Habiter les extrêmes : la conception des habitats dans les milieux reculés

Chadi Sleilati

▶ **To cite this version:**

Chadi Sleilati. Habiter les extrêmes : la conception des habitats dans les milieux reculés. Architecture, aménagement de l'espace. 2019. dumas-02492573

HAL Id: dumas-02492573

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02492573

Submitted on 27 Feb 2020

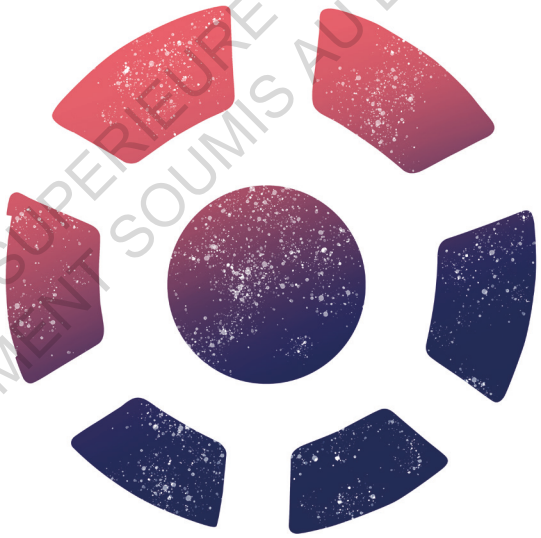
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

CHADI SLEILATI

HABITER LES EXTRÊMES



LA CONCEPTION DES HABITATS DANS LES MILIEUX RECULÉS

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

HABITER LES EXTRÊMES

LA CONCEPTION DES HABITATS DANS LES MILIEUX RECULÉS

MÉMOIRE DE MASTER EN ARCHITECTURE

SÉMINAIRE **AMBIANCES, RÉFÉRENCES, DISPOSITIFS, EFFETS**

RÉALISÉ PAR **CHADI SLEILATI**

ENCADRANTS **PASCAL JOANNE**
IGNACIO REQUENA-RUIZ

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ENSA NANTES
2019

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

AVANT-PROPOS

Devenir le premier astronaute à poser le pied sur Mars est un rêve partagé par beaucoup d'enfants découvrant les aventures de leurs héros qui ont marché sur la Lune 50 ans plus tôt. Le besoin et la curiosité d'aller plus loin et de dévoiler les mystères encore cachés du cosmos est un trait inné dans la conscience humaine.

Le sujet traité représente le fruit du mariage entre une passion d'explorer l'inconnu et de comprendre la place de l'homme dans l'univers, et mon parcours professionnel qui consiste en une grande partie à concevoir l'espace pour les humains dans cet univers. Aujourd'hui, avec le regain d'intérêt de l'exploration de l'Espace, et des envies de colonisation des mondes extra-terrestres, de nouvelles questions commencent à se poser afin de donner des réponses à des sujets jusqu'alors inconnus. Les diverses expériences de la dernière décennie en matière de projets habités dans l'Espace et dans les milieux extrêmes terrestres nous ont munis d'un bagage riche et des savoirs inestimables.

Ce mémoire propose d'enquêter sur le rôle de l'architecte dans cette nouvelle ère humaine, ainsi que sur les possibilités d'intervention et les solutions qu'il pourra apporter pour contrer les effets de confinement dans les habitats éloignés. En visitant et étudiant les différentes architectures destinées aux environnements extrêmes, nous essaierons de dégager les points forts et marquants qui permettent d'assurer une ambiance de bien-être au sein des milieux les plus hostiles.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier les directeurs de ce mémoire, M. Pascal JOANNE et M. Ignacio REQUENA-RUIZ, enseignants et chercheurs à l'ENSA Nantes, pour leur patience, leur disponibilité, et leurs conseils bienveillants tout au long de l'année.

J'aimerais aussi gratifier les efforts de ma famille et mes amis pour leur encouragements et leurs nombreuses relectures et corrections. Un grand merci à ma soeur Joëlle pour sa précieuse aide dans les moments critiques.

Je remercie aussi de façon globale toute personne qui m'a encouragé, et avec qui j'ai pu avoir des moments d'échange durant la période de rédaction.

Ce mémoire a été davantage nourri par le réseau scientifique 'ARCHES' spécialisé dans les architectures extrêmes, qui s'est avéré être une source inestimable d'information.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 2

REMERCIEMENTS 4

INTRODUCTION 9

1 À L'AUBE DES GRANDES EXPÉDITIONS HUMAINES 15

1.1 HISTOIRE DE L'EXPLORATION 16
1.2 PREMIERS HABITATS ISOLÉS 18
1.3 PRISE DE CONSCIENCE DE LA NOTION D'ESPACE 20

2 L'ESPACE, UNE NOUVELLE AVENTURE POUR LES ARCHITECTES 23

2.1 GALINA BALASHOVA, PREMIÈRE ARCHITECTE DE L'ÈRE SPATIALE 24
2.2 RAYMOND LOEWY ET L'ARCHITECTURE DES VAISSEAUX SPATIAUX 29
2.3 L'ARCHITECTE COMME PROMOTEUR DE BIEN-ÊTRE 31

3 L'ESPACE ARCHITECTURAL ET LA VIE EN CONFINEMENT 35

3.1 LES ESPACES 38
3.2 VIE PRIVÉE ET COMMUNAUTÉ 41
3.3 L'ÉQUIPAGE 42
3.4 TRAVAIL ET DÉTENTE 44

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

4 LES HABITATS DE L'EXTRÊME : TERRAINS D'ÉTUDE 47

4.1 STATIONS SPATIALES : PREMIER PAS EN DEHORS DU VAISSEAU TERRESTRE 47
4.2 SITES ANALOGUES TERRESTRES : CONCEVOIR POUR L'ESPACE, SUR TERRE 64
4.3 VISIONS FUTURES DES HABITATS ÉLOIGNÉS 84

5 ANALYSE ET SYNTHÈSE 89

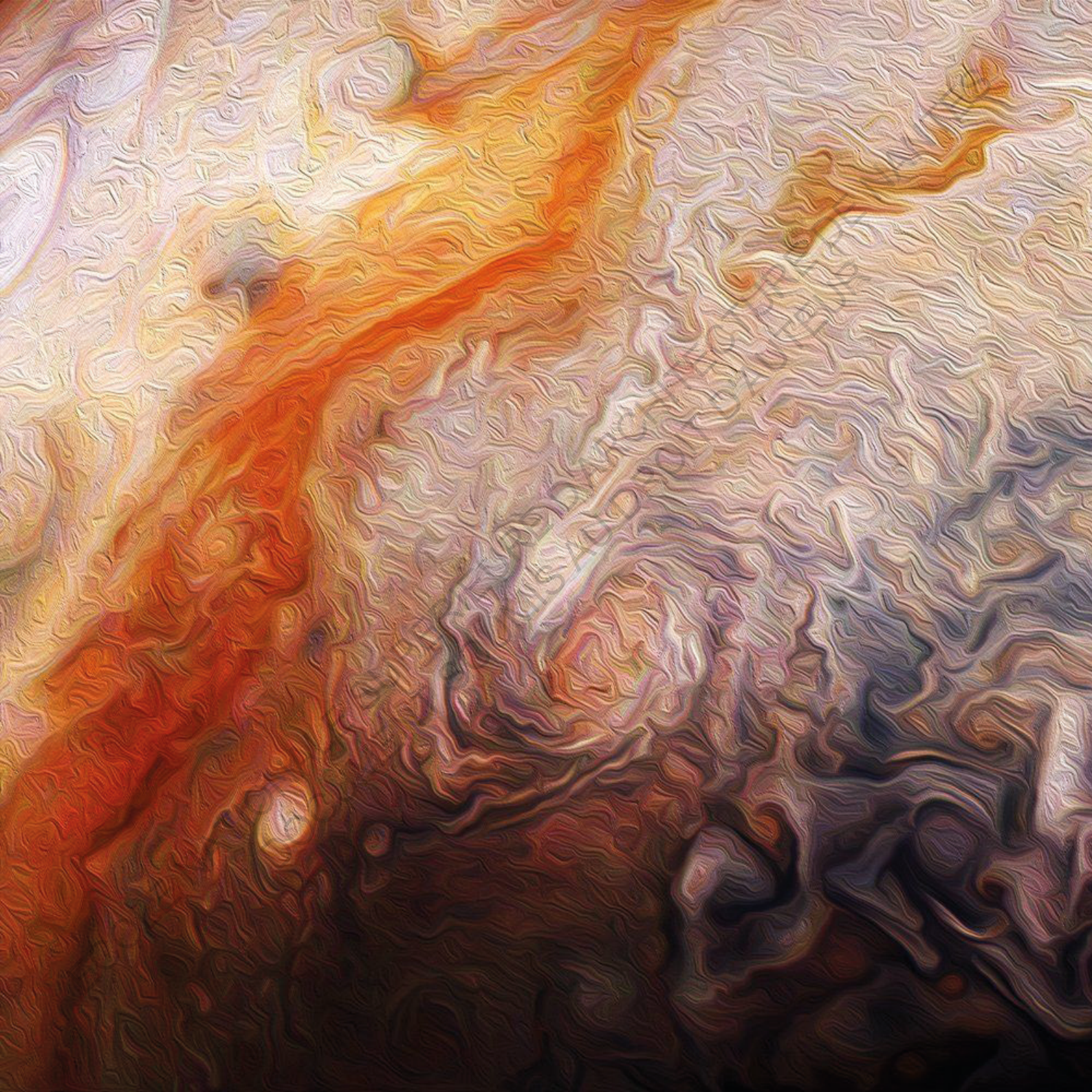
5.1 MÉTHODE EMPLOYÉE 90
5.2 DISCUSSION 92
5.3 OBSERVATION 100
5.4 REGARD PROSPECTIF 101

CONCLUSION 105

BIBLIOGRAPHIE 108

SOURCES ICONOGRAPHIQUES 112

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



INTRODUCTION

Pour comprendre les nouvelles tendances et les évolutions dans le métier de l'architecture, il faut se tourner vers d'autres domaines en cours de mutation. L'architecte a toujours été un savant généraliste, qui s'intéresse à une multitude des disciplines humaines, comme l'affirme Buckminster Fuller dans son livre : "Les architectes et les urbanistes, en particulier les urbanistes, bien qu'ils soient considérés comme des spécialistes, ont une vision un peu plus large que les autres professions." (Fuller, 2016)

La naissance du secteur aérospatial il y a un peu plus d'un siècle, et les efforts mis en place pour l'exploration des cosmos ont bouleversé la plupart des activités humaines, ainsi que les imaginaires collectifs cherchant à visualiser un avenir pour notre espèce. Pour défier l'extrême, des scientifiques et des penseurs de tous horizons ont uni leurs efforts afin de révéler les secrets cachés de notre univers. Ils ont imaginé des capsules volantes, construit des fusées, installé des bases dans les régions les plus reculées, survolé la Terre, posé des hommes sur la Lune, et envoyé des sondes en dehors du système solaire.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Aujourd'hui, avec le regain d'intérêt pour l'Espace et ses possibilités illimitées, de nouveaux projets ambitieux commencent à voir le jour. Les motivations pour sortir de notre refuge habituel unique sont nombreuses : curiosités scientifiques, intérêts économiques, rivalités politiques, ou un simple trait instinctif humain. Selon l'astronome américain Carl Sagan : "Puisque, à long terme, toute civilisation planétaire sera menacée par des impacts venant de l'espace, toute civilisation qui survit est condamnée à devenir spatiale - non par zèle exploratoire ou romantique, mais pour la raison la plus pratique qui soit : rester vivant.... Si notre survie à long terme est incertaine, nous avons la responsabilité fondamentale envers notre espèce de nous aventurer dans les autres mondes."[1]

Afin d'atteindre ces jalons, et nous lancer dans une nouvelle étape de l'évolution humaine, nous devons apprendre à nous adapter à la vie dans des conditions extrêmes. Contrairement aux premières missions, plus modestes dans leurs objectifs, les projets futurs porteront sur une durée de plus en plus longue sous des conditions hostiles et dangereuses à l'être humain. Devant ces besoins de concevoir et de repenser l'habitat dans des conditions inhabituelles, nous dégageons les problématiques suivantes :

Quel rôle aura l'architecte dans la conception des habitats destinés à des missions dans des milieux extrêmes ? Quels facteurs physiologiques, psychologiques, sociaux ... doit-il prendre en compte lors du dessin de ces habitats ? Quelles solutions apportera-t-il pour assurer le bien-être de l'équipage et surmonter les problèmes de confinement et d'isolement ?

Avant de commencer, il est nécessaire de définir deux mots-clés indispensables à la compréhension des thématiques abordées :

Extrême, du latin 'extremus', le plus à l'extérieur : "Qui excède la mesure ordinaire. *Cas, chaleur, climat extrême. (Quasi-)synon. démesuré, exagéré*. Qui est au-delà des autres, au point de comporter des risques, du danger.

