons cosmiques sont un flux très rapide de particules à haute énergie venant de tout l'univers. Ce rayonnement est très nocif pour l'homme car il tue ou fait muter les cellules. Les effets les plus connus sont la cataracte, le cancer et la stérilité. Le principal danger se trouve sur le long terme. Effectivement, nous possédons encore peu de connaissances sur le sujet. Les mutations qui en découlent peuvent sauter une génération et se manifester dans la descendance de la personne exposée. A titre de comparaison, le séjour d'un astronaute dans l'Espace durant un an équivaut à l'exposition autorisée que reçoit à vie un travailleur sous rayonnement. Les objets en orbite sont cependant protégés des vents solaires (particules émises par le soleil) par le champ magnétique de la Terre.

Selon l'exposition au soleil, la température extérieure de l'ISS varie entre -150° et +150°C. Etant donné que la station fait 16 fois le tour de la Terre par jour, elle subit donc 32 chocs thermiques par jour. Ainsi, le choix des matériaux doit être fait en fonction de leur résistance aux rayonnements et aux changements de température et leur capacité à les bloquer.

L'architecture spatiale est un nouveau secteur niche dans lequel quelques architectes s'aventurent par passion et curiosité. Cependant, ce secteur riche en technologie, dû à la complexité de son environnement, requiert une prise de connaissance de ces facteurs par les concepteurs arrivants. Certains architectes-ingénieurs font la passerelle entre ces deux domaines afin de transmettre aux architectes un résumé simplifié mais extensif des facteurs environnementaux et de leurs conséquences physiques. Nous pouvons retenir quatre contraintes environnementales majeures qui régissent l'Architecture Spatiale orbitale : l'apesanteur, les débris orbitaux, le vide spatial et les rayonnements.

1.1.2. Difficultés psychologiques et sociales que subissent les habitants des Environnements extrêmes en Confinement et Isolement (ICE)

Nous avons introduit précédemment les caractéristiques environnementales qui font de l'Espace un environnement physiquement difficile pour les astronautes. A ces difficultés s'ajoute celles psychologiques et sociales. Effectivement, l'Espace, comme d'autres environnements terrestres extrêmes tels que l'Antarctique ou les espaces sous-marins, se caractérisent aussi par le confinement et l'isolement forcé de leurs habitants. Ce type d'environnement est nommé Environnements extrêmes en Confinement et Isolement (ICE) et met psychologiquement à l'épreuve les micro sociétés qui y habitent.

Un inconfort de survie

Le premier homme à habiter l'Espace, Youri Gagarine, fit part de l'importance du facteur psychologique dans les séjours spatiaux au travers de son livre appelé *Espace et Survie*⁵. Les premiers programmes spatiaux se déroulaient dans de véritables conditions de survie où même la réponse aux besoins vitaux était insuffisante. Par exemple, les astronautes des missions Apollo, ne possédaient pas de sanitaires et avaient recours à des sacs plastiques. Ce processus manquant d'intimité, aurait aussi posé un problème pratique d'utilisation pour les membres féminins pour un équipage hypothétiquement mixte. En outre, la taille du Module Lunaire (LM) ne laissait pas la place nécessaire à la position allongée pour dormir. Lors de la réédition de son livre, Youri Gagarine intitula son livre *Espace et Psychologie*. Le confort psychologique des astronautes semble effectivement de plus en plus crucial avec l'allongement de la durée des missions. Un confort de survie ne saurait être durable pour le bon aboutissement des missions futures, notamment pour celle de l'installation humaine sur Mars.

*“Les premiers vaisseaux spatiaux avaient été conçus pour être exploités et non habités.”*⁶

Les facteurs psychologiques et sociaux des ICE

Selon les recherches de Jason Kring⁷, les ICEs se caractérisent par trois facteurs de difficultés: l'hostilité environnementale, les variables psychologiques qui influencent les réactions d'un individu ainsi que les relations individuelles et communautaires des habitants vivant et travaillant dans un même environnement. Ces derniers doivent faire preuve d'une grande adaptation physique, comportementale et psychologique afin de vivre de manière saine et

5 GAGARIN, Yuri; LEBEDEV, Vladimir, *Survival and Space*, Edité par Bantam Books, 1969

6 COMPTON, W. D., BENSON, C. D., *Living and working in space, a history of Skylab* (p.130), NASA, Washington, 1983

7 KRING, J., "Human performance in extreme environments", dans DAVIS, S.F., BUSKIST, W., *21st Century psychology – A reference handbook* (pp. 210–219). Newbury Park, CA: Sage. (2008) dans HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 2), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

vertueuse dans ces environnements extrêmes.

Avec la perturbation physique, liée aux propriétés environnementales qu'éprouvent les astronautes, ceux-ci peuvent ressentir un inconfort psychologique dû à l'étrangeté de l'environnement extraterrestre. Il est possible d'établir une liste relevant de nombreuses sources d'inconforts psychologiques et sociaux⁸ :

- isolation et confinement dans un environnement hostile
- proximité entre habitant
- distance avec le groupe social d'origine d'un habitant
- baisse d'intimité
- interactions forcées avec un groupe de personnes limité et souvent multiculturel
- dépendance des besoins vitaux à la technologie
- déconnexion avec la Nature
- absence de la famille
- tâches répétitive qui peuvent sembler perdre leur sens
- manque de stimulation et ennui

Tous les éléments cités ci-dessus mènent à un inconfort psychologique pouvant aussi mener à des tensions sociales. Dans ces environnements restreints, les habitants se retrouvent à devoir interagir avec un nombre limité de personnes, sans avoir moyen d'aller "prendre l'air".

Intimité

Le problème de l'intimité s'accroît avec la durée des séjours. Par exemple, pour les missions Apollo, qui duraient une dizaine de jours, les astronautes n'avaient aucune intimité, pas même pour se laver. Les équipages, composés de pilotes d'essais, ont affirmé ne pas avoir rencontré d'ennui à cela⁹. Bien que des douches aient été testées dans les trois premières stations spatiales (Saliout, MIR et Skylab), aucune des tentatives ne fut fructueuse. Aujourd'hui, à bord de l'ISS, les astronautes prennent des douches à la lingette. Il semble important de trouver une solution pérenne pour les prochaines missions annuelles qui se dérouleront sur Mars.

A bord des stations spatiales, on peut retrouver des espaces personnels coupés visuellement des autres, tels que les quartiers résidentiels. Toutefois, la séparation auditive et olfactive est moins bien établie. La présence de ses voisins se ressent donc par exemple par les ronflements, un appel avec les proches restés sur Terre ou les odeurs corporelles.

8 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 2), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

9 SCHMITT, Harrison, interview non publié, HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, Vienna, Austria, 2009 dans HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 221), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

Espace visuel

Le design neutre et fonctionnel des stations spatiales renvoie une impression de froideur à l'égard de ses habitants. Outre l'esthétique, l'espace intérieur est chargé visuellement, provoquant de ce fait un sentiment oppressant. En phase de planification, les surfaces sont agencées de manière efficace par les ingénieurs et l'espace semble spacieux. Après la mise en service et à mesure du passage des équipages, l'espace se transforme car les astronautes s'approprient de manière incrémentale leur habitat (fig.2a et b). L'impact de cette complexité visuelle est la baisse de l'attention et l'anxiété.

Ennui et monotonie

A bord de la station, la monotonie est induite par le nombre réduit de personnes, le manque d'activité et un environnement immuable. La monotonie d'un milieu restreint est un facteur majeur d'ennui et donc de sensation de confinement. Certains psychologues, tel que Vladimir Gushin de l'Institut Russe des Problèmes Biomédicaux¹⁰, affirment que le problème à bord de la station spatiale n'est pas le confinement mais le manque de stimuli. Un aménagement flexible permettrait donc de réduire à la fois la monotonie et le sentiment d'espace impersonnel. Les vues vers l'extérieur sont une autre source de divertissement. Les paysages changent très rapidement puisque l'ISS fait 16 fois le tour de la Terre par jour.

Absence de nature

La nature présente dans les habitats spatiaux est bien différente de celle que l'on peut trouver sur Terre. Une technique très courante est l'aquaponie. C'est une culture hors sol, utilisée aussi sur Terre, qui permet de faire pousser les plantes dans de l'eau et non dans du substrat. Malgré cette relative artificialité des plantes spatiales, elles apportent un double réconfort autant visuel que gustatif.

La première serre, nommée OASIS (fig.3), fut installée à bord de la Station Saliout en 1971. Les cosmonautes testèrent la culture de différents légumes, tels que des oignons, des tomates, des concombres et de la laitue. En 1975, le premier légume cultivé en apesanteur fut mangé à bord de la station. L'astronaute Valentin Lebedev considérait ces plantes comme des animaux de compagnie. Il avait même relocalisé son sac de couchage à côté de la serre afin de pouvoir admirer les plantes en s'endormant¹¹.

¹⁰ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 214), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

¹¹ LEBEDEV, V., *Diary of a cosmonaut – 211 days in Space*, Bantam Air & Space Series, New York, 1990



Fig.2a : Photo du module Destiny dans l'ISS juste après son déploiement en orbite en 2001 (Source : NASA)



Fig.2b : Photo du module en 2020, du haut vers le bas, Andrew Morgan, Jessica Meir et Oleg Skripochka (Source : NASA)



Fig.2b : Photo du cosmonaute Victor Savinykh avec sa "plante" a bord de Saliout 6, 1977 (Source : TASS par Victor Savinykh)

Espace et relations sociales

Dans un espace limité dont on ne peut sortir, sa perception peut vite paraître bondée. Sur Terre, la place ne manque pas et il suffit de se déplacer autre part pour retrouver une distanciation sociale. Dans l'Espace, la barrière invisible de l'espace public existe difficilement. Les habitants se retrouvent à chevaucher sans cesse les espaces sociaux et personnels des autres. Il faut apprendre à concevoir l'espace de manière à retrouver ses sphères sociale et personnelle.

Communication

Selon l'astronaute Valentin Lebedev¹², la communication entre les membres de l'équipage et avec Mission Control a été la plus grande difficulté durant son séjour spatial à bord de la Station MIR en 1983. Il nota que 30% des jours de la mission recouvrait un conflit. La majorité des conflits internes à l'équipage concernent principalement la routines et les tâches futiles telles que la gestion des ressources, le ménage ou l'hygiène. La communication avec les équipes au sol est une autre source de désaccord. On a pu remarquer une hostilité développée à l'égard de Mission Control¹³. Cela s'explique par le manque d'expériences et de compréhension des équipes au sol face aux difficultés que rencontrent les astronautes. L'événement le plus marquant fut la mutinerie de 1973 des astronautes de Skylab face au planning surchargé de travail imposé par Mission Control. L'équipe des trois astronautes cessa à titre de protestation la communication avec la Terre durant presque 30 minutes.

De manière assez pratique, la communication avec les habitants peut être difficile à cause de la latence. Effectivement, avec l'éloignement le délai s'accroît et le signal perd en qualité. Pour l'instant, cette latence est négligeable avec la proximité de l'ISS. Pour Mars, la latence serait de 4 minutes lorsque les deux planètes sont au plus proches et de 24 minutes à leur point le plus éloigné. Cependant, avec la Lune, le délai n'est que de trois secondes. La difficulté que représente la Lune est le silence de communication lorsqu'on l'on se trouve du côté opposé à la Terre.

Bien que les contraintes environnementales de l'Espace semblent plus évidentes que les contraintes psychologiques et sociales, ces dernières sont plus nombreuses et concernent tout particulièrement le métier d'architecte spatial.

¹² MANN, A., *How will we deal with the psychological problems of spaceflight ?*, 2017 dans HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 214), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

¹³ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 230), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

1.2. Un processus de conception contraint l'ingénierie spatiale

1.2.1. Une conception contrainte par la technique et le progrès

Le design des habitats orbitaux est contraint en forme, en volume et en poids par le véhicule de lancement

Il existe deux types de véhicules de transport : les fusées et les navettes spatiales. Les deux principales fusées de l'histoire de l'aérospatial sont Soyuz (URSS et Russie) et Saturne V (USA) (fig.4). Ce dernier, bien que lanceur le plus lourd jusqu'à l'heure actuelle, fut abandonné du à des restrictions budgétaires en 1973. D'autres types de fusées existent, telles que les fusées européennes Arianes, mais elles ne sont pas utilisées pour les lancements habités. Space Shuttle (USA) fut le seul modèle de navette spatiale à avoir volé. La navette est entièrement réutilisable à la différence du lanceur (modèle STS) sur lequel elle est montée. Le programme fut effectif à partir de 1981 et ferma en 2011 pour des raisons économiques. Cinq navettes furent construites : Challenger, Columbia, Discovery, Atlantis et Endeavour, comptabilisant un total de 135 vols. Deux crashes marquent l'histoire du programme. Le premier fut celui de la navette de test Challenger qui est la première navette du programme. Elle se désintégra, avec tout son équipage, lors de son décollage en 1980. Puis en 2003, Columbia fut pulvérisée lors de sa réentrée dans l'atmosphère. L'ISS et une partie du segment international de la station MIR furent installés par les navettes spatiales américaines. La taille des modules de l'ISS fut donc conçue en fonction de la capacité des cargos soit un diamètre de 4.5m¹⁴. La structure du module Destiny (premier module de l'ISS à avoir été lancé en orbite) est conçue de la même manière que celle d'une fusée. Elle est conçue avec le même matériau et type de rigidification (motif losange). Aujourd'hui, ce sont les modules Soyuz sur les lanceurs du même nom qui sont utilisés pour les vols habités. Les gouvernements ne sont plus en mesure de financer des programmes à plus de mille milliards de dollars¹⁵, à l'instar de la course à la Lune dans le cadre des missions Apollo. Les agences spatiales ont maintenant recours à des entreprises privées afin de financer leurs programmes. C'est ainsi que SpaceX remporte un contrat avec la NASA et qu'en mai 2020, le premier vol commercial habité fut lancé. SpaceX développe le vaisseau Dragon qui existe en version cargo ou équipage, montable sur leur propre lanceur Falcon 9.

Les habitats spatiaux, notamment les modules des stations spatiales sont contraint en forme, en taille et en poids par les véhicules qui vont les transporter en orbite et plus loin. C'est par exemple, la raison qui limite l'espace attribuable au sommeil dans le LM des missions Apollo. De manière plus contemporaine, la taille des modules de l'ISS est aussi contrainte par la capacité des navettes et des fusées.

14 JONES, Rod, "Performance de l'ISS interior" dans HOWE, A. Scott.; SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009
 15 SHERWOOD, Brent, "Design constraints of orbital architecture" dans HOWE, A. Scott.; SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009



Fig.4 : Dessins comparatif des toutes les fusées au monde, en rouge les fusées décrite dans le texte (Source : Ombi Wallach, Visual Capitalist)

La gestion des ressources par le Système de Contrôle Environnemental et de Support Vital (ECLSS)

Lors de la course à l'Espace, de nombreuses techniques ont été développées et perfectionnées. Au vu du niveau de progrès actuel, la plupart des solutions apportées sont à la pointe de leur technologie. L'architecture spatiale est limitée aujourd'hui par le niveau de progrès atteint, ainsi que par les ressources financières mises à disposition. Les contraintes techniques recouvrent les énergies, les moyens de communications, les ressources en air et en eau ainsi que la gestion des déchets. Le niveau technique actuel repose sur le recyclage de la majorité des ressources présentes à bord de l'ISS. Nous allons nous focaliser sur le niveau technique actuel.

L'oxygène et l'eau sont deux ressources presque entièrement recyclées et qui possèdent des cycles liés. Leur recyclage est exécuté par le Système de Contrôle Environnemental et de Support Vital (ECLSS)(fig.5). L'oxygène est apporté à bord de l'ISS en amont sous forme de bouteilles. Son recyclage passe par différents systèmes qui permettent de produire par la suite 40% de la quantité nécessaire. L'un des types de recyclage est l'électrolyse. Cette technique consiste à faire passer un courant électrique dans l'eau afin de séparer l'hydrogène de l'oxygène. Ces gaz sont stockés à nouveau sous forme de réservoirs pressurisés¹⁶. Sur Terre, l'eau est séparée en deux par un procédé chimique et non mécanique comme à bord de la station : la photosynthèse. Celle-ci convertit la lumière, le CO₂ et l'eau en nourriture. L'eau est séparée en hydrogène qui permet de produire le sucre tandis que l'oxygène est libéré dans l'air. Les ingénieurs voient donc un grand potentiel dans l'agriculture spatiale. Cependant, le recyclage artificiel reste pour aujourd'hui beaucoup plus efficace et compact.

L'oxygène, expiré par les astronautes sous la forme de dioxyde de carbone, est capté dans l'air de la station par un matériau minéral appelé zéolithe qui agit comme un filtre. Cependant, l'oxygène compris dans le CO₂ capté ne peut être récolté. Les procédés de séparation du carbone et de l'oxygène sont énergivores et ne sont pas pour l'instant rentables. D'autres gaz émis en petites quantités par le corps humain, les expériences scientifiques et les aléas doivent être captés dans l'air afin d'éviter leur accumulation. Outre le dioxyde de carbone émis en respirant, le corps génère des gaz tels que le méthane par les intestins, l'ammoniaque par la transpiration ou de l'acétone par l'urine. Ces différentes particules sont principalement extraites de l'air grâce à un filtre de charbon. Il est important de maintenir un environnement constant et un niveau d'oxygène suffisant. Les astronautes seraient sinon sujet à une fatigue accrue pouvant mener à l'évanouissement. Afin de pallier à tout aléa, l'ISS possède différents systèmes redondants de production et de filtration.^{17 18}

¹⁶ NASA, Marshall Center History, *The Environmental Control and Life Support System (ECLSS)*, 10 Mars 2020, consulté novembre 2021 à <https://www.nasa.gov/centers/marshall/history/eclss.html>

¹⁷ NASA Sciences, BARRY, Partrick L., *Breathing Easy on the Space Station*, 12 Novembre 2000, https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2000/ast13nov_1

¹⁸ NASA, JACKSON, Shanessa, *Life Support System*, mis à jour le 4 Août 2017, <https://www.nasa.gov/content/life-support-systems>



Fig.5 : Maquette de l'ECLSS, 2001. De gauche à droite, le support de douche, le support de gestion des déchets, les deux systèmes de récupération d'eau et le support du système de génération d'oxygène. (Source : NASA)

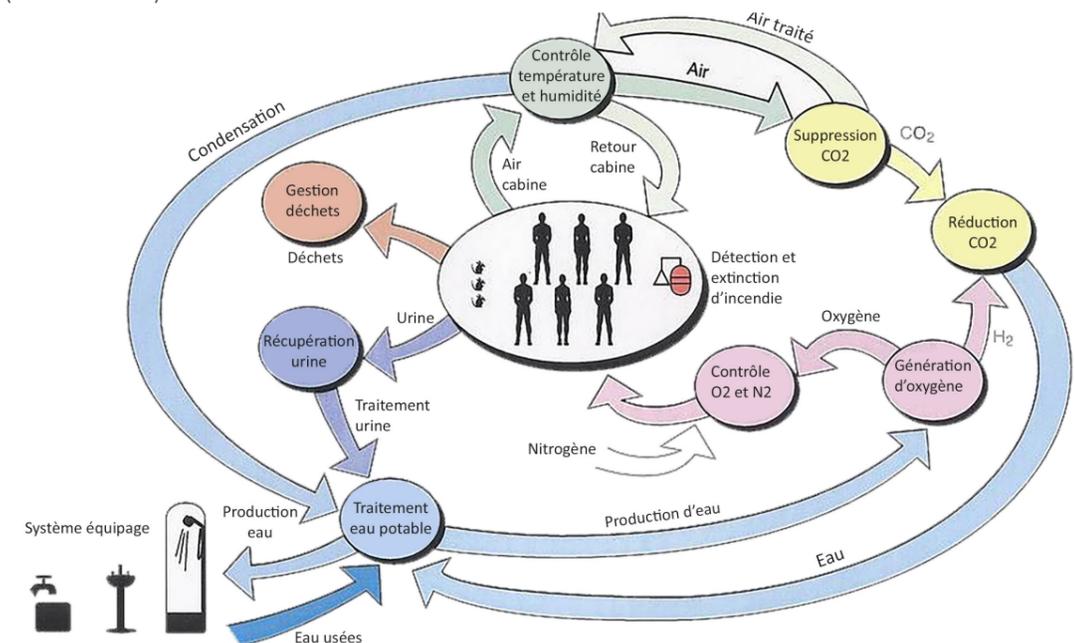


Fig.5 : Maquette de l'ECLSS, 2001. De gauche à droite, le support de douche, le support de gestion des déchets, les deux systèmes de récupération d'eau et le support du système de génération d'oxygène. (Source : NASA; Traduction : auteur)

La gestion des eaux usées couvre un panel bien plus large que sur Terre : eaux grises, urine, transpiration, humidité de l'air, etc. Ce recyclable permet de récupérer près de 90% de l'eau présente à bord. Un astronaute nécessite en moyenne 4 litres d'eau par jour qu'il utilise pour sa consommation directe, pour la nourriture et son hygiène (douche à la lingette, brossage des dents et rasage). Afin de produire ces ressources, l'eau utilisée passe au travers de multiples filtres puis d'un oxydant catalytique. La pureté de l'eau est vérifiée en aval par des capteurs. Si l'eau est considérée comme impropre, elle passe à nouveau dans le système. Après nettoyage, l'eau propre est stockée¹⁹.

Bien que l'ISS cherche à recycler une grande partie de ses ressources, nous ne sommes pas encore en mesure de traiter certaines. Les déchets non recyclables (habits sales, déchets humains, ...) sont emballés à la main par les astronautes et stockés à court terme dans un module les brûlant durant sa réentrée (fig.6). La production de déchets d'un astronaute est conséquente, environ 500 kg par an²⁰. Ce système de déchets à pulvériser ne peut pas être rentable pour les missions interplanétaires qui ne possèdent pas de ravitaillement régulier.

Production d'énergie

Le design des stations spatiales est grandement impacté par son mode de production d'énergie : les panneaux solaires. Ces derniers convertissent l'énergie solaire en électricité. L'ISS possède huit panneaux solaires de trente-quatre par douze mètres (fig.7). Ceux-ci sont inclinables pour récolter le maximum de lumière. Ils fournissent plus d'énergie que nécessaire, l'équivalent utile pour quarante maisons. Cela permet donc de stocker l'énergie sous forme de batterie afin de l'utiliser lorsque la station est dans l'ombre, soit près de la moitié du temps. Une grande partie de l'énergie est utilisée pour maintenir une température constante à l'intérieur de la station.

Système de communication

Le système de communication de l'ISS repose sur deux types de réseaux : la radio et les ondes satellites. Le système de communications a plusieurs buts : communication audio et vidéo entre les membres de l'équipage à bord et en EVA par réseau non filaire, communication audio et vidéo entre les membres de l'équipage et la Terre, transmission des informations pour le système de guidage, transmission des données des expériences scientifiques et de l'ISS.

La communication satellite passe par une constellation de Satellites Relais de Pistage et de Données (TDRS) en orbite géostationnaire. Cette couverture extensive offre un contact continu entre l'ISS et le centre de contrôle (White Sands Complex à Las Cruces, New Mexico et

¹⁹ NASA, JACKSON, Shanessa, *Life Support System*, mis à jour le 4 Août 2017, <https://www.nasa.gov/content/life-support-systems>

²⁰ FILMER, Joshua, "ISS Waste Disposal" dans *Futurism*, 13 Novembre 2013, <https://futurism.com/iss-waste-disposal-2>



Fig.6 : Module en réentrée, "Voici à quoi ressemblent 1,6 tonne de déchets de la station spatiale en réentrée" (Source : ESA)

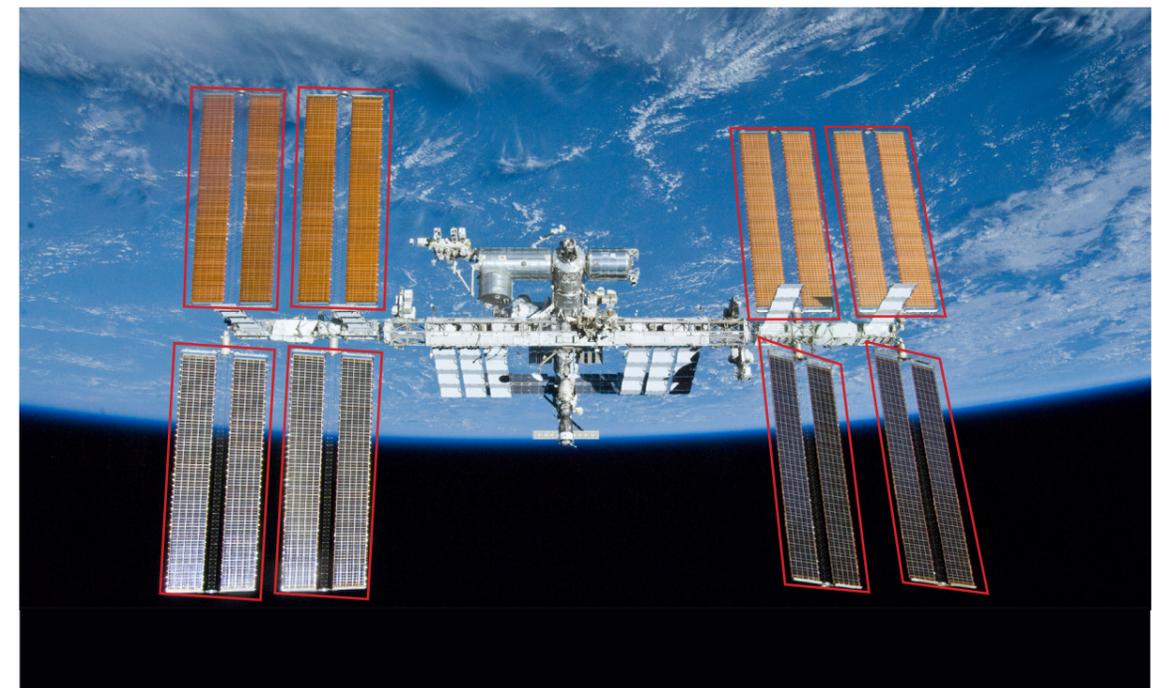


Fig.7 : Photo de l'ISS, en rouge les huit panneaux solaires (Source : ESA)

Guam Remote Ground Terminal). Jusqu'en 1998, avant l'ajout du Centre de Contrôle Guam, le système de communication n'était équipé que de deux antennes terrestres qui couvraient 85% du temps. Ce réseau satellite amélioré est utilisé afin de transmettre des données scientifiques et des vidéos en haute résolution. Il est aussi utilisé pour vingt-cinq autres missions tel que le télescope Hubble ou les mesures météorologiques.

Le système de radio VHF (Very High Frequency ou Très Haute Fréquence) est un système redondant avec le TDRS. Le système de VHF est divisé en deux types d'ondes VHF1 et VHF2. Le premier sert à bord de l'ISS en cas d'urgence et le deuxième afin de communiquer avec les vaisseaux Soyuz. Les deux antennes, situées à l'avant et à l'arrière de l'ISS, optimisent la communication radio.

Système de pilotage et propulsion

Bien que la station soit un objet libre en chute perpétuelle, il est nécessaire de conserver son altitude et le contrôle de sa localisation afin de maintenir le niveau thermique, la vitesse, la communication ainsi que la microgravité. Le système de pilotage est nommé CMG (Control Moment Gyroscopes) (fig.8 et 9). Il est formé de roues métalliques tournant à 6000 rpm (rotation par minute) situé dans la poutre centrale²¹. L'ISS possède plusieurs de ces stabilisateurs la maintenant avec précision à une altitude constante. Le premier module placé en orbite, Zvezda aussi appelé module de services, fut équipé d'un de ces systèmes, pesant à lui seul près de 100 kg.

L'ISS, étant en basse orbite, est constamment freinée par l'atmosphère et doit donc être régulièrement propulsée afin de rester à son altitude donnée. De plus, la station doit être déplacée de temps en temps afin d'éviter des débris orbitaux. Le module de service, situé à l'arrière de l'ISS, abrite aussi le système de propulsion, similaire à celui d'une fusée utilisant un carburant à base de nitrogen maintenu sous forme liquide.

L'ensemble de ces ressources et de ces modes de gestion recouvrent une grande place de la station et permet aux astronautes de vivre au mieux leur quotidien en apesanteur. L'architecte doit être conscient de ces contraintes afin de les intégrer au mieux dans le design des stations présentes et futures. Ces derniers éléments techniques, fruit du travail de l'ingénierie spatiale, illustrent la coordination et la coopération dont les ingénieurs et les architectes doivent faire preuve dans le domaine aérospatial. Les premiers inventent les machines qui font survivre les astronautes dans l'environnement le plus extrême, tandis que les seconds pensent la manière de vivre en apesanteur. Les uns comme les autres sont essentiels pour le bien-être des astronautes et la pérennisation de la présence humaine dans l'Espace.