1 "Since, in the long run, every planetary civilization will be endangered by impacts from space, every surviving civilization is obliged to become spacefaring--not because of exploratory or romantic zeal, but for the most practical reason imaginable: staying alive... If our long-term survival is at stake, we have a basic responsibility to our species to venture to other worlds." Sagan, 1996, p. 371

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Parti, conséquence extrême. (Quasi-)synon. désespéré, risqué, hasardeux."[2]

Nous traiterons comme extrême tout environnement qui présente des conditions assez dangereuses de telle manière qu'il est impossible pour un être humain de survivre sans une protection adéquate. Ces milieux, en raison de leurs risques sur la santé ainsi que de leur éloignement et isolement, n'ont pas encore été colonisés par les sociétés humaines.

Confinement : "Fait d'être retiré; action d'enfermer, fait d'être enfermé (dans des limites étroites). Maintien d'un être vivant (an imal ou plante) dans un milieu de volume restreint et clos."[3]

Une personne est considérée en confinement dans un espace limité quand elle est incapable de sortir librement ou de s'échapper volontairement pour une durée assez importante, ce qui l'oblige à mener sa vie en n'interagissant qu'avec ce qui est présent à l'intérieur.

Ce mémoire propose d'étudier la qualité architecturale et les ambiances des espaces dans les habitats des limites, donc les solutions qui peuvent être apportées aux problèmes de l'isolement et du confinement. Il a comme objectif de servir comme aperçu utile pour les architectes sur le sujet de l'architecture dans les milieux extrêmes, en explorant particulièrement les problématiques de gestion de l'espace et de la vie en communauté, et en exposant les différents enjeux et contraintes qu'ils pourront rencontrer.

Dans ce contexte, nous nous intéresserons en premier lieu aux motivations principales derrière le besoin humain d'explorer son entourage, de la préhistoire jusqu'à l'ère de l'Espace. En deuxième lieu, nous allons observer le champ d'intervention de l'architecte dans la conception des habitats destinés aux explorations des extrêmes, en se basant sur des exemples d'architectes ayant fait partie des programmes spatiaux. Ensuite, la troisième partie portera sur les défis généraux rencontrés lors de la conception architecturale des habitats éloignés. Les caractéristiques étudiées sont en rapport direct avec la problématique du confinement, et présentent des effets sociaux et psychologiques sur les équipages. Dans

2 Dans CNRTL, 2012, s. v. "Extrême".
3 Dans CNRTL, 2012, s. v. "Confinement".

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

la partie 4, nous découvrirons des exemples concrets d'habitats érigés dans des milieux extrêmes, en commençant par les stations spatiales en orbite autour de la Terre, puis les habitats dans des milieux analogues terrestres, ou des milieux qui se rapprochent aux conditions trouvées dans d'autres planètes voisines. Nous explorerons aussi d'autres projets théoriques imaginés par des penseurs pour répondre à des questions de survie dans l'Espace. La dernière partie sera consacrée à la présentation de la grille d'analyse, selon laquelle les projets exposés seront étudiés et comparés, ainsi qu'à la formulation des aspects clés et fondamentaux de la conception des habitats extrêmes de demain.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY
BIBLIOTHEQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1

À L'AUBE DES GRANDES EXPÉDITIONS HUMAINES

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1.1 HISTOIRE DE L'EXPLORATION

Tout au long de l'histoire, l'humanité a partagé un trait inné : le désir d'explorer. Des femmes et des hommes préhistoriques se sont certainement interrogés et se sont demandés curieusement depuis l'ouverture de leur grottes, ce qui se trouvait de l'autre côté de la colline. Cette volonté de conquérir l'inconnu a fait rêver de nombreux explorateurs qui se sont lancés dans de longs voyages et ont défié les chemins périlleux.

Pour quitter la sûreté de leur lieux de résidence et abandonner leurs habitudes pour des horizons inconnus, les explorateurs se sont munis de motifs assez puissants, à la fois d'origines et d'influences individuelles comme collectives. Ces pionniers se détachent volontairement de leur communauté pour aller vivre en petits groupes dans des conditions jamais vues. La psychologie de la communauté et la mentalité du groupe vis à vis les objectifs communs, encouragent des traits comme le goût de l'aventure, la recherche, la curiosité, l'évasion, et l'ambition.

Les peuples se tournent vers l'exploration de nouveaux terrains de vie pour plusieurs raisons et motivations, qui se développent et mûrissent au fil du temps. Les motivations peuvent être classées dans le cadre religieux, comme les actes de foi et les missions qui ont contribués à la découverte de terres inconnues et la fondation de nouvelles cités. Un autre moteur principal des explorations est la motivation économique, où l'intérêt commercial et le profit matériel ont poussé les colonialistes à tenter l'expansion de leur pouvoir vers des zones inexplorées. Ces explorations économiques se traduisent par les différentes routes de commerce comme la route des épices, la route de soie, et les autres quêtes de nouvelles richesses comme l'or, l'argent, le sucre et le thé. Les motifs scientifiques formaient un autre facteur dans l'histoire des explorations, qui commence surtout avec les marins transportant les savoirs recueillis au cours de leurs navigations. L'exploration est animée et stimulée par la curiosité scientifique croissante, et par tous les défis que présentent les nouvelles terres mystérieuses, aussi bien que par les mondes marins qui sont hors de la portée habituelle des hommes de l'époque. Ces collectes scientifiques diversifiées, fruits de 'l'attrait de l'inconnu', bouleversent les normes historiques et la définition classique du 'voyage', et contribuent à

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

la fondation de nouvelles académies et métiers, constitués de marins, de scientifiques, d'écrivains, de dessinateurs et de constructeurs.

L'exploration, étant avant tout une expérience personnelle, constitue un exploit et une réussite nominative : "L'histoire des grandes découvertes est le triomphe de la biographie." (MIÈGE, s. d.) Ce n'est qu'avec les aventures vers les extrémités les plus lointaines de la Terre que naissent les meilleurs récits de voyage, inspirant des générations à y retourner et aller encore plus loins.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1.2 PREMIERS HABITATS ISOLÉS

Avec chaque expédition, les nouveaux colonisateurs ont dû repenser la façon d'habiter le milieu pour assurer leur survie, en se protégeant et en étant capables de pratiquer les activités indispensables à la vie humaine. En suivant ces petites adaptations, qui deviennent progressivement importantes dans l'histoire des civilisations, nous venons désigner les différentes époques humaines, en fonction de la technologie et du mode de vie achevé suite aux mutations.

Pour se protéger des différents dangers qui menaçaient sa survie, l'homme s'est servi de son environnement comme refuge. Se rassemblant en groupes de plus en plus grands, ces hommes ont délibérément cherché des abris quasi isolés et fermés comme bases indispensables à leurs sécurité. Depuis que les communautés humaines se sont installées dans les grottes pour échapper aux bêtes dangereuses, au froid, au noir de la nuit, etc. ils ont dû faire face à la problématique de l'organisation sociale en rapport avec l'espace qu'ils habitent. Au fil du temps, et au fur et à mesure que les défis augmentaient et la qualité de vie s'améliorait, les peuples des époques successives se sont mis à perfectionner les habitats et les lieux de vie des sociétés humaines. Même si les constructeurs réussissaient ultérieurement à restaurer le lien entre l'habitat et la nature environnante, et à trouver l'équilibre en s'adaptant au milieu, les premières sociétés occupantes d'un nouveau site ne possédaient pas ce privilège.

La tendance à améliorer les conditions de vie met en évidence les changements et l'évolution des priorités des occupants en fonction de la progression de la durée de l'installation. Comme règle de base générale, nous remarquons que le niveau de confort dans une colonie est progressif et croissant, et ne revient rarement en arrière. Les populations habituées à un certain degré de confort prévoient le maintien d'un niveau similaire voire amélioré avec les nouvelles générations. Cela est clair dans l'architecture des premiers habitats qui émergent dans un milieu donné, où les conditions de vie sont plus dures et où le sentiment de confinement et d'isolement est beaucoup plus dominant que dans les constructions des générations ultérieures. Face à de nouveaux enjeux, qui restent non résolus par la technologie de l'époque, les premiers hommes venant

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AUX DROITS D'AUTEUR

s'installer dans un site encore considéré comme extrême privilégient les solutions techniques à résultat immédiat.

Dans les fouilles archéologiques, nous avons trouvé des vestiges d'occupation préhistoriques au fin-fond de cavernes, avec des indices d'activité sociale humaine. Or, même si l'image de l'homme préhistorique caché dans une cave obscure constitue le cliché de la vie de l'époque, il est presque sûr que les sociétés des Homo sapiens préféraient vivre dans des simples abris sous des roches, à l'entrée des caves, ou dans les falaises protégées (Belnet, 2012). Nous découvrons plus facilement les anciens vestiges dans des zones cachées et isolées simplement parce qu'ils sont mieux protégés des intempéries et des dégradations naturelles et humaines. L'homme a donc tendance à chercher la bonne balance entre un abri bien protégé et isolé des dangers, et la disponibilité des éléments naturels essentiels à un bon niveau de vie.

En sortant de leurs refuges pour explorer, les premiers chasseurs-cueilleurs, libres de parcourir la Terre, ont eu besoin au moins d'un abri temporaire pour se protéger. Et cela, même à un niveau aussi simple, marque le début d'une nouvelle approche de l'architecture. Au fil du temps, en passant des simples tentes aux logements circulaires vers des habitats plus permanents, les sociétés ont appris à perfectionner leurs technologies de construction, à améliorer leurs aménagements spatiaux, et à développer leurs relations et leurs hiérarchies sociales.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1.3 PRISE DE CONSCIENCE DE LA NOTION D'ESPACE

Au fur et à mesure de l'accroissement de notre connaissance du monde physique, et après avoir conquis les continents les plus reculés et les océans les plus redoutables, des rêveurs et des écrivains ont commencé à spéculer sur les voyages en dehors de cette sphère terrestre. Regardant le ciel, ils rédigent des histoires de voyages fictifs vers les autres planètes et étoiles. Après l'apport des philosophes grecs et des scientifiques de la renaissance, les civilisations humaines commencent à modifier leur vision élémentaire de ce que représente notre planète dans l'univers. La théorie de l'héliocentrisme présentée par Copernic au XVIe siècle bouleverse l'idée de la Terre comme centre du monde.

En littérature, Jules Verne, un des premiers auteurs à avoir imaginé l'étape suivante de l'histoire de l'exploration humaine, avec ses romans "De la Terre à la Lune" paru en 1865 et "Autour de la Lune" en 1869, réussit à inspirer des générations. Dans ses ouvrages, Verne s'interroge sur les aspects techniques d'un voyage extra-planétaire, ainsi que sur le séjour d'une semaine des trois astronautes au bord de la capsule.

Le pionnier russe de l'espace Konstantin Tsiolkovsky s'est largement inspiré des œuvres de Verne. Tsiolkovsky est considéré par beaucoup comme le père des vols spatiaux modernes, puisqu'il a établi les bases et a identifié les problèmes et les défis à surmonter, ainsi que les moyens envisageables pour réussir. Un de ces concepts comprenait une station spatiale avec une section rotative pour générer de la gravité artificielle. Une telle station pourrait être utilisée pour étudier la Terre et ravitailler en carburant les navires qui se dirigent vers d'autres destinations, comme la Lune.

Au milieu des années 1800, les astronomes étaient déjà arrivés à une bonne compréhension du mouvement des planètes. En même temps, les lois d'Isaac Newton concernant la gravité, les objets en mouvement et les objets au repos soulevaient des questions sur la possibilité de propulsion d'objets à de grandes vitesses pour échapper à la gravité terrestre. En plus, les baromètres, inventés dans les années 1600, ont révélé des caractéristiques physiques de l'air qui devient moins dense avec l'altitude.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Ces connaissances majeures ont préparé le terrain aux explorations et aux aventures spatiales de l'humanité (Chladek & Anderson, 2017).

Dans la seconde moitié du XXe siècle, des fusées assez puissantes pour surmonter la force de gravité et atteindre des vitesses orbitales ont été construites, rendant l'exploration spatiale plus qu'un simple fantasme. Dans les années 1930 et 1940, l'Allemagne nazie envisage la possibilité d'utiliser comme armes des fusées de longue portée. Durant la Seconde Guerre mondiale, Londres a été attaquée par des missiles V-2 d'une portée exceptionnelle, développés par l'ingénieur Wernher von Braun. Après la guerre, les États-Unis et l'Union soviétique mettent en place leurs propres programmes de missiles.