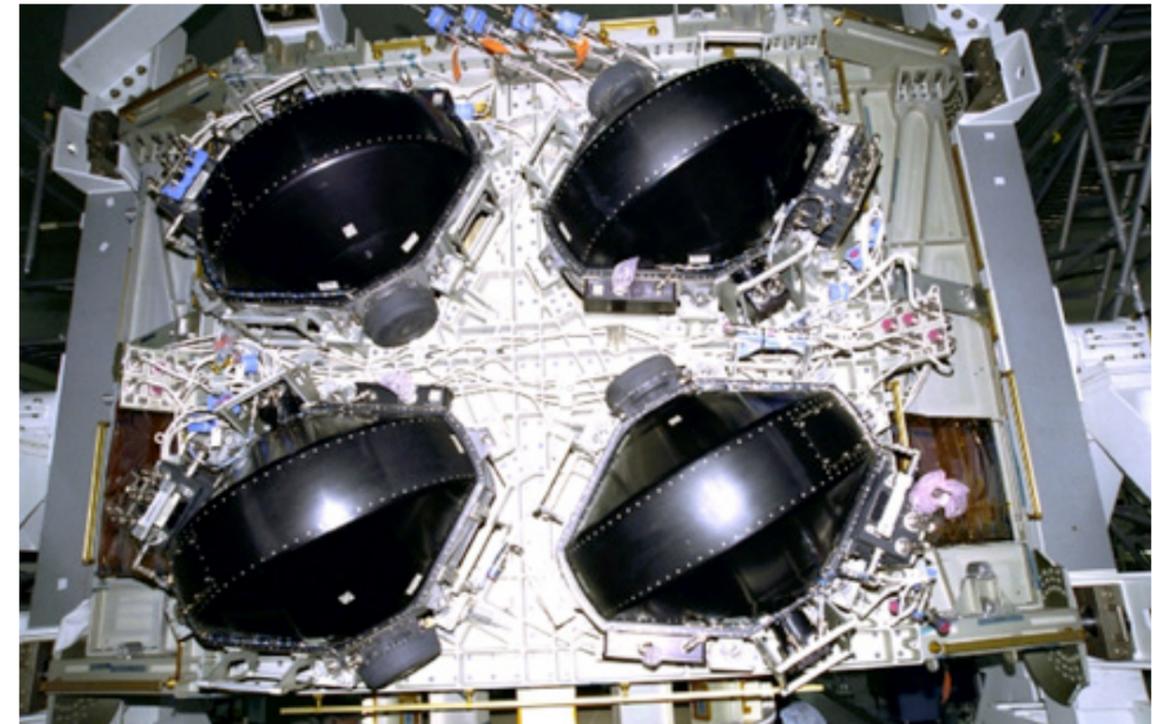


Fig.8 : Photo du CMG assemblé sur la poutre central de l'ISS
(Source : NASA)



Fig.9 : Assemblage du CMG sur la poutre
(Source : NASA)

²¹ NASA, *Main Support Systems*, NASA, non daté, https://www.nasa.gov/pdf/167129main_Systems.pdf

1.2.2. Une conception qui suit des normes aérospatiales

Un processus de design réglementaire

Les habitats spatiaux, tels que les stations spatiales, doivent passer par le processus réglementaire des engins aérospatiaux. Dans le cadre du programme Apollo, la NASA développa une procédure de vérification du design appelé Rapport Critique de Design (CDR pour Critical Design Review). Cette procédure suit de manière détaillée et méthodique la conception de toute construction aérospatiale, de ses ébauches au déclassement. Ce processus permet aussi au client, au départ le gouvernement américain, de suivre les avancements et d'attribuer des fonds. La NASA met à jour ce processus de design dans le Manuel de l'Ingénieur Système. L'architecte se doit donc d'en prendre connaissance afin d'être capable de venir s'inscrire de manière harmonieuse avec les autres corps de métiers déjà présents dans la conception, tel que les ingénieurs.

Cette procédure se déroule en sept grandes étapes qui mettent à l'épreuve et vérifient la fiabilité du projet à chacune d'entre elles. Avant de passer à l'étape suivante, le projet passe en vérification auprès d'une commission qui accorde ou non sa validation. La première étape d'études des concepts ainsi que les trois suivantes, étapes de design et d'intégration des systèmes ingénierie, sont celles où l'architecte spatial met en application son savoir-faire. Les deux avant dernières étapes, respectivement assemblage et les tests avant lancement du système et opération du système, peuvent encore avoir recours à l'architecte en cas de changement majeur. Le rôle de l'architecte à l'étape finale, celle du déclassement, est de l'identification de la fin de vie et de l'archivage du programme.

La réglementation ci-après recouvre des extraits du Manuel de l'Ingénieur Système de la NASA (fig.10).²²

Pré-phase A : Étude des concepts

“Le but de la pré-phase A est de produire un large éventail d'idées et d'alternatives pour les missions parmi lesquelles de nouveaux programmes/projets peuvent être sélectionnés. Au cours de la pré-phase A, une équipe d'étude analyse un large éventail de concepts de mission qui peuvent relever de contraintes techniques, de coûts et de calendrier. Ces concepts doivent aussi contribuer aux objectifs du programme et de la direction de la mission. Les recherches de la pré-phase A peuvent inclure des examens ciblés sur le développement des domaines à haut risque ou de haute technologie. Les attentes du projet sont recueillies auprès des principaux investisseurs (y compris le client).”

Phase A : Développement des concepts et des technologies

“L'objectif de la phase A est de développer une proposition d'architecture de mission/système qui soit crédible et adaptée aux attentes, exigences et contraintes du programme, y compris les ressources. Au cours de la phase A, des activités sont effectuées pour développer pleinement un concept de mission de base, commencer ou assumer la responsabilité du développement des technologies nécessaires et clarifier la dépendance attendue des humains [...] Ce travail, ainsi que les interactions avec les investisseurs, aident à mûrir le concept de mission et les exigences du programme. Les ingénieurs système sont fortement impliqués au cours de cette phase (développement et l'évaluation de l'architecture et attribution des exigences aux éléments de l'architecture).”

Phase B : Réalisation du design préliminaire et des technologies

“L'objectif de la phase B est que l'équipe de projet achève le développement technologique, le prototypage technique, les évaluations du matériel et des logiciels patrimoniaux et d'autres activités d'atténuation des risques identifiés [...]. Le projet doit démontrer que ses références de planification, techniques, de coûts et de calendrier développées pendant la formulation sont complètes et cohérentes ; que l'avant-projet est conforme à ses exigences ; que le projet est suffisamment mature pour commencer la phase C ; et que le coût et le calendrier sont adéquats pour permettre le succès de la mission avec un risque acceptable. C'est à l'issue de cette phase que le projet et l'Agence s'engagent à atteindre les objectifs du projet pour un coût et un échéancier donnés. [...] Les ingénieurs système sont impliqués dans cette phase pour s'assurer que les conceptions préliminaires des différents systèmes fonctionnent ensemble, sont compatibles et sont susceptibles de répondre aux attentes des clients et aux exigences applicables.”

Phase C : Design final et fabrication

“L'objectif de la phase C est de terminer et de documenter la conception détaillée du système qui répond aux exigences et de fabriquer, coder ou réaliser les produits. Au cours de la phase C, des activités sont effectuées pour établir une conception complète (base de référence du produit), fabriquer ou produire du matériel et des logiciels de code en vue de l'intégration [...] Des unités de test d'ingénierie ressemblant davantage au matériel réel sont construites et testées pour établir l'assurance que la conception fonctionnera dans les environnements attendus. Des sujets humains représentant la population d'utilisateurs participent aux évaluations des opérations de la conception, de l'utilisation, de la maintenance, des procédures de formation et des interfaces. La spécialité d'ingénierie et les résultats d'analyses transversales sont intégrés dans la conception et le processus de fabrication ; les contrôles sont définis et validés. Les ingénieurs système sont impliqués dans cette phase pour s'assurer que les conceptions détaillées finales des différents systèmes fonctionnent ensemble, sont compatibles et sont

²² NASA, Systems Engineering Handbook, 11 décembre 2019 à <https://www.nasa.gov/seh/index.html>

susceptibles de répondre aux attentes des clients et aux exigences applicables. Pendant la fabrication, l'ingénieur système est disponible pour répondre aux questions et résoudre les problèmes d'interface qui pourraient survenir."

Phase D : Assemblage du système, intégration, tests et lancement

"Le but de la phase D est d'assembler, d'intégrer, de vérifier, de valider et de lancer le système. Ces activités se concentrent sur la préparation à l'examen de préparation au vol (FRR)/ examen de l'état de préparation à la mission (MRR). Les activités comprennent l'assemblage, l'intégration, la vérification et la validation du système, y compris le test du système de vol dans les environnements attendus. Les autres activités comprennent la mise à jour des procédures opérationnelles, les répétitions et la formation du personnel d'exploitation et des membres d'équipage, ainsi que la mise en œuvre de la logistique et des pièces de rechange [...] L'ingénierie système est impliquée dans tous les aspects de cette phase, y compris répondre aux questions, fournir des conseils, résoudre les problèmes, évaluer les résultats des tests de vérification et de validation, s'assurer que ces résultats répondent aux attentes des clients et aux exigences applicables, et fournir des informations aux décideurs des feux verts ou non."

Phase E : Opérations et durabilité

"Le but de la phase E est de mener à bien la mission principale pour répondre au besoin initialement identifié et de soutenir ce besoin. Les produits de cette phase sont les résultats de la mission et les performances du système. Le personnel d'ingénierie des systèmes continue de jouer un rôle au cours de cette phase, car l'intégration chevauche souvent avec l'opération des systèmes complexes. Cette phase n'englobe l'évolution du système que dans la mesure où cette évolution n'implique pas de modifications majeures de l'architecture du système. Des changements de cette envergure constituent de nouveaux « besoins » et le cycle de vie du projet recommence. Pour les grands projets de vol, cela peut être une période prolongée de croisière, d'insertion en orbite, d'assemblage en orbite et d'opérations de mise au point initiales."

Phase F : Fermeture

"L'objectif de la phase F est de mettre en œuvre la planification du déclassement et de l'élimination des systèmes ainsi que d'analyser les données et les échantillons renvoyés. Les produits de cette phase sont les résultats de la mission. L'ingénieur système est impliqué dans cette phase pour s'assurer que toutes les informations techniques sont correctement identifiées et archivées, pour répondre aux questions et pour résoudre les problèmes au fur et à mesure qu'ils surviennent."

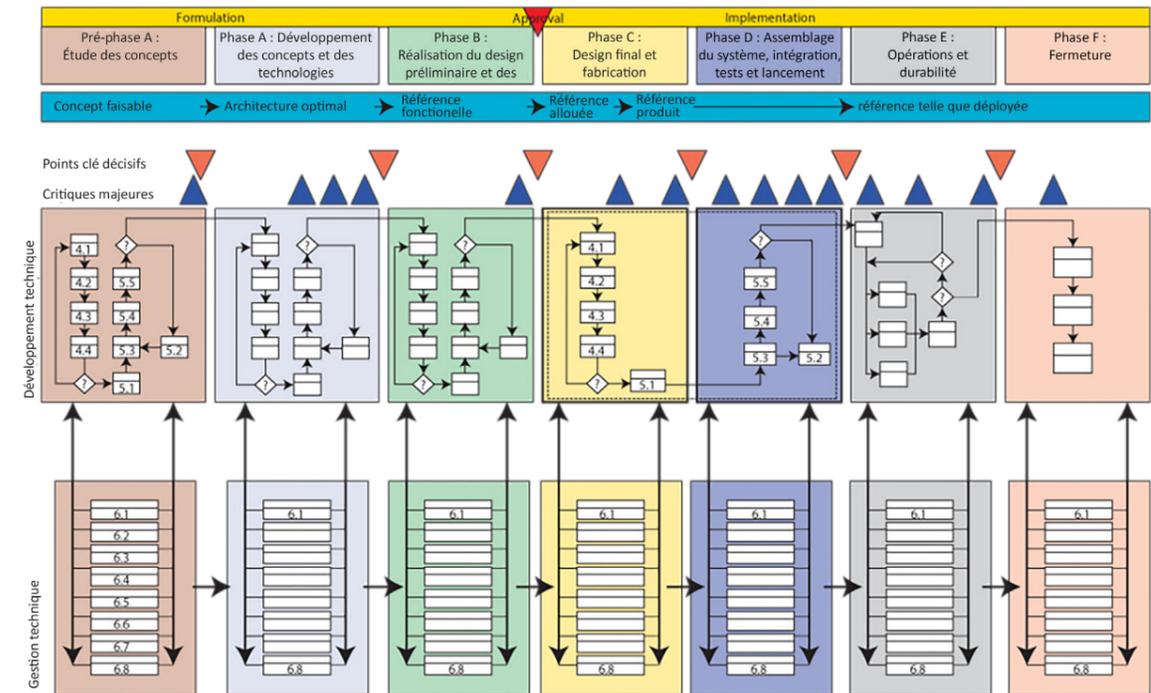


Fig.10 : Version miniature du poster de la NASA illustrant le processus du cycle de vie d'un projet accompagnant le Manuel de l'Ingénieur Système. (Source : NASA)

Des réglementations et normes aérospatiales

Le Centre Spatial Johnson (JSC) est la division qui s'occupe des missions habitées de la NASA. Cette organisation a donc généré de nombreux rapports, normes et standards sur le design des habitats spatiaux. Un grand nombre de documents portent son nom et sont les textes majeurs régissant le design spatial. On trouve la majorité de ces standards requis sur le Serveurs des Rapports Techniques de la NASA (NTRS)²³. Cette base de données regroupe tous les documents en rapport avec le domaine aérospatial de la NASA, comprenant des conférences, des articles de journaux, des rapports de réunion, des brevets, des rapports de recherches, des images et vidéos techniques, etc. Ces documents, récoltés et archivés depuis les années 1960, sont régulièrement révisés voire annulés en fonction de l'évolution du progrès aérospatial.

Dans les textes les plus utilisés, on trouve JSC Standard Procédural et Design (JSC-STD-8080). Ce texte est régulièrement mis à jour depuis sa création. Son importance réside dans le fait que ce soit un texte général qui regroupe de manière exhaustive les sujets abordés dans la phase de design de tout type d'équipement spatial de transport humain. Le texte recouvre six sujets du point de vue du confort et de la sécurité des astronautes : général, fluides, électricité, fluides, matériaux, mécanique/structures et pyrotechniques. Ce sont des domaines que nous retrouvons dans l'architecture terrestre mais que les architectes doivent réapprendre à maîtriser dans un environnement complètement nouveau. La préface de cette norme spécifie:

“Ce document contient des exigences de conception et de procédure [...] sur la base des leçons apprises et des meilleures applications. Les exigences décrites dans ce document sont appropriées pour l'acquisition, la conception, le développement, les tests, l'évaluation, les opérations et l'ingénierie de maintenance de tout programme, projet, engin spatial, système ou produit final de vols habités.”

On trouve aussi une série de standards et pré requis concernant la Station Internationale, ses véhicules visiteurs et ses équipements. Leur matricule commence par SSP en référence à Space Station Program. La plus connue des architectes spatiaux est la SSP-50005 qui répertorie les exigences de sécurité de l'ISS et sert de document de référence aux normes plus précises sur l'ISS. Cette norme précise autant l'acceptation et la classification des risques rencontrés dans l'Espace, que l'attitude à adopter ou le design préventif.

L'ingénierie spatiale a pour objet un environnement bien surprenant, pourtant ses projets se soumettent aussi à l'ISO (Organisation internationale de normalisation) et à ses normes qui gèrent la qualité des produits depuis 1987 : la série de normes ISO-9000. Ce suivi des règles semble essentiel pour un environnement aussi extrême que l'Espace.

L'objet de normalisation le plus connu à bord de la station spatiale est le rack (fig.11). L'International Standard Payload Rack (ISPR) ou simplement rack, est un conteneur en acier conçu et adopté par le programme de l'ISS pour prendre en charge de manière efficaces

²³ NASA, NTRS, <https://ntrs.nasa.gov>



Fig.11 : Photo de l'astronaute Alexander Gerst à bord de l'ISS installant le système de recyclage de l'eau de l'ECLSS 1er octobre 2018.

(Source : ESA)

l'intégration et l'interchangeabilité du matériel, comme les machines du support vital ou les expériences. La taille d'un rack est d'environ 2 m par 1 m et profond de 85 cm. Les répétitions du rack forme la partition de l'ISS.

Les normes formelles et procédurales, dont les architectes spatiaux héritent de l'ingénierie aérospatiale, paraissent à première vue d'une grande complexité. Cependant, elles sont issues des leçons que les agences spatiales ont tirées de leurs erreurs et de leur succès en 70 ans d'expériences et offrent aussi un cadre aux nouveaux arrivants. Ces bases permettent de construire avec ou bien même d'être mise à nouveau à l'épreuve et d'être modifiées face au nouveau regard que les architectes peuvent apporter.

1.3. Utilisation des méthodes de recherches architecturales ou sur le retour d'expérience

1.3.1. L'étude de design des habitats analogues simulant et in-situ en ICE terrestres

De nombreux architectes se tournent vers l'architecture spatiale par intérêt pour les environnements extrêmes. C'est par exemple le cas de Sandra Häuplik-Meusburger qui écrit trois livres sur le sujet sous des points de vue différents : activité humaine, ingénierie et psychologie. Elle explique :

“Ce n'était pas une voie directe comme vous pouvez peut-être l'imaginer. J'ai commencé [l'architecture spatiale] parce que je m'intéresse à la relation entre l'humain et l'espace bâti. [...] Je voulais l'examiner dans l'environnement le plus extrême, et c'était dans l'Espace.”

“Pour moi, c'était le terrain de l'expérimentation, ce que l'Architecture pouvait apprendre pour nous les humains de la planète. C'est, je pense, la partie la plus intéressante. Car après tout il n'y a pas beaucoup d'habitats spatiaux à construire donc ce serait dommage d'aller à l'école, à l'université, faire un doctorat si vous ne pouvez pas transmettre vos connaissances aux gens qui vivent sur Terre.”

Afin de pouvoir construire dans l'Espace, cet environnement aux qualités parfaitement nouvelles, les architectes doivent apprendre comment faire. Cependant, aucun architecte spatial ne peut faire l'expérience d'habitats spatiaux. Ils prennent donc comme référence les habitats d'ICE terrestres appelé habitat In-Situ, notamment les habitats sous-marins (Précontinent I-II-III, Tektite I-II, Aquarius) et les bases en Antarctique (Amundsen-Scott south Pole Station, Vostok Station, Concordia Station, et près de 75 autres stations antarctiques²⁴). Un autre type de corpus de références existe. Les environnements simulés sont pratiquement tous orientés vers l'établissement sur Mars (Bios-3, Biosphere 2, IBMP facility, Hera habitats, Flashline Mars Arctic Research Station, ...). Effectivement, même si ce type de projet ne réunit pas toutes les caractéristiques environnementales dont notamment la micropesanteur, il met en lumière le comportement humain face à une situation de confinement et d'isolation. L'étude de ces cas offre aux architectes la possibilité de perfectionner leur design en les testant dans ce type d'habitat. Dans les faits, ces habitats analogues sont construits puis étudiés afin d'en tirer des conclusions, mais on observe peu d'améliorations architecturales du confort intérieur. L'étude est généralement centrée sur l'acclimatation des habitants à un environnement extrême plutôt qu'au succès et à l'amélioration d'un design. Les changements observables sont souvent exécutés par des ingénieurs et résolvent des questions de survie et de faisabilité.

²⁴ https://www.coolantarctica.com/Community/antarctic_bases.php

La station polaire américaine de Amundsen-Scott illustre cette idée. Elle fut reconstruite 3 fois depuis 1956²⁵. La première base, appelée aujourd'hui Old Pole, est composée de modules préfabriqués. Elle est abandonnée en 1975 car les modules ont été ensevelis dans la neige au fur et à mesure des années. La même année, une nouvelle station est construite sous la forme d'un dôme géodésique, englobant les nouveaux modules, de 50 m de diamètre et 16 m de haut. Elle aussi est recouverte de neige et sera abandonnée en 2003 avant d'être démontée en 2009. La nouvelle base, construite entre 2003 et 2010, prend une forme innovante en surélévation afin de laisser passer le vent en dessous et évacuer naturellement la neige. Ce problème est récurrent en architecture des environnements extrêmes. Certains designs préventifs pourraient être pris en amont, pourtant le schéma se répète. S.Häuplik-Meusburger explique qu'avant qu'un design intérieur soit considéré, l'impact négatif sur la santé de ses habitants doit être caractérisé et justifie donc d'un changement nécessaire du design²⁶. Seuls quelques architectes et designers ont su marquer l'histoire de l'architecture spatiale avec leurs idées innovantes qui ont remis en question les designs ingénieurs, tels que Raymond Loewy pour Skylab et Galina Balachova pour Saliout et MIR.

La mise à l'épreuve des hypothèses : Biosphere 2

Biosphere est un large équipement de recherche et de développement écologique, dont le but est de tester la viabilité d'un écosystème artificiel pour le séjour prolongé d'un équipage en confinement et isolement total. Le complexe représente une surface de plus d'un hectare composé de 5 biomes : forêt tropicale humide, désert, savane arbustive épineuse, savane, marais, mangrove, océan et son récif corallien et un terrain agricole²⁷ (fig.12). L'ensemble est fermé le plus hermétiquement possible dans ses fondations par une feuille de métal et une dalle de béton, et en surface par d'immenses verrières. Le projet fut construit entre 1985 et 1991 en Arizona, aux Etats-Unis. Cependant, seuls deux séjours furent accomplis entre 1991 et 1994. La première mission dura deux ans, du 26 septembre 1991 au 26 septembre 1993 avec un équipage de huit personnes, quatre hommes et quatre femmes. La seconde mission, planifiée pour 1 an, ne dura au final que 6 mois dû au licenciement soudain du PDG par l'actionnaire principal de l'entreprise en possession du complexe (Space Biospheres Ventures).

Ces missions permettent de mettre en lumière les réactions sociales d'un groupe confiné ensemble sur une longue période de temps. Pour les deux missions, il est observé assez tôt une division du groupe en deux factions opposées. Jane Poynter, résidente de la première mission, raconte que le mécanisme d'adaptation adopté par le groupe avait été le théâtre et que cela avait réussi à poursuivre le séjour tous ensemble²⁸. Lors d'une interview, elle explique

²⁵ <https://www.nsf.gov/geo/opp/support/southp.jsp>

²⁶ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 31), Vienne, Springer, 2021

²⁷ Site officiel de Biosphere 2, <https://biosphere2.org/>

²⁸ POYNTER, Jane, *The human experiment : two years and twenty minutes inside Biosphere 2*, New York, Basic Books, 2006

que le groupe s'est divisé de manière égale, deux hommes et deux femmes de chaque côté. C'est un processus difficile à vivre mais inévitable à l'intérieur d'un groupe réduit de personnes confinées et isolées ensemble. Selon Mark Nelson, aussi membre de la première mission, le stress de la mission était majoritairement social car le danger environnemental n'était pas réel²⁹. L'équipage était conscient que si besoin, il suffisait d'ouvrir le sas vers l'extérieur et qu'un environnement sécurisant se trouvait de l'autre côté de la vitre. Cette idée simple et rassurante était la motivation à ne pas abandonner. Le module d'habitation a été pensé de manière à limiter le sentiment d'enfermement. Chaque membre possède sa propre chambre en duplex (espace diurne et espace nocturne) qui donne généreusement sur la serre (fig.13a). Les espaces de vie sont de grandes dimensions et ont recours aux technologies de pointes de l'époque³⁰ (fig.13b et c).

Le détail apporté au design de Biosphere 2 est sûrement la raison du succès de la mission malgré les difficultés interpersonnelles qu'ont rencontrés ses habitants. Toutefois, cet environnement simulé montre les limites des leçons que l'on peut tirer d'un environnement artificiel. Effectivement, l'équipage subit un stress en moins par rapport à un séjour interplanétaire. De plus, pour des raisons technologiques et économiques, il est impossible de créer un habitat de cette échelle dans un futur à moyen terme. En définitive, ce projet illustre l'importance du design pour le succès des missions de longue durée et que la recherche et les progrès doivent se poursuivre.

Habitats in-situ sous-marins

Les habitats sous-marins se trouvent dans l'environnement terrestre le plus comparable à celui de l'Espace. L'eau permet de compenser l'effet de la gravité et fait flotter le corps. On trouve, en outre, une différence de pression entre l'intérieur de l'habitat (équivalent à 1 bar) et l'extérieur, bien que dans l'eau la pression augmente alors qu'elle est inexistante dans l'Espace. C'est pour cette raison que les astronautes s'entraînent dans l'eau pour les sorties extravéhiculaires. Les habitats analogues in-situ apportent aussi un poids psychologique à ses habitants, par le danger réel de l'environnement dans lequel ils vivent. Le design doit donc s'ajuster à un niveau de stress conséquent afin de le prévenir si possible.

Le premier habitat sous-marin fut construit en 1962, sous la direction de l'explorateur sous-marin Jacques Cousteau. L'habitat nommé Précontinent I (ou Conshelf I en anglais) avait pour but de prouver la faisabilité de vivre sous l'eau pour de longues périodes. Il répéta l'expérience deux autres fois plus profondément, 25 m sous le niveau de la surface pour Précontinent II (fig.14, 1963) et 110 m pour Précontinent 3 (1965). Le séjour des océanographes dura un mois sans retour à la surface, durant lequel ils exécutent chaque jour des sorties afin de tester leurs capacités sur des travaux manuels. L'expérience

²⁹ NELSON, Mark, *Lessons from Biosphere 2, Both the scientific community and the general public still have a lot to learn from the largest mesocosm research project ever conducted*, The Scientist, 1 Août 2018, consulté le 6 janvier 2021, <https://www.the-scientist.com/reading-frames/lessons-from-biosphere-2-64464>

³⁰ Science J Rank, *Biosphere project, designing Biosphere 2*, Science J Rank, consulté le 6 janvier 2021, <https://science.jrank.org/pages/914/Biosphere-Project-Designing-Biosphere-2.html>



Fig.12 : Photo aérienne de Biosphere 2 (Source : Organisation Biosphere 2)



Fig.13a : En haut à gauche, chambre d'un biosphérien (Source : Dave Mosher, Business Insider)



Fig.13b : En haut à droite, salon transformé en salle de conférence (Source : americanexpeditioners.com)

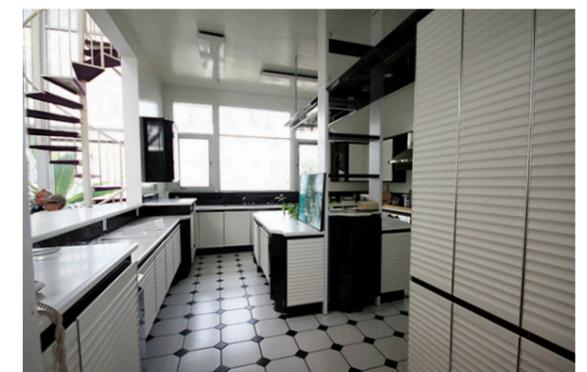


Fig.13c : En bas, cuisine se situant derrière le salon (Source : americanexpeditioners.com)

de Précontinent II est retranscrite dans le film documentaire *Le monde sans soleil*. Les séjours sont plus bien plus courts que ceux réalisés par les astronautes mais les conditions environnementales sont les plus proches. Les trois modules construits pour Précontinent II sont de forme circulaire ou cylindrique afin de résister à la pression de l'extérieur. Les stations spatiales sont de forme comparable mais pour la raison opposée. La taille des modules sous-marins est modeste, permettant de comparer plus facilement les conditions de vie. Le premier module en "étoile de mer" accueillent au centre un espace de vie avec les équipements de communication. Les quatre branches accueille les chambres, la cuisine, la salle de bain. On trouve à l'extérieur un garage sous-marins hébergeant le véhicule de plongée. Le module le plus profond conçu pour deux personnes durant une semaine, est localisé à -25 m. C'est un cylindre de trois étages avec l'espace de vie et de sommeil à son sommet, un étage intermédiaire humide pour les sorties ouvrant sur le rez-de-chaussé immergé.

Seuls des équipages masculins de profil explorateur ont participé à ces missions de relative courte durée. Le module le plus petit utilisé durant seulement une semaine, ne semble pas avoir dérangé ces occupants par sa forme de "camping". Le profil des habitants peut transformer les réactions : l'excitation de la découverte semble avoir comblé le manque de confort. L'équipage semble avoir apprécié le design du module "étoile de mer". Les membres expriment dans le documentaire leur engouement pour la cuisine qui leur permet de réchauffer au four et au micro-ondes des plats préparés en amont de la mission par un cuisinier. La série de projet Précontinent à donc prouver, que pour une certaine période, l'homme peut effectivement habiter sous l'eau.

Le laboratoire et habitat sous-marin Tektite I et II, arrivent aux mêmes conclusions. L'habitat se situe à Great Lameshur Bay dans la mer des Caraïbes et accueille des missions de 1969 à 1970. L'équipement est composé de deux cylindres de deux étages rejoint par un tube de communication (fig.15). Le rez-de-chaussé est composé de la salle humide dans un cylindre et de l'espace de sommeil et de nutrition dans l'autre. A l'étage supérieur où se trouve le pont, sont également installés le laboratoire et la salle de bain.

La Nasa entreprend un programme de recherche d'habitabilité qui est considérée comme le premier effort de compréhension des répercussion que subissent les astronautes en situation de confinement et d'isolation³¹. Le résultat de l'étude n'apporte aucune observation négative, ni concluantes. Il est donc considéré que la période de confinement, entre un et deux mois, n'a pas suffisante pour évaluer l'habitat et ses effets. Il semble donc que Tektite est été bien conçu pour son programme précis, c'est-à-dire héberger des missions de courtes durées. L'habitat est décrit comme " dans son ensemble [il] a fourni une maison confortable et habitable pour la plongée de longue durée, en eau peu profonde et saturée Tektite I. En tant que laboratoire, ce n'était pas optimal, mais c'était suffisant"³². Cependant, la recherche de la Nasa visait les conséquences de l'habitat sur son habitants pour des voyages de longue durée.

31 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 81-82), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021

32 PAULI, D. C, COLE, H. A., *Summary report on Project Tektite I. A multiagency 60-day saturated dive*, NASA, Department of the Interior et the General Electric Company, 1970

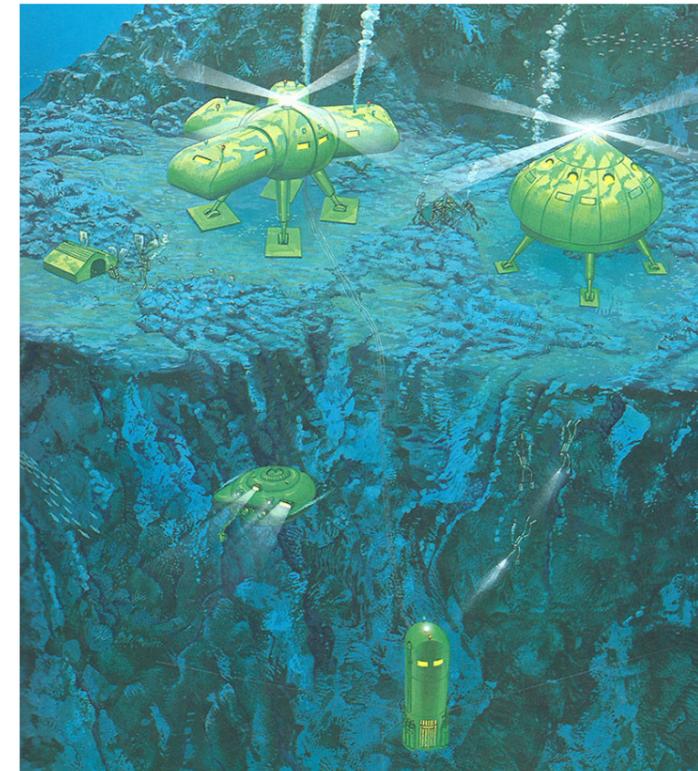


Fig.14 : Schéma des différents modules composant l'expédition Précontinent 2 (Source : plongee-infos.com)

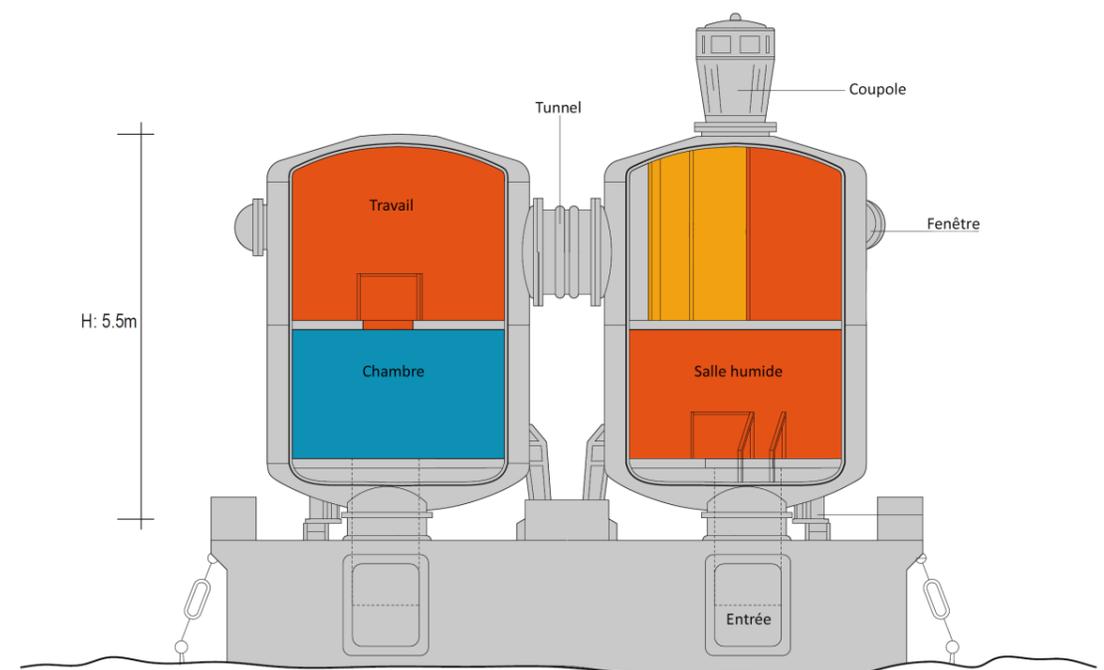


Fig.15 : Coupe de Tektite (Source : Sandra Häuplik-Meusburger)

Habitats in-situ antarctiques

L'Antarctique est considéré comme l'environnement terrestre le plus similaire à l'Espace en termes d'isolement, de dépendance à la technologie et aux ressources non productibles sur place, devant donc être réapprovisionnées régulièrement. Il existe près de soixante-quinze stations en Antarctique, mais seulement une quarantaine d'entre elles sont occupées durant l'hiver³³. Plus la localisation de la base est près du Pôle Sud, plus sa période d'isolation sera longue car les difficultés d'accès se densifient. Les bases se retrouvent en autonomie en moyenne huit mois, de mars à octobre. En hiver, il fait nuit pratiquement toute la journée et la température peut descendre jusqu'à -80°C avec un record mesuré à -89,9° par la station Vostok. Il n'existe que trois stations à but uniquement scientifique qui restent occupées en hiver.

La plus grande d'entre elles est la base américaine Amundsen-Scott (introduite précédemment et fig.16) qui héberge cinquante personnes en hiver contre cent-cinquante en été. La station est localisée proche du Pôle Sud et ses habitants se retrouvent isolés durant les huit mois d'hiver. Les habitants possèdent une chambre individuelle. Leur communication internet vers l'extérieur est limitée entre 2 et 4 heures par jour, correspondant au passage des satellites au-dessus de la station³⁴. La station Amundsen-Scott est donc plus isolée que l'ISS, qui est pratiquement en constante communication avec la Terre. En plus de 60 ans d'existence, il a été recensé seulement trois évacuations d'urgences, qui elles-mêmes peuvent prendre plusieurs mois. L'exemple le plus connu est celui de la médecin Jerri Nielsen qui se découvre un cancer du sein et dû se traiter et s'administrer elle-même une chimiothérapie. Elle prend conscience de ses fortes chances de mourir en Antarctique. Etant l'unique physicienne de la station, elle cache pendant trois mois sa maladie et commence à former le reste de l'équipage à prendre le relais si la situation venait à s'aggraver. A son retour, elle témoigne de la manière dont son environnement la rassure et la reconforte :

"Je ne peux pas décider si je suis effrayée ou soulagée. Je suis malade et très probablement en train de mourir [. . .] Et comme je n'avais pas peur. Ici, dans cet avant-poste solitaire entourée par le vide stupéfiant du plateau polaire, dans un monde dépourvu de bruit et de confort inutiles, j'ai trouvé la maison la plus parfaite que j'aie jamais connue. Je ne veux pas partir."

(NIELSEN, J., VOLLERS, M., Ice bound: A Doctor's incredible battle for survival at the south pole, New York, Miramax Books, 2001)

On trouve à l'opposé du spectre la station russe Vostok (fig.17). Créée en 1957, elle est restée identique depuis et continuellement occupée malgré la rudesse de son design. Elle est composée de baraquements datant des années 1950 qui protégeant peu ses habitants des

33 Cool Antarctica, https://www.coolantarctica.com/Community/antarctic_bases.php, consulté le 6 janvier 2021
34 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 87), Vienne, S.Bishop, Springer, 2021



Fig.16 : Photo aérienne de la station Amundsen-Scott

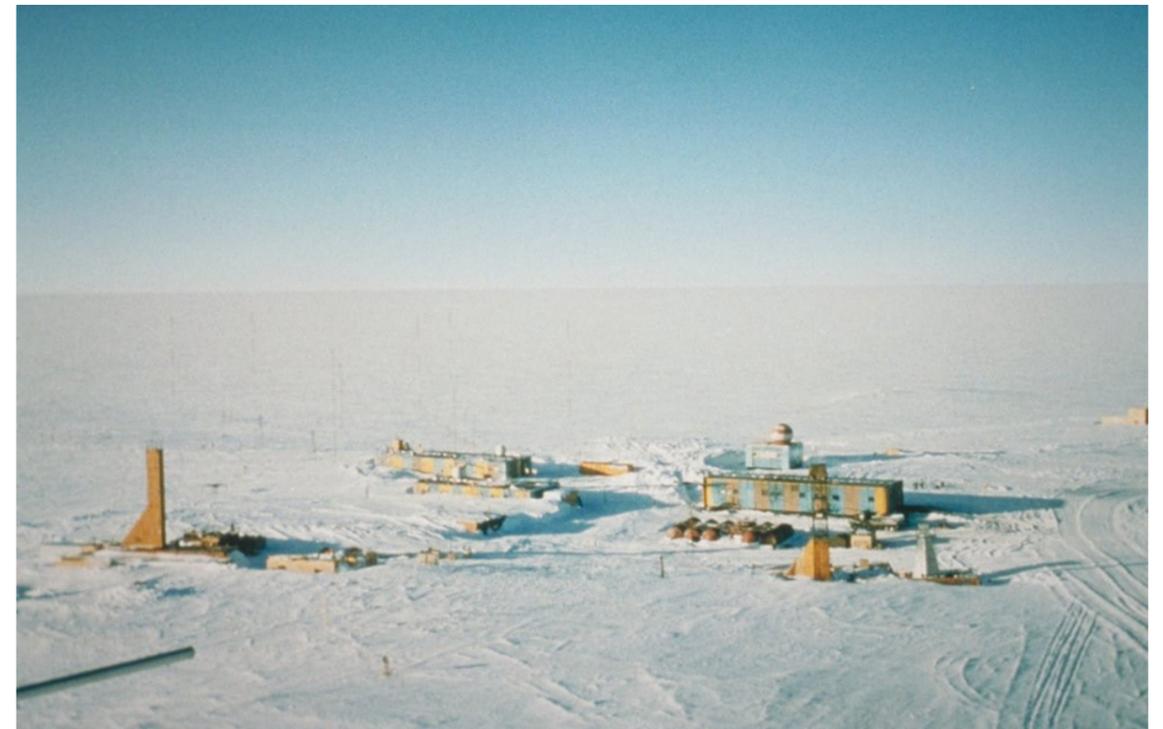


Fig.17 : Photo aérienne de la station Vostok, Le bâtiment rayé sur la gauche est la centrale électrique, le bâtiment rayé sur la droite est l'endroit où les chercheurs dorment et prennent leurs repas. Dans l'arrière-plan avec la boule à rayures rouges et blanches sur le dessus est le bâtiment de la météorologie (Source : NOAA)

caractéristiques extrêmes de son environnement : humidité de l'air presque nulle, manque d'oxygène dû à l'altitude, ionisation de l'air supérieure à la normal, un vent constant d'une moyenne de 18 km/h (5 m par seconde) et une nuit durant trois mois.. L'acclimatation à cet environnement peut prendre jusqu'à deux semaines³⁵ dont les symptômes se traduisent sous la forme de maux de tête, tremblements oculaires, douleurs aux oreilles, saignements de nez, sentiment de suffocation dû au manque d'oxygène, augmentation soudaine de la pression dans les vaisseaux sanguins, insomnies, vomissements, perte d'appétit, douleurs musculaires et articulaires ou perte de poids. Pour toutes ces raisons, la station Vostok est considérée comme l'un des endroits les plus difficiles à vivre sur Terre pour un humain. Ces multiples facteurs d'inconfort et de stress peuvent favoriser les altercations et tensions entre les membres d'équipage. Vostok est la seule base polaire à avoir dû gérer un potentiel meurtre. En 1959, deux scientifiques se disputèrent violemment à l'issue d'une partie d'échec résultant en une blessure qui aurait été fatale à l'un des membres, cependant, les avis divergent sur la question³⁶. Aux vues des conditions de vie des scientifiques, il semble qu'un design plus à l'écoute des comportements humains aurait potentiellement pu prévenir ce drame. Il faut noter que la station perdure actuellement sous son design d'origine.

La base polaire Concordia (fig.18) prend la forme de deux cylindres duplex accueillant en hiver une quinzaine de personnes. La composition en partie deux distinctes, permet d'isoler les espaces bruyants (tels que les laboratoires avec les machines) des espaces de repos, appelées en anglais "quiet tower" (la tour silencieuse). En plus des autres recherches scientifiques, cette station sert à étudier l'adaptation humaine face à l'isolement. Le cadre est particulièrement intéressant car l'isolement de la base dure neuf mois, contre par exemple 6 mois à McMurdo (la plus grande station antarctique qui se situe sur la côte du continent). Cette durée prolongée d'isolement permet de simuler plus fidèlement les séjours interplanétaires. La recherche à Concordia est centrée sur le comportement humain et l'impact du design sur la psychologie. Il a été mis en avant que les besoins spatiaux individuels changent selon les groupes socio-professionnels. Par exemple, les ingénieurs ont exprimé un plus grand besoin d'espaces privés tandis que les techniciens ont mis en avant l'importance des espaces de rencontres sociales et de loisirs. Un des résidents, Alexander Kumar, exprime lors d'une interview que, malgré l'excellente planification des lieux, il manque un grand espace libre multifonctionnel³⁷. Cet espace pourrait servir à jouer au football ou au volleyball, autant qu'à organiser des concerts. En effet, les résidents ne pouvant sortir à l'extérieur pour leurs loisirs, cet ajout semblerait augmenter leur qualité de vie. Ce type de structure a su prouver son efficacité dans la station Amundsen-Scott où les habitants y organisent des concerts à leur propre initiative.

35 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 92), Vienne, Springer, 2021

36 idem

37 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, Interview de Alexander KUMAR, juillet 2012, disponible en ligne à <https://cba.fro.at/65695>



Fig.18 : Photo aérienne de la station Concordia
(Source : ESA)

Il existe sur Terre des habitats qui simulent certaines des conditions spatiales et offrent donc aux architectes d'étudier un large échantillon de design et leurs répercussions sur la psychologie et le corps humain. Ces références donnent la possibilité aux architectes d'observer et d'apprendre quoi faire ou ne pas faire. Ils peuvent ainsi développer une meilleure architecture spatiale et perfectionner un design vertueux. Il apparaît que, par exemple, en isolement un humain a besoin de son espace intime pour se retirer du reste du groupe. En revanche, cela n'exclut d'inclure des espaces de rencontre qui doivent être suffisamment spacieux et adaptable qui est essentiel à la cohésion du groupe et au bien être individuel.

1.3.2. Une architecture customisée grâce retour d'expérience des astronautes

Les architectes développent un second outil pour pallier à leur manque d'expérience de l'environnement spatial. Outre l'étude d'habitats analogues, les architectes sont à l'écoute des astronautes afin d'améliorer leurs espaces de vie et de travail. La "population spatiale" étant d'une taille modeste, offre l'opportunité de converser avec ses parties. L'architecte peut ainsi ajuster au mieux le design et parfois de le concevoir sur mesure. A partir des retours d'expérience d'astronautes, cette partie présente un bilan des points positifs et négatifs du design des stations spatiales construite jusqu'à l'heure actuelle.

Aux retours de leur séjour, les astronautes transmettent des suggestions d'améliorations de leur environnement de vie à bord de l'ISS. Nous pouvons illustrer cette démarche par les nouveaux quartiers d'équipages qui ont été améliorés à partir des retours sur ceux de Skylab. Ces derniers, conçus par le designer Raymond Loewy, représentaient déjà une nette avancée car chaque membre possédait sa propre cabine. Malgré l'attention du concepteur apporté à l'intimité, les astronautes reportent une mauvaise qualité de sommeil dû aux bruits de la station et des autres membres, ainsi que des infiltrations de rayons de lumière. L'architecte Constance Adams (Lockheed Martin's) remarque qu'à cause du manque d'attaches dans l'ensemble de la station, l'équipage ne peut ajuster ou relocaliser son sac de couchage³⁸. De manière générale, la station manque en modularité et en possibilité de reconfiguration en dépit de la variété des maintiens qui sont intégrés et testés.

Le rangement comme principal préoccupation des astronautes

Le rangement semble être actuellement le principal problème à bord de l'ISS et cela toujours aujourd'hui. Selon le sondage anonyme réalisé par Sandra Häuplik-Meusburger, le vocabulaire du désordre compose deux des quatre mots ("desordered" et "stowage") les plus utilisés pour exprimer l'inconfort le plus notable à bord des stations³⁹. Ci-après, quelques témoignages anonymes récoltés par l'auteure sur l'ordre à bords des stations :

"Concernant la vie à bord de l'ISS, la chose la plus inconfortable pour moi étant l'emmêlement des câbles, la nature négligée et en désordre des intérieurs, et l'extrême fonctionnalité avec le peu d'attention à l'esthétique. Vivre dans un environnement en désordre doit avoir un impact psychologique. les câbles sont un défi difficile car il y a tellement de câblage hérité qui ne peut pas être modifié, ce qui nécessite une méthode très ad hoc/accumulative de changement ou de modification de l'équipement, mais il doit y avoir un meilleur moyen"

38 ADAMS, Constance, "Defin(design)ing the Human Domain: the Process of Architectural Integration in Long-Duration Space Facilities", *Proceedings of the 28th International Conference on Environmental Systems* (p.992-999), Society of Automotive Engineers, Warrendale, 1999, consulté sur <https://www.jstor.org/stable/44735826>

39 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 145 à 153), Vienne, Springer, 2021

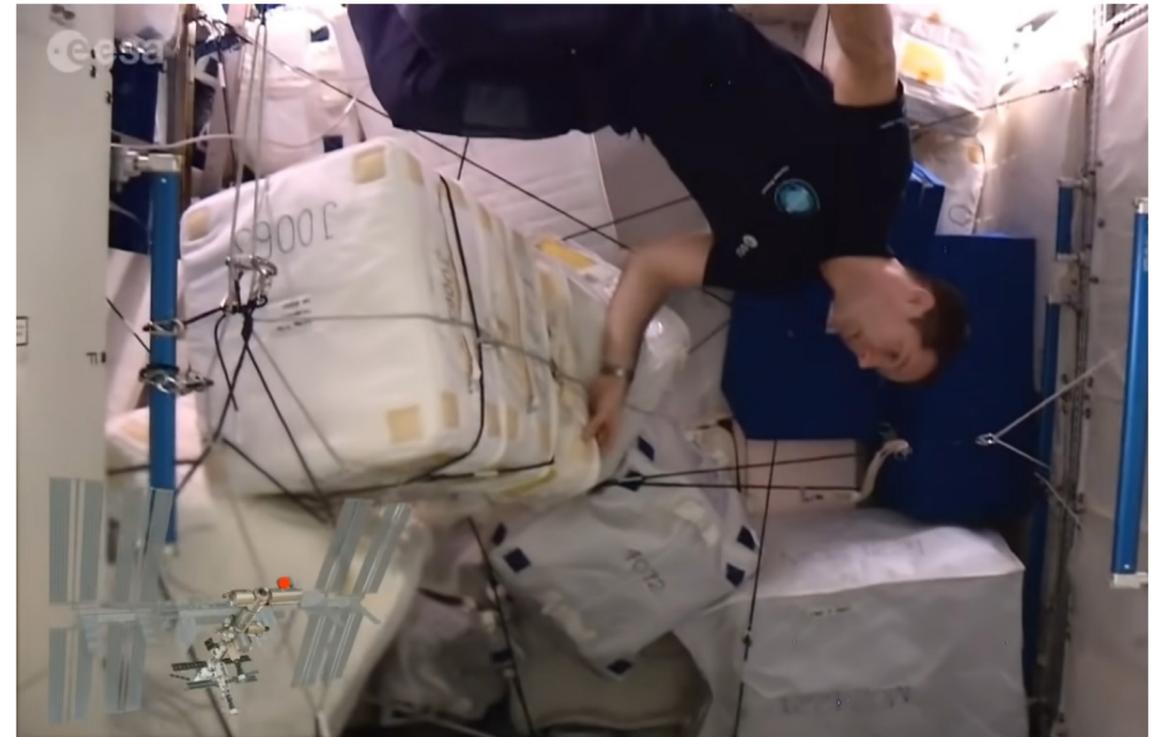


Fig.19 : Photo du module de rangement japonais présenté par l'astronaute Thomas Pesquet (Source : ESA, Visite complète de la Station Spatiale avec Thomas Pesquet, Youtube, novembre 2021)

"L'environnement de vie de l'ISS est caractérisé comme étant un volume habitable très "rempli" and "bondé" avec un manque d'intimité affectant les relations interpersonnelles et les dynamiques de groupe. "

"Rangement et système de gestion de l'inventaire mal établis; difficulté à trouver les objets nécessaires en un temps raisonnable. Surpeuplement d'articles rangés/stockés de sorte que vous ne puissiez pas vous déplacer ou travailler sans déplacer les objets, et suivre où vous les avez déplacés. Sur Skylab, l'effet jack-in-the-box signifiait que lorsque les compartiments étaient ouverts, les objets flottaient et qu'il était difficile de remettre les choses dans le même volume. Sur MIR, il était difficile de se déplacer. Souvent, vous ne pouviez pas voir à plus de deux mètres devant vous [...] Sur l'ISS avant les premières expéditions de longue durée, de nombreux arrimages avaient été déposés sur de nombreux vols de navette précédents. Le suivi et la recherche des objets où les objets avaient été placés étaient souvent difficiles. L'équipement n'a pas été testé de manière adéquate avant la mission. L'équipement d'exercice comme la surface de roulement du tapis roulant de la station ISS s'est effondré en quelques jours d'utilisation en raison de tests inadéquats ; mis en danger la mission et aurait pu exiger un retour prématuré."

Le rangement et sa gestion semblent être une question toujours entière depuis les premières stations spatiales. Cependant, la gestion devient plus complexe car les stations restent de plus en plus longtemps en orbite et sont continuellement habitées résultant en une accumulation croissante des objets. Des modules cargos sont régulièrement envoyés pour approvisionner la station et récupérer les déchets produits afin de les brûler lors de la réentrée. Un nouveau module, Nauka, lancé par Roscosmos en juillet 2021 a agrandi l'ISS. Le module comprend principalement des rangements et permet d'accueillir un septième membre permanent. Lors de la visite de l'ISS par Thomas Pesquet en novembre 2021⁴⁰, les racks sont déjà remplis et des sacs de stockage occupent le "sol" du module. Effectivement, même si des emplacements de rangement ont été ajoutés, la présence de plus en plus nombreuses des astronautes comble ces espaces libres. L'agence spatiale japonaise a été la seule à penser à créer un module réservé uniquement au stockage. Ce module est accroché au plafond de leur propre laboratoire (module Kibo, fig.19 et voir annexe D et E) ainsi les astronautes l'appellent "le grenier". En dépit des efforts des architectes et des concepteurs d'espace à fabriquer un espace accommodant de nombreux rangements, les habitants des stations ressentent une oppression à cause de l'accumulation des objets et le désordre.

Demande d'intimité et d'espaces personnels

Les astronautes possèdent leur propre espace de sommeil depuis la création de Skylab en 1973. Les membres d'équipage de passage ou en surnombre durant la relève sont une exception et doivent dormir dans des cabines temporaires ou au travers de la station en accrochant leurs sacs de couchage aux racks. Les astronautes expriment un manque d'espaces privés et intimes. Mise à part l'hygiène faciale située en face des sanitaires dans le noeud 3 (fig.20), les espaces réservés à l'hygiène corporelle semblent absents des plans de l'ISS. Les astronautes ne prennent pas de douche à proprement parler, leur hygiène est effectuée à la lingette. Ce principe requiert également un certain degré d'intimité et son emplacement semble donc libre. Durant la visite de l'ISS par Thomas Pesquet en Novembre 2021, une situation imprévue met en avant le problème que peut poser l'absence d'espace spécifique à l'hygiène corporelle. Alors que Thomas Pesquet présente le module Kibo, il dérange son collègue qui se prend sa douche dans le module "grenier".

"trop de volume commun comparé à trop peu voir pas de volume individuel privé. Chacun a sa propre manière de gérer ses affaires personnelles. Avant mon premier vol - un équipage de six comprenant trois bleus- nous étions tenus de d'identifier chacun à bord de la navette notre propre petit "cagibi" où nous pouvions chacun stocker nos propres affaires pour nos activités quotidiennes. Si on ne fait pas cela, on risque de se retrouver avec nos affaires rangées ça et là d'une manière désorganisée, ce qui peut rapidement irriter les autres"

"L'environnement de vie de l'ISS [...] manque d'intimité affectant les relations interpersonnelles et les dynamiques de groupe. "

⁴⁰ ESA, Thomas Pesquet fait visiter l'ISS avant son retour sur Terre, Youtube, 6 novembre 2021, consultée le 8 janvier 2022



Fig.20 : Photo de l'espace réservé à l'hygiène (brossage de dents, coiffure, shampoing, rasage, ...), au mur en bleu se trouve les trousse de toilettes personnelles. Astronaute Sunita Williams, saisisant sa brosse à dents (Source : ESA, Visite complète de la Station Spatiale avec Thomas Pesquet, Youtube, novembre 2021)

Les stations spatiales ne sont qu'au début de leur évolution d'un état de camping à celui d'un foyer. Les caractéristiques environnementales et les dispositions de transportation ne facilitent pas l'amélioration des espaces de sommeil et d'hygiène, et nécessite un sens fort de la communauté de la part de l'équipage. Les retours des astronautes expriment le besoin d'une plus grande séparation entre les espaces privés et communs, ou même entre espaces privés.

Les tables forment un espace de réunion et de socialisation

La table à manger est le centre et la chaleur d'un foyer. Il est primordial qu'elle soit bien designée afin d'être un atout au moral de l'équipage. Les astronautes ont observé une réelle évolution depuis les premières stations spatiales et en sont de plus en plus satisfaits. Les repas sont un moment de détente et d'échange entre les membres qui se réunissent autour de la table à manger. En apesanteur, les astronautes ne se placent pas de manière conventionnelle à la table, le design doit être ainsi redéfini par les architectes. Le design des diverses tables à bord de l'ISS reçoit des retours très positifs. La table à manger située dans le noeud 1 évolue avec le temps et la croissance des besoins. Entre 2017 et 2021, la table changea de côté du module afin d'ajouter un four et un réfrigérateur supplémentaires⁴¹. Ainsi, l'espace de préparation permet d'être séparé de celui de la table à manger (fig39 p.83). L'ère numérique permet l'ajout d'un

⁴¹ ESA, Thomas Pesquet fait visiter l'ISS avant son retour sur Terre, Youtube, 6 novembre 2021, consultée le 8 janvier 2022

ordinateur pouvant servir à regarder des films durant le repas ou rechercher tout autre type d'informations⁴². Les modifications de la "table de bricolage" (fig. 21), situées dans le noeud 2, derrière les quartiers de sommeil, est particulièrement appréciée des astronautes. De part et d'autre du module, se trouvent de larges tables inclinables conçues pour la maintenance et parfois utilisées pour réaliser des expériences scientifiques. A chaque visite virtuelle, les astronautes expriment leur contentement pour cet élément architectural qui peut également être déplacé dans un autre endroit de la station.

"Avoir une table autour de laquelle l'ensemble de l'équipage puisse s'asseoir à prouée être d'une excellente utilité. Des repas ont été partagés et des réunions ont été tenues. Le temps libre était passé à admirer par la fenêtre [qui s'y trouvait]"
témoignage à bord de Skylab

"Avoir un endroit commun où l'équipage peut se rassembler et partager un bon moment, promouvoir la socialisation à bord ; l'équipage apprécie être ensemble et fêter les succès ou bien de discuter de sujets affectant la mission. Plus la pièce est amicale et chaleureuse, plus l'ambiance sera positive. Dans la navette spatiale, nous n'avions que le pont intermédiaire, ou le pont de contrôle de vol qui n'était pas idéal. Dans MIR, la table du module principal était un bon endroit pour ce type de rassemblement"

La typologie des espaces communs s'est améliorée dont notamment celui de la nourriture grâce au design des diverses tables qui sont améliorées et rendues plus fonctionnelles. Pour des séjours plus longs, il semble essentiel d'intégrer un espace spécifique aux loisirs pour visionner par exemple des films, jouer aux jeux vidéos, ...

Les fenêtres sont le principal loisir des astronautes

L'activité favorite des astronautes est, depuis le commencement des vols spatiaux, l'observation vers l'extérieur. Selon un sondage sur la caractéristique la plus positive durant un séjour spatial, le mot "coupole" est le vocabulaire qui revient le plus⁴³. Effectivement, la coupole (fig.22) est un module ayant été ajouté en 2010 qui offre une vue à 360°C. Elle fut réalisée par l'entreprise Thales Alenia Space en coopération avec leur département d'habitabilité et d'architecture. Un architecte est à la tête du département multidisciplinaire composé d'une équipe d'architectes, de sociologues, d'ergonomes, d'économistes, etc⁴⁴. Le succès de cet élément architectural réside sûrement dans son approche transdisciplinaire. Bien que, le projet ne soit pas dans les priorités essentielles aux succès des missions, la coupole rend la vie des astronautes bien plus plaisante.

⁴² Documentary Tube, *HOW IT WORKS: The International Space Station*, Youtube, 3 juillet 2015, consultée le 28 décembre 2021

⁴³ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p. 152), Vienne, Springer, 2021

⁴⁴ Entretien de HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT-PASSOT Prève, Novembre 2021



Fig.21 : Photo des deux tables de bricolage en bleu situées de part et d'autres de l'astronaute Thomas Pesquet (Source : ESA, Visite complète de la Station Spatiale avec Thomas Pesquet, Youtube, novembre 2021)



Fig.22 : Photo d'une astronaute prenant des photos depuis la coupole (Source : NASA)

“La coupole localisée dans le noeud 3 a procuré des heures de relaxation et d’investigation scientifiques à de nombreux membres d’équipage depuis son arrivée en 2010. La coupole comprend un poste de travail électronique et autant de maintiens que nécessaires. ”

“La coupole de l’ISS a eu le plus grand impact sur le bien être des équipages, apportant de larges vue et la possibilité de traquer des particularités terrestres et spatiales, et apportant à l’équipage un activité de loisir relaxante et divertissante. Durant vingt ans, les directeurs du programme tentent d’abandonner la coupole pour des raisons économiques. La présence de la coupole a rendu mon séjour bien plus facile et plaisant.”

“La vision de la Terre par la coupole est essentielle et fait se sentir l’équipage “pas si loin” des gens qu’il aime”

Sandra Häuplik-Meusburger rappelle que “si les gens sont plus heureux dans leur lieu de travail, ils effectuent mieux leur travail”⁴⁵. La coupole est un exemple de design nécessaire aux astronautes pour les missions de plus longues durées à venir. Il n’en va pas de la santé physique des habitants mais de leur soutien psychologique et moral qui, de plus, sont la clef du succès des missions.