Vers la fin des années 1940, une équipe d'ingénieurs et de scientifiques allemands spécialisés dans les fusées s'est lancée dans l'exploration des frontières de l'espace, convaincus que le rêve de Goddard - créateur de la première fusée en 1926, d'un voyage vers Mars était réalisable. Aux États-Unis, von Braun a également perçu la nécessité de sensibiliser davantage le public à l'exploration spatiale. En 1951, il écrit un article visionnaire intitulé "Next Stop Mars", détaillant un projet visant à envoyer des hommes sur la planète rouge en utilisant la technologie disponible.

Le 3 octobre 1957, des ingénieurs de l'Union soviétique réussissent à effectuer le premier pas hors du "berceau" terrestre en lançant le premier satellite, Spoutnik 1. Les États-Unis mettent en orbite leur premier satellite en 1958, qu'ils nomment "Explorer 1". Quelques semaines plus tard, Wernher von Braun, qui dirigeait ce qui devint la 'Rocket Team', fut interrogé par le magazine Time sur la possibilité de voir des humains partir dans l'espace : "Ne me dites pas que l'homme n'a rien à faire ici", dit-il. "L'homme appartient à tous les lieux où il désire aller et il s'en sortira bien quand il y arrivera."[1]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 "Don't tell me that man doesn't belong out there. Man belongs wherever he wants to go - and he'll do plenty well when he gets there." Wernher von Braun, International Space Hall of Fame.

JPL

2

L'ESPACE, UNE NOUVELLE AVENTURE POUR LES ARCHITECTES

Après avoir réussi à atteindre les cosmos, l'humanité, dans un nouveau climat d'optimisme, se lance dans des défis technologiques pour franchir des jalons importants. Les ambitions étant grandes, les agences spatiales se dépêchent de développer de nouveaux types d'engins spatiaux pour des vols de plus en plus longs et compliqués.

Dans un milieu très technique et fonctionnel, et pour faire face à des problématiques psychologiques et sociales de bien-être dans des missions de longues durées, quelques noms se distinguent comme étant les seuls architectes et designers des premiers programmes spatiaux.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2.1 GALINA BALASHOVA, PREMIÈRE ARCHITECTE DE L'ÈRE SPATIALE

La conquête de l'Espace et la technologie des fusées étaient considérées des domaines de priorité absolue au sein de l'Union Soviétique depuis les années 50, les voyages dans l'espace étant une preuve de la performance de la société et de la progression culturelle. Outre les aspects militaires et politiques, le rêve ancien de l'humanité de surmonter les frontières spatiales et de conquérir le ciel a été au centre de l'attention.

Durant cette course spatiale, la tâche de concevoir et de dessiner l'aspect des fusées de lancement, des laboratoires orbitaux, des navettes spatiales et d'autres chefs-d'œuvre de la technologie soviétique était confiée à une seule femme : Galina Balashova.

1. L'architecte russe Galina Balachova

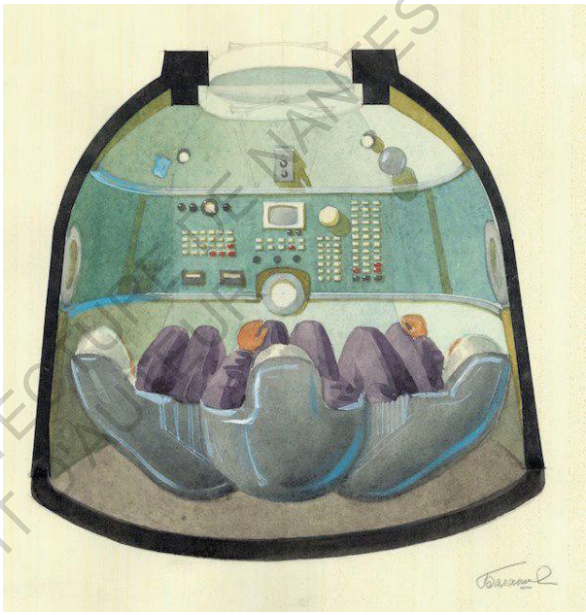
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT DE TRAVAIL AU DROIT D'AUTEUR

Pour l'architecte en herbe, placée dans un environnement dominé par les ingénieurs aéronautiques, ces projets présentaient une opportunité d'appliquer des principes architecturaux à des domaines encore jamais touchés par ceux-ci. Selon Balashova, "l'intérieur des vaisseaux spatiaux est aussi un travail d'architecte, puisque l'architecture a comme but l'organisation de l'espace et la projection des intérieurs."

Balashova commence sa carrière d'architecte en 1955 à Kuibyshev, une ville qui a joué un rôle majeur dans le développement de l'aviation soviétique. En 1956, elle accepte le poste d'architecte principal au OKB-1, le Bureau de conception expérimentale de l'Union Soviétique. En 1963, Sergei Korolev, le chef de l'OKB-1, a convié la seule architecte de son entreprise à proposer des esquisses pour l'espace de vie de la capsule Soyouz encore en phase de conception. Cette première mission, qu'elle préparait chez elle pendant les week-ends, était le premier pas vers l'un des parcours architecturaux les plus insolites du XXe siècle.

"Je me suis mise à travailler sur des projets spatiaux par hasard, car lorsque la durée des vols spatiaux s'est allongée, les cosmonautes avaient besoin de plus d'espace dans les vaisseaux," explique Balashova. "Les ingénieurs avaient conçu un module habitable, mais ils l'ont fait sans penser au confort et au bien-être de l'équipage, et Korolev n'a pas aimé ça. Un des assistants de Korolev qui me connaissait m'a recommandée pour le projet intérieur, et cette mission était mon premier projet spatial." Cet intérieur en question deviendrait l'espace habitable de la capsule Soyouz, considéré le module orbital et la fusée la plus fiable des vols spatiaux habités.

Balashova s'est rapidement imposée comme le cerveau créatif du Programme spatial soviétique. Néanmoins, son travail est resté secret et confidentiel, car la propre technologie de l'URSS devait être en avance



2. *Capsule Soyouz avec les sièges utilisés jusqu'à ce jour*

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

sur la concurrence américaine. Ses délicates et riches aquarelles et illustrations - les esquisses des capsules Soyouz, des stations spatiales Salyout et Mir et de la navette spatiale soviétique Bourane - témoignent de la fonctionnalité et ont servi plusieurs générations de vaisseaux russes jusqu'à aujourd'hui. Mais ce sont aussi de magnifiques œuvres d'art, véritables reliques d'un temps presque oublié.

3. Aquarelle de l'intérieur de la station Mir, avec les couleurs qui facilitent l'orientation

Tout au long de sa carrière d'architecte spatiale, Galina Balashova cherchait à intégrer l'art dans ses projets et accordait la priorité à son rôle d'artiste spatiale. Elle était chargée de résoudre les problèmes liés aux proportions spatiales, à l'effet psychologique des couleurs et des matériaux, et à la distribution fonctionnelle des équipements techniques. Parallèlement, les questions de sécurité variaient de la fixation des objets sous l'effet de l'apesanteur, à la fixation des cosmonautes lorsqu'ils dorment. Pour l'aménagement intérieur, Balashova a accordé une grande importance à un agencement de couleurs qui facilite l'orientation et intègre l'absence de gravité dans le design. Les couleurs foncées soulignent le sol et les couleurs vives le plafond : sol vert, plafond gris-bleu, murs en jaune clair (Pangburn, 2015). Cela avait un effet psychologique important, étant donné que les astronautes, habitués à la vie sur Terre, seraient moins susceptibles d'être désorientés à l'intérieur du module habitable. Balashova était également responsable de la conception de l'éclairage et du mobilier. Elle a conçu une gamme de meubles pour les espaces de vie des cosmonautes, dont une armoire avec bibliothèque, un divan et une table pliante, le tout avec une gamme de couleurs pour une meilleure orientation humaine en apesanteur. Le choix des matériaux a été principalement motivé par la question de leur inflammabilité ou de leur toxicité, qui pourraient présenter un risque mortel dans l'espace du module.

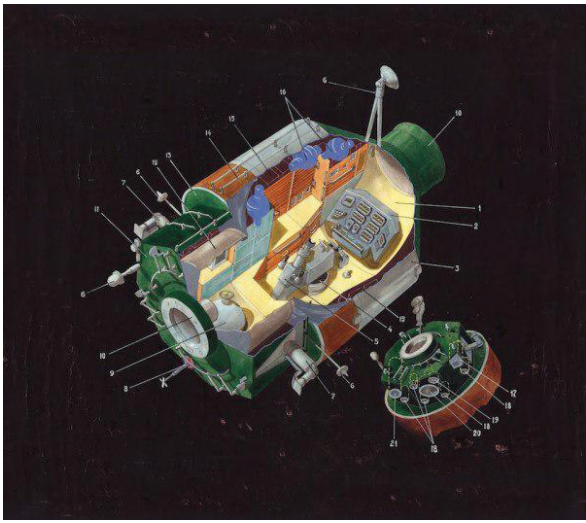
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT PROTÉGÉ PAR LE DROIT D'AUTEUR

Pour Philipp Meuser, auteur de la biographie de Galina Balashova, parler de la théorie d'architecture c'est penser l'espace et la gravité. Dans le cas de Balashova, elle a conçu l'espace pour la non-gravité. Travaillant avec les limites posées par la pression, la température et la rentrée atmosphérique, elle a réussi à penser à l'humain en soi, et non à l'espace lui-même. Plus tard, le programme spatial américain a également employé des concepteurs spatiaux, comme Raymond Loewy. Mais pendant longtemps, Balashova a été la seule architecte au monde à travailler dans ce domaine complètement novateur (Koivu, s. d.).

Elle a dû se battre pour s'imposer dans cet environnement d'ingénieurs. "Ils imaginaient naïvement que le travail d'un artiste se limite à la sélection des couleurs dans la réalisation de ses intérieurs," se souvient Galina. Le fait que son travail et ses tâches impliquaient une coordination importante, des dimensionnements et des échelles bien précises faisaient face à la mystification. "J'ai dû me débrouiller toute seule dans mon travail et je ne pouvais demander conseil à personne." En termes de conception, elle ne pouvait se référer qu'à la structure de base et aux appareils, appareils et détails techniques dans leur intégralité. Elle a conçu les éléments en proportion avec la forme de la pièce, comme elle a adapté ces éléments à la taille du corps de la personne. Selon Balashova, cela constituait la différence réelle par rapport au travail des ingénieurs : pour eux, la relation entre l'homme et la machine n'avait pas d'importance. Ironiquement, pendant son séjour à OKB-1, elle occupait le poste d'ingénieur puisque le poste d'architecte n'existait officiellement pas dans l'entreprise (Meuser, 2015).

Il est difficile de parler de structures ou de bâtiments au sens conventionnel du terme car le résultat du travail architectural est tout simplement extraordinaire. Les missions de conception accomplies par Galina Balashova

4. Conception du module de technologie de Mir



ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

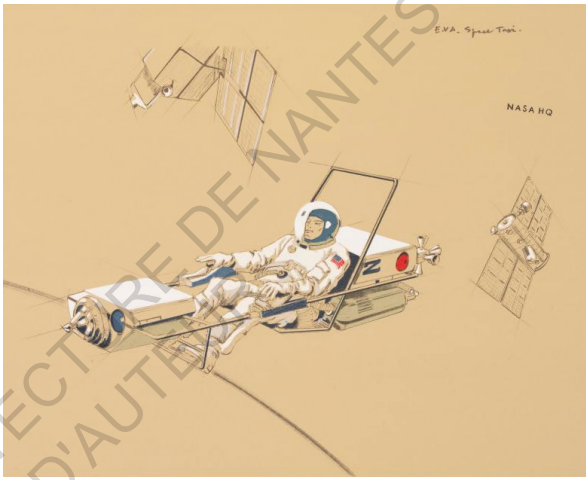
ne peuvent ni être enseignées à l'université ni faire l'objet d'une médiation dans le cadre d'une autre forme de formation professionnelle.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2.2 RAYMOND LOEWY ET L'ARCHITECTURE DES VAISSEAUX SPATIAUX

Raymond Loewy, un des designers industriels et graphistes les plus connus du XXe siècle, a eu un rôle important dans la conception des premières stations spatiales, dans le cadre du programme spatial américain. La NASA, confrontée à de nouveaux défis en ce qui concerne le cadre de vie de l'intérieur de ses vaisseaux, a dû chercher des solutions pour assurer le bien-être de ses astronautes dans l'espace. Pour les aider à relever ce défi de conception délicat, ils ont fait appel au célèbre designer Raymond Loewy. Loewy a été retenu par la NASA à titre de conseiller en matière d'habitabilité et, à ce titre, Loewy et son équipe ont développé plus que 3000 idées, ainsi qu'un grand nombre de maquettes, de diagrammes, de dessins et de suggestions sur la meilleure façon de vivre et de travailler dans l'espace (Novak, 2014). Il est connu principalement pour son travail sur la station spatiale américaine Skylab.

Loewy a réussi à avancer plusieurs idées qui ont contribué à révolutionner le secteur. Pour lui, chaque astronaute devrait avoir droit à huit heures de solitude par jour. Ce concept a donné naissance aux premières cellules privées dans un vaisseau spatial. En outre, les astronautes seraient assis les uns en face des autres pour les repas, selon une disposition triangulaire. Lorsque l'équipage était composé de trois membres, la disposition de Loewy permettait d'éviter tout problème de hiérarchie dans l'attribution des places à la table qui risquait de créer des tensions. Les cloisons intérieures seraient lisses et dégagées pour faciliter le nettoyage après les inévitables épisodes de mal de l'espace. Loewy intègre dans ses dessins une vision innovante de l'ergonomie des espaces et des mobiliers, ainsi que



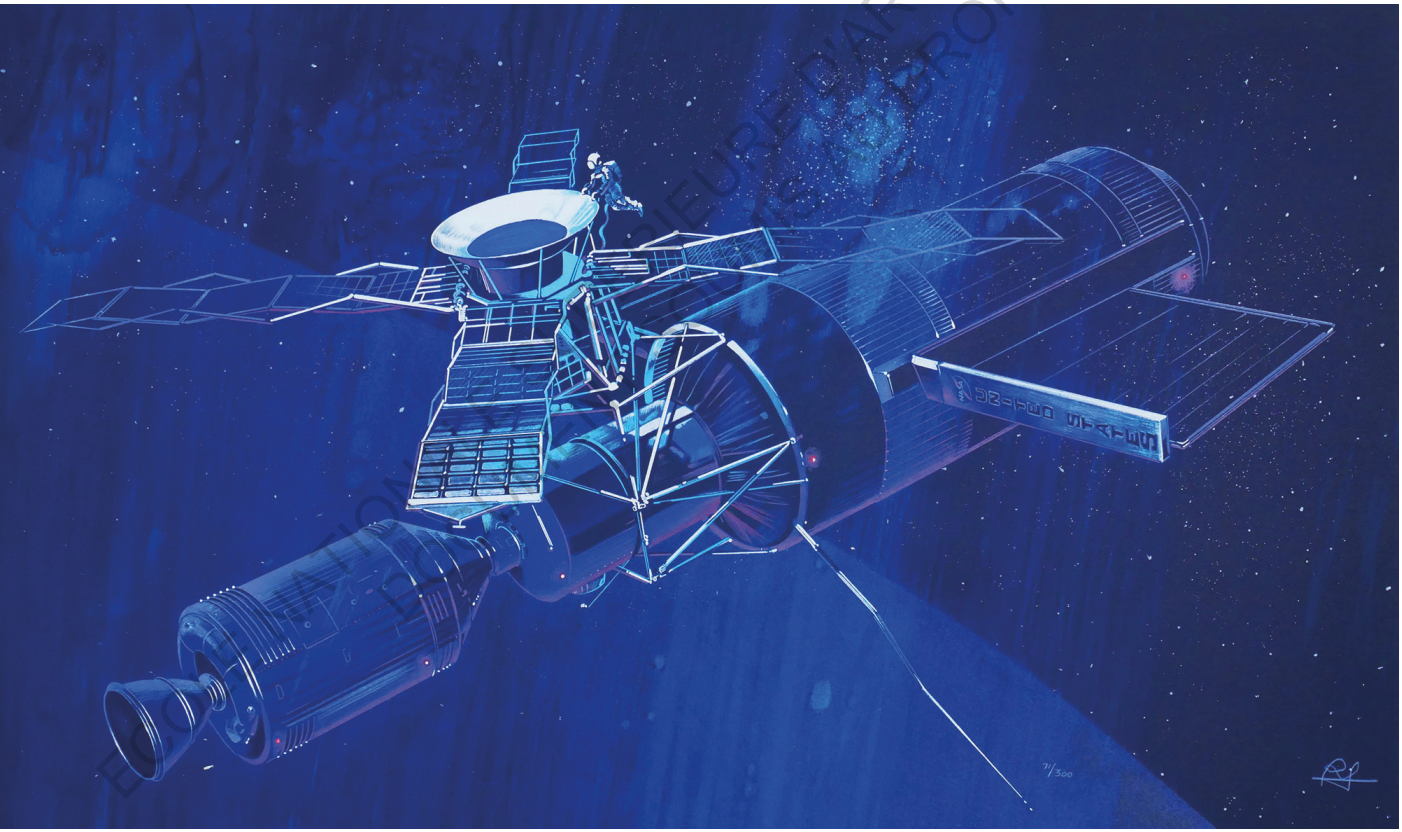
5. Space Taxi : Un des schémas produits par Loewy pour la NASA

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

la relation sociale entre les membres de l'équipage. En y appliquant des règles modernes de design, la station Skylab lancée en orbite abritait un espace intérieur qui ressemblait plus aux dessins de science-fiction qu'aux autres stations soviétiques de l'époque (Torchinsky, 2013).

Ces notions, même si elles nous paraissent aujourd'hui comme mesures ordinaires, étaient considérées comme des révolutions dans la manière de concevoir les habitats isolés. Aucun de ces concepts apparemment simples n'a été appliqué dans les vols spatiaux avant Skylab.

6. Station Skylab, conçue par Loewy



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DROIT D'AUTEUR

2.3 L'ARCHITECTE COMME PROMOTEUR DE BIEN-ÊTRE

Vivre dans un environnement confiné avec un minimum de stimuli externes présents, comme dans un habitat spatial, ou dans un site isolé, représente une contrainte importante sur le déroulement normal de la vie humaine et exerce une grande pression sur les groupes et les individus. Les concepteurs et les architectes qui travaillent sur un habitat pareil doivent non seulement travailler sur son rôle fonctionnel, mais aussi intégrer cette fonctionnalité à la représentation mentale et psychologique des individus, tout en cherchant des significations et des symboles présents dans la vie normale sur Terre. Les interfaces de connexion entre les espaces telles que les portes et les fenêtres, par exemple, agissent comme des "organes sensoriels" d'un bâtiment. Ils permettent une communication de l'intérieur vers l'extérieur, mais offrent également à l'utilisateur la possibilité de contrôler le flux de lumière et d'air, qui sont en soi des moyens de communication et d'expression.

De nombreuses conceptions actuelles d'habitats en milieux extrêmes sont dictées par des limites de volume sous pression, de masse, de diamètre de fusée, d'énergie disponible, de budget... Cette approche conduit souvent à négliger complètement la notion architecturale et sociologique de l'habitat. Si elle est prise en compte au début du processus de conception, l'attention accordée aux questions architecturales et psychologiques de base réduirait en effet les coûts et pourrait contribuer à un meilleur développement d'habitats dans des environnements extrêmes, qui sont bien plus que des machines habitées. La préoccupation première de l'architecture est de créer un espace fonctionnel, mais tout comme les êtres humains, cet espace est aussi un

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

champ complexe et multidimensionnel. Nous pouvons parler dans ce cas d'écologie, qui se préoccupe de l'étude des êtres vivants et de leur environnement (Vogler & Jørgensen, 2005).

Les êtres humains vivent dans un équilibre entre la vie privée et la vie en communauté. Cet équilibre fait toujours l'objet de pressions opposées. Dans la plupart des cultures, la privation de la liberté de circulation dans l'espace et des contacts sociaux est considérée comme la sanction la plus sévère. Depuis la nuit des temps, habiter un espace est considéré comme un acte de prise de contrôle. La maison est l'endroit où l'on a le sentiment de maîtrise des influences environnementales comme le temps, la température, les animaux sauvages… et des influences sociales comme les étrangers, les visiteurs, et les amis visiteurs. L'acte de prendre contrôle est directement lié à notre état psychologique. En tant qu'organisateur et concepteur d'espaces, l'architecte doit être conscient que l'espace ne se limite pas à ses trois dimensions géométriques. Les avancements technologiques poussent les habitats spatiaux vers de nouvelles limites de l'habitabilité. Par conséquent, certaines conceptions d'habitats spatiaux ont tendance à prendre cette limite comme une excuse pour ignorer complètement les autres domaines et facteurs qui régissent l'espace. Si les équipes de travail étaient plus interdisciplinaires et plus mixtes, elles seraient en mesure de démontrer que les exigences non contraignantes, comme celles en rapport aux facteurs humains, ne coûtent souvent pas plus cher et peuvent s'avérer indispensables pour les missions de longue durée.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENTS GOOGLE AJUSTOUATTEDOC

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3

L'ESPACE ARCHITECTURAL ET LA VIE EN CONFINEMENT

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

L'architecture pour 'l'habitat des limites' signifie la conception d'un environnement artificiel avec l'accessibilité du confort dans une 'atmosphère' de bien-être. Il s'agit principalement des effets psychologiques des facteurs humains, très déterminants dans le cas d'une mission de longue durée. L'architecture a un pouvoir de définir aussi les règles de la vie en communauté, par le contrôle de l'intimité et la division en espaces, ce qui régit les relations entre le groupe et la personne individuelle. Dans un environnement totalement isolé, marqué par des dangers, il n'y a pas d'autre choix pour l'individu que de se souscrire aux règles valables à l'ensemble du groupe.

Le bien-être de l'équipage, étant intimement lié à la relation entre l'être humain et son environnement, sera encore marqué par l'expérience sensorielle de l'espace. L'architecture doit donc substituer à la diversité de l'environnement naturel à laquelle l'être humain est habitué sur la Terre. Les qualités particulières des espaces artificiels dans lesquels les personnes seront contraints de rester assez longtemps incluront la

lumière, les matériaux, la couleur, la définition de l'espace, la conception de l'espace, la définition du volume et de la forme, la fonctionnalité, l'ergonomie, l'acoustique... D'après Vera Martinez, architecte à l'Université Technique de Darmstadt, l'idéal serait de développer une ambiance dans laquelle tous les sens atteignent la "zone verte", qu'elle définit par le secteur d'une échelle dans lequel l'état de confort de l'un des cinq sens est établi, et qui soit harmonieuse dans l'ensemble du projet en même temps (Martinez, 2007).

L'idée de l'architecture organique fut avancée par Frank Lloyd Wright, avec l'émergence de l'idée du rapport entre l'habitat humain et le monde naturel. Pour Wright, l'architecture doit émerger naturellement de ses contraintes, plutôt que de les combattre. "Les contraintes sont les meilleures amies de l'architecte ", dans la mesure où elles proviennent de diverses sources, et Wright leur a accordé une attention particulière dans sa démarche conceptuelle.

Selon Brent Sherwood, les contraintes qui pèsent sur la conception de l'environnement humain comprennent cinq éléments principaux (Howe & Sherwood, 2000). L'architecture tend à se concentrer davantage sur les trois premiers, tandis que l'urbanisme se focalise plutôt sur les trois derniers. Une bonne architecture et une bonne planification urbaine s'occupent de ces cinq aspects de façon égale :

- Les conditions exigées par l'environnement, le site et le contexte.
- Les limitations liées à la technologie et au budget.
- Les exigences imposées par le propriétaire, les utilisateurs, les voisins et la communauté.
- La manière dont les gens vivent, travaillent et utilisent l'architecture.
- L'adaptation de la croissance et de l'évolution du programme de conception et de son contexte.

La conception des habitats spatiaux est une tâche extrêmement complexe, car elle touche à différents aspects importants de la vie humaine. L'hypothèse principale est que l'architecture représente physiquement les règles sociales d'une communauté et influence donc

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

le comportement.

Désormais, le succès d'une mission ne dépendra plus seulement des aspects de sécurité liés au progrès technologique, mais les facteurs sociologiques et psychologiques joueront un rôle déterminant dans le succès ou l'échec des futures longues missions. Pour créer et assurer l'équilibre social et psychologique, un aménagement adéquat de l'espace est indispensable.

Ces questions sont abordées dans les deux études réalisées par Sandra Häuplik et Susanne Lorenz en 2002, et par Andreas Vogler et Jesper Jørgensen en 2005. Ils proposent des bases de conception pour les habitats en milieux extrêmes, notamment dans l'Espace.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.1 LES ESPACES

La conception de n'importe quel habitat comporte quatre couches spatiales principales : l'espace physiologique, l'espace perceptible, l'espace psychologique, et l'espace sociologique.

3.1.1 L'ESPACE PHYSIOLOGIQUE

C'est l'espace qui assure la survie physique et qui satisfait les besoins de travail et de repos de l'équipage. Il doit assurer l'intégrité structurelle de l'habitat et la protection contre l'environnement extérieur tout en maintenant l'espace intérieur dans une certaine zone de confort. La construction de cet espace est dictée par les exigences fonctionnelles, les moyens technologiques, les coûts, le temps et l'intention conceptuelle de l'architecte.

En vue de ces limites, l'espace attribué aux membres de l'équipage dans les habitats extrêmes a toujours été restreint. La question de 'l'espace minimal' est en rapport avec des variables comme la durée de confinement et le nombre de personnes partageant le même lieu de vie. Il faut tenir compte de la façon dont l'espace disponible est alloué et comment les zones disponibles à l'intérieur sont utilisées. Dans les stations spatiales, l'apesanteur permet aux astronautes d'utiliser l'espace plus efficacement que sur Terre, puisqu'ils ont accès à tous les coins de la pièce.