Parmi les clés du design spatial on trouve un espace intime, privé et personnalisable, ainsi qu’un espace de rassemblement flexible dans son utilisation (loisir et professionnelle). L’architecte spatiale et chercheuse Sandra Häuplik-Murburger ajoute à la liste un troisième espace nécessaire de fonction mixte : “Ensuite, vous avez besoin d’un espace où vous pouvez parler de quelqu’un, et vous ne voulez pas que l’autre le sache.” . Le travail de l’architecte spatial se trouve dans l’attention aux détails, souvent aux objets. C’est pourtant cette petite attention qui impacte la vie des astronautes de manière méliorative. Les architectes ont besoins du retour des équipages sur leur design afin de poursuivre leurs améliorations.

⁴⁵ Entretien de HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT--PASSOT Prève, Novembre 2021

2. La formation progressive d'une nouvelle discipline par les architectes

Introduction

Cette partie étudie la création du métier d'architecte spatial à part entière et de sa recherche de reconnaissance comme prescripteur. Dans un premier temps, nous découvrirons chronologiquement trois figures d'ingénieur, d'architecte et de designer d'espace. Ces trois figures ont été pionnières dans leur vision de ce que devait devenir l'architecture spatiale et ont prouvé son utilité. Nous observerons ensuite quel a été leur impact sur l'architecture spatiale contemporaine par l'analyse de quatre "pièces" de l'habitat spatial. L'évolution vers le design actuel et les perspectives d'orientation du design seront identifiées du point de vue de l'architecte. Dans un dernier temps, nous mettrons en lumière les individus et organisations qui soutiennent la reconnaissance du métier d'architecte spatial et qui encouragent le progrès architectural spatial.

Chesley Bonestell, Fred Freeman et Rolf Kelp. Leur objectif est de sensibiliser la population américaine à la faisabilité du projet par la vulgarisation des concepts scientifiques derrière ainsi qu'à la faisabilité financière (moins d'un treizième du budget d'armement pour la guerre de Corée). Il y exprime aussi une nécessité ancrée dans le contexte de la guerre froide. Pour lui, la première nation ayant un satellite en orbite vaincrait la guerre car les intentions des Etats-Unis seraient entièrement pacifique contrairement au bloc soviétique.

Ce projet porté par des scientifiques et des artistes exprime une intégration détaillée du confort quotidien humain et inspire les générations à venir d'architectes spatiaux. Le numéro le plus connu de la série paru en mars 1952 : L'homme va bientôt conquérir l'Espace. Wernher Von Braun et Willy Ley y présentent leur projet de station spatiale avec son système de transport par les dessins de Chesley Bonestell. Leur vision se veut la plus réaliste possible. A l'aide de dessins écorchés de la station, ils présentent les différents programmes dont la station aurait besoin pour fonctionner (centre de communication radio, mesure météorologique de la Terre, observation télescopique de la Terre et de l'Espace, chambre de développement photographique, système de chauffage et d'air conditionné, ascenseurs, quartiers de repos, etc). L'exhaustivité et la précision avec lesquelles les artistes et les scientifiques décrivent leur vision de la station spatiale rendent le projet tout à fait crédible aux yeux de la population et au sein de la population américaine.

La gravité artificielle

Leur plus grande ambition pour ce projet de station spatiale est le principe de gravité artificielle par rotation. Il semble essentiel aux scientifiques de l'époque de recréer un environnement proche de celui de la Terre grâce à cette technologie. Tout en relatant les prodiges d'une potentielle gravité artificielle, ils en expriment aussi les contraintes. En raison du mouvement rotationnel, les sections diamétralement opposées de l'anneau doivent avoir un poids équivalent de sorte à ne pas déséquilibrer la station. L'objectif serait d'obtenir une gravité équivalente à la Terre, soit 1G. Or, l'intensité de la gravité artificielle dépend de la taille de son rayon de l'anneau rotationnel et de sa vitesse tangentielle (fig.24). De cette façon, il n'y a pas de gravité au centre de la rotation, celle-ci s'accroît plus on se déplace en périphérie de l'anneau. Les astronautes subissent donc un différentiel de gravité entre leur tête et leur pieds. Le rayon de la station doit donc être suffisant afin que ce différentiel ne soit pas néfaste à leur santé. La vitesse de rotation, exprimée en rotation par minute (rpm), augmente avec le rayon pour une gravité donnée. Dans le cas de la station spatiale proposée par Wernher Von Braun et Willy Ley, le rayon mesurerait 30 m. Selon le tableau de synthèse des études sur le confort physique des astronautes en environnement de gravité artificielle menées depuis les années soixante (fig.24), ce rayon ne se situe pas dans la zone de confort optimal peu importe sa vitesse de rotation.

D'autres caractéristiques de design sont à prendre en compte en gravité artificielle, telles

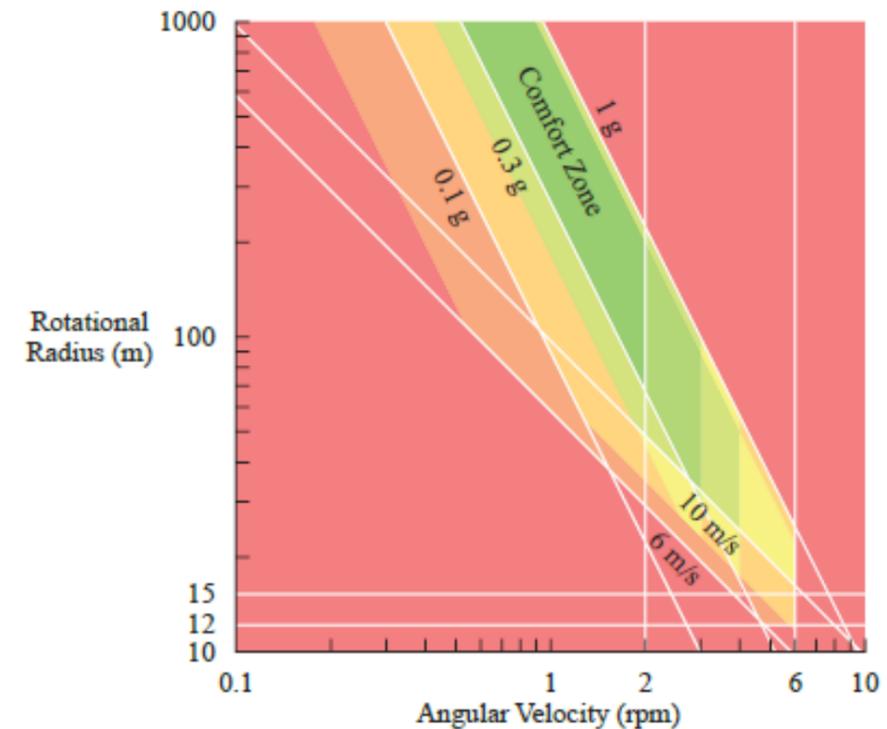


Fig.24 : Tableau de confort face à la gravité composé à partir de plusieurs études. Vitesse de rotation en rotation par minute (rpm) indiqué horizontalement, taille en mètre du rayon de rotation indiqué verticalement. La zone verte décrit le confort optimal, la zone rouge représente les conditions non confortables, les couleurs intermédiaire dépeignent les conditions pour lesquels les études divergent.

(Source : HOWE, A. Scott.; SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture*, AIAA, 2009)

notamment l'inclinaison des surfaces. En effet, en situation de gravité artificielle la force de Coriolis (liée aux axes NSEO) se déforme en fonction du rayon et de la vitesse de rotation. En conséquence, les objets tombent ou rebondissent de manière non intuitive pour notre sens habitué à la gravité terrestre 1G et les sensations de déplacement sont différentes de l'environnement observable. Nous pouvons remarquer sur les dessins réalisés que les planchers sont courbes. En effet, si Wernher Von Braun avait désigné des planchers plans, les astronautes auraient eu l'impression de se déplacer en pente. La sensation de planéité du plancher s'obtient en conservant sa perpendicularité au rayon.

Les déplacements verticaux sont un sujet qui pose des problèmes de perte de repères d'orientation spatiale. Pour ce type de déplacements, les escaliers sont le design le plus sûr. Quant à Wernher Von Braun, il propose un escalier hélicoïdal. L'efficacité de ce système peut être remise en question par la désorientation du déplacement circulaire en simultané du changement de gravité lié au déplacement vertical. Cependant, les échelles sont privilégiées pour leur caractère efficace dans les projets d'habitats en gravité artificielle. Son placement et sa hauteur sont primordiales pour la sécurité des astronautes. L'exemple de l'échelle présente dans le film *2001 : L'Odyssée de l'Espace*, présente une échelle parallèle à l'axe de rotation. L'astronaute aurait la sensation au fur et à mesure de la descente que l'échelle se courbe dans



Fig.25a : A gauche, personnage fictif descendant de l'échelle du centre vers la périphérie.

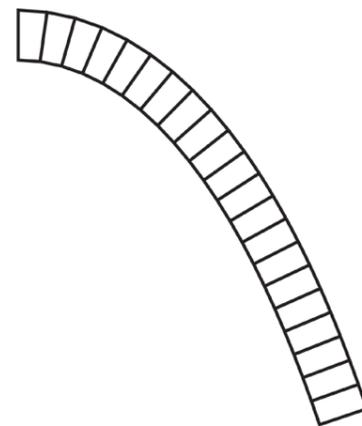


Fig.25b : A droite, inclinaison apparente de l'échelle de la figure précédente causée par l'accélération latérale de coriolis (Source : KUBRICK, S, 2001 *l'Odyssée de l'espace*, 1968)

le sens de rotation. L'architecte doit penser à trois clés du design des circulations verticales dans un projet en gravité rotationnelle :

- l'échelle doit être perpendiculaire au plan de rotation afin que celle-ci reste de sensation linéaire et verticale,
- séparer le sens de montée de celui de la descente afin de ne pas être tiré en arrière lors de l'ascension,
- si possible désaxer l'échelle de son axe afin qu'elle serve d'escalier.

De prime abord, minimiser la taille du rayon ainsi que la vitesse de rotation semblerait éviter des surcoûts en énergie et en construction. Toutefois, ses coûts ne seraient pas rentabilisés par la suite à cause de ceux potentiels d'accoutumance à une gravitation déformée. Il faudrait inclure dès la conception un surcoût de recherches, de tests et d'examen scrupuleux des hypothèses tirées de l'expérience terrestre. D'autres encore, pourraient inclure une sélection d'équipage plus stricte, des périodes plus longues d'entraînement et d'acclimatation ainsi que la diminution de la productivité de l'équipage face à la baisse du confort. Wernher Von Braun et son équipe ont su pour l'époque proposer un projet aussi réalisable que l'était celui d'envoyer un homme sur la Lune. Toutefois, ces travaux n'ont jamais été réalisés au profit de ce dernier objectif. Jusqu'à aujourd'hui le principe des stations spatiales lancées en orbite est basé sur le principe d'apesanteur. Outre le coût lié à la construction d'une station ayant recours à la gravité artificielle, cela reviendrait à négliger les avancées techniques et humaines que nous avons déjà effectuées sur l'apesanteur. Wernher Von Braun a su proposer une vision d'architecte à mi-chemin entre son savoir scientifique et ses amis artistes. Mais seuls ses projets d'ingénierie, à l'instar de la fusée Saturne V, furent réalisés. Les designers spatiaux venus après lui, tels que Galina Balachova et Raymond Loewe, ont cependant conservé cette liberté d'expérimentation dans le domaine technique de l'aéronautique. Ils ont en quelque sorte poursuivi ces recherches d'orientation dans l'espace et de potentiel gravité artificielle.

2.1.2. Galina Balachova : le travail sur la couleur dans l'orientation dans l'Espace

La première architecte spatiale est Galina Balachova. De formation architecte, elle intègre le OKB-1 (Soviet Experimental Design Bureau) en 1957 à Korolyov. Son travail consiste à s'occuper de la rénovation des bâtiments et de l'urbanisation de la ville. En 1963, elle est approchée secrètement par Sergueï Korolev du département d'aéronautique (ingénieur et fondateur du programme spatial soviétique). Ce dernier prend conscience tôt que la dimension du confort dans le design des vaisseaux spatiaux soviétiques est importante pour la santé des astronautes. Il observe que les ingénieurs spatiaux ont designé des boîtes métalliques peintes de couleur agressive à l'intérieur. C'est pour cette raison qu'il invite G.Balachova à intégrer le programme spatial de l'OKB-1 en 1963 dans l'optique de concevoir l'intérieur de vaisseaux Soyouz (fig.26). Le supérieur de son ancien département lui avait interdit de participer au programme spatial, elle devra donc travailler chez elle durant un an, dans le plus grand des secrets. En 1966, pour le programme lunaire, S.Korolev institue G.Balachova chef architecte du département d'aéronautique⁴⁷, instaurant officiellement la toute première architecte spatiale de l'histoire. Au cours de son travail, G.Balachova découvre par elle-même les principes basiques de conception architecturale dans un environnement sans gravité. Elle accomplit de grands progrès sur l'orientation du corps dans un espace en microgravité.

Orientation du corps par la couleur et la matérialité

Le premier principe instauré par Galina Balachova durant son travail sur les vaisseaux Soyouz est de penser le design intérieur comme s'il y avait de la gravité, c'est-à-dire à projeter des murs, un sol et un plafond. Sans ces repères élémentaires, le corps humain est incapable de s'orienter et un inconfort psychologique voir physique peut s'installer. La solution apportée par G.Balachova est très simple : attribuer des couleurs contrastées au sol, au plafond et aux murs afin de les repérer facilement. La couleur sombre attribuée donne une impression de lourdeur pour signifier le sol et à l'opposé le plafond se voit assigner une couleur claire. Le choix de couleur pour le sol se porte sur le vert car sa perception dans l'Espace ne change pas, contrairement au rouge qui semble noir.

Bien que travaillant seule et ayant beaucoup de liberté dans le design, G.Balachova exprime sa reconnaissance aux ingénieurs matériaux qui ont su la guider dans ses choix. L'aide de ces derniers influence son design. Elle remarque ainsi, durant la coopération des blocs soviétiques et américains sur le programme Soyouz, la différence de méthodologie qui en découle. Là où les soviétiques utilisent des velcros pour se maintenir en position, les américains intègrent des poignées de maintien dans leur design. Chacun des partis développe un outil de confort. Les premiers se sont penchés sur l'ambiance et les sensations de l'espace par leur attention

⁴⁷ BALACHOVA Galina par MEUSER Paul dans *Architectural Guide, Moon*, Berlin, DOM Publisher, 2019

portée sur la matérialité. Tandis que les deuxièmes ont poussé le design intégré et ont laissé un environnement métallique plus brutal.

Une partition de l'espace selon les usages

Durant la conception du module lunaire, le code couleur est aussi attribué à la signification des fonctions. Le sol et le plafond conservent leur couleur et le bleu est assigné à l'espace de travail. En effet, le volume attribué au travail est dès le premier programme spatial grandement majoritaire sur le reste. Lors de leurs missions, les astronautes vivent dans leur lieu de travail auxquels les ingénieurs ont simplement ajouté des équipements pour subvenir aux besoins vitaux. Grâce à la couleur bleue, G.Balachova vient délimiter visuellement l'espace décerné au travail de celui du lieu de vie. Durant son travail pour la station MIR (fig.27), l'architecte développe plus amplement la division des espaces par la couleur.

L'orientation du corps dans l'espace est assurée, en outre, par un design au plus proche de l'architecture terrestre. Selon G.Balachova, le but du design spatial est toujours le même : réaliser un espace confortable et habitable pour l'homme. Il devrait même être encore plus accentué, afin de compenser l'inconfort lié à l'apesanteur. Elle s'exprime clairement dans l'espace où l'astronaute peut dormir, où il peut manger, ... Effectivement l'apesanteur, même si elle allège le poids du corps, complique la manière de vivre et donc de penser l'espace.

Dans son premier design pour le vaisseau Soyouz, G.Balachova installe les fonctions essentielles, inspirées des designs terrestres : un lit sous la forme d'un sofa, des toilettes pouvant servir de siège lorsqu'elles sont fermées et un panneau de contrôle. Le volume devant être suffisant pour que l'astronaute puisse mettre et enlever sa combinaison. Lors de la présentation à Sergueï Korolev, ce dernier trouve le design pas assez moderne. Les réflexions architecturales sur les vaisseaux sont dès le début ancrées sur des références terrestres à partir du moment où le design intérieur est soigné par un autre corps de métier que les ingénieurs.

Son travail se situait en amont des ingénieurs et en aval des ingénieurs. S'ils avaient pleinement coopéré, les ingénieurs n'aurait jamais prêté attention à ses suggestions du fait de son métier et d'être une femme. Cependant, après la mort de S.Korolev en 1966, plus personne ne comprend le travail de G.Balachova et elle est assignée à des tâches moins intéressantes. Galina Balachova travaille pour l'OKB-1 de 1963 à 1991. Elle est la première et dernière architecte à avoir été employée en URSS pour le programme spatial.

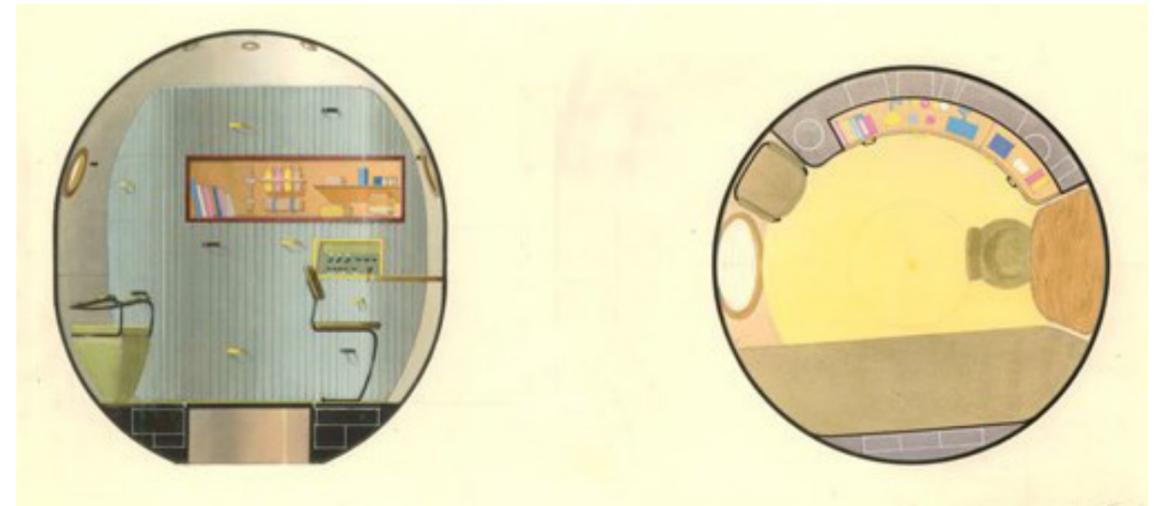


Fig.26 : Dessins initial du module Soyouz réalisé par Galina Balachova, aquarel
(Source : Galina Balachova archives)



Fig.27 : Dessin pour la station MIR par Galina Balachova
(Source : Galina Balachova archives)

2.1.3. Raymond Loewy : un confort qui passe par l'attention aux objets

Raymond Loewy est un designer industriel renommé, d'origine française et naturalisé américain. Le design du logo de la marque LU et de la bouteille Coca-Cola sont sûrement ses travaux les plus connus. Il ouvre une agence à son nom au début des années 1930 et en 1935, il ouvre un département spécialisé en architecture dont il confiera la direction à William Snaith⁴⁸. Ce dernier, architecte de formation, deviendra son associé. C'est en 1967, qu'ils répondent ensemble à l'appel de la Nasa.

Durant l'étude de faisabilité de la future station spatiale américaine Skylab, la Nasa fait appel à des consultants externes et spécialisés dans le design d'espace. On observe une prise de conscience de la nécessité du confort de ces environnements jusqu'alors froids et mécaniques. Une philosophie des espaces pratiques et appréciables émerge. Elle permettrait de meilleures performances au travail. Certains visionnaires imaginent déjà une démocratisation de l'Espace. Dans cette optique, George Muller, qui est à la tête du bureau des vols habités de la Nasa et à qui nous devons le succès des missions Apollo, se voit chargé de cette mission. Il contacte donc Raymond Loewy et William Snaith. La demande formulée par la Nasa est d'imaginer un environnement assurant le support psychologique et physiologique, la sécurité et le confort des astronautes dans cet espace confiné. R.Loewy doit travailler à partir des premières études réalisées par la Nasa pour le nouveau projet. Les réponses sont ancrées dans le style futuriste de la fin des années 1960, présentant des couleurs vives et des formes molles. Le design rappelle fortement celui de *2001, l'Odyssée de l'espace* (1968) par Stanley Kubrick. Le rapport vient donc créer un pont entre la science et la science-fiction.

Le tandem Raymond Loewy et William Snaith répond à la Nasa avec un rapport d'habitabilité, d'une trentaine de pages, qu'ils exécutent tout au long de l'année 1972⁴⁹. L'aspect plastique fortement assumé de leurs propositions empêche de retenir l'ensemble du design pour la version finale de la station spatiale. Cependant, cela mène à d'importantes réflexions sur la conception des espaces habitables en orbite. Leur travail a couvert de vastes sujets, s'intéressant jusqu'aux combinaisons spatiales ou au sac de couchage des astronautes et s'intéressant à des design de gravité artificielle hypothétique.

Agencement général

L'innovation de la station spatiale Skylab passe par la partition des espaces selon leur fonction (fig.29). L'architecture terrestre admet depuis longtemps ce principe comme pierre de fondation. Cependant, les espaces spatiaux étaient jusqu'à présent trop limités pour en offrir la possibilité. Skylab représente 320m³ contre un total de 10.5m³ pour les deux modules qui composent les missions Apollo. Pourtant, les deux projets accueillent un équipage de trois

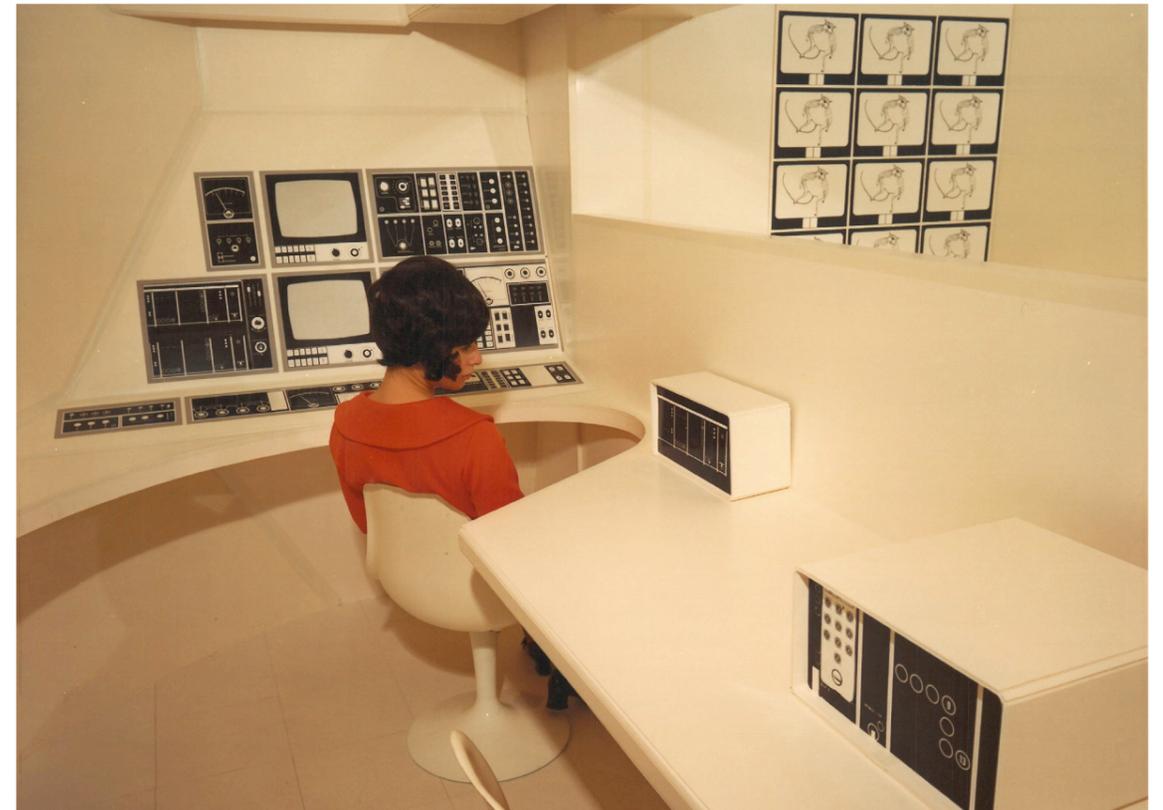


Fig.28 : Proposition extrapolée en gravité artificielle par Raymond Loewy après l'étude de faisabilité réalisée pour Skylab (Source : NASA)

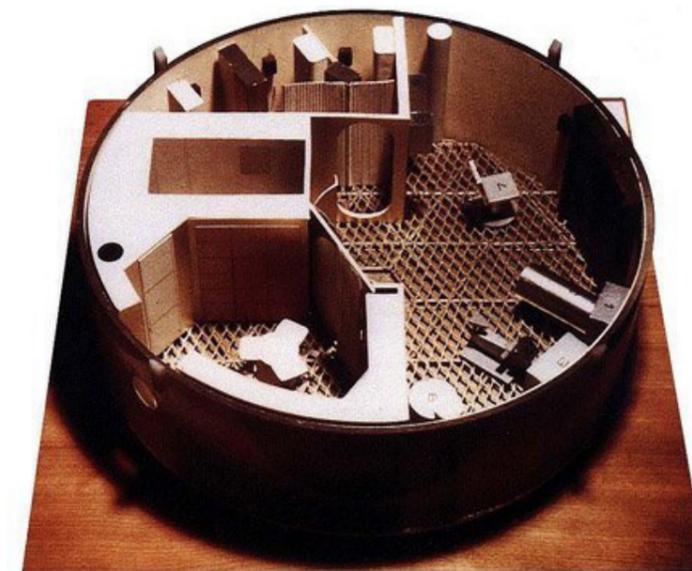


Fig.29 : Maquette du design final de Skylab réalisée par Raymond Loewy (Source : Raymond Loewy archives)

48 BOUTARD, François, *Raymond Loewy, le pionnier du design industriel*, Design Market Magazine, 2016

49 LOEWY, Raymond, SNAITH, William, "Hability Study for orbital Shuttle", Nasa, 1972

personnes.

Loewy insiste sur la pratique et la cohésion que ce système apporterait. Il est essentiel que les objets puissent être rangés de manière ergonomique et facile d'accès afin d'être profitable au travail. Le confinement dans la capsule peut mener à des tensions entre les trois membres de l'équipage. Loewy a pour objectif d'améliorer les relations grâce au design des espaces. Il propose, par exemple, une table triangulaire afin qu'aucun membre ne puisse dominer la situation et que l'égalité puisse s'installer entre eux.

Face à l'environnement froid et sombre proposé par les ingénieurs de la Nasa, les designers proposent un fond neutre jaune pâle afin d'apporter une ambiance chaleureuse et rassurante. Ils proposent ensuite un code de couleurs vives afin de repérer plus facilement les objets. Cette codification est sûrement issue de l'observation du module soviétique lors du programme coopératif Soyouz-Apollo. Ce système a su faire ses preuves et est toujours en utilisation aujourd'hui à bord de la station spatiale internationale. Effectivement, les astronautes se voient assignés une couleur avec laquelle chacune de leurs affaires est marquée à l'aide d'un velcro coloré.

Le maintien

L'environnement en apesanteur redéfinit les circulations et les positions statiques. Effectivement, le corps flotte dans l'espace et prend une position fœtale. En position neutre, toutes les articulations du corps sont légèrement pliées et le cou est penché vers l'avant. Le moindre mouvement a des conséquences. Pour y remédier, Loewy invente différents types de maintiens pour chaque activité. Il veut tenter de rétablir la verticalité que nous trouvons sur Terre afin d'offrir des repères au corps.

La station est composée de différents niveaux à l'instar d'une tour. On doit se propulser d'un étage à l'autre par un trou central. Chaque niveau de sol est composé d'une grille sur laquelle on peut se déplacer de manière contrôlée grâce à des chaussures à crampons triangulaires qui s'y agrippent. Après les avoir expérimentées, l'équipage préféra se déplacer librement et abandonna les chaussures. On peut retrouver de manière régulière ce schéma de dissociation entre l'usage imaginé par son designer et son réel usage. Loewy avait une vision particulièrement utopiste de l'architecture spatiale.

La fenêtre

La vision sur la Terre est un élément primordial au soutien psychologique. Elle permet d'offrir une ouverture vers l'extérieur et d'échapper à un potentiel sentiment de confinement. La constante vision sur la Terre offre une présence réconfortante. Les journées sont cependant très courtes. Le soleil se lève toutes les heures et demie, ce qui correspond à 16 tours autour par jour de la Terre. Loewy est le premier à prescrire une fenêtre pour la station. L'image de la vue sur notre planète, depuis l'intérieur d'un objet spatial, est aujourd'hui emblématique. On



Fig.30a : Gauche, chaussures à crampons triangulaire venant se fixer sur le grillage de même géométrie de la station
Fig.30b : Droite, photo de Skylab depuis le dôme montrant les trois "étages de grillage"
(Source : NASA)



Fig.31 : Photos des astronautes Joseph P. Kerwin, Paul J. Weitz et Charles Conrad s'entraînant à utiliser la table de Skylab. En arrière plan, la large fenêtre en forme circulaire.
(Source : NASA)

trouve majoritairement ce type de photos et très peu de représentations d'intérieur de station en orbite. L'astronaute Thomas Pesquet a démocratisé ce type de photographie en postant régulièrement ses clichés sur Facebook.

L'entrée des designers d'espace dans le secteur aérospatial prend source dans la nécessité d'améliorer les conditions de vie à bord des constructions spatiales, en vue de séjour plus longs en orbite. Des figures visionnaires, tel que Raymond Loewy, ont su apporter un regard novateur sur les aménagements pour les astronautes. Des systèmes simples et efficaces améliorent de manière significative la vie des astronautes.

2.2. Les éléments de composition de l'architecture spatiale contemporaine

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la conception et la pratique des espaces de vie dans les stations spatiales. Par une démarche analytique, nous observerons la manière dont la pensée architecturale se transforme ces espaces. Le lecteur est invité à consulter les plans situés en annexe, en parallèle de sa lecture afin de comprendre l'ensemble cohérent de chaque station.

2.2.1. La chambre

L'espace attribué au sommeil a pendant longtemps été amputé par celui du travail, dans les habitats spatiaux. Rappelons que durant le programme Apollo, l'équipage ne possédait pas d'espace attribué au sommeil, bien que leurs missions durent en moyenne une dizaine de jours. Avec l'établissement plus pérenne de l'homme en apesanteur dans les stations spatiales, l'espace alloué au sommeil tente d'être amélioré dès leur conception. Les architectes spatiaux sont de fervents défenseurs de ce confort élémentaire. En raison des grandes contraintes auxquelles fait face l'architecture spatiale, l'évolution n'est pas toujours synonyme d'amélioration. Une autre difficulté se situe dans le fait d'aider le sommeil des astronautes. Ces derniers mentionnent souvent leur peine à dormir due à divers facteurs tels que l'excitation, le stress, le bruit, les poussières, etc. Les architectes des habitats spatiaux se doivent donc de trouver des solutions spatiales et matérielles à cet inconvénient pour permettre aux astronautes de limiter leur consommation de somnifères.

En théorie, dormir en apesanteur est très simple, il suffit de se placer dans son sac de couchage et de s'accrocher à un endroit afin de ne pas flotter. Après l'endormissement, le sommeil est généralement lourd et l'astronaute ne change pas de position car, sans gravité, le corps ne se fatigue pas de se reposer sur le même côté durant toute une nuit.

Dès la première station spatiale (Saliout par l'URSS), un espace, même réduit, est décerné au sommeil. Les concepteurs inventent un compartiment de sommeil commun localisé au plafond afin d'offrir une large vue sur l'ensemble de la station (fig.32 et plan en annexe). En 1982, pour le dernier modèle de la station, Saliout 7, un voile séparant l'espace de vie et de travail de l'espace de sommeil est installé afin de limiter les particules et poussières mécaniques. Cet ajout est la première séparation de l'espace de nuit. Les astronautes dorment dans des sacs de couchage attachés au plafond. Les deux stations russes (Saliout et MIR) sont réalisées avec l'aide de l'architecte Galina Balachova, qui y instaure un confort chaleureux au plus proche de celui de la maison.



Fig.32 : Les cosmonautes Kovalionok, Prunariu et Savinykh dans leurs sacs de couchage à bord de Saliout 6 (Source : NASA)



Fig.33a : Photo des quartier d'équipage de la reproduction de Skylab. De gauche à droite, la cuisine, l'espace d'hygiène, les chambres

Fig.33b : Astronaute Owen Garriot dormant dans sa chambre (Source : NASA)

La station américaine Skylab, lancée en 1973, est la première à héberger des compartiments de sommeil privés. Raymond Loewy et l'architecte d'intérieur William Snaith sont les architectes de cette partition de l'espace. La station est pensée pour trois astronautes qui possèdent donc leur propre "chambre" (fig.33a et b). Dans l'optique de renforcer le sens de l'individualité, chacune des chambres se voit octroyée une couleur de sol différente. De nombreux accessoires personnels sont intégrés tels que le sac de couchage, des rangements, ...

L'innovation de la station MIR est l'incorporation de la fenêtre dans les deux compartiments privés, appelés "kayutas" qui sont toujours utilisés à bord de l'ISS pour les deux chambres côté russe (fig.34). Depuis Skylab, les cabines des stations spatiales possèdent des espaces de plus en plus personnalisables et des rangements individuels. Une vision vers l'extérieur est un vrai atout psychologique pour les astronautes. Toutefois, sa présence dans l'espace de sommeil peut-être remise en question pour deux raisons. La première est l'exposition plus importante aux rayonnements cosmiques. En effet, la fenêtre représente une faiblesse dans l'isolation de la cabine pendant l'exposition prolongée des 6 à 8 heures de sommeil. De ce manière, les compartiments de l'ISS ont vu leur isolation aux rayonnements cosmiques renforcé. La seconde raison est l'utilisation réduite de la fenêtre durant les heures de sommeil. L'implantation d'un vitrage dans une station spatiale représente une prouesse d'ingénierie avec un coût significatif. Sa présence dans l'espace de nuit n'est donc pas rentable comparée à son utilisation dans les espaces de vie et de travail diurne. Plus tard, pour les missions accueillant plus de 2 membres, lors de l'agrandissement de la station MIR vers une station internationale, des sacs de couchage appelés kayutas sont ajoutés et accrochés au travers de la station. La configuration "terrienne" de la station avec un sol, un plafond et des murs imaginée de manière colorée par G.Balachova, affecte psychologiquement certains astronautes dormant dans ces sacs de couchage. L'astronaute Sasha Kaleri percevait fortement l'orientation de l'espace et ressentait le besoin de dormir allongé sur le sol désigné⁵⁰.

Durant les premières années de l'ISS (de 2000 à 2008) tout comme celles de MIR, la station ne possédait que deux compartiments privés localisés dans le module russe Zvezda, les "kayutas" de la station MIR, pour héberger les trois membres permanents. Pour le troisième membre, le prototype de compartiment temporaire de sommeil ou Temporary Sleep Station (TeSS), était installé dans le module du laboratoire américain Destiny⁵¹. Les membres d'équipage de passage dorment, toujours aujourd'hui, dans des sacs de couchage accrochés au travers de la station. En 2007, quatre nouveaux quartiers permanents ou Crew Quarters (CQ) sont ajoutés à bord de l'ISS grâce à l'ajout du module Harmony ou Node 2. La conception de ces CQ ont suivi le CDR et répond aux mêmes besoins qu'un habitat terrestre : la lumière, la ventilation, l'acoustique, la température et l'ajustement par son habitant. Sa réponse formelle est simplement différente



Fig.34 : Astronaute Norm Thagard dormant dans son Kayutas à bord de la station MIR (Source : Nasa)



Fig.35 : Les quatre nouveaux quartiers d'équipage de l'ISS dans le Node 2 avec les astronautes Ron Garan (bas), Cady Coleman (droite), Paolo Nespoli (gauche) et Alexander Samokutyaev (haut). (Source : Nasa)

50 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space* (p.107), Vienne, Springer, 2021

51 HOWE, A. Scott.; SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009

grâce aux disponibilités de l'environnement spatial. Son aboutissement représente le "dernier cri de la chambre spatiale".

Chaque CQ fait 2,1 m³, et offre une retraite protégée des bruits et des activités. Le son y est limité à 40 Db (équivalent d'une bibliothèque publique). Ces CQ sont dimensionnés en fonction du passage minimum prévu de l'ISS, soit 152 cm, pour laisser le passage des racks (comparable aux unités de passage françaises). Les portes s'ouvrent vers l'intérieur pour que tout l'équipage puisse évacuer en cas d'alarme. Ces contraintes ne sont pas des réglementations mais sont des normes issues du bon sens et des expériences acquises. Par exemple, l'utilisation du CQ temporaire TeSS permet de prendre conscience de la nécessité d'une meilleure qualité d'isolation (thermique et acoustique) et de la simplification des étapes d'assemblage d'un rack. Le quartier se compose du mur utilitaire munis d'une table et du système d'éclairage (fig.36). La surface est agrémentée d'attaches de 5x5cm, limitées au nombre de 125 pour des raisons d'espace. Les membres peuvent aussi stocker l'équivalent de 0,09m³ d'objets personnels au bas de leur cabine. Leur localisation permet de maximiser l'espace au niveau de la tête et des bras. Les murs sont recouverts d'un isolant peu salissant et facilement nettoyable en couvertures GoreTex. L'intérieur est composé de Thinsulate. Cet isolant, d'abord utilisé pour ses propriétés thermiques dans l'industrie du vêtement, est utilisé aujourd'hui dans les voitures pour ses qualités acoustiques et imperméables. Les murs sont aussi composés de Nomex (très résistant chimiquement et thermiquement) est la famille du Kevlar. Les parois des cabines des CQ sont les plus isolantes de la station, côté vide spatial, pour limiter l'exposition des astronautes qui passent un tiers de leur temps dans cet espace. Les cabines sont donc isolées avec 125 kg de polyéthylène à ultra haut poids moléculaire ou Ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE), panneaux de 6cm d'épaisseur qui réduisent de 9% les radiations galactiques et de 74% les radiations solaires. La structure interne de la cabine est en panneaux de carbone en nid d'abeille qui résistent à la pression du lancement tout en économisant du poids utilisé pour l'isolation des radiations⁵².

La ventilation est un sujet important pour les espaces réduits et confinés tel qu'un CQ. Elle renouvelle l'air et évite l'asphyxie due à la concentration de carbone relâché par la respiration. La ventilation régule aussi les échanges thermiques et assure le confort. A cause de sa situation dans le vide cosmique, l'ISS ne possède aucune ventilation naturelle et a recours à une ventilation artificielle. L'air est pris à l'extérieur en haut de la cabine (là où il y a le plus de circulation d'air) et rejeté à l'intérieur au niveau des pieds. Le flux d'air doit être suffisant pour renouveler l'air mais suffisamment lent et large pour éviter toute gêne sonore.

La lumière a également été l'objet d'une recherche approfondie. La lumière principale, située au niveau de la tête, est réglée dans le CQ à un minimum de 54 lux et à un maximum de 323 lux pour les surfaces de lecture. Les diverses lampes sont ajustables, par son habitant, en hauteur

⁵² ANN BORREGO, Melissa, JUERGEN, F.Bahr, LEE BROYAN, James jr., "Internationnal Space Station crew quarters", dans *Out of this world : The new field of space architecture*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009



Fig.36 : Interieur d'un quartier d'équipage à bord de l'ISS
(Source : Nasa)

et en luminosité à l'aide d'abat-jour. Durant la "nuit", la luminosité est plafonnée à 0.5 lux mais s'allume automatiquement en cas d'alerte pour prévenir de la désorientation dans le noir.

Avec l'allongement des séjours spatiaux, le confort des espaces destinés au sommeil a été nettement amélioré. Ils possèdent de plus en plus d'intimité autant acoustique que sonore, et leur ergonomie est pensée de manière de plus en plus précise et flexible à la fois. Leur évolution n'a cependant pas été linéaire, mais les concepteurs apprennent de leurs erreurs et tentent avec l'aide du retour d'expérience des astronautes d'accroître le confort des espaces de sommeil. Les quartiers d'équipage restent encore loin de l'image standard d'une chambre.

2.2.2. La cuisine

Dans la dureté et l'isolement de l'environnement spatial, la nourriture devient, plus que l'énergie physique, un véritable stimulant psychologique pour les astronautes. Les plats sont variés et aux goûts spécifiques des membres d'une mission afin de prévenir toute monotonie. La conservation de la nourriture pose un grand problème auquel les scientifiques ont répondu dès les missions Apollo. Le choix de la nourriture se base sur des aliments denses et nutritifs afin de limiter le poids. Dans leur volume, les plats sont optimisés par déshydratation. Cette méthode permet aussi d'accroître leur conservation à une moyenne de 18 mois⁵³. Après leur réhydratation, les astronautes mangent directement leur repas dans leur sachet de conservation. Chaque plat choisi doit être en sauce ou sous la forme d'une pâte pour qu'aucune miette ne flotte en dehors du paquet. La cuisine, dans le sens de préparation d'un repas, est presque inexistante dans l'Espace. Les architectes ont peu d'influence sur ce fait mais ils sont en mesure d'améliorer l'endroit où mangent les astronautes.

La première station spatiale ne possède ni "cuisine", ni "salle à manger". Cependant, la nouveauté apportée par les soviétiques est la présence de la serre Oasis qui, en plus de son but scientifique, permet de cultiver des légumes frais. Cette serre, appelée Oasis, est munie de lumière et de terre artificielle ainsi que d'un système de mesure et de régulation de la ventilation, de l'humidité, des nutriments et de la température. Les astronautes y cultivent majoritairement des pois et des oignons. Au fil des missions, la variété de légumes se diversifie : tomates, coriandre, radis, concombres, etc⁵⁴. D'autres serres et dispositifs plus élémentaires, comme le pot de terre Vazon dans lesquels des oignons étaient cultivés, furent envoyés à bord de Saliout.

A bord de Saliout 7 (1982 à 1986), une cuisine rudimentaire est installée dans l'espace de travail. Le format des plats est changé (fig.37). A la place de menus établis en amont, les astronautes sélectionnent plusieurs aliments qu'ils peuvent ensuite manger ensemble. Le nouvel élément prend la forme d'une table rétractable dans laquelle sont logées de petites ouvertures permettant de réchauffer la nourriture. Deux petits fours, une poubelle et un dispositif de maintien de la nourriture sont mis en place.

La cuisine de Skylab est celle qui reste aujourd'hui la plus proche de la conception terrestre du terme. Tout d'abord, les astronautes possédaient un espace séparé, uniquement dédié à leur repas avec une fenêtre. Le volume a des proportions spacieuses : 14,5m³. A l'image d'une cuisine terrestre, l'espace est équipé d'un réfrigérateur, d'un congélateur et de quoi réchauffer la nourriture. Tout comme les dernières missions à bord de Saliout, les astronautes peuvent



Fig.37 : Equipage de la mission T-13 (Vladimir Dzhanibekov à gauche et Viktor Savinykh à droite) devant la table dépliable
(Source : inconnue)

composer leur menus au moment du repas. La forme des aliments se diversifie : nourriture déshydratée, thermo-stabilisée, congelée, boissons, forme naturelle. La table à manger est désignée spécialement par Raymond Loewy et William Snaith (voir 2.1.3. fig.31). Elle est triangulaire, offrant une place égalitaire pour chacun des trois membres d'équipage, et son design cherche à rétablir la verticalité. La table est parallèle au "sol" et plusieurs options de restraints viennent maintenir le corps des astronautes de manière passive : au niveau des cuisses, encoche en triangle pour les chaussures de Skylab, accroches en velcro pour les chaussettes. Cependant, cette intention se révéla trop rigide. L'ergonomie de la table aurait été meilleure si son plan avait été légèrement incliné. Il est essentiel d'utiliser des concepts architecturaux terrestres mais, contrairement aux recommandations de G.Balachova, désigner exactement comme en gravité peut se révéler être une erreur. Selon l'astronaute Alan Bean⁵⁵, combinaison d'ouverture magnétique et chauffante de la table est trop stricte. Parfois, l'ensemble du menu choisi ne pouvait tenir dessus. Il fait aussi remarquer que l'éclairage n'était pas suffisant. La lumière dans l'Espace perturbe la vision des couleurs, il est donc essentiel que l'éclairage artificiel soit suffisant. De plus, la bonne vision d'un repas peut stimuler l'appétit qui est déjà mis à mal par l'apesanteur.

⁵⁵ NASA, BEAN, Alan, *Skylab Experience Bulletin No.12 : Temporary Equipment Restraints*, NASA, Houston, 1975

⁵³ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.202), Vienne, Springer, 2011

⁵⁴ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.207), Vienne, Springer, 2011

Sandra Häuplik Meusburger insiste sur le fait que même si les humains s'habituent à vivre et manger en apesanteur, les habitudes domineront toujours parfois à rebours de l'efficacité :

"Mais ce que nous avons appris, c'est que les humains ne changent pas tellement. Nous aimons voir ce à quoi nous sommes habitués [...] Il y a cet exemple célèbre de la table de Skylab, au-dessus de laquelle personne ne passait car cela était considéré comme impoli."⁵⁶

La station MIR, ne présente pas de grande avancée dans sa proposition d'espace de salle à manger (fig.38). Une tablette ordinaire est à disposition proche des CQ à bord du Module Principal (Core Module). En plus des velcros maintenant la nourriture, un système d'aspiration de l'air intégré à la table la maintient en place⁵⁷. A l'instar de la Station Saliout, MIR héberge plusieurs types de serres dont la plus connue est la Svet GreenHouse à bord du module Kristall lancé en orbite en 1990.

L'espace dédié au repas à bord de l'ISS est composé de deux parties : l'espace de préparation et celui de consommation (fig.39). Ces espaces se situent dans le module Zvezda, installé en 2000. La majorité de la nourriture consommée est réhydratée à l'eau chaude. Le plaisir de manger est apporté par la diversité internationale des plats que l'on trouve désormais à bord de la station. Les plats, dans un premier temps américains ou russes, peuvent être désormais choisis dans les menus japonais et européens. Les menus sont basés sur un planning de 16 jours qui se répète. La nourriture est maintenue en place par du velcros et des sangles sous lesquels les couverts ou autres objets peuvent être glissés. Certains astronautes confient leur attachement à l'odeur du module Zvezda, due à la préparation et consommation de nourriture et qu'ils associent au moment de détente que représente le repas⁵⁸. D'autres astronautes s'essaient à la "cuisine de l'Espace" comme le raconte Sandra Magnus (NASA, Expedition 18)⁵⁹ :

"La variété des aliments est assez bonne et vous pouvez augmenter leur variété en mélangeant et en assortissant les choses, et dans mon cas en faisant un peu de "cuisine" dans l'espace (...) Il est donc possible de cuisiner dans l'espace avec quelques heures, beaucoup de lingettes sèches et humides et les outils de base que sont le ruban adhésif en toile, les sacs en plastique, les sachets en aluminium et un petit couteau. C'est amusant et certainement une aventure!"

Les astronautes semblent donc particulièrement apprécier l'attention accordée à la ressemblance entre de la "cuisine" de l'Espace, dans le sens d'espace et d'activité, et celle terrestre. Au fil de la création de nouvelles stations spatiales, des améliorations ont été apportées mais certaines de ces grandes avancées n'ont pas été conservées. Une véritable table sur laquelle les astronautes peuvent cuisiner semble faire partie du passé. Ce sont donc par des moyens détournés qu'ils retrouvent avec joie leur habitudes terriennes.

56 HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT-PASSOT Prève, Novembre 2021

57 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.212), Vienne, Springer, 2011

58 ESA, *Visite complète de la Station Spatiale avec Thomas Pesquet*, Youtube, novembre 2021, consultée en décembre 2021

59 WHISTON, Peggy, *Peggy Whiston's Journal - Exercise inSpace*, NASA, 2008



Fig.38 : En rouge à l'avant-plan, table à manger. De gauche à droite, les astronautes Charlie Precourt (sortant du kayutas), Gennady Strekalov, Bonnie Dunbar et Greg Harbaugh. (Source : JSC photos collection, NASA)



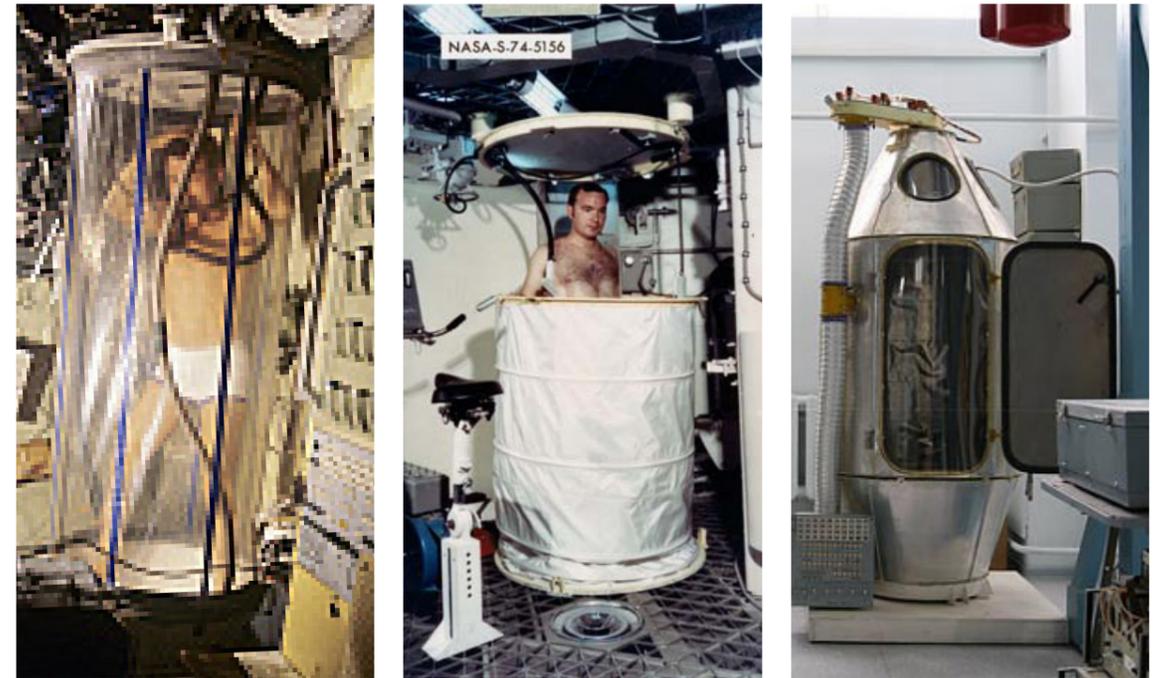
Fig.39 : Thomas Pesquet présentant l'espace "cuisine" situé dans le Node 2 de l'ISS, novembre 2021. A gauche (en rouge), table à manger déployable repliée, à droite (en bleu), fours et réfrigérateurs. (Source : ESA)

2.2.3. La salle de bain

La caractéristique de l'Espace la plus contraignante pour l'hygiène est la tension de surface. Les liquides et textures visqueuses glissent le long de la peau sans vouloir se détacher. Cela pose donc des problèmes à tous les niveaux de l'hygiène, que ce soit les liquides corporels ou ceux du lavage. Les liquides doivent être soit épongés, soit aspirés. Les astronautes ont par exemple pendant longtemps reporté ne pas utiliser les brosses à dent et/ou le dentifrice fournis, mais préféré les chewing gum à bord des missions Apollo, les lingettes ou brosse à dent électrique "à sec" à bord de la station Saliout, ...⁶⁰

A partir de Saliout, les astronautes possèdent un espace dédié à l'hygiène corporelle, séparé du reste par des rideaux et avec son propre système de ventilation. La douche fait son apparition à bord de Saliout 3 (1974). L'espace d'hygiène est pensé en trois parties distinctes, localisées vers le fond de l'espace de travail : la douche située au "plafond" le long de la "chambre", les sanitaires et l'espace de toilette. La douche, en polyéthylène souple et transparent, se déplie du plafond et s'ouvre à l'aide d'une fermeture éclair (fig.40a). La douche s'utilise comme sur Terre, c'est-à-dire que l'eau est projetée du "haut" de la cabine de douche. Un système de ventilation force l'eau à "descendre". Malgré ce système, les astronautes doivent porter une pince sur leur nez pour ne pas respirer d'eau en cas de remontée de celle-ci. L'astronaute glisse ses pieds dans des lanières de maintien situées sur le "sol" de la cabine de douche afin de conserver sa verticalité. La préparation du système de douche prend une journée complète, aussi les douches sont prévues selon un planning établi chaque mois. Les astronautes apprécient fortement la possibilité de prendre des douches bien que le système soit très contraignant. Les missions à bord des stations sont plus longues que celles réalisées jusque-là, par conséquent les équipements se diversifient : nettoyant pour le corps et les cheveux, outils pour la coupe des cheveux. Les sanitaires possèdent un système distinct d'urine (collecteur d'urine) de celui des excréments (cuvette) localisé au même endroit (fig.41a). Après collection, l'urine et les excréments sont pulvérisés en dehors de la station. Le double système est pensé pour être utilisable autant par les hommes que par les femmes. Tous les sanitaires créés depuis Saliout compris, utilisent un système d'aspiration afin de compenser la tension de surface. A bord de cette station, le rasoir est électrique et possède un aspirateur intégré afin d'aspirer la moindre poil coupé. Ce principe permet de réduire le ménage et surtout d'éviter la respiration des poils coupés. Le ménage à bord est fait de manière minutieuse et régulière. Une fois par semaine, toutes les surfaces sont nettoyées à l'aide de lingettes jetables imprégnées d'un désinfectant. Plus rarement, un ménage plus extensif à l'aspirateur est exécuté afin de retirer les microparticules notamment dans les angles difficilement atteignables autrement. Dans les faits, les astronautes décrivent la station comme un bazar permanent car tous les équipements

⁶⁰ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.132 et140), Vienne, Springer, 2011



De gauche à droite

Fig.40a : Douche de Saliout en cours d'utilisation
(Source inconnue)

Fig.40b : Douche de Skylab dans la maquette d'entraînement terrestre. Les tubes pendant du plafond sont celui de projection et de succion de l'eau.
(Source : Nasa)

Fig.40c : Maquette de la douche de la station MIR
(Source : Seiji Yoshimoto, Energia Museum)

et sacs de rangement flottent dans la station. Même avec le ménage intensif, l'espace reste extrêmement sale car tout est en suspend dans l'air, on trouve des miettes de nourriture, des gouttes de jus, des petites poussières partout, ...⁶¹. En dehors, de ces grandes particules flottantes, les astronautes de Saliout reportent un air très pur grâce aux nombreux filtres et que seule une "odeur technique de la Station Spatiale restait"⁶². Ces retours sont très différents de ceux donnés par les astronautes durant les missions Apollo. Au retour des EVA sur la Lune, ils se rendent compte du problème que représentent les poussières extérieures. Les poussières lunaires sont particulièrement fines et les filtres d'air les éliminent avec difficulté. La poussière se retrouve sur toutes les surfaces de l'habitacle. Cette odeur métallique se mélange à celle des sanitaires, qui sans aspiration, se retrouvent dans tout le module.

A bord de Skylab, le principal espace d'hygiène est localisé entre celui de sommeil et celui des repas (annexe B). Il comprend un collecteur d'excréments et d'urine, un distributeur d'eau pour se nettoyer les mains (fig.41b), les ressources d'hygiène personnelle et de ménage. La

⁶¹ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.147), Vienne, Springer, 2011

⁶² PRUNARIU, Dumitru-Dorin., Interview non publié par Sandra Häuplik-Meusburger, Vienne, 2011

douche se trouve dans l'espace central de travail. Elle prend la forme d'un cylindre déployable depuis le "sol" où se trouvent deux maintiens dans lesquels on peut glisser les pieds (fig.40b). Les astronautes utilisent deux tuyaux pour se laver, le premier projette de l'eau sous pression et le second vient aspirer l'eau. A l'instar de la douche de Saliout, la mise en place de la douche prend beaucoup de temps. En effet, il faut préparer l'eau en amont car le système de plomberie de la douche n'est pas relié à celui du reste de la station. L'expérience de la douche par les équipages successifs de Skylab sont très hétérogènes, allant de ceux qui apprécient et prennent de manière régulière des douches à Owen Garriott (Skylab 3)⁶³ qui ne prend pas une seule douche. Les sanitaires pour déféquer sont distinctement séparés de ceux pour uriner. Localisé dans la zone d'hygiène, chaque astronaute possède son propre collecteur d'urine. Celui-ci est composé d'un tuyau aspirateur, collectant l'urine dans des sachets. Ces derniers, en cas de maladie ou nausées, peuvent être utilisés pour réceptionner toutes remontées gastriques. Les astronautes possèdent aussi un siège sanitaire attaché au mur au-dessus du collecteur d'urine. Le système aspirateur s'utilise à la manière de son homologue terrestre, à la différence que son utilisateur se ceinture au siège dans le but d'éviter toute "fuite" en dehors du réceptacle. A bord de Skylab, les produits émis par les astronautes ne sont pas pulvérisés mais stockés sous forme séchée ou congelée afin d'être analysés plus tard sur Terre. Les équipements de ménage de Skylab était similaire à ceux de Saliout. Cependant, les astronautes se plaignent de la taille réduite inadéquate comparée au volume de la station.

La collection des déchets des deux stations est similaire. Les astronautes remplissent des sacs de déchets en séparant les déchets inertes de ceux actifs car ces derniers doivent être jetés plus régulièrement. Lorsque la quantité de déchets est suffisante un des sas est rempli des déchets qui sont ensuite évacués dans l'Espace.

La douche à bord de MIR est installée de 1989 à 1995 (soit respectivement 3 ans après le début du programme et 5 avant sa fin). Bien que la douche soit en matière rigide et donc toujours prête à l'utilisation, le système ne facilite pas le lavage du corps (fig.40c). L'eau est pulvérisée dans la cabine imperméable et le cosmonaute doit donc respirer par un tuyau pour ne pas s'étouffer. Les astronautes préfèrent la douche à la lingette, instaurée avec le programme Space Shuttle depuis 1981. Le cosmonaute Valery Polyakov affirme même après 437 jours en apesanteur, que "sa peau était en encore mieux qu'avant le séjour"⁶⁴. A bord des navettes, chaque individu se voit attribué quotidiennement deux lingettes, une pour se laver et une pour se rincer, ainsi qu'une serviette. Pour se laver les cheveux, ils utilisent un shampoing sans rinçage. Ce système est toujours utilisé à bord de l'ISS. Le confort instauré à bord de MIR est le fait de posséder deux sanitaires. Le premier se situe dans le module principal et suit le modèle de Saliout. Le sanitaire du module Kvant 2 installé plus tardivement est préféré par les utilisateurs. Ce système est composé de toilettes assises pour déféquer et uriner ainsi

63 GARRIOTT, Owen, *Lessons Learned on the Skylab Program*, NASA, Houston, 1974

64 POLYAKOV, Valery, *Waste and Hygiene Compartment*, ESA, 2010, consulté 26 décembre 2021 à http://asimov.esrin.esa.it/SPECIALS/node3/SEMEHHSJR4G_0.html



Fig.41a : Toilettes de la station Saliout, en vert, ouverture des toilettes.

(Source : Mark Wade)

Fig.41b : Toilettes de la station Skylab. Au sol, maintien pour les pieds, en rouge, receptacles et tubes individuels à urine, en vert, assise du réceptacle fécal, en bleu, distributeur d'eau pour le lavage des mains.

(Source : Nasa)

Fig.41c : Maquette des toilettes de la Station MIR. En rouge, embout du tube pour uriner, en vert, réceptacle fécal, en vert, boîte pour le lavage des mains.