Les contraintes relatives aux équipements de bains et les problèmes de gestion des déchets sont parmi les principaux inconforts signalés par les individus participant à des expériences en milieu confiné. Bien que largement améliorées par rapport aux premiers systèmes, les installations sanitaires n'ont pas encore permis un niveau confort acceptable pour une mission de longue durée. Plusieurs installations d'hygiène personnelle doivent être prévues en assurant une intimité visuelle et auditive totale.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.1.2 L'ESPACE PERCEPTIBLE

Cet espace est en relation étroite avec les sens en jouant sur les ambiances de l'habitat. Les sens humains, contrairement aux capteurs techniques, sont guidés par l'expérience et la culture. La façon dont nous percevons les lieux dépend fortement de notre personnalité, de nos origines culturelles et de notre santé psychologique. Étant très subjectives, des différences dans la simple perception du bruit ou des odeurs, par exemple, peuvent rapidement entraîner des tensions au sein d'un groupe. Pour cela, il faut arriver à bien contrôler les sources potentielles de malaise, comme la nourriture odorante. Le contrôle visuel reste l'un des facteurs les plus importants quant au ressenti sensoriel global, et l'architecture 'terrestre' est riche en stratégies pour influencer la perception de l'espace par la lumière, la couleur et la géométrie. Il est tout à fait possible d'agrandir et d'élargir un petit espace en jouant sur la perception de celui-ci. L'organisation du stockage et du rangement a une influence importante sur la qualité et le confort visuel. Enfin, une attention plus grande doit être accordée aux surfaces et aux objets qui entrent en contact avec l'équipage, comme les poignées de porte et les boutons.

Un environnement intérieur attrayant semblait plus important lorsque l'équipage était composé d'hommes et de femmes, et lorsque les équipages masculins avaient tous un temps libre. Le décor s'est avéré très important lorsque tous les membres de l'équipage, hommes et femmes, se retrouvaient sans travail significatif. L'aménagement intérieur d'un engin spatial est censé être flexible. Cette flexibilité est renforcée par la différence entre les éléments architecturaux "durs" (mur, trappes...) et "mous" (écrans, cloisons mobiles...).

Dans les conditions extrêmes, l'éclairage devient un facteur primordial pour l'équipage. Un bon éclairage est indispensable pour préserver une bonne vision, minimiser les nuisances et améliorer l'environnement visuel. Les lumières artificielles et les volets contrôlables ont pour rôle de bien éclairer les zones de travail, de créer des atmosphères différentes, de simuler les cycles de jour et de nuit, et d'offrir la capacité de contrôle de la lumière dans les zones privées.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.1.3 L'ESPACE PSYCHOLOGIQUE

L'aspect psychologique d'un habitat humain peut être décrit comme offrant une identité, une stimulation et une sécurité. Sans contre-mesures actives, l'habitat répondra aux contre-critères de l'anonymat, de l'ennui et de l'anxiété. L'espace doit permettre la réflexion et la projection de soi, qui nécessitent un ordre et une clarté visuels. L'étude des maladies mentales a montré que le manque de lisibilité et le désordre des espaces peuvent être contre-productifs. En outre, le sentiment de sécurité est l'un des critères majeurs qui peuvent influencer le psychisme personnel, ainsi, avoir le sentiment de contrôle dans son habitat est un élément très important. L'acte même d'habiter l'espace peut être comparé à une prise de contrôle.

3.1.4 L'ESPACE SOCIAL

Le besoin individuel d'intimité exige des barrières et des isolations physiques, tandis que le besoin du rassemblement nécessite des espaces correspondants et clairement définis pour créer un sentiment de sécurité comme chez soi. L'architecte travaille en tenant compte de trois zones : publiques, semi-publiques et privées. Les fonctions des espaces physiques peuvent changer et se chevaucher pendant la journée. La cuisine, qui est normalement un lieu public, pourrait devenir un espace privé si deux membres de l'équipage y tenaient une conversation intime. Les portes et les fenêtres sont des éléments très importants pour alterner ces lieux et communiquer l'ouverture sociale de l'espace.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.2 VIE PRIVÉE ET COMMUNAUTÉ

Les êtres humains doivent vivre dans un équilibre fructueux entre la communauté et la vie privée. Habituellement, un architecte aménage et planifie les pièces privées et communes dans sa conception d'un projet. Cependant, ce qui est le plus important, mais souvent négligé, sont les transitions entre les deux, ou les zones intermédiaires. Ces zones fondamentales, servant comme filtres et tampon entre les espaces privés et publics, où le comportement social se matérialise dans l'architecture, étaient menacées par l'importance croissante accordée au fonctionnalisme et à la technologie dans l'architecture moderne. Pour bien concevoir les espaces, la hiérarchie des domaines et les domaines eux-mêmes doivent être clairement soutenus, de façon à ne pas être intrusifs. En effectuant la transition entre un espace privé et un autre public, la personne doit avoir un maximum de variation, de choix et de contrôle.

Vivre dans un habitat en milieu extrême, c'est être dans un endroit confiné, à volume limité, à proximité des autres membres de l'équipage, sans possibilité de s'évader. Les responsabilités individuelles sont importantes et les niveaux de stress peuvent être élevés. Dans l'environnement fermé de l'habitat, l'intimité est nécessaire à la santé psychosociale ; les individus ont besoin d'un endroit privé pour se reposer et se détendre. Plus on est forcé d'être proche des autres et plus on passe de temps à proximité, plus le besoin d'un moyen de se retirer et s'isoler est important.

Dans la plupart des discussions portant sur les missions spatiales de longue durée, il est recommandé de prévoir des locaux privés pour chaque astronaute. Albert Harrison identifie trois fonctions primordiales de l'intimité : le travail sans distraction, le repos et la récupération, et le contrôle de l'image de soi projetée aux autres. Il identifie également le besoin d'intimité du groupe dans le but de favoriser les discussions intimes, d'évacuer les émotions et de fournir des retours critiques entre les membres. Le besoin d'intimité est contré par le besoin de vivre en communauté, d'être avec les autres et d'interagir avec eux. Cette interaction est un facteur important de soutien émotionnel et de stimulation par la discussion, les actions inattendues ou le partage des émotions.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.3 L'ÉQUIPAGE

3.3.1 CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉQUIPAGE

Les missions futures ne doivent pas seulement former des individus performants, mais aussi des groupes efficaces. Dans une étude psychologique menée par la NASA, les interactions entre les membres de l'équipage, ainsi qu'entre l'équipage et le personnel au sol, jouent un rôle important dans le rendement global de l'équipage. Bien que de nombreuses variables influent sur les interactions de l'équipage, comme les espaces personnels et privés offerts par l'architecture, un des facteurs les plus importants est la composition de l'équipage (Vakoch, 2012).

La sélection optimale de l'équipage, les méthodes d'entraînement, l'habitabilité et les spécifications de communication dépendront des variables telles que la taille et l'hétérogénéité de l'équipage, la durée de la mission et les objectifs de celle-ci. Les voyages dans l'espace ont été toujours dominés par les hommes, mais le rôle des astronautes féminines va certainement augmenter dans le futur. D'une part, les équipages mixtes offrent une diversité sociale, alors que d'une autre, les stéréotypes sexuels et les attitudes négatives pourraient être perturbatrices. Les membres doivent être assez jeunes dans la mesure où les membres ne se sont pas encore ennuyés les uns des autres, mais qu'ils ont atteint un degré élevé de coordination interpersonnelle. Augmenter la taille de l'équipage augmente le nombre de relations sociales possibles, ainsi que les options de stimulations sociales, de développement de l'amitié, et de l'exercice de divers comportements.

Finalement, les membres du groupe n'ont pas besoin de partager totalement les mêmes idées. Deux personnes avec des besoins et des personnalités différents peuvent totalement être compatibles. En plus, les besoins concurrentiels peuvent généralement entraîner de la frustration. Le besoin de compatibilité devient primordial dans des conditions d'isolement et de confinement.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.3.2 DYNAMIQUES SOCIALES

Après un certain temps ensemble, le groupe commence à développer des liens qui unissent les membres les uns aux autres. Les groupes cohésifs ont tendance à avoir des limites serrées, ce qui rend compliqué pour un étranger ou un nouvel arrivant de se joindre au groupe. Dans les conditions d'isolement et de confinement, il est impossible d'abandonner le groupe en cas de dispute. Cela peut aboutir à des rejets et à des problèmes psychologiques qui peuvent affecter tous les membres du groupe. Pour arriver à une bonne cohésion du groupe, les tâches doivent être structurées de manière à maximiser la motivation et l'engagement des personnes. Or, la performance du groupe est le résultat d'une interaction complexe de nombreux facteurs différents. Si les normes du groupe favorisent une productivité élevée, comme c'est probablement le cas dans l'espace, alors une cohésion élevée est associée à un bon rendement.

La nourriture est un facteur très important en isolement, car elle permet de répondre aux besoins psychologiques et sociaux. Les membres doivent partager au moins un repas par jour pour maintenir une bonne cohésion. Les expériences effectuées en Arctique et en Antarctique concluent que les personnes confinées apprécient davantage les repas et mettent deux fois plus de temps à manger que les personnes en temps normal. Le défi pour les missions futures est de pouvoir offrir des options d'activités suffisamment intéressantes pour que les besoins psychologiques et sociaux des individus puissent être satisfaits sans dépendre de façon excessive de la nourriture ou du temps de repas.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.4 TRAVAIL ET DÉTENTE

La performance pendant les longs séjours est importante pour la santé et la sécurité des membres de l'équipage et pour le succès de la mission. La moindre perturbation de la conduite et du comportement des personnes peut avoir un impact mortel sur la mission. Plusieurs facteurs influencent cette capacité à bien travailler et vivre dans les habitats en milieux extrêmes comme :

- L'absence de gravité, qui affecte la précision de la performance psychomotrice.
- Les changements biomédicaux, comme la diminution de l'activité cardiaque, les troubles musculosquelettiques et le mal de l'espace.
- Les troubles de perception, causés par les changements de contrastes visuels, et l'absence de repères habituels d'orientation.
- Les troubles de sommeil, observés dans les bases en Antarctique et en Arctique, où la qualité du sommeil se détériore et les individus souffrent d'une forme dramatique d'insomnie, dans laquelle les phases profondes du sommeil diminuent ou disparaissent. Dans l'espace, le problème semble être lié au bruit et aux vibrations élevés, aux horaires de sommeil décalés et à la conception des lits. Le bruit de fond doit être maintenu à un niveau tolérable, surtout dans les endroits où dorment les astronautes.
- Changement du rythme circadien, puisqu'en absence de points de référence externes, la corps humain a tendance à se déplacer vers des jours de 25.4 heures. Une façon de lutter contre ce problème est d'imposer des activités sociales à des temps précis pour simuler une journée terrestre.
- Les cycles veille-sommeil et travail-repos, influencés par le stress.
- La fatigue, qui représente une diminution réversible de la performance en raison d'une surcharge ou d'une sous-charge. Il est nécessaire d'équilibrer les horaires de travail afin de minimiser les conditions de fatigue qui réduisent la capacité de travail et entraînent des performances irrégulières ou désordonnées.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

- La variété du travail. Le programme de formation ne doit pas réduire le niveau d'intérêt lié aux responsabilités de la mission. Lorsque tout le travail est sur-appris, le problème de l'ennui est amplifié. Une stratégie consiste à entraîner l'équipage à des tâches vitales pour sa sécurité et sa réussite, tout en conservant l'apprentissage des tâches non essentielles pour le temps de la mission. Un milieu de travail restreint ou inexistant peut entraîner une diminution spectaculaire de divers aspects du rendement. La satisfaction est élevée lorsque les tâches sont conformes aux intérêts personnels. Pour que chacun puisse s'adapter à des tâches différentes et changeantes, il est nécessaire de bien organiser l'aménagement intérieur.

Les personnes confinées adoptent une orientation professionnelle extrême et manifestent peu d'intérêt pour les activités de loisirs. Jusqu'à récemment, on croyait qu'un programme d'exercice approprié pouvait inverser les changements physiologiques importants associés à l'apesanteur. L'activité physique soulage la dépression et diminue l'anxiété, c'est pourquoi les personnes qui sont activement engagées dans leur temps libre sont en meilleure santé psychologique que les individus passifs. Par conséquent, il faut déterminer comment motiver ces individus à accomplir les exercices nécessaires. Les stratégies cognitives sont très importantes pour maintenir un entraînement régulier. Il est normal aussi que les individus dans l'espace développent un intérêt pour les mouvements propres à ce milieu. Les astronautes du Skylab se sont montrés enthousiastes à l'idée de faire de l'acrobatie dans l'espace et ont même suggéré que toutes les futures stations spatiales intègrent une installation pour ce genre d'activités (Häuplik-Meusburger & Lorenz, 2002).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT PROTEGE PAR LE DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

4

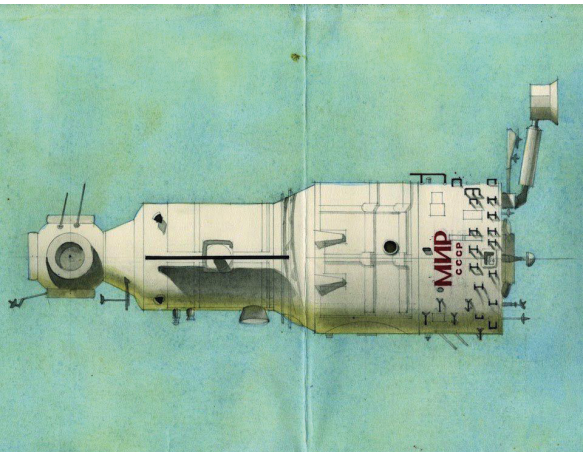
LES HABITATS DE L'EXTRÊME : Terrains d'étude

4.1 STATIONS SPATIALES : Premier pas en dehors du vaisseau terrestre

Lorsque Yuri Gagarin accomplit son vol spatial en 1961, il poussa le public russe comme américain, à imaginer de nouvelles structures capables d'accueillir et de soutenir des êtres vivants dans l'espace pour des durées importantes. Dans cette partie nous allons exposer les différentes stations spatiales qui ont été mises en orbite et occupées par des équipages militaires et scientifiques. Durant l'ère spatiale, ces stations formaient les premiers exemples d'habitats confinés dans des milieux extrêmes, et ont servi de laboratoire idéal pour explorer les réactions humaines à l'isolement.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

SALIOUT



7. Aquarelle de l'enveloppe externe de la station Saliout, avec l'emplacement du logo par Galina Balashova

En 1969, bien que l'URSS poursuive son programme lunaire d'atterrissage, elle avait commencé à mettre l'accent sur le développement de stations en orbite terrestre dans lesquelles les cosmonautes pouvaient effectuer des observations et des expériences de longue durée, pendant des séjours de quelques semaines ou quelques mois, au lieu de journées. Le programme regroupe 7 stations, lancées entre 1971 et 1982, qui servaient comme locaux d'habitation et laboratoires scientifiques ou plates-formes de reconnaissance militaire. Le nom du programme Saliout, russe pour 'Salut', a été choisi pour honorer le cosmonaute Yury Gagarin après sa première orbite historique de la Terre en 1961. L'objectif de ce programme était de laisser l'Union Soviétique en avance par rapport à ses homologues américains.

Saliout 1, lancée le 19 avril 1971, était la première station mondiale à être lancée. Elle est basée sur la plate-forme de reconnaissance Almaz conçue dans les années 1960 par l'ingénieur soviétique Vladimir Chelomey et adaptée pour être utilisée avec la fusée spatiale Soyouz. La station spatiale de l'Union soviétique a été conçue sous la forme d'un cylindre étagé de 14,6 m de long et de 4,25 m de large. À l'avant de la station se trouvait un système d'amarrage pour les fusées Soyouz. L'intérieur, connecté à un sas étanche, forme une seule pièce rectangulaire. Saliout 1 a été équipée dès le début pour soutenir deux équipes de trois hommes pour une durée totale de deux mois au cours d'une période de six mois. Bien que son premier équipage désigné ait accosté cinq jours plus tard dans une Soyouz 10, les cosmonautes n'ont pas réussi à ouvrir leur écoutille et ont dû rentrer chez eux. Une fois le problème réglé, l'équipage de Soyouz 11 passe 23 jours

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AUX DROITS D'AUTEUR

à bord de la station en juin, mais une tragédie se produit sur le chemin du retour lorsqu'une valve dans la capsule de descente fait fuir l'air, et les trois cosmonautes sont tués. À l'époque, les cosmonautes Soyouz n'avaient pas l'habitude de porter des combinaisons pressurisées. Lors de la reconception du Soyouz, et afin d'éviter un tel accident, un siège a dû être omis pour dégager de l'espace et y loger un système de survie pour deux cosmonautes en combinaison pressurisée (Harland, 2005c).

Saliout 2, lancée en 1973, subit une explosion après avoir été mise en orbite et ne fut jamais occupée. Saliout 3 et 5 (1974 et 1976, respectivement) étaient des stations spatiales militaires, tandis que Saliout 4 (1974) était essentiellement destinée à des fins scientifiques. Saliout 6 et 7 (1977 et 1982), stations scientifiques, étaient conçues dans une optique évoluée, avec un nouveau système de ravitaillement et de meilleurs locaux de vie. Les ports d'amarrage, situés aux deux extrémités des stations, permettaient aux équipages en mission de longue durée d'être approvisionnés par des navettes automatiques Progress, alors que des modules Soyouz restaient attachés à la station. Saliout 6 a soutenu un programme scientifique qui a connu un grand succès et ses équipes ont accueilli une succession de cosmonautes internationaux invités pour de courts séjours. L'expérience acquise dans le cadre du programme Saliout a préparé le terrain pour le développement et l'exploitation de la prochaine génération de station spatiale modulaire Mir (Harland, 2005b).

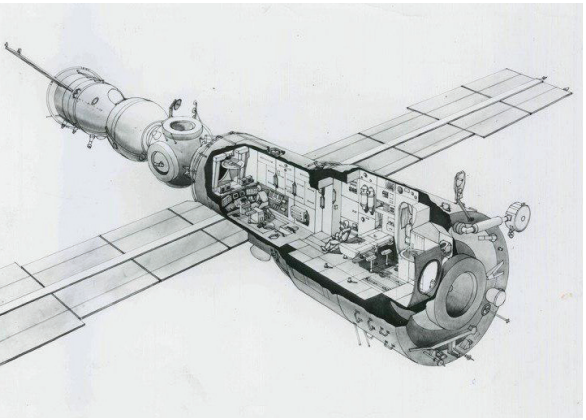
8. Cosmonaute russe prenant une photo de l'extérieur de la station

Saliout fut le premier engin spatial de disposer d'un module habitable. Lorsque Yuri Gagarin est parti dans l'espace en 1961, il n'avait besoin que d'un petit vaisseau spatial pour son court séjour. Ce n'est qu'avec le développement des vols spatiaux habités que l'on a eu besoin d'engins spatiaux qui permettent des séjours et des périodes de travail de longue durée. Les

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS A DROIT D'AUTEUR

prédécesseurs Vostok et Voshod offraient peu d'espace aux cosmonautes dans la capsule d'atterrissage ; on ne trouvait que des chaises longues qui permettaient de stabiliser le corps au décollage et à l'atterrissage.

Galina Balashova a été chargée de concevoir et de créer le module orbital de Saliout. Il ne lui a fallu qu'un week-end pour réaliser une première esquisse du module. Elle a transformé le compartiment gauche de la trappe d'entrée en une armoire avec de l'équipement, un bureau et un espace de rangement pour les livres et autres articles. A côté du meuble, elle a placé les toilettes, qui ressemblaient à un fauteuil. De plus, elle a dessiné le compartiment à droite de la trappe d'entrée comme un divan qui stockait les pièces de matériel à l'intérieur. Balashova abordait ses dessins en réalisant des esquisses qui servaient de base à un dessin à l'aquarelle. Lors du dessin d'objets, elle utilisait d'abord des plans cotés avant de les présenter en 3D. Les plans ont servi de base aux ouvriers de l'usine de fabrication de maquettes pour la production de prototypes à échelle réelle. Ces modèles correspondaient à l'engin spatial dans les moindres détails et étaient fabriqués en métal plutôt qu'en bois. "Le fait que certaines parties de mon travail continuent à définir l'aménagement intérieur des capsules spatiales est quelque chose que je n'aurais jamais pu imaginer à l'époque", confie Galina.



9. Dessin de l'intérieur de Saliout, qui montre un espace unique accessible par l'équipage

Dans ses dessins des stations Saliout, Balashova a incorporé plusieurs éléments architecturaux, en partant du principe de l'harmonie et des proportions équilibrées, qu'elle s'est toujours attachée à cultiver. Elle devait prendre en compte des questions et des considérations comme celles-ci : où dormiraient les cosmonautes ? Où et comment allaient-ils manger ? Comment mieux orienter leur vision ? Où devait être placée la cuvette des toilettes ?

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Pour répondre à ces questions, Galina Balashova introduit des couleurs pour différencier le sol et le plafond et donner un sens d'orientation à l'habitat; elle intègre un divan comme espace dortoir et une toilette équipée et adaptée à l'apesanteur dans un petit espace séparé. La position des installations techniques, du système de contrôle, des étagères, et de l'espace de rangement de la nourriture, de la vaisselle et des boissons étaient tous adaptés aux besoins des personnes. Une grande partie de son travail a porté sur le revêtement intérieur, ainsi que sur l'attribution des fonctions qui lui sont associées et sur les composants nécessaires à cet usage. Ce revêtement, de couleur assez claire pour compenser l'absence d'un bon éclairage, permettait de protéger l'équipage en cas de choc (Meuser, 2015).

10. Saliout 7 en orbite autour de la Terre

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT PROTÉGÉ PAR LES DROITS RÉSERVÉS AU DROIT D'AUTEUR

SKYLAB

Skylab était la première station spatiale lancée par les États-Unis. Elle reste en orbite pour 6 ans et accueille trois équipages pour des durées successives de 28, 56 et 84 jours. Les astronautes à bord de la station ont mené 270 expériences en sciences biomédicales et biologie, en astronomie solaire, en observation de la Terre et en traitement des matériaux, en plus de recherches importantes sur les réactions physiologiques des astronautes pendant les vols spatiaux de longue durée.

Plusieurs bureaux de la NASA ont eu des idées pour une station spatiale bien avant le lancement de Skylab. Cependant, l'agence était très axée sur la course à l'espace et les voyages vers la Lune qui dominaient la conscience publique dans les années 1960. Alors que le programme Apollo arrivait à sa fin au début des années 1970, la NASA lance un programme destiné à développer des applications à ce programme, afin de pouvoir réutiliser et lancer le matériel non utilisé du programme lunaire. Une idée, proposée par l'ingénieur aérospatial Wernher von Braun, consistait à construire une station spatiale à partir d'un étage de fusée inutilisé.

Le projet Skylab a été conçu pour étudier la capacité de l'homme à effectuer de longs voyages dans l'espace et à accomplir un travail utile dans un environnement en apesanteur. En tant que première station spatiale américaine, Skylab était censée être le point déterminant de la faisabilité de l'exploration spatiale, et notamment d'un atterrissage habité sur Mars, de la construction d'une station spatiale terrestre de 50 à 100 personnes et de l'établissement de bases scientifiques sur la Lune destinées à des études géologiques prolongées.

La version initiale de la première station spatiale américaine, Skylab, a été réalisée en 1966. Un changement

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

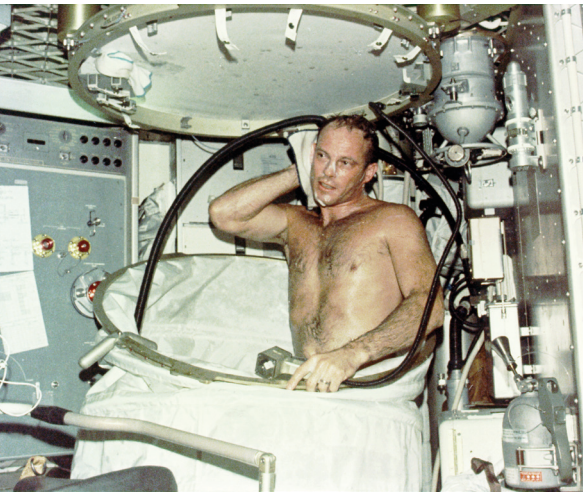
radical par rapport aux fantasmes rotatifs et gonflables de la science-fiction. Il s'agissait de lancer un 'atelier humide' - un étage de fusée rempli de carburant, qui pouvait se nettoyer tout seul quand il était vide et devenir une 'maison habitable de l'espace'. Lorsque le chef du Bureau des vols spatiaux habités de la NASA, George Mueller, vit une maquette de son projet en automne 1967, il fut bouleversé par son intérieur mécanique et sombre. La nouvelle maison de l'humanité dans l'espace n'était rien qu'un réservoir de carburant, et il ne pouvait imaginer personne survivre dans un tel environnement pendant plus de deux mois. Il a alors demandé aux ingénieurs de consulter des concepteurs industriels et des architectes afin d'améliorer les conditions de vie des astronautes.