(Source : Gabriele Formentini, Flickr)

Fig.41d : Toilettes du module Zvezda de l'ISS. En rouge, embout du tube pour uriner, en vert, réceptacle fécal.

(Source : NASA)

que d'un lave-main et lave-cheveux. Le système de lavage est similaire à celui de Skylab, à l'exception qu'un troisième trou plus large est installé à son sommet pour y passer le crâne et se laver les cheveux. Les toilettes sont assises et offrent une expérience plus "terrienne" de l'activité. L'utilisateur est maintenu en place par une barre inclinable au niveau des cuisses et de sangles au niveau des pieds. Un trou d'une dizaine de centimètres au centre de l'assise reçoit les défécations. A l'avant du siège, se situe un tuyau aspirant l'urine par succion. L'embout du tube est individuel, il est donc nettoyé et changé à chaque utilisation. Les déchets solides sont évacués dans le vide spatial, tandis que l'urine est recyclée en eau. L'ensemble du système toilettes et hygiène est hérité des navettes spatiales américaines. Les tâches ménagères de MIR sont gérées de la même manière qu'à bord de Saliout.

L'ISS reprend les équipements d'hygiène les plus appréciés et les plus pratiques de ces prédécesseurs. Il n'y a donc pas de douche à bord puisqu'aucune n'a su faire l'unanimité et que les astronautes préfèrent au final les lingettes qui leur semblent plus pratiques. La demande d'une douche à bord n'est pas pour des raisons d'hygiène mais plus de confort. Cependant,

l'apesanteur retire le plaisir de la simplicité d'une douche terrestre. Il existe deux sanitaires à bord de l'ISS, un dans le module Zvezda (2000) (fig.41d) et l'autre dans le module Destiny (2008) qui sera déplacé dans le module Node 3 un an plus tard. Ces sanitaires sont deux mises à jour de ceux trouvés à bord de MIR. Ils sont utilisables aussi bien par les hommes que par les femmes. Le ménage est effectué toutes les semaines à l'aide de lingettes jetables et durables ainsi que de deux aspirateurs.

Les questions majeures d'hygiène ont été traitées et affinées au fil du temps et des stations spatiales : hygiène corporelle, sanitaires, ménage, rasage, ... Un problème d'importance subsiste, qui pour l'instant pourrait nous empêcher de nous aventurer trop loin de la Terre : faire la lessive. En effet, cette question n'a pas encore été répondue. Actuellement, les vêtements sont portés jusqu'à ce qu'ils soient trop sales, puis sont détruits dans des cargos pulvérisés durant leur réentré sur Terre. Les habits de rechange sont envoyés avec le ravitaillement. Or, pour la durée d'un voyage vers Mars, les provisions de vêtements représenteraient un volume et un poids conséquent. En outre, un ravitaillement suffisamment régulier de cette ampleur pose des problèmes budgétaires. Sans gravité, il est pour l'instant impossible d'effectuer une lessive.

2.2.4. Le salon et les loisirs

Les astronautes à bord d'une station spatiale sont envoyés pour des raisons professionnelles. Ils restent donc durant des mois dans leur lieu de travail. Cette structure coûte extrêmement cher, plusieurs milliards de dollars, chaque espace est donc optimisé et seul l'essentiel est fourni. Les besoins vitaux, tels que manger, dormir ou autres besoins corporels, possèdent leur propre espace. Toutefois, c'est le travail qui prend la majorité de l'espace, puisque les stations ont un but scientifique. Le repos et la détente des astronautes sont mis de côté. Pourtant, le bien être d'un travailleur est essentiel à l'efficacité et la qualité de son travail. Nous allons donc voir comment les loisirs des astronautes sont traduits en orbite autour de la Terre.

Dès les missions Apollo, des exercices physiques sont imposés aux astronautes pour compenser la perte de muscles liée à la pesanteur. A partir de Saliout, des machines de fitness sont installées à bord : un vélo, un tapis de course et un équipement d'exercice musculaire. En 1984, le premier cosmonaute indien introduit le yoga. Selon l'astronaute B.J.Bluth⁶⁵, l'activité est très appréciée pour son utilisation minimal de l'espace et son bénéfice face à l'apesanteur. Les scientifiques soviétiques reconnaissent tôt l'importance du temps libre pour leurs hommes. La plupart des activités de loisirs personnels incluent : la vidéo-télécommunication, les cassettes vidéos, des jeux de sociétés, la lecture, l'écoute de musique, l'éducation personnelle, le dessin, observer l'extérieur et prendre des photos. Cependant, seul le sport possède un espace propre à cette activité, sûrement à cause de sa nécessité pour la santé physique des astronautes. Valery Ryumin (Saliout 6)⁶⁶ se plaint du sport imposé :

"Je déteste nos exercices. J'adore ça sur Terre. Mais ici, je dois me forcer à chaque fois. C'est ennuyeux et monotone, et c'est du travail lourd. Mais on réalise qu'on en a besoin pour rester en forme alors on sert les dents"

Les cosmonautes se voient attribuer des jours de congés qui sont parfois supprimés. Les cosmonautes autant que les astronautes protestent pour cela. En 1973, l'équipage de Skylab protesta en coupant toute communication avec Houston durant 30 minutes en raison de la surcharge de travail.

La particularité de Skylab est son large volume sous la forme d'une "tour de trois étages" pour un équipage réduit de trois personnes. Les membres de ces missions étaient très inventifs en exercices et jeux (fig.42a et b). Ils abandonnent rapidement le vélo qu'ils considèrent inconfortable et bruyant. Celui-ci sera remplacé par un tapis de course.⁶⁷ Leurs activités favorites sont l'observation par les larges fenêtres ainsi que les figures acrobatiques uniquement possible en microgravité.

⁶⁵ Bluth, B.J., Helppie, M, *Soviet Space Stations as analogs*, NASA, Washington, 1986

⁶⁶ Idem 61

⁶⁷ HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.268), Vienne, Springer, 2011

A bord de MIR, un vélo et deux tapis de course sont installés. Les astronautes et cosmonautes peuvent regarder des films et écouter de la musique en même temps. Dans la station, des couleurs et des musiques sont utilisées afin de relaxer les habitants et de conserver le sens des saisons. Les week-end à bord de MIR sont planifiés comme jours de congés, cependant, les astronautes travaillent pour différentes raisons : finir une expérience, faire le ménage, motivation personnelle, ...

Depuis la première station spatiale et aujourd'hui encore, à bord de l'ISS, deux heures d'exercices sont inscrits au planning quotidien⁶⁸. Les équipements se sont diversifiés : vélo, deux tapis de course, système de résistance musculaire, balles et élastiques, ... (fig.43a, b et c) Les loisirs personnels restent similaires selon le temps et les cultures. La radio, les films et la lecture sont des activités très communes. Toutefois, l'observation terrestre reste l'ultime loisir, particulièrement depuis l'installation de la coupole en 2010 avec ces sept fenêtres (fig.22 p.55). Avec le développement d'internet, la communication s'est améliorée et les conférences transmises dans le monde entier sont devenues courantes.

Les espaces comparables à ceux d'une même fonction sur Terre se traduisent en apesanteur très différemment. Les "pièces" et leurs équipements se sont perfectionnés au cours des essais. Cependant, les solutions conservent un design fonctionnaliste car l'échantillon de quatre stations est trop faible pour pouvoir développer un confort de microgravité abouti. La plupart des besoins sont solutionnés par des équipements plutôt que par des réponses spatiales, dans le sens de surface et de volume. Il semble important d'intégrer une pièce importante dans un foyer terrestre : le salon. Cette pièce est censée héberger les activités de loisirs

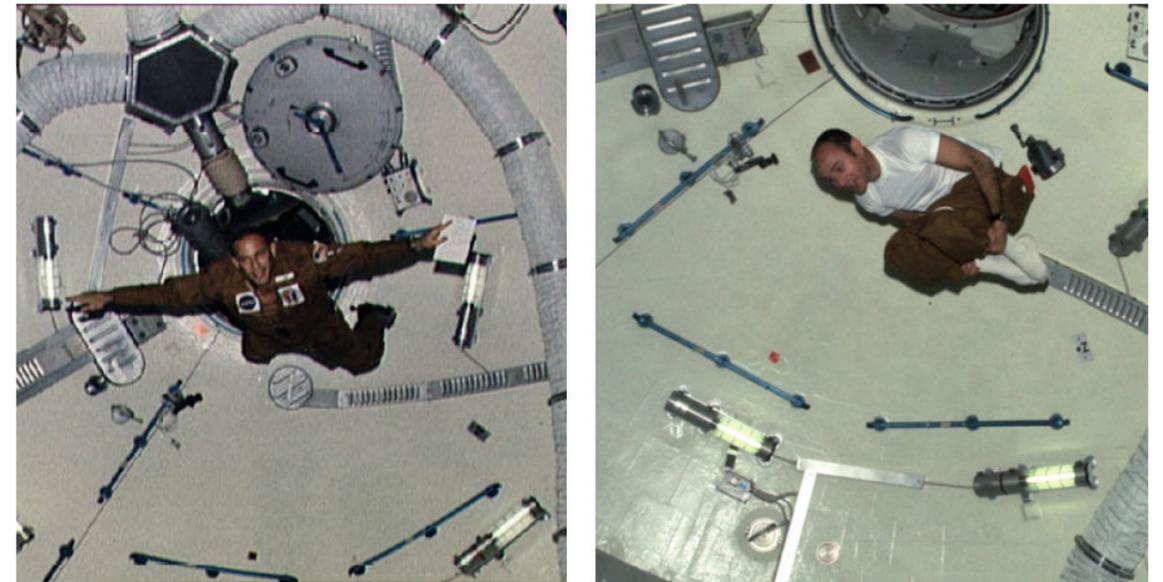


Fig.42a et b : Les astronautes Jack R. Lousma (à gauche) et Alan Bean (à droite), pratiquant leurs figures acrobatiques dans le dôme de Skylab.
(Sources : NASA)

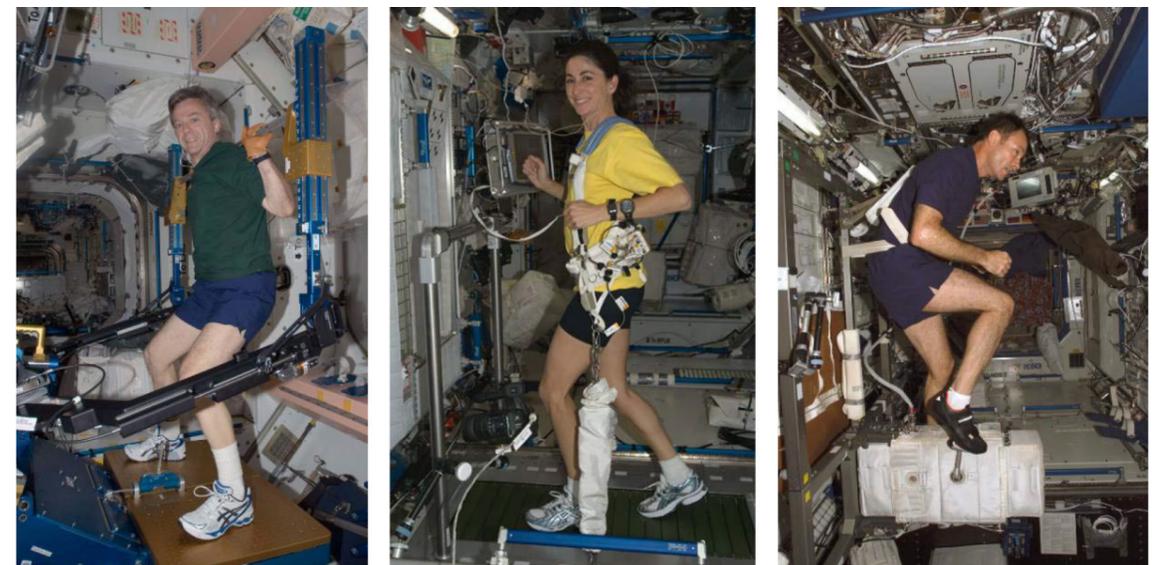


Fig.43a : Astronaute Robert Thirsk utilisant la machine à résistance musculaire (ARED) dans le Node 3 à bord de l'ISS.

Fig.43b : Astronaute Nicole Stott utilisant le tapis de course dans le Node 3 à bord de l'ISS.

Fig.43c : Astronaute Michael E. Lopez-Alegria utilisant le vélo dans le module Destiny à bord de l'ISS.
(Sources : NASA)

68 HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach* (p.274), Vienne, Springer, 2011

2.3. Les outils de la reconnaissance du métier d'architecte spatial

L'architecture spatiale est une "niche" composée d'un petit nombre d'acteurs internes. Pourtant, ce domaine ne cesse de grandir car on observe que le nombre d'architectes et d'agences d'architecture spatiale augmente notamment depuis les années 2000. Nous allons exposer dans cette partie la manière dont les architectes spatiaux développent leur profession et découvrir les aides et le soutien que les acteurs extérieurs au domaine peuvent leur apporter.

2.3.1. Les acteurs qui soutiennent la reconnaissance du métier d'architecte spatiale

Ce chapitre expose de manière chronologique, le chemin et les acteurs du soutien au métier d'architecte spatial.

Première initiative d'acteurs individuels visionnaires

Si la place d'un architecte dans le domaine aérospatial n'est pas évidente, elle est contre nature au commencement pour les équipes de conception des programmes spatiaux. A l'instar de la naissance de chaque nouveau mouvement, il suffit de l'initiative d'un seul individu pour lancer l'étincelle. Deux acteurs visionnaires à l'intérieur des programmes spatiaux invitèrent des concepteurs d'espace, un par "bloc". Aux Etats-Unis, c'est George Muller, à la tête du bureau des vols habités de la Nasa et à qui est dû le succès des missions Apollo, fait appel à Raymond Loewy. Durant l'étude de faisabilité de la future station spatiale Skylab, à la fin des années 1960, il fait appel à un consultant externe à la Nasa et spécialisé dans le design d'espace. Au même moment du côté soviétique, Sergueï Korolev qui est chargé du poste similaire à George Muller, fait appeler à Galina Balachova. On observe une prise de conscience parallèle et simultanée dans les deux blocs opposés de la nécessité du confort de ces environnements lorsqu'ils sont froids et mécaniques. Une philosophie des espaces pratiques et appréciables émerge. Dans l'esprit commun, le rôle des architectes est de définir la forme et l'esthétique d'un bâtiment. Cette conception intellectuelle s'applique aussi aux ingénieurs aérospatiaux qui n'ont pas la proximité de l'architecture comme la possède l'ingénierie civile. Sandra Häuplik-Meusburger définit la compétence particulière de "l'architecte [comme] l'avantage de savoir vraiment organiser l'espace en fonction de l'efficacité humaine et du plaisir."⁶⁹. En ce sens, la présence des architectes dans la conception des habitats spatiaux est essentielle aux côtés de l'ingénieur. Les directeurs des programmes spatiaux habités possèdent une vision large sur le

69 Entretien de HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT-PASSOT Prève, Novembre 2021



Fig. 44 : Photo aérienne du spacioport de New Virgin Galactic à New Mexico par Foster + Partners, 2014 (Source : Foster + Partners)

travail de toute l'équipe de conception et entend la nécessité du confort et de l'ergonomie. Constance Adams est une troisième grande figure d'architecte spatial qui porte le concept de l'architecture vers le domaine aérospatial dans les années 2000. Son décès soudain en 2018 marque la communauté car elle était une grande défenseuse active du métier et auteure de nombreux articles avant-gardistes. En plus d'être une femme, son parcours est semblable à celui de son aînée Galina Balachova. Leur parcours présente une continuité fluide entre le métier d'architecte vers celui d'architecte spatial. Nous connaissons déjà le parcours de Galina Balachova (relaté en partie 2.1.2) que nous allons maintenant comparer à celui de Constance Adams. Alors que cette dernière travaille pour Foster + Partners, elle participe à la construction du premier spacioport à New Mexico pour la société Virgin Galactic (fig. 44). De manière fluide et "inévitable"⁷⁰, elle se retrouve à concevoir des sièges, de l'éclairage, etc. pour des vaisseaux spatiaux. De la même manière, les deux femmes passent de la construction d'immeubles à la conception d'éléments architectoniques aérospatiaux. Constance Adams travaille à la Nasa durant une dizaine d'années et aura le privilège de faire partie de l'équipe de développement du module gonflable Transhab. Ce module innovateur dans son architecture et sa structure dont la phase de conception était très avancée, ne verra jamais le jour à cause des réductions budgétaires sévères qui s'effectuent dans les années 1990 et qui manquent de peu d'annuler de manière générale le projet de l'ISS. Après avoir travaillé plusieurs années à la NASA, elle

⁷⁰ TedxTalk, TEDxHouston 2011 - Constance Adams - Space Architect, Youtube, 23 juillet 2011, consultée le 9 janvier 2022

fonde sa propre entreprise et bureau d'étude en architecture spatiale Synthesis Intl⁷¹.

L'influence des pouvoirs politiques et les contraintes budgétaires

En 2013, La décision d'arrêter le programme Space Shuttle a fait trembler le monde de l'aérospatial. La navette spatiale est le symbole même du progrès technologique de l'humanité et représente une grande fierté américaine. Son arrêt par les pouvoirs politiques pour des raisons budgétaires est ressenti comme un retour en arrière avec l'utilisation des fusées russes Proton datant des années 1960. Cette décision avait été prise bien en amont et avait mis en péril la réalisation de l'ISS. Cependant, l'accord international pour réaliser le projet de station spatiale a contraint les Etats-Unis à poursuivre le programme jusqu'à un certain degré de finalisation de l'ISS⁷². Le financement est le principal frein au design, bien plus que la technologie et l'ingénierie. Effectivement, la raison pour laquelle le design est un design de survie est que les états ne peuvent financer que le minimum. Ainsi, les besoins essentiels reçoivent en premier une réponse et pour cela les ingénieurs sont nécessaires avant les architectes. L'ergonomie et le confort viennent en second plan. L'habitude de travailler avec des ingénieurs est prise et l'aide des architectes paraît superflue. Cependant, avec l'allongement des durées de séjour les compétences de design d'espace sont requises. On peut remarquer que, dès que les missions ont dépassé les quelques jours, intuitivement les directeurs de conceptions ont fait appel à des consultants. La pleine reconnaissance reste toujours un rêve tant que le voyage spatial coûte des sommes exorbitantes. Les contraintes économiques se sont resserrées à la sortie de la Guerre froide mais Sandra Häuplik-Meusburger rappelle qu'elle a existé dès le début des programmes spatiaux :

*"Au début, [le design de l'ISS] avait l'air totalement différent, comme pour les missions lunaires. Mais commençons par l'ISS. L'ISS était énorme et avait onze modules et chaque année, c'était comme restriction, restriction, restriction, ... et puis on conservait le minimum. Le rover lunaire, par exemple, il y avait eu beaucoup de conception avec un gros rover lunaire puis restriction, restriction, restriction, ..."*⁷³

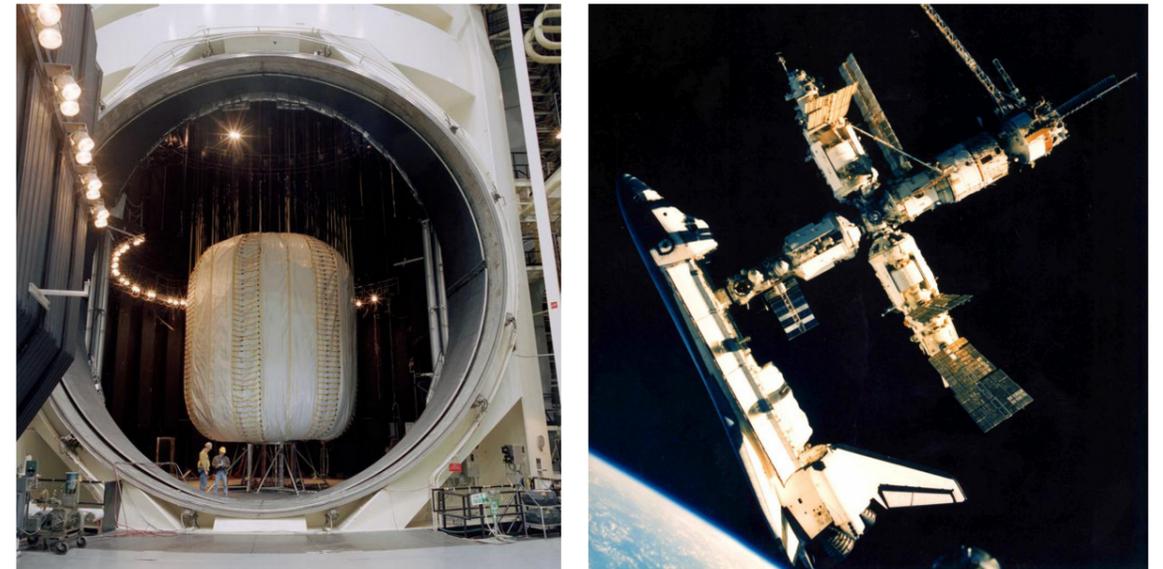
Ces coupures budgétaires ont un impact préjudiciable sur le design et par extension sur la santé et le moral des astronautes. Constance Adams qui est une fervente défenseuse du design spatial a cherché pendant toute sa carrière une solution pour relancer l'étincelle de progrès dans la course à la lune. Pour elle, Spoutnik représente l'espoir d'une nation et non une provocation⁷⁴. Elle ne trouve pas de solution et laisse en héritage la réponse à cette énigme aux futurs architectes spatiaux qui sont créateurs de la vie et non de la survie dans l'Espace.

⁷¹ <https://www.synthesis-intl.com/>

⁷² Cusp conference, *Cusp 2013 / Constance Adams*, Youtube, 11 mars 2014, consulté le 9 janvier 2022

⁷³ Entretien de HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT-PASSOT Prève, Novembre 2021

⁷⁴ Tedx Talk, *TEDxHouston 2011 - Constance Adams - Space Architect*, Youtube, 23 juillet 2011 et Cusp conference, *Cusp 2013 / Constance Adams*, Youtube, 11 mars 2014, consultées le 9 janvier 2022



Gauche, fig. 45 : Prototype gonflé du projet Transhab prêt à être testé dans la chambre à vide, 1998

Droite, fig.46 : Space Shuttle Atlantis amarré à la station MIR, 1995

(Sources : NASA)

Les comités et organisations qui soutiennent actuellement la reconnaissance du métier d'architecte spatial

Des organisations de plus en plus spécialisées se sont développées afin de soutenir l'émergence du métier. Le nombre d'architectes spatiaux étant encore relativement réduit, les mêmes noms se retrouvent au travers des différentes structures. Les trois principales organisations sont :

- AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) créé en 1963,
- SATC (Space Architecture Technical Committee) créé en 1975, sous-comité de AIAA,
- Spacearchitect.org créé en 2014, dépendant du SATC

Ces organisations deviennent de plus en plus spécialisées. Le SATC est la première organisation composée d'architectes et de designers industriels intéressés par le développement de l'architecture spatiale. Elle compose l'un des soixante-dix sous-comités de l'AIAA et est soutenue par ce dernier. L'adhésion à l'AIAA est une condition préalable à l'adhésion au sein du SATC. Son but est de participer et d'organiser des conférences et autres types d'événements, la promotion de la recherche en architecture aérospatiale, le conseil sur les compétences nécessaires pour travailler dans ce secteur, l'assistance aux étudiants lors de la réalisation de projets d'architecture spatiale, la communication entre les secteurs d'ingénierie aérospatiale, d'architecture et de design industriel. Les membres de ces organisations sont redondants⁷⁵ (fig.47). Olga Bannova est par exemple présidente au sous-comité d'éducation avant de devenir la présidente du SATC en 2020. Elle est aussi la directrice de SISCA (Sasakawa 75 SATC, *How to become a space architect ?*, Spacearchitect.org, 2014

International Center for Space Architecture) qui est le département d'architecture spatiale de l'Université de Houston. Elle écrit aussi en collaboration avec Sandra Häuplik-Meusburger *Space Architecture Education for Engineers and Architects, Designing and Planning Beyond Earth* (Springer, Vienne, 2016).

Bien que Spacearchitect.org soit dépendant du sous-comité, l'adhésion au SATC ne l'est pas afin de faciliter son accès. Ce site fut créé pour promouvoir le métier d'architecte spatial, méconnu et qui ne possède pas encore de formation précise pour y parvenir. La demande est toutefois croissante et bien réelle. Il s'agit d'orienter et d'éclairer les étudiants et jeunes professionnels intéressés par ce domaine en plein essor grâce à l'arrivée du secteur privé sur le marché. Il n'existe qu'un seul master d'architecture spatiale au monde depuis 1985, situé à Houston. Afin de pallier le manque de formation, le site veut offrir un accès facilité à ces connaissances, complexes à acquérir autrement. Il est mis à disposition une bibliographie qui se veut exhaustive sur les recherches effectuées sur l'architecture spatiale ainsi que des références de livres, de conférences et d'organismes utiles à la formations des architectes, ainsi qu' une brochure en ligne intitulée « Comment devenir architecte spatial ? ». L'organisation met en contact avec un réseau mondial inclusif qui favorise la recherche et le dialogue sur la vie humaine dans l'espace. Des colloques périodiques sont organisés sur l'architecture spatiale pour réunir des amateurs passionnés, des étudiants et de jeunes professionnels avec des spécialistes.

“Une chose importante est que c'est un nouveau chemin et vous devez en tracer un. S'il n'y en a pas, vous devez faire le vôtre.”⁷⁶

Les différentes organisations fondées ont été créées pour rendre plus accessible le métier et rendre disponible des professionnels capables d'aider les nouveaux arrivant dans le domaine à atteindre leur but.

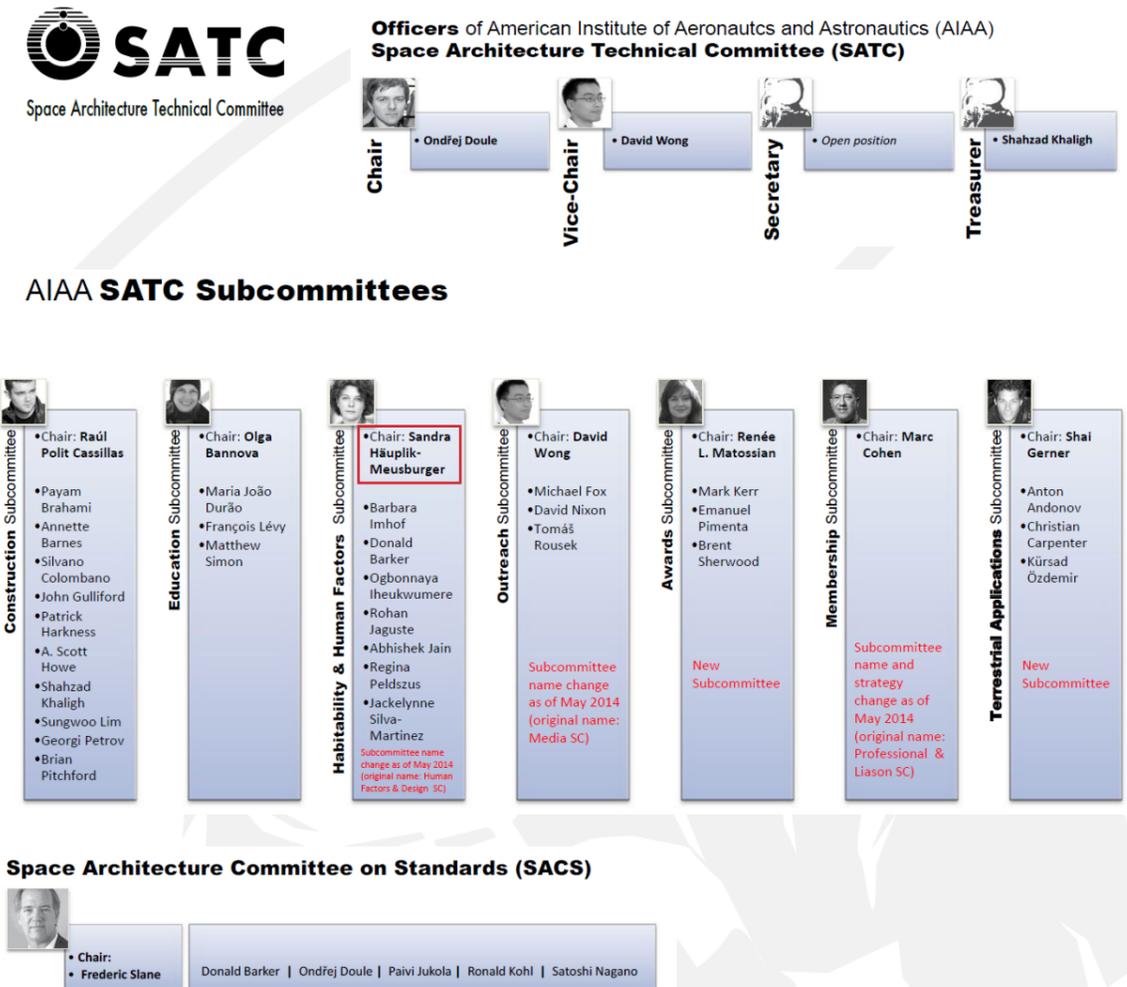


Fig. 47 : Tableau présentant les membres siégeant STAC en 2014. Entouré en rouge, l'architecte spatiale interviewée en annexe F.

(Source : spacearchitect.org)

76 Entretien de HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT--PASSOT Prève, Novembre 2021

2.3.2. Les concours d'Architecture Spatiale : terrain de progrès des agences d'Architecture spatiale

La course à l'Espace lourdement financée par les gouvernements est révolue. On observe depuis un développement du secteur privé, dont celui très renommé de SpaceX. Concernant les habitats spatiaux, les organisations publiques relancent les recherches à l'aide d'initiatives moins coûteuses telles que des concours, tandis que des acteurs privés répondent par passion et conviction à cette demande.