Skylab se composait de quatre éléments principaux : l'atelier orbital, le module sas, l'adaptateur d'amarrage et le support du télescope Apollo. Le module de pilotage et de service Apollo qui transportait les équipages vers Skylab restait attaché à la station pendant toute la durée de l'occupation de la station.

L'atelier orbital, qui sert de compartiment principal de travail, de vie et de repos pour les équipages, a été reconverti à partir de l'étage supérieur d'une fusée Saturne. Il contient des équipements d'exercice, une cuisine et de nombreuses expériences scientifiques, en particulier dans le domaine des sciences de la vie. Deux grands panneaux solaires sur le module fournissent 12,4 kilowatts d'électricité à la station. Le module sas permet aux astronautes d'effectuer des sorties dans l'espace. L'adaptateur d'amarrage comprend un port d'amarrage principal et un autre de secours et abrite l'ensemble des expériences sur les ressources terrestres. Le deuxième port d'amarrage offre une possibilité d'évacuation et de sauvetage. Le support du télescope Apollo contient des télescopes pour les observations solaires et

11. Aménagement des espaces de travail et des locaux d'habitation par Raymond Loewy.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE PARIS LA VILLETTE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



12. L'astronaute Jack R. Lousma, pilote de Skylab 3 prenant un bain dans les cabines de l'équipage

quatre panneaux photovoltaïques pour l'alimentation supplémentaire.

Après l'émergence et la résolution d'une multitude de problèmes techniques, la NASA et les trois équipages du Skylab se sont concentrés sur les questions relatives aux vols spatiaux de longue durée. Le temps d'exercice de l'équipage, les besoins nutritionnels, les horaires de travail, les effets physiologiques et les effets psychologiques ont fait l'objet de nombreux examens et débats.

Le deuxième équipage du Skylab a impressionné la NASA par sa productivité. L'équipage a terminé les tâches qui lui ont été assignées beaucoup plus rapidement que prévu. Cela a créé de fausses attentes au sein de la NASA vis à vis de la capacité d'un groupe d'astronautes d'accomplir ses tâches. La situation n'a pas toujours été aussi lisse entre la Terre et l'espace. Le troisième équipage de Skylab en particulier s'est régulièrement plaint d'être surchargé de tâches et d'attentes surhumaines.

L'expérience de Skylab a préparé le terrain aux autres missions futures grâce aux connaissances acquises dans les domaines techniques et logistiques comme dans ce qui concerne la psychologie de l'équipage. La NASA a insisté dans les projets ultérieurs sur la nécessité de tenir des séances privées régulières avec un médecin désigné pour que les astronautes puissent exprimer leurs préoccupations au sujet de leur charge de travail, de leur vie familiale ou de tout autre sujet qui pourrait les déranger. Ils pourront parler aussi sans répercussions et sans crainte que le public soit à l'écoute. Le médecin peut alors rechercher des solutions auprès des gestionnaires sur le terrain, libérant ainsi du temps pour que les équipages puissent travailler en orbite.

Les astronautes suivent également un programme d'exercices rigoureux, qui consiste en environ deux heures sur un tapis roulant, un vélo d'exercice ou

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AUX DROITS D'AUTEURS

un appareil de levage qui simule les entraînements musculaires sur Terre. Des études médicales ont montré que ce type d'exercice réduit la perte osseuse, l'atrophie musculaire et d'autres problèmes qui émergent en vol spatial (Howell, 2018b).

Bien que Skylab offrait des espaces visuellement privés pour chaque membre de l'équipage, ceux-ci manquaient une bonne isolation acoustique et lumineuse, et étaient dotés d'un contrôle de ventilation très limité. L'équipage du Skylab a indiqué qu'il s'agissait de ces défauts, ainsi que du manque de dégagements et d'espaces de rangements plus grands, qui ont réduit l'efficacité des volumes privés.

13. Skylab en orbite, avec le pare-soleil installé visible

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT MIS À DISPOSITION SOUS DROIT D'AUTEUR

MIR

Après la maudite Saliout 7, les autorités soviétiques décident de passer à la phase suivante, qui consistait à assembler un grand complexe modulaire en orbite. Au centre se trouverait un bloc de base dérivé du modèle Saliout, qui serait aménagé comme habitat de l'équipage. En plus d'une paire de systèmes d'amarrage axial, un anneau de quatre unités d'amarrage périphériques lui permettrait de recevoir des modules montés en jonction avec ce bloc. Cinq unités supplémentaires permettraient d'agrandir la station et d'en fournir les principaux instruments scientifiques. Pour marquer cette avancée, la nouvelle station a été appelée Mir, Russe pour 'paix', 'communauté' ou 'monde'. Conçue à l'origine pour deux personnes, la station finit par servir un équipage de six, sur une durée de quinze ans, trois fois sa durée de vie prévue. Mir devient une légende en son temps, reflétant les gloires spatiales passées de la Russie et son avenir en tant que pionnière dans le domaine spatial (Harland, 2005a).

14. Station Mir agrandie pour accueillir un équipage de six

Le bloc de base Mir, ou module central, a évolué à partir du modèle Saliout pour servir de cœur de la station spatiale. Lancé en février 1986, le noyau de 13,1 mètres de long et de 20,4 tonnes métriques contenait l'aire d'habitation et de travail principale, le système de survie et l'alimentation électrique, ainsi que l'ordinateur principal, l'équipement de communication et de contrôle, le tout dans 90 mètres cubes de volume habitable. Les températures de l'environnement de Mir étaient généralement maintenues entre 64°F et 82°F et l'humidité entre 20 et 70 pour cent. Le noyau comportait quatre compartiments principaux (NASA, 1999).

Le compartiment de travail était constitué de deux cylindres reliés par une section conique. Il fournissait

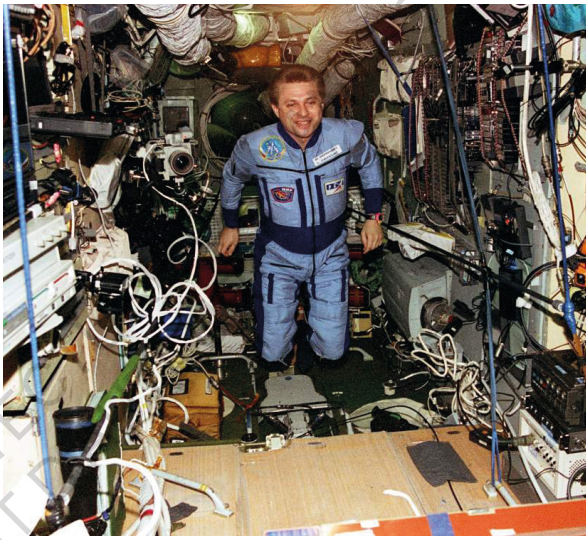
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

des zones d'opérations et des espaces de vie. Les opérations comprenaient des activités de surveillance, de commandement et de recherche scientifique. L'espace de vie fournissait les nécessités pour des missions de longue durée, y compris une cuisine avec une table, des éléments de cuisson, un espace de rangement pour les déchets, un appareil d'exercice à vélo et un tapis roulant. L'aire d'hygiène personnelle, avec toilettes et lavabo, était située à une extrémité du compartiment. Mir disposait de plusieurs hublots, avec des volets à l'extérieur pour se protéger des impacts de débris orbitaux, alors que deux écrans de télévision permettaient de communiquer face à face avec le sol.

Le compartiment de transfert était formé d'une structure sphérique à l'extrémité avant de la station, offrant un orifice d'amarrage et un espace de transition pour accéder aux modules additionnels de la station. Ce compartiment n'avait pas d'indicateurs de direction simulés de haut et de bas ; c'était un endroit de Mir où les astronautes ont signalé des sensations de désorientation. Ceci démontre clairement l'importance des repères conçus par Galina Balashova dans le compartiment de travail, en utilisant des couleurs différentes pour indiquer la direction de l'espace.

Kvant I et Kvant II, lancés en 1987 et 1989, ont augmenté le volume utilisable de Mir et élargi ses capacités scientifiques. Leur sas contenait une unité autonome de manœuvre des cosmonautes qui augmente la portée et la complexité des tâches des activités extravéhiculaires. Le Kvant-2 améliore la station avec de l'eau potable, de l'oxygène, des systèmes de contrôle de mouvement et de distribution d'énergie, ainsi que des douches et des installations de lavage pour l'équipage.

Plusieurs autres modules ont été ajoutés à la station Mir pour augmenter ses moyens, comme Kristall en 1990, Spektr en 1995, et Priroda en 1996. Ces blocs augmentent la surface habitable de la station, tout en



15. Le cosmonaute Yury I. Onufrienko, commandant de la mission Mir-21, flotte à l'intérieur de la station clairement encombrée.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

offrant des équipements scientifiques et techniques à la station. L'intérieur de Mir reflétait un environnement de travail et de résidence, mais surtout, ce lieu renfermait les systèmes, équipements et matériaux essentiels à la survie dans l'espace. Chaque jour, les membres de l'équipage effectuaient les tâches nécessaires au maintien de la station ainsi qu'à l'établissement des conditions de vie indispensables à leur survie.

16. Mir, devant la Terre, depuis la navette spatiale Atlantis

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

STATION SPATIALE INTERNATIONALE

La Station spatiale internationale (ISS) est un projet multinational qui a réussi à mettre en orbite la plus grande structure jamais réalisée dans l'espace. Sa construction a été principalement achevée entre 1998 et 2011, quoique la station évolue continuellement pour inclure de nouvelles missions et expériences. Elle est occupée sans interruption depuis le 2 novembre 2000 (Howell, 2018a).

Laboratoire scientifique international, l'ISS est une expérience hautement sophistiquée et coûteuse qui vise à étendre notre présence au-delà des frontières de notre planète. Cette station orbitale soigneusement entretenue et fortement contrôlée est principalement destinée à la recherche dans des domaines variés comme la biologie, la physique, l'astronomie, l'ingénierie, la robotique, la médecine, l'astrobiologie, la météorologie et l'astronomie. Deux sections principales sont exploitées par la NASA des États-Unis et l'Agence spatiale russe (Roscosmos), mais des astronautes résidents et des visiteurs passent par d'autres agences spatiales, comme l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) et l'Agence spatiale canadienne (CSA). 300 personnes y ont habité depuis la première mission. À l'intérieur, l'architecture modulaire de l'espace crée des pièces et des passages qui correspondent à la surface d'une maison de six chambres, ou à peu près au volume d'un Boeing 747. Elle est environ quatre fois plus grande que la station spatiale russe Mir et cinq fois plus grande que la station américaine Skylab (Damjanov & Crouch, 2019).

Il a fallu 10 ans et plus de 30 missions pour assembler

17. Sortie spatiale de l'ISS, pour des travaux de maintenance.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

l'ISS. L'assemblage a débuté avec le lancement du module de contrôle russe Zarya, en novembre 1998, suivi par le module américain Unity le mois suivant. Ces deux pièces ont été reliées en orbite par des astronautes américains de la navette spatiale. Au milieu de l'année 2000, le module russe Zvezda, comprenant un espace de séjour et de contrôle, fut ajouté. Le 2 novembre de la même année, l'ISS reçoit son premier équipage composé des cosmonautes russes Sergey Krikalyov et Yuri Gidzenko et de l'astronaute américain William Shepherd, qui embarquent sur un vaisseau spatial Soyouz. Un laboratoire de microgravité de la NASA appelé Destiny et d'autres éléments ont ensuite été reliés à la station. Le plan global prévoyait l'assemblage, sur une période de plusieurs années, d'un ensemble de laboratoires et d'habitats traversés par une longue ossature supportant quatre unités accueillant des grands panneaux solaires et des radiateurs thermiques (Harland, 2019).

18. Les astronautes profitent de la coupole vitrée pour observer et photographier la Terre

Les exigences initiales relatives à l'architecture de l'ISS ont été établies au début de la phase de développement. Les principales caractéristiques étaient l'enveloppe de l'enceinte sous pression, les cloisons, les étagères, ainsi que la forme et la taille de la trappe. Ces mesures, en plus de l'expérience acquise dans les autres aventures spatiales, répondaient adéquatement aux questions fonctionnelles fondamentales de l'architecture, notamment la modularité, la fabrication, la facilité de maintenance et le remplacement du matériel, et devraient assurer l'exploitation et l'occupation sécuritaire de l'ISS pendant au moins 20 ans. Cependant, cela n'a pas empêché les équipages d'adapter l'architecture à travers l'usage. Comme c'est le cas pour toutes les architectures et les systèmes d'habitation spatiaux, les équipages de l'ISS ont apporté de nombreux ajouts et modifications en orbite à l'environnement aménagé en fonction de leurs besoins particuliers : le module de service russe a été lancé sans sa table en raison des limitations de poids, et l'équipage a donc improvisé un module à partir de

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCIES
DOCUMENT SOUMIS À DROIT D'AUTEUR

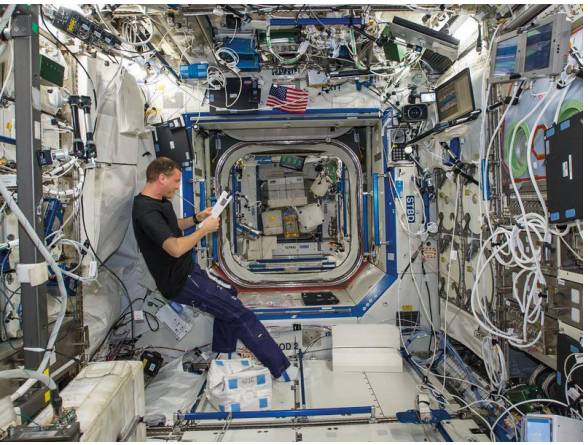
19. ISS prise depuis la navette Discovery

restes de matériel de vol. Respectant les traditions de la Marine et de la NASA, l'équipage a ajouté une cloche pour annoncer l'arrivée de chaque nouveau groupe à la station, et a également installé un panneau plat pour afficher les tâches et un journal de bord pour enregistrer et documenter toutes les visites orbitales.