L'architecture spatiale encouragée par les concours

Le principal concours d'architecture spatiale est lancé par la Nasa en 2015 et s'intitule Impression 3D d'habitat. La compétition ne suggère pas un type de profil professionnel précis. Cependant, les attendus suggèrent des équipes composées d'architectes et de designers ainsi que d'ingénieurs. Le concours, qui se déroule sur quatre ans, se compose de trois phases, elles-mêmes divisées en épreuves ou niveaux de design et d'ingénierie. La première phase concerne le design et requiert des rendus architecturaux exprimant le projet d'habitation. La phase deux, complétée en 2017, répond aux questions de structure et matériaux. La phase trois de la compétition vise à tester les technologies et l'architecture du projet par l'impression d'un prototype à l'échelle 1/3 en autonomie dans un temps imparti⁷⁷ (fig.48). Une quatrième phase a été planifiée en 2019 mais jamais encore réalisée⁷⁸.

La consigne officielle précise ainsi : "Le concours d'habitat en impression 3D vise à développer et à démontrer les capacités de fabrication, avec les technologies d'impression 3D, d'un habitat sur un autre corps planétaire en utilisant des matériaux recyclés et/ou des matériaux indigènes locaux. La vision comprend des machines de construction autonomes déployées sur des surfaces planétaires pour construire des abris pour l'habitation humaine"⁷⁹

A propose des participants : "Entrepreneurs, investisseurs, professionnels de l'industrie, éducateurs et étudiants de domaines comprenant, mais sans s'y limiter, l'architecture, l'ingénierie, la fabrication, la construction et la science des matériaux. [...] Le programme recherche des innovations provenant de diverses sources, y compris des experts de l'industrie et des universités qui apportent des solutions précieuses et novatrices. La participation au concours offre l'occasion de soutenir la commercialisation de technologies de pointe."⁸⁰

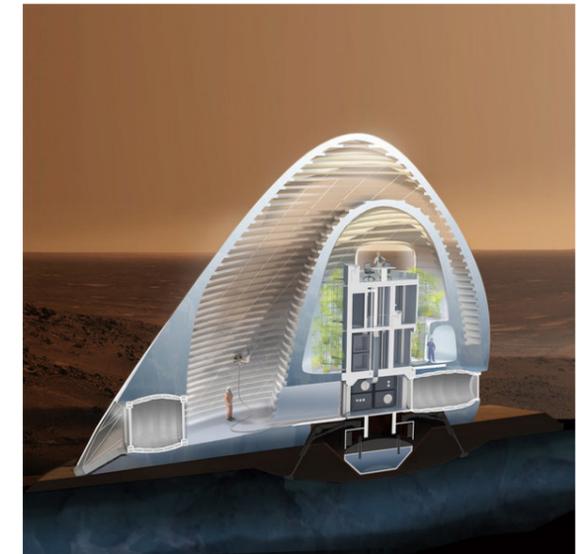
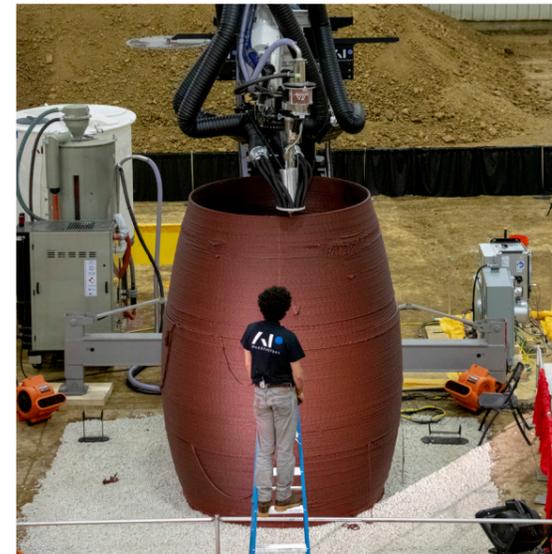
La notation du concours se base sur 3 critères : l'accomplissement de la maquette (3D ou physique selon les épreuves), l'utilisation des fonctionnalités BIM et l'esthétique. La

⁷⁷ HARBAUGH, Jennifer, *Latest Updates from NASA on 3D-Printed Habitat Competition*, NASA, 27 mars 2019, consulté le 10 janvier 2022 à https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/latest-updates-from-nasa-on-3d-printed-habitat-competition

⁷⁸ NASA, BRADLEY UNIVERSITY, *On-site habitat competition rules*, 27 juin 2018, consulté le 10 janvier 2022 à https://www.bradley.edu/sites/challenge/assets/documents/3DPH_Phase_3_Rules-v3.pdf

⁷⁹ idem

⁸⁰ idem



Gauche, fig. 48 : Prototype à l'échelle 1/3 en cours d'impression 3D du projet Marsha par AI Space Factory, 2019 (Source : AI Space Factory)

Droite, fig.49 : Coupe du projet Mars Ice House par Search+, 2019 (Sources : Search+)

récompense est divisée entre les 3 premières équipes et versée de manière proportionnelle au nombre de points obtenus à l'évaluation. Elle s'élève à un montant total de trois millions de dollars. Le montant versé fait partie des plus grands montants versés pour un concours de la Nasa traduisant l'importance qu'accorde aujourd'hui les administrateurs à l'habitabilité des futurs habitats spatiaux. Ce principe permet de développer l'innovation architecturale à moindre coût. Le fait que le type de technologie à utiliser soit imposé indique que l'agence spatiale exécute des études de faisabilité en amont. Les participants sont donc attendus à innover sur la forme et le matériau.

Ce concours est particulièrement tourné vers l'architecture, contrastant donc avec les origines de la Nasa. L'assemblée de participants présente majoritairement des agences d'architecture spécialisées en aérospatiale, des équipes d'étudiants mais aussi d'une agence d'architecture classique, celle de Foster + Partners. Les agences spécialisées en architecture spatiale semblent les plus pertinentes dans leur réponse et composent la grande majorité des gagnants. Certaines d'entre elles se démarquent particulièrement en remportant plusieurs récompenses tel que Search+ (spacexarch.com). Leur principe de maison de glace martienne (fig. 49), se distingue par la décision de ne pas enterrer l'habitat pour protéger ses habitants des radiations, mais au contraire, de l'élever dans un enveloppe de glace. En effet, cette ressource, ensevelie sous seulement 30 cm de régolithe (terre martienne ou lunaire), est très présente aux pôles. La glace est imprimée en deux épaisseurs largement espacées afin d'offrir un espace "tampon". A l'intérieur se situe un noyau vertical, envoyé depuis la Terre, contenant tout le support vital. Grâce à la transparence du matériau enveloppant, les habitants restent connectés au cycle

journalier du soleil. Effectivement, les journées martiennes sont très proches des nôtres avec seulement 37 min de plus.

Les agences d'architecture spatiale qui participent à ce type de concours partagent leurs projets (plans, images de synthèse, vidéos, etc) en source libre d'accès. Il est possible d'accéder aux documents de Search+ ou bien de AI Space Factory (aispacefactory.com), qui est un autre gagnant du concours d'impression 3D, ce qui encourage l'innovation architecturale. Leur accessibilité est particulièrement facile et complète sur leur site internet.

Les limites contemporaines des architectes dans l'architecture spatiale

Les agences d'architecture peuvent aussi travailler en partenariat directement à la demande des agences spatiales. C'est le cas de Foster + Partners qui effectua en 2012 pour l'ESA, un projet d'habitat lunaire imprimé en régolithe (fig. 50). Le projet a pour but d'étudier la faisabilité d'un habitat sur la lune à partir de matériaux locaux. L'étude est en amont des concours d'Impression 3D de la Nasa, et la question de la pertinence de cette technologie dans le cadre d'habitats spatiaux est encore entière. Le projet imaginé par Foster + Partners présente un design presque archaïque par son principe d'habitat troglodyte. L'idée est relativement simple et consiste à imprimer un mélange de régolithe et d'oxyde de magnésium⁸¹ au-dessus d'une structure gonflable. Quatre fines ouvertures zénithales transpercent la coque pour donner des ouvertures vers l'extérieur. Précédent de sept ans la complétion du concours d'impression 3D de la Nasa, la comparaison des deux réponses met en lumière les avancées technologiques et architecturales qui sont établies dans cette courte période. Nous pouvons donc attendre encore de plus de la future base lunaire, qui était prévue à l'horizon 2024. Les projets d'habitats spatiaux conçus par des architectes possèdent une vraie qualité architecturale et esthétique. Leur faisabilité est mise à l'épreuve et présente quelques faiblesses. Il est encourageant de les prendre comme inspiration plus que comme réalité. Ces projets sont un but à atteindre en fonction des avancées technologiques.

“L'impression 3D offre un moyen potentiel de faciliter la colonisation lunaire avec une logistique réduite de la Terre” (Scott Hovland de l'équipe de vols spatiaux habités de l'ESA)⁸²

“ En pratique, nous sommes habitués à concevoir pour des climats extrêmes sur Terre et à exploiter les avantages environnementaux de l'utilisation de matériaux locaux et durables. Notre habitation lunaire suit une logique similaire.” (Xavier De Kestelier, manager BIM de Foster + Partners)⁸³



Fig. 50 : Image de synthèse présentant le projet de Foster + Partners pour l'ESA en cours d'impression, 2012 (Source : Foster + Partners)

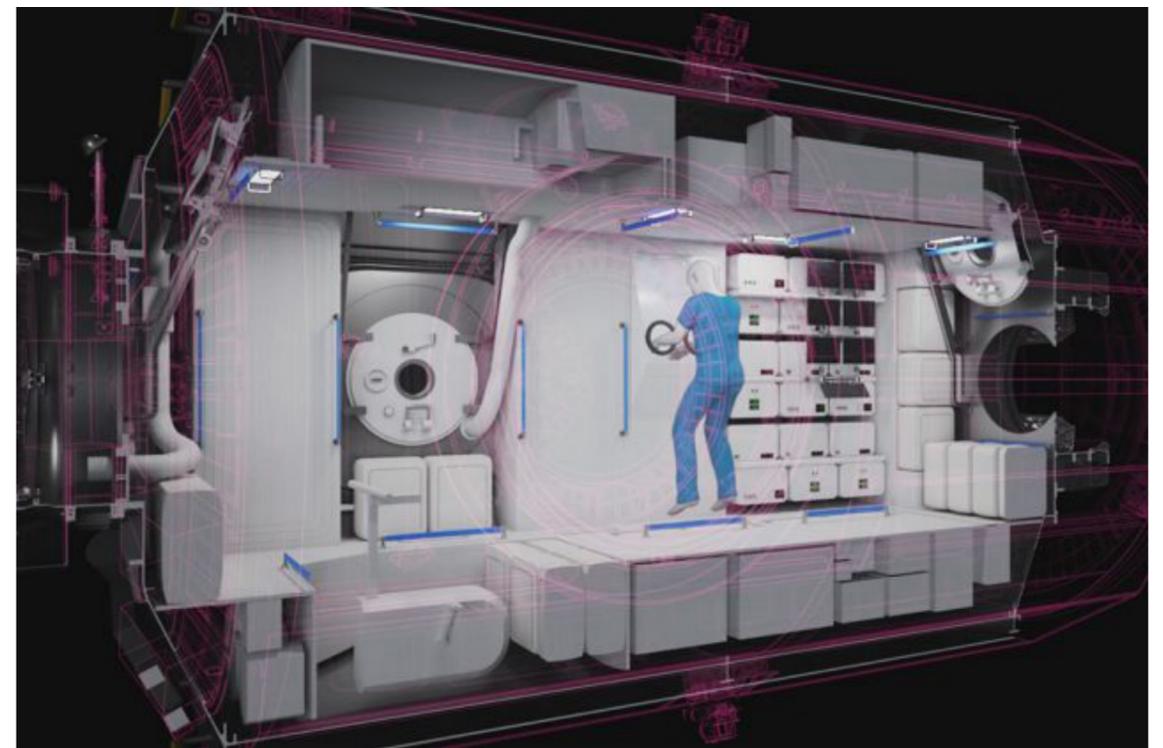


Fig. 51 : Proposition d'aménagement intérieur du module d'habitation internationale de la future station orbitale lunaire Gateway par Liquifer pour l'ESA, 2018-2019 (Source : Liquifer)

81 ESA, *Building a lunar base with 3D printing*, ESA, 31 janvier 2013, consulté le 10 janvier 2022 à https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing

82 Idem 51

83 Idem 51

Les projets d'habitats orbitaux qui se veulent réalisables avec les technologies contemporaines perdent une grande partie de leur qualité esthétique, à l'instar du projet Gateway de Liquifer pour l'ESA. Ces projets n'en restent pas moins architecturaux car ils sont réalisés avec l'attention d'un architecte. Comme nous l'avons déjà développé, le métier d'architecte est aussi un métier d'intégration de l'activité humaine dans un espace. En 2018-2019, Liquifer (liquifer.com) projette pour l'ESA un module d'habitation pour la future station orbitale lunaire Gateway à vision 2025 (fig. 51). L'agence européenne fait concourir deux équipes en parallèle : Thales Alenia Space Italie et Airbus Défense et Espace, cette dernière étant sous-traitée par l'agence Liquifer. Visuellement, le design proposé par Liquifer est similaire à celui de l'ISS⁸⁴. On reconnaît, par exemple, les barres de maintien bleues situées dans les modules américains. Le module représente un volume de 48 m³ pour quatre membres d'équipe et fait recours à des éléments déployables afin d'optimiser l'espace, tel que les cabines de sommeil. Il comprend aussi l'essentiel pour vivre et effectuer les missions : l'installation d'hygiène, l'équipement scientifique. Les rangements et équipements occupent les surfaces du cylindre, redessinant sa section circulaire en un carré, au centre un couloir de passage et d'activité. En tous points ce projet de modules suit le langage actuel des stations spatiales. La différence se trouve sûrement dans le fait d'accorder sa confiance aux architectes dans l'aménagement intérieur du module. Effectivement, son design paraît similaire mais le travail des architectes est d'agencer subtilement l'ergonomie des équipements afin de faciliter la vie des astronautes. En ce sens, ce projet est une réussite et possède potentiellement des chances d'être construit un jour car il est réaliste et réalisable.

Les agences d'architecture spatiale recouvrent de nombreux styles d'architecture : plutôt esthétique, plutôt technologique, plutôt réaliste, ... Touchant de cette manière divers domaines telle que l'architecture sur d'autres corps planétaires, la construction en apesanteur, les méthodes de construction. L'architecture reste donc diverse sur Terre comme dans l'Espace et l'architecte peut choisir la voie qui lui plaît. Les projets ambitieux et innovants restent aujourd'hui utopistes. Ils nourrissent cependant la pensée architecturale des futurs habitats spatiaux.

⁸⁴ Liquifer, *Gateway - I-Hab*, Youtube, 25 décembre 2019, consulté le 10 janvier 2022



Astronaute Karen Nyberg observant la Terre depuis la coupole réalisée par Thales Alenia Space, 2013
(Source : NASA)

Conclusion

Conclusion

L'architecture spatiale est un domaine jeune qui ne possède que soixante-dix ans d'expérience. Il est encore très malléable et intègre de plus en plus de disciplines. Ce mémoire pose la question de savoir *en quoi l'apparition de ce nouveau domaine redéfinit le métier d'architecte*. La présence de l'architecte dans le domaine spatial n'est pas une évidence pour tous les acteurs du secteur. L'architecte doit donc adapter ses connaissances et ses méthodes à cet environnement extra-terrestre. Ses compétences sont donc remises en question.

Un environnement extrême qui met à l'épreuve autant ses habitants que les architectes

Le caractère extrême de l'environnement spatial nécessite de grandes compétences techniques qui ne se trouvent pas à l'origine dans la formation architecturale. Cependant, l'architecte est observateur et peut apprendre les rudiments afin de travailler en coopération avec les ingénieurs pour gérer une meilleure intégration de la technique par rapport à l'humain dans l'habitat spatial. Les ingénieurs ont déjà pavé le chemin par de grandes avancées et découvertes qui facilitent l'apprentissage et la marche à suivre par les architectes. Les premiers ont créé l'enveloppe qui protège l'humain des dangers spatiaux, tandis que les seconds améliorent le confort physique et psychologique des habitants.

Bien que les compétences de l'architecte soient remises en question par le caractère extrême de l'environnement spatial et la spécialisation des ingénieurs aérospatiaux, l'architecte apporte ses méthodes architecturales afin de transposer ses connaissances dans un domaine parfaitement nouveau. En effet, le métier d'architecte est aussi un métier de recherches et les références sont essentielles même en tant que praticien. Le corpus d'habitats analogues aussi bien simulant un ICE que in-situ sont une ressource précieuse pour la compréhension des contraintes notamment psychologiques et l'optimisation du design. Les architectes utilisent dans l'appréhension de l'espace et de l'intégration du design, les outils standards de l'architecture : les plans/coupes, les axonométries, ... Les retours d'expérience sur ces habitats analogues mais aussi ceux des astronautes sont le meilleur outil des architectes pour l'amélioration de l'intégration du design.

La vision architecturale face aux limites techniques et économiques

Les propositions architecturales sont peu réalisées, notamment celles tournées vers une résolution esthétique. Elles sont mises à mal par les limites technologiques et matérielles actuelles. Le coût de construction dans l'Espace est extrêmement élevé, si bien que les solutions architecturales doivent être des réponses particulièrement efficaces à un problème clairement identifiable et possiblement périlleux pour la mission. Les réponses architecturales ne sont autrement pas réalisées et de nombreux projets ont été annulés pour cette raison.

Ces architectures restent pour autant importantes car elles sont un terrain fertile pour les perspectives d'avenir de la discipline tout comme le corpus imaginaire et de science-fiction l'est. Le métier d'architecte spatial contemporain est donc centré sur l'amélioration de manière

efficace du design des stations spatiales. L'attention architecturale se cristallise sur le passage d'un design de survie à celui de confort par des réponses architectoniques de plus en plus architecturales. Concrètement, le travail de l'architecte spatial vise à développer chacune des fonctions à l'image d'une maison avec la chambre, la cuisine, la salle de bain, le salon, ... La distinction des programmes est de plus en plus claire mais certains espaces restent absents tel le salon (espace de réunion, de socialisation et de loisirs) au profit des espaces consacrés au travail. L'architecte spatial participe au confort et au bien-être des astronautes. Cette tâche lui revient car elle n'est ni quantifiable ni mesurable par les outils et méthodes des ingénieurs.

Le lent processus de reconnaissance du métier d'architecte spatial

Le travail de l'architecte spatial est concrètement difficilement observable. Il doit donc se battre pour sa reconnaissance. Pourtant, les astronautes reconnaissent sa nécessité. Par exemple, l'élément le plus apprécié dans chacune des stations spatiales est la fenêtre. Elle est l'apport architectural le plus important qui ne cesse de s'améliorer, elle illustre la coopération fructueuse des différents corps de métier avec la mise en place de la coupole à bord de l'ISS en 2010.

Des acteurs individuels et des organisations soutiennent de manière croissante la reconnaissance de ce métier et offrent de plus en plus d'opportunités principalement au travers de concours. On observe une continuité entre l'architecture et le domaine spatial qui se retrouvent dans la construction d'infrastructures terrestres pour les entreprises et les agences aérospatiales. Ce contact rend visible la nécessité des compétences des architectes.

L'architecture spatiale remet donc en question le métier d'architecte par la nouveauté de son environnement qui oriente cette profession plus vers la recherche que vers la pratique. Cependant, le métier d'architecte terrestre comme spatial possède cette double compétence, seulement leur proportion est différente pour l'instant. Le débat sur la nécessité du métier d'architecte a lieu pour la construction terrestre. Les avis divergent sur la nature de son métier : artiste, ingénieur, anthropologue, sociologue, ... La discussion reprend pour sa branche spatiale où son travail reste majoritairement borné à la recherche anthropométrique, psychologique et sociale. L'architecte tout comme l'architecte spatial a un métier transdisciplinaire qui coopère avec différents corps de métier pour l'intégration optimale de l'humain dans son habitat. L'architecte a donc transposé son savoir-faire au nouveau domaine qu'est l'architecture spatiale.

BIBLIOGRAPHIE

Livres d'architecture et d'architecture spatiale

- BANNOVA, Olga, *Space architecture: human habitats beyond planet earth*, DOM Publishers, Berlin, 2021
- BUCKMINSTER-FULLER, Richard, *Operating manual for spaceship Earth*, Southern Illinois University Press, 1969
- GAGARIN, Yuri, LEBEDEV, Vladimir, *Survival and Space*, Bantam Books, 1969
- HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach*, Vienne, Springer, 2011
- HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, BISHOP, Sheryl, *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space*, Vienne, Springer, 2021
- HOWE, A. Scott.; SHERWOOD, Brent, *Out of this world : The new field of space architecture*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2009
- MEUSER, Philip, *Galina Balaschowa : Architektin des sowjetischen Raumfahrt Programms*, Berlin, DOM Publisher, 2014
- MEUSER Paul, *Architectural Guide, Moon*, Berlin, DOM Publisher, 2019
- NIXON, David, *ISS, Architecture Beyond Earth*, London, Circa Press, 2016
- PICON, Antoine, *La ville, territoire des cyborgs*, éditions de l'Imprimeur, 1998
- PICON, Antoine, *Culture numérique et architecture, une introduction*, Birkhäuser Basel, 2010
- RAHM, Philippe, *Histoire naturelle de l'architecture, comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments*, Pavillon de l'Arsenal, Paris, 2020
- RAHM, Philippe, *Architecture météorologique*, Archibooks, Paris, 2009
- ZUKOWSKY, John, préface par BUZZ, Aldrin, *Space architecture, the work of John Frassanito & associates for NASA*, Stuttgart, Axel Menges, 1999

Rapports et articles

- ADAMS, Constance, "Defin(design)ing the Human Domain: the Process of Architectural Integration in Long-Duration Space Facilities", *Proceedings of the 28th International Conference on Environmental Systems* (p.992-999), Society of Automotive Engineers, Warrendale, 1999, consulté sur <https://www.jstor.org/stable/44735826>
- BOUTARD, François, Raymond Loewy, le pionnier du design industriel, *Design Market Magazine*, 2016

COMPTON, W. D., BENSON, C. D., *Living and working in space, a history of Skylab* (p.130), NASA, Washington, 1983

ESA, *Building a lunar base with 3D printing*, ESA, 31 janvier 2013, consulté le 10 janvier 2022 à https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing

ESA, POLYAKOV, Valery, *Waste and Hygiene Compartment*, ESA, 2010, consulté 26 décembre 2021 à http://asimov.esrin.esa.it/SPECIALS/node3/SEMEHHSJR4G_0.html

FILMER, Joshua, "ISS Waste Disposal" dans *Futurism*, 13 Novembre 2013, <https://futurism.com/iss-waste-disposal-2>

HARBAUGH, Jennifer, *Latest Updates from NASA on 3D-Printed Habitat Competition*, NASA, 27 mars 2019, consulté le 10 janvier 2022 à https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/latest-updates-from-nasa-on-3d-printed-habitat-competition

LOEWY, Raymond, SNAITH, William, "Hability Study for orbital Shuttle", Nasa, 1972

LEBEDEV, V., *Diary of a cosmonaut – 211 days in Space*, Bantam Air & Space Series, New York, 1990

LEY, Willy, VON BRAUN, Wernher, *Magazine Collier's*, "What are we waiting for ?", "Crossing the last frontier", "A station in Space", 22 mars 1952

NASA, GARRIOTT, Owen, *Lessons Learned on the Skylab Program*, NASA, Houston, 1974

NASA, BEAN, Alan, *Skylab Experience Bulletin No.12 : Temporary Equipment Restraints*, NASA, Houston, 1975

NASA, Bluth, B.J., Helppie, M, *Soviet Space Stations as analogs*, NASA, Washington, 1986

NASA Sciences, BARRY, Partrick L., *Breathing Easy on the Space Station*, 12 Novembre 2000 à https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2000/ast13nov_1

NASA, WHISTON, Peggy, *Peggy Whiston's Journal - Exercise inSpace*, NASA, 2008

NASA History, SMITH, Rick, "100 Years of Possibility: Celebrating the Centennial Birthday of Dr. Wernher von Braun", 20 Mars 2012

NASA, JACKSON, Shanessa, *Life Support System*, mis à jour le 4 Août 2017, <https://www.nasa.gov/content/life-support-systems>

NASA, BRADLEY UNIVERSITY, *On-site habitat competition rules*, 27 juin 2018, consulté le 10 janvier 2022 à https://www.bradley.edu/sites/challenge/assets/documents/3DPH_Phase_3_Rules-v3.pdf

NASA, *Systems Engineering Handbook*, 11 décembre 2019 à <https://www.nasa.gov/seh/index.html>

NASA, Marshall Center History, *The Environmental Control and Life Support System (ECLSS)*, 10 Mars 2020, consulté novembre 2021 à <https://www.nasa.gov/centers/marshall/history/eclss.html>

NASA, *Main Support Systems*, NASA, non daté, https://www.nasa.gov/pdf/167129main_Systems.pdf

NELSON, Mark, *Lessons from Biosphere 2, Both the scientific community and the general public still have a lot to learn from the largest mesocosm reserach project ever conducted*, *The Scientist*, 1 Août 2018, cosnulté le 6 janvier 2021, <https://www.the-scientist.com/reading-frames/lessons-from-biosphere-2-64464>

PAULI, D. C, COLE, H. A., *Summary report on Project Tektite I. A multiagency 60-day saturated dive*, NASA, Department of the Interior et the General Electric Company, 1970

POYNTER, Jane, *The human experiment : two years and twenty minutes inside Biosphere 2*, New York, Basic Books, 2006

SATC, *How to become a space architect ?*, Spacearchitect.org, 2014, <http://spacearchitect.org/how-to-become-a-space-architect/>

Science J Rank, *Biosphere project, designing Biosphere 2*, Science J Rank, consulté le 6 janvier 2021, <https://science.jrank.org/pages/914/Biosphere-Project-Designing-Biosphere-2.html>

Site internet

aispacefactory.com

biosphere2.org

capcomespace.net

coolantarctica.com

fosterandpartners.com

historycollection.jsc.nasa.gov

liquifer.com

nasa.gov

ntrs.nasa.gov

spacearchitect.org

spacearch.com

synthesis-intl.com et autres agences d'architecture spatiale

Videos

Cusp conference, *Cusp 2013 / Constance Adams*, Youtube, 11 mars 2014, consulté le 9 janvier 2022

Documentary Tube, *HOW IT WORKS: The International Space Station*, Youtube, 3 juillet 2015, consultée le 28 décembre 2021

ESA, *Thomas Pesquet fait visiter l'ISS avant son retour sur Terre*, Youtube, 6 novembre 2021, consultée le 8 janvier 2022

Liquifer, *Gateway - I-Hab*, Youtube, 25 décembre 2019, consulté le 10 janvier 2022

NASA, *Departing Space Station Commander Provides Tour of Orbital Laboratory*, Youtube, 19 novembre 2012

TedxTalk, *TEDxHouston 2011 - Constance Adams - Space Architect*, Youtube, 23 juillet 2011, consultée le 9 janvier 2022

Interview

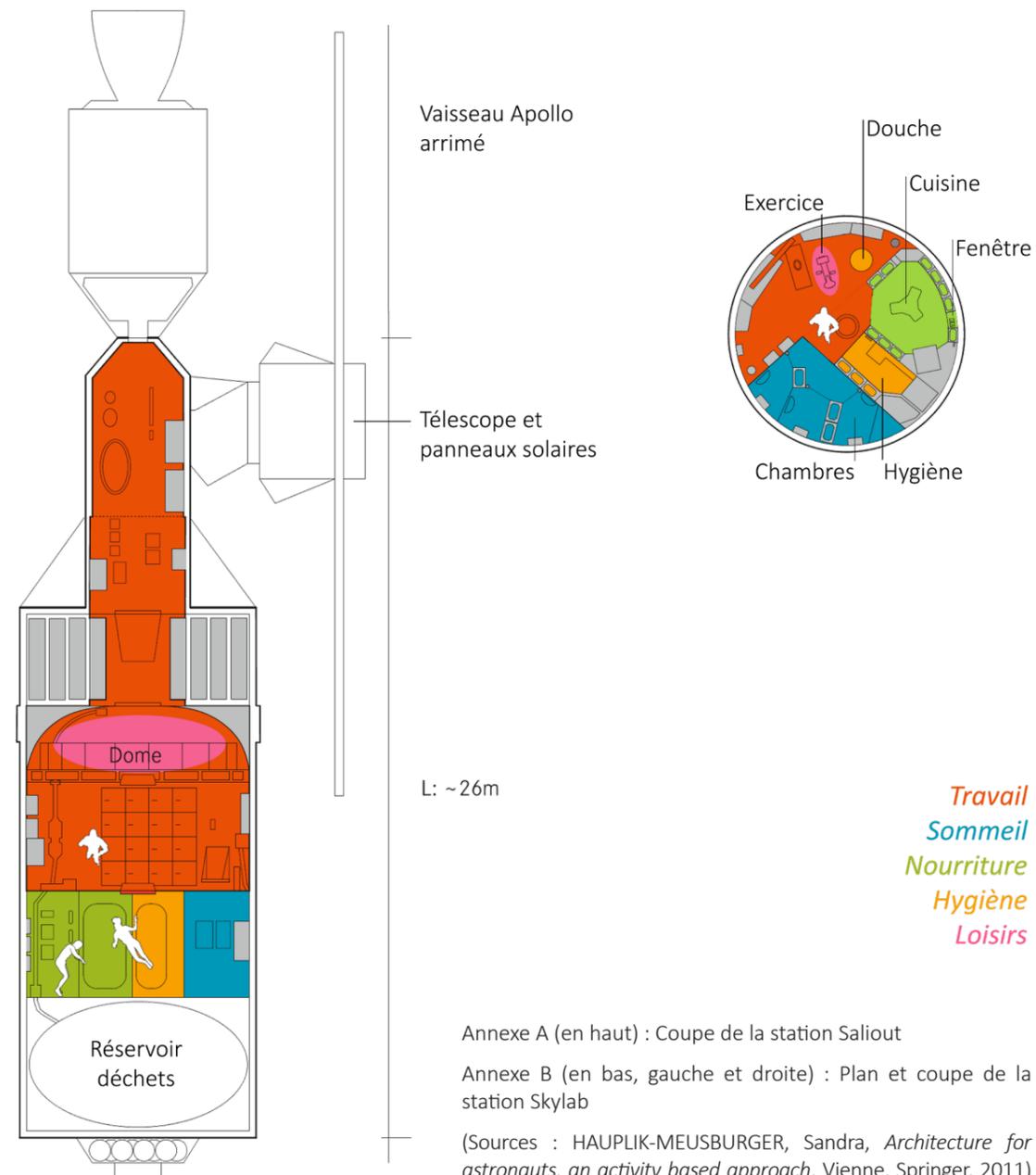
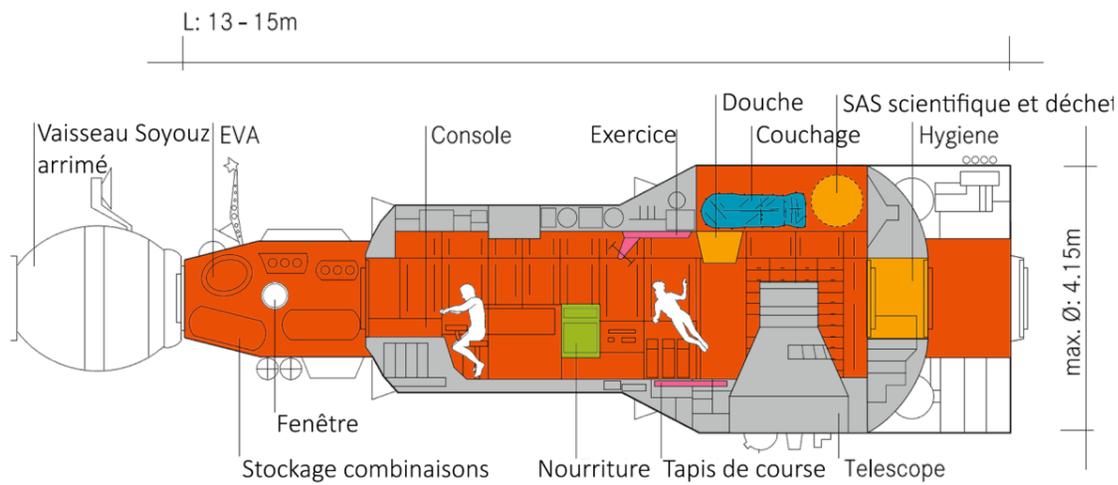
BALACHOVA Galina par MEUSER Paul dans *Architectural Guide, Moon*, Berlin, DOM Publisher, 2019

HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra par CHOBERT--PASSOT Prève, Novembre 2021

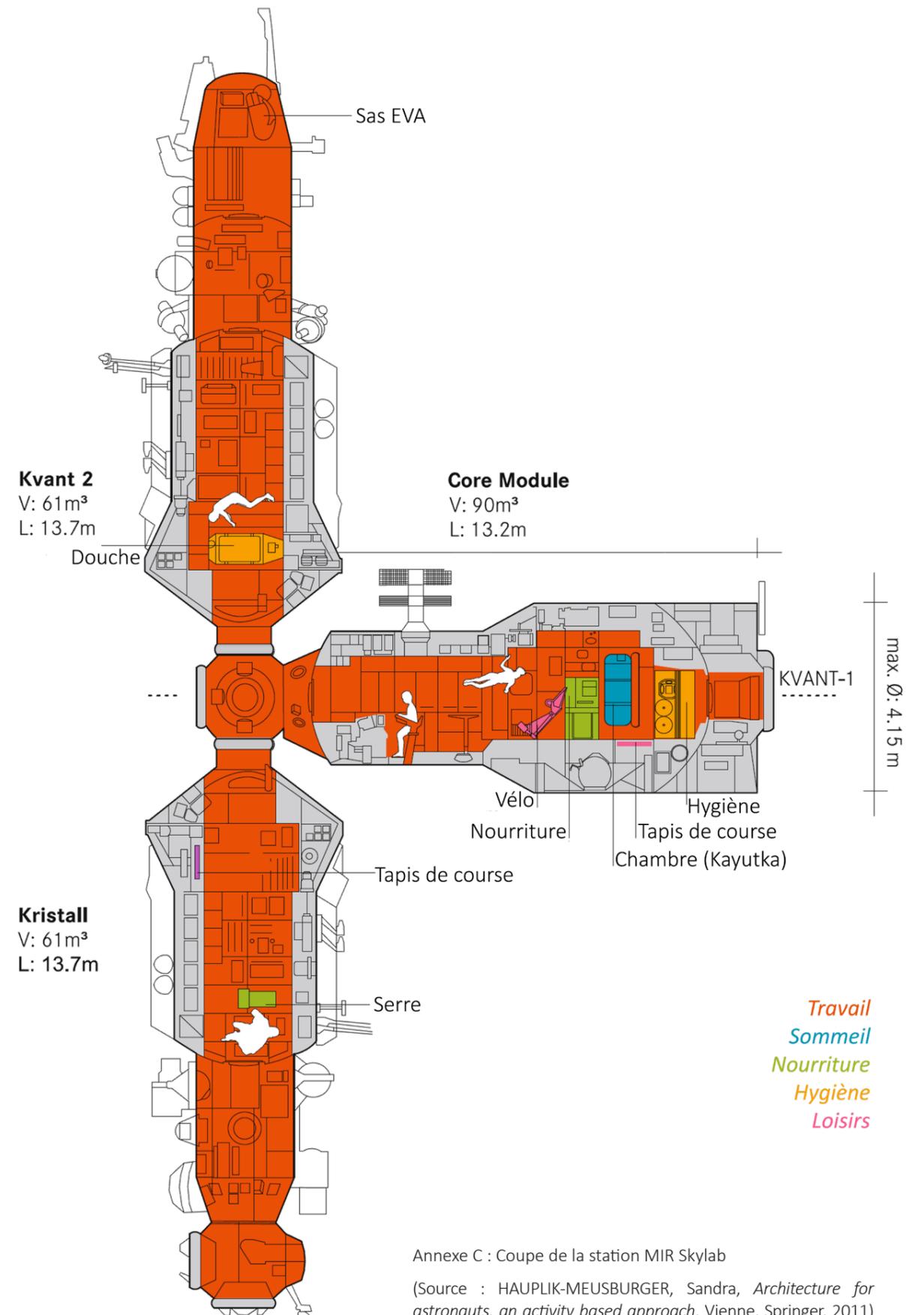
KUMAR Alexander par HAUPLIK-MEUSBURGER Sandra juillet 2012, disponible en ligne à <https://cba.fro.at/65695>

PRUNARIU, Dumitru-Dorin., Interview non publié par Sandra Häuplik-Meusburger, Vienne, 2011

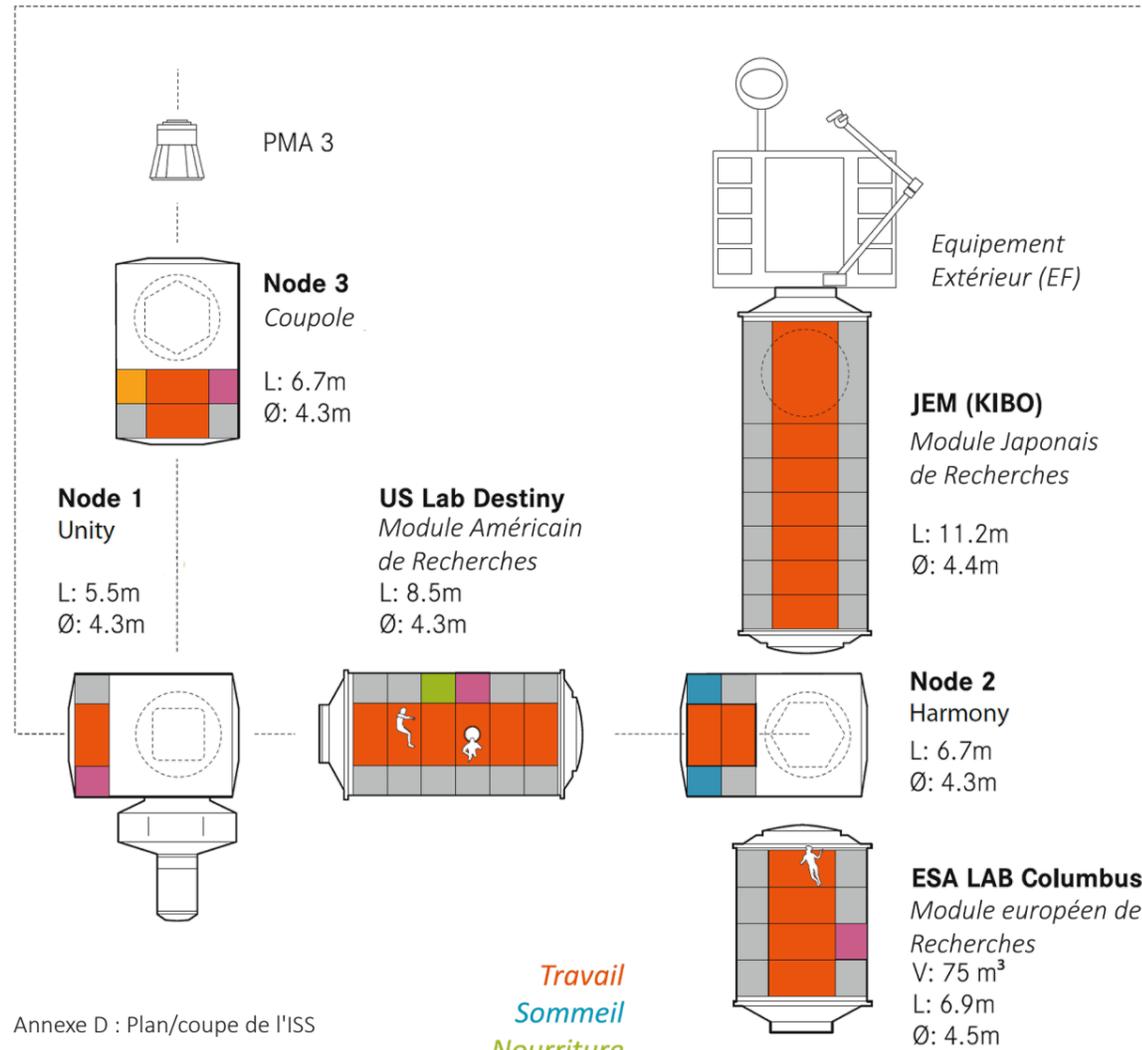
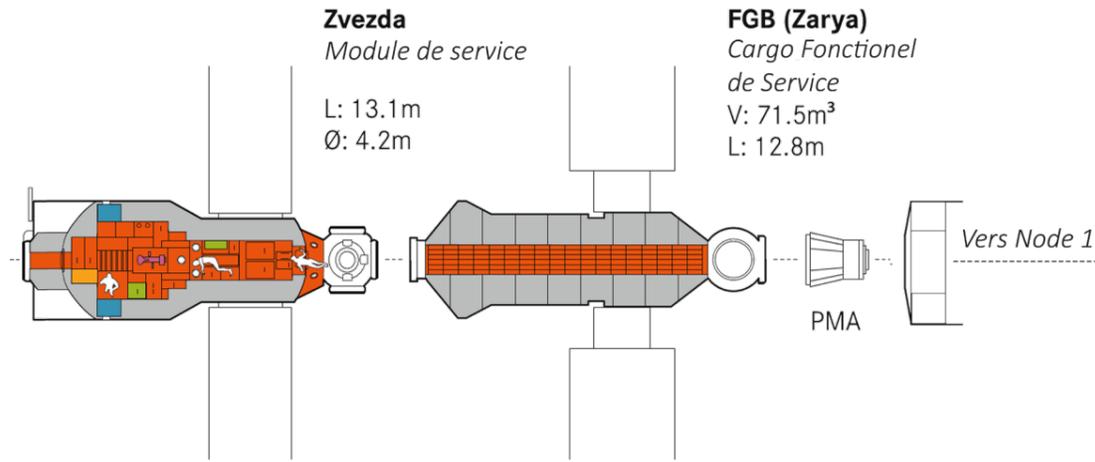
ANNEXES



Annexe A (en haut) : Coupe de la station Saliout
 Annexe B (en bas, gauche et droite) : Plan et coupe de la station Skylab
 (Sources : HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach*, Vienne, Springer, 2011)



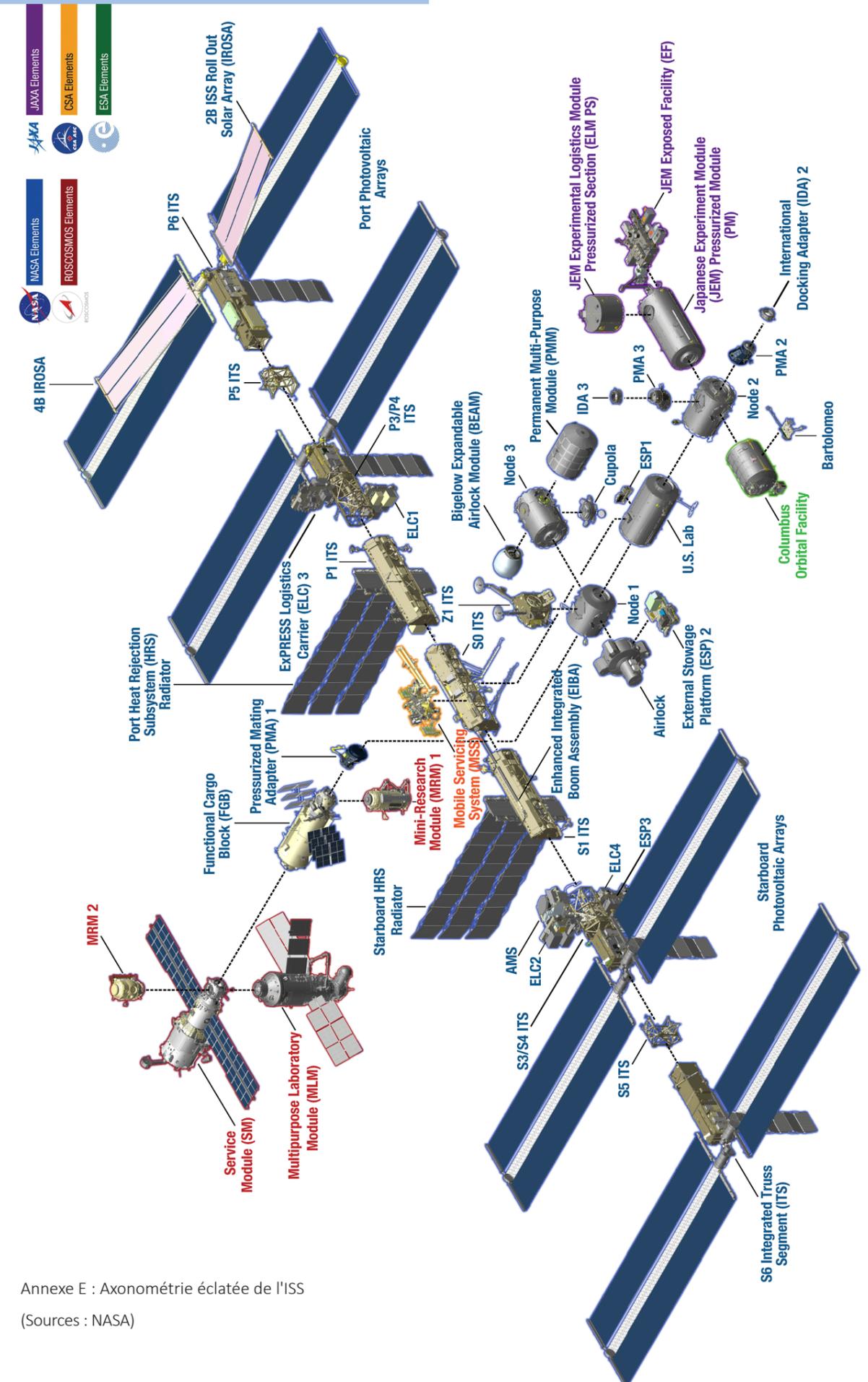
Annexe C : Coupe de la station MIR Skylab
 (Source : HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, *Architecture for astronauts, an activity based approach*, Vienne, Springer, 2011)



Travail
Sommeil
Nourriture
Hygiène
Loisirs

Annexe D : Plan/coupe de l'ISS

(Source : HAUPLIK-MEUSBURGER, Sandra, Architecture for astronauts, an activity based approach, Vienne, Springer, 2011)



Annexe E : Axonométrie éclatée de l'ISS

(Sources : NASA)

Annexe F : Entretien avec Sandra Häuplik-Meusburger

Architecte spatiale et auteure de *Architecture for astronauts, an activity based approach*, Vienne, Springer, 2011 et *Space Habitats and Habitability : Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space*, Vienne, Springer, 2021

How did you discover space architecture and what was your personal path?

It was not the direct way as you can imagine maybe, I started because I am interested in the relationship between human and build space. And following my path for the diploma and my dissertation, I wanted to examine it in the most extreme environment, and it happened to be in Space. So, this led to my first book Space Architecture for astronauts where I interview some astronauts in relation to the lift in Space. And you know one storm is after the other storm and ... Now I am teaching at the TU Wien where I do projects. That's the short version. But actually, if you are interested, I'm posting a website of our community. Do the Spacearchitecture.org ?

Yes, I do ! That's actually how I discovered my references for Space Architecture

And you can see that we have different path of career depending on where you are from. So, for example in the US, they have a different path because they have a different educational system. As in Europe and also Asia, and you will see a lot of different stories. But one important thing is that it's a new path and you have to make one. If there is none, YOU have to make one. It's not a path that have been made in the past and you can walk easily.

Yes it's not an obvious path, except perhaps for the master in Houston. I think there is only one Space Architecture degree.

But still after the master, you don't know what you are doing. You still need to find your way to see things, to see the project, how to integrate it into your life. And there is many different path. One thing that is also important for me is that doing Space Architecture was not my goal. For me, it was the field of experimentation, what could learn from Architecture HERE for us humans on the planet. This is I think the most interesting part. Because there is after all not a lot of Space habitats to be built so it would be a shame to go to school, to University, to do a PhD if you can not give your knowledge to the people that live on Earth.

This might be linked to the conclusion of my thesis. I came to the conclusion that the profession of Space architects, is not one of a practitioner but more of a theorist or a researcher. What would you say in your experience?

I think this is an interesting question. I would say it's neither nor, similar to Architecture on Earth. I don't see ... I think it's important to build. I think it will be very important that the

first the lunar base, a habitat, is made by someone that has experience in building. Because there is a lot of steps between a design, a prototype, and the actual building. And a lot of know-how also, in this transmission from head to plan, to model and then to the lift in Space. But similar to on Earth, there is a BIG research part in our work. And this is why I started Architecture actually and kept doing it because to my opinion every project is new. It depends on the humans who live there, who use it, it depends on the site, the country, the regulations. I think this is the interesting part. But in relation to Space Architecture, Yes, there is not a lot of example there, yet.

I think you said that the first moon habitat should be made with architects. But, I thought that space stations like the ones you describe in your book are already Space Habitats. But, architects haven't really done anything yet. So ...

I think it will be very necessary, because otherwise people can not survive. I just wrote a book with Sheryl Bishop where write on survival to thriving. But I also think, the further you go away, the more you need a good space to live and work. And this is what we can do, this is what you learn. It's not about making things right for a specific task, it's also how you use it now and how you will use it in a few years. This is what architects can do, we can't really design efficient spaces that is habitable at the same time. It's not only a matter of size and square meters, but also how you include also all the parameters to construct on lighting, relationships, ...

So do you think, for example the ISS, is habitable, in an architect's sense ? Or is it still like survival ?

Well, I think the ISS is a beautiful piece of architecture, and also it is the only one that we have, and the Chinese also have it because it's a huge huge project. It's really something that we all, or many engineers and probably world class architects, realized so its worth it for sure, and works. But, because it's so close and because the astronauts are trained it's easier, so they can all do the job there. When we look forward to places where normal people will go or with less training. For example, the toilet from the tourists flight is in the news because it didn't work and because it was awful to use, and they had to where diapers. If you miss things like this that are related to such normal human activity. You know that astronauts have to train how to use the toilets. It changes the people who go to Space, the reason people go to Space and the Architecture will be more relevant because you need this privacy. You need that place where you can be in your own space, whatever it is. And you also need space where you can socialize and meet. So there are some relevant architectural elements that need to be integrated and that are not necessarily seen by engineers.

At this stage, are there some architects who are involved in the process of conception of the ISS ? I haven't seen any names, but I know that in the past some architects have been consulted like Galina Balachova and others. Are there today some consultants or even fully integrated architects?

For example, the cupola is made by Thales Alenia Space. I had an internship there a long time ago, and they had a special habitability architectural department, and the leader of the department was an architect. They also had a psychologist there and ergonomists. They had on purpose different professions. They didn't work directly on architecture but on the ideas and the integrations. The Italian approach was, I think, the most human. I think it is related to the history of Italian design. I mean it has always been great and grand. So, the approach of how to do things ... They have this ergonomic specialist, a psychologist, an architect and other people working on that idea [the cupola].

Then we have the deployable habitat, the beam habitat you know ? This is from Bigelow and Bigelow brought this concept from a tent to NASA. They developed it for NASA for the project Transhab. And Constance Adams and Chris Kennedy. Constance Adams also has beautiful papers. Unfortunately, she died a two years ago, very young, much too young. But she was one, for example. There always have been architects working on Space projects, but they were called I think, not architect, but ...

Like Raymond Loewy was a consulted on Skylab ? He was an ...

Yes, Raymond Loewy, an industrial designer, very famous industrial designer. I think he was one of the big names at that time. That work for many [?] at that time : Shell, ... So there is some contribution of architects but the problem is, for example ISS ... At the beginning it looked totally different, every mission, also the lunar missions. But let's start with ISS. ISS was huge and had living modules and every year it was like cut, cut, cut and then the minimal. The lunar rover, for example, they had many design with large lunar rover and then cut, cut, cut, ...

Yes, I believe that was at that time that the budget was cut a lot by the government.

Yes it's a matter of politics, a matter of priorities. It depends on who is talking to who. But, the Russians were the first one up to Skylab, with Salyut and then MIR station, with the real benefits that is not just letting an architect work on the colors. The architect has the advantage that he really knows how to organize space in relation to human efficiency and pleasure. And when you have an architect working on a team with other social scientists, of course if people work better at their workplace, they do better jobs. It's similar to Earth's environment, at Google or Amazon, all these big companies, they know this. Their headquarters are great, large, beautiful cities. You always have to communicate this advantage: why Architecture is important and relevant. Because it's soft and cannot be calculated, sometimes it's difficult to communicate.

I would like to know to ask questions on your own experience. I saw on your website that you did a lot of Space Architecture. I would like to know how you found all these opportunities and clients. How difficult was it ? I seems to me that everything is happening in Houston so how did you manage to find all these opportunities in Europe.

Yes, it is difficult, it is ... But, I think it is the same with all the new things, if there is no way you

have to make your own. It is important to know where you want to go. It might be strange to say, but if you know where you want to go, you will find the way. In short, it is trying every opportunity that you can get. Just like now, you write me an email, talk to the people you want to talk to. Go to the IAC conferences in Paris, it's the International Astronautical Conference where people from worldwide gathers to exchanges ideas. It is the perfect idea to meet people, especially young people. Then, there is the Hiseas Habitat in Hawaii. They are always searching for people that can go there and test it. And they have workshops. For example, Spacearchitect.org community that you know, and SATC. STAC is the technical sub-committee from AIAA, and you can apply to become a member. The thing is, it is limited to people, but we do take students as members. When you see something that interest you, go for it. When you see they search for PhD, apply to it. Who knows what will happen? You should not be shy to take opportunities.

Actually, I have a question about PhD. I thought it would exist PhD in Space Architecture, but I haven't found anywhere how to do one. Is there any opportunity, or should I find a professor who would like to accompany me ?

I would suggest you find a PhD that suits your know how. Not especially in Space Architecture. For example, you are in Paris, and you are interested in construction, go to a university that is very good in construction. Nowadays, it is good in every field, not only Space Architecture. It is good to have a broader spectrum, to have a specific knowledge about something. Whatever it is, combine it with engineering, building physics, biomechanics, or psychology. Combine it with whatever is your own interest. This would be my suggesting. And then you can find a PhD. If you don't find a PhD directly, you will find one indirectly.

It gives me idea. I believe we have in my school a laboratory for PhDs which is specialized in sociology. I would be a great approach for a PhD in Space Architecture. So it might be interesting.

Yes, it is for example !

I lost track of my guideline, let me find another question... Since you are a professor at the university of Vienna, what do you teach you students ?

I can post some links. We have, at the moment, a module called Emerging fields in Architecture. This may be interesting because we had the lectures from last year and this year are online, and many of them are related to what you may be interest in. And there are a few coming up. I am posting a link of where the lectures are stored and one where planning is kept. Then, we also have studios. For example, I am leading a studio in collaboration with another university on lunar habitat. And we publish them, this is where you can find the booklets. And there is also a French community that is quite large.

Oh really ? I haven't found a lot of French names. I found only one who is a professor at the Architecture school of Strasbourg. But, he does not publish.

I am giving you the name of one [Emmanuel Dufrasnes], who is connected to them. You have a quite large network. You can tell him that I gave you his name and that you want to be part of the ... the "French" haha.

About teaching, do you think we should teach more this discipline at school and in Architecture schools as well ? Or is it normal that it is still a niche and that it is difficult to access ?

For me, Architecture in extreme environment is really interesting for many issues, not only related to Space Architecture. For me building Space Architecture is only one part of it. More interesting is what we can learn for life on Earth. There is a lot with sustainability issues, water usage, recovery, or modularity. It is also a practice where we can teach conceptual thinking and visions. Visions is something very important in the architectural education. Because if an architect does not have a better vision for society, we are very poor. Technology is also important for many aspects. I think it is okay that it is still a niche in many different professions. It is related so psychology, sociology, computer, 3D printing, biology. I think it is good that it is like this, and I think it may be not good when it is too specialized. It sounds a bit strange but if we get too specialized, it is a bit of a cut. Because I think Space Architecture is interdisciplinary. I think similarly about Architecture, it is also very hard to teach Architecture. It is something you have to learn but also to experience. The same goes with Space Architecture. It is not mathematics or biology where you learn and then you know it. It needs a critical reflection, a lot of thinking. Trying out and not doing well.

Have any of your design, theory or things that you learned through all your researchers already been built in Space or applied in Space Architecture or even extreme environment.

No, nothing has been built. I mean, I have an office, ... As I said, I use Space Architecture as a laboratory and a thinking tank. Something where you can experience or analyze things that are not easily seen if you don't change perspective. In that way, a lot of the issues that I have been working on the last years, are integrated into what I do or at least I try to. The other thing is the books, for example, that we do or the lectures is ... preparing the vision and helping others creating visions, for example with students. They open a book, they read, they think and hop it gets something. Students that are ten- or twelve-year-old are even better, at this age. It is a guiding function.

How did your research on extreme environments influences your terrestrial architecture that you do today, how did it change you own thinking and perspectives on Architecture ?

It changed it a lot. It is a question that is hard to answer because you can not easily transfer a solution from one environment to the other. But you should not underestimate the way of thinking how to use materials in the life cycle. So, where it comes from, how it is produced, how it is used and what happens after the lifetime. One important aspect is how things are used by different people over a long period of time. This is a difficult and challenging task for an architect, but architects can really do this well. Making place where you can be single, alone, in

family, spaces that can be adapted. It sounds normal, but in real life it is not that normal. One big example that I already talked about, is privacy and social space. You need a space where you can retreat from the others, and you need a space where you can have a party. Then you need a space where you can talk about someone, and you don't want the other one to know. Otherwise, it makes even more difficult. One more thing is storage. It is a problem on Earth and here you have the cellar, you can put everything down. And trash management that also something we can learn. That's actually something we already knew but we rediscover it every few years or centuries. Humans forget how to build or how to plan houses where people don't kill each other.

But still microgravity is something new...

Yes, this is something fantastic, this is something totally new. It is also interesting that you can use all the spaces, there is no floor, no ceiling. But what we have learned is that humans don't change so much. We like to see what we are used to, your parents have told you what is right and what is wrong. There is this famous example of the Skylab's table, where nobody would float over the table because it was seen as unpolite. But at the same time, it was a space that was not used, which is also strange because it would be more functional and efficient. But because of the human socio-cultural issues, ... That's interesting to see with the orientation, we are used that light comes from above and not from the side, it is irritating for us. If we are in a room that is upside-down it is difficult for us to work. That is why even the model of the ISS has an orientation. It is interesting that we take so much with us. We might be able to design the weirdest places, it will not fit us, or maybe just for a few moments. But when we want to work, to talk in private, or relax, there is a common scheme that we share, of space and possibilities.

Are there some regulations and norms in Space Architectures ?

Environment, environment, environment, ... You need to know gravity because it impacts everything, orientation, feelings, fluids, our vision. We state as a designer that the body position changes. For example, I would not need a table and a chair. My head and my hands would have a different position, looking out at the window, we would have a different angle. Everything that you learn in Architecture is actually not usable. You have to think from the human need. Because in a gravity regime, nothing works as would have learned in building physics and dimensions, stairs, room heights and volumes. That is why I started the research from a human activity point of view. Because, we are the only constant, the rest is new, unusual, and extreme. In addition to the change of our relation to the environment comes the facts of the environment: radiation, micrometeorites; no air to breath, you can not go outside. So, there are a lot of hard facts that is the ABC. But if should design in the desert or in Antarctica you also have to learn your lessons. If you do not do it right, you will not have good solutions. That is essential : the environment

Entretien en appel vidéo fait le 9 novembre 2021 par Prève CHOBERT-PASSOT

école nationale
supérieure
d'architecture
de **paris-belleville**