Les concepteurs ont imaginé que l'intérieur de l'ISS devait être propre, organisé et fonctionnel. En pratique, l'intérieur a généralement été adapté par l'équipage pour être organisé et fonctionnel, mais l'aspect propre a disparu depuis longtemps. Comparablement à l'intérieur de Mir, l'ISS paraît bien plus 'habitée' que prévu.

Pour la conception des locaux de l'équipage, le bloc de

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



20. L'intérieur plus 'habité' que prévu

21. Intérieur des cabines de l'équipage : le seul espace totalement privé de l'ISS

base de l'ISS a été basé sur les 'kayutas' russes, introduits dans Saliout 6, et utilisés dans le bloc de base de Mir. Les kayutas, ou logements de l'équipage, fournissent un volume visuellement privé avec une fenêtre de 20 cm, mais celle-ci augmente l'exposition des membres de l'équipage au rayonnement spatial. Ces locaux aspirent l'air ambiant de la cabine mais sont généralement trop chauds et n'offrent pas une atténuation acoustique suffisante du bruit. Les précieuses leçons tirées du programme Mir par rapport aux fonctions privées ont été intégrées à l'ISS dès le début.

La station abrite à l'origine quatre modules de logements, très similaires mais uniques. Chacun fournit 2,1 m3 de volume intérieur. À l'intérieur de chaque module, une des parois latérales est désignée comme surface de couchage et de repos, alors que le mur de face permet de fixer des assemblages électriques, des postes de travail, des luminaires et d'autres équipements. La paroi arrière opposée à l'entrée est courbée pour suivre la coque du module et offre des espaces de rangement et de stockage. Le premier objectif des cabines de l'équipage est d'offrir aux personnes un endroit pour se retirer du bruit et des activités intenses dans les parties communes de l'ISS. La conception est très efficace pour limiter le bruit à des niveaux bas comparables à ceux d'une bibliothèque publique. La lumière extérieure, étant presque complètement occultée, crée un environnement privé. Une lumière artificielle réglable est nécessaire, ainsi qu'un débit d'air suffisant qui doit être maintenu pour éviter l'asphyxie et éliminer la chaleur corporelle.

Ces quatre locaux d'équipage, en plus des deux kayutas du segment russe, permettent l'hébergement privé de six personnes. La station temporaire TeSS, située dans le module du laboratoire américain Destiny, a servi comme solution provisoire pour accueillir un membre d'équipage supplémentaire pendant la phase de montage. TeSS offre un volume d'habitation privé, mais pas le même

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AUX DROITS D'AUTEUR

degré d'intimité ou de confort que les locaux permanents (Howe & Sherwood, 2000).

Les missions spatiales prolongées exigent un environnement flexible avec des équipements qui peuvent être reconfigurés pour le nettoyage et l'entretien et pour s'adapter à l'évolution de la composition, des préférences et des activités de l'équipage. Cette approche est conforme aux normes de l'ISS concernant les étagères échangeables. La flexibilité est un attribut commun dans les meubles terrestres, avec des exemples d'objets et d'environnements qui offrent de multiples options d'agencement et de flexibilité fonctionnelle. Le 'retrofitting' ou la réadaptation est également un élément important de l'aménagement intérieur de l'ISS. Elle consiste à équiper une machine ou une installation déjà en service, de pièces, dispositifs ou équipements qui n'existaient pas ou n'étaient pas disponibles au moment de la conception ou de la fabrication. Dans différentes étapes du long cycle de vie de l'ISS, cette dernière a fait l'objet de plusieurs réaménagements et réadaptations, à mesure que sa mission change et que la technologie évolue.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

4.2 SITES ANALOGUES TERRESTRES : Concevoir pour l'espace, sur Terre

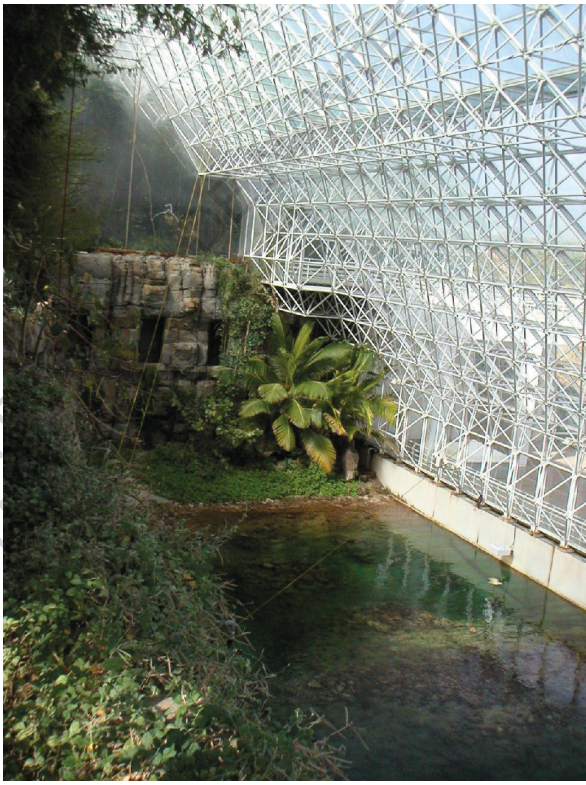
Pour mieux se préparer aux prochaines aventures spatiales habitées, les chercheurs ont réfléchi à des méthodes plus pratiques, économes et accessibles pour perfectionner leurs outils, améliorer la technologie, et effectuer leurs études sur le confinement. Notre planète, offrant des climats et des environnements très variés, abrite des milieux dans lesquels les conditions ambiantes sont tellement extrêmes et comparables à ce que nous pouvons trouver dans d'autres planètes. Depuis quelques années, ces milieux analogues accueillent des habitats qui logent des scientifiques et des explorateurs, afin de dévoiler de nouveaux mystères de notre planète et d'étudier les effets possibles d'un isolement prolongé. Nous trouverons dans cette partie un aperçu des projets les plus marquants du point de vue architectural et scientifique, et qui ont servi le plus comme terrain d'études comportementales.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

BIOSPHÈRE 2

Biosphère 2 est une installation de recherche scientifique située à Oracle, en Arizona, aux États-Unis, conçue pour imiter l'environnement de la Terre considérée comme la Biosphère 1. le plus grand système écologique fermé du monde. Cette installation est connue pour deux missions effectuées au début des années 1990 au cours desquelles les équipages étaient enfermés dans son enveloppe pour étudier leur capacité de survie. La priorité de ces études était d'évaluer si les humains étaient capables de construire et de vivre dans des colonies autosuffisantes dans l'Espace, en les isolant du reste du monde pendant presque deux ans. Étant l'une des premières expériences étudiant la possibilité d'une vie en communauté dans un espace confiné, le projet visait aussi à mieux comprendre l'équilibre et le mode de fonctionnement de notre propre biosphère, et à développer les instruments et les technologies permettant d'assurer l'autosuffisance et la préservation de la vie terrestre dans l'ère de la colonisation spatiale. Bien que cet habitat ne soit pas situé dans un milieu extrême, il présente une simulation d'un environnement majoritairement isolé et coupé du reste du monde. Seul le lien visuel et thermique est maintenu avec l'extérieur.

La conception du terrarium Biosphère 2 a été imaginée dans les années 1980 par l'ingénieur américain John P. Allen, directeur de 'Space Biospheres Ventures', qui propose un nouveau type de laboratoire qui combine une architecture avant-gardiste et des systèmes de contrôle permettant d'abriter une diversité d'écosystèmes vivants. Sa construction s'est achevée en 1989, révélant une structure composée de trois sections principales : une zone en surface hermétiquement fermée, une zone technologique souterraine (la Technosphère) et une zone réservée à l'habitat humain. La verrière principale



22. Intérieur de la serre comportant différents climats et milieux simulés

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE LYON
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

23. Le site de Biosphère 2, avec la serre vitrée et l'habitat de l'équipage

contient 5 écosystèmes différents terrestres (une forêt tropicale, un désert, une savane ...) et maritimes (un océan et son récif coralien), avec des conditions variées selon les besoins des êtres vivants présents. Au sud du bâtiment se trouvent deux grands dômes géodésiques servant comme "poumons" de la biosphère à l'aide de grandes chambres à expansion variable qui régulent la pression de l'air à l'intérieur de l'enceinte vitrée. La température de l'air et son humidité sont contrôlés, et la biosphère un système biologique de traitement des déchets qui utilise à la fois des microorganismes aérobiques et anaérobiques et d'autres systèmes de recyclage biologique.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS À DROIT D'AUTEUR

Les missions de survie à la Biosphère 2 débutent le 26 septembre 1991, lorsque quatre hommes et quatre femmes, communément appelés “Bionautes”, sont enfermés dans le biome de verre. Les tâches agricoles occupaient une grande partie de la routine quotidienne des Bionautes, qui devaient assurer eux-mêmes la production de leur propre nourriture, notamment des légumes et des céréales à partir de plantes cultivées dans le sol, de la viande, des œufs, du lait des animaux de ferme et du poisson élevé dans des lits d’aquaculture.

Cette première mission ne fut pas considérée comme une réussite totale, avec plusieurs problèmes qui affectent la mission. Quelques mois après leur entrée dans l’atmosphère intérieure, les Bionautes détectent une diminution des niveaux d’oxygène et une augmentation du dioxyde de carbone. Au début de la mission, l’atmosphère intérieure était composée d’environ 20,9% d’oxygène ; 17 mois plus tard, les niveaux d’oxygène avaient baissé à seulement 14,2%. Incapables d’en identifier la cause, les responsables décident d’injecter de l’oxygène à au moins deux reprises, et les poumons ont été ouverts quotidiennement pour permettre l’entrée d’air provenant de l’environnement extérieur. Bien que cette décision fut critiquée en raison de l’impossibilité d’un tel sauvetage pour une colonie autonome dans l’espace, les Biosphériens ont souffert d’une léthargie marquée et de difficultés respiratoires avant que l’oxygène soit injecté, suscitant des craintes concernant leur santé et la possibilité de mener la mission à son terme. Cette expérience a montré pour la première fois que jusqu’à des niveaux d’oxygène de 16%, le corps humain est peu affecté, et a permis de mieux comprendre les implications sur les explorations planétaires et sous-marines (Meyer, 2017).

En plus, l’équipage n’a pas réussi à atteindre une production alimentaire maximale. Sur les 2000 m² de terrains, le rendement de produits alimentaires était

24. Candidats pour la première mission. Six sont retenus, avec deux autres non présents

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

juste de 83%, ce qui entraîne une perte de 10 à 20% du poids des membres de l'équipage durant les 6 premiers mois. Cela était causé principalement par un manque d'ensoleillement au cours de l'année 1991-92, et de l'expansion de certaines espèces d'insectes ravageurs. Cependant, Dr. Roy Walford, chercheur en gérontologie et spécialiste du régime alimentaire de la mission, affirme la bonne qualité du régime, qui s'est bien améliorée la deuxième année, avec une stabilisation et une reprise de poids de quelques membres. Selon lui, le métabolisme des Bionautes est devenu plus efficace dans l'extraction des nutriments de leurs aliments pour s'adapter au régime pauvre en calories et riche en nutriments (Walford, 2004).

La tâche du premier groupe a encore été entravée environ six mois après le début de la mission, lorsque le groupe s'est divisé en deux factions. Néanmoins, les Biosphériens ont résisté pendant deux ans dans l'environnement vitré, émergeant le 26 septembre 1993. Le 6 mars 1994, après avoir apporté diverses améliorations et optimisations au système technique et introduit d'autres espèces dans l'écosystème et les zones agricoles, la deuxième mission, avec un équipage de sept personnes, débute. Cependant, en septembre de la même année, l'expérience est interrompue prématurément suite à des conflits sur la gestion et les finances du projet (Rogers, 2011).

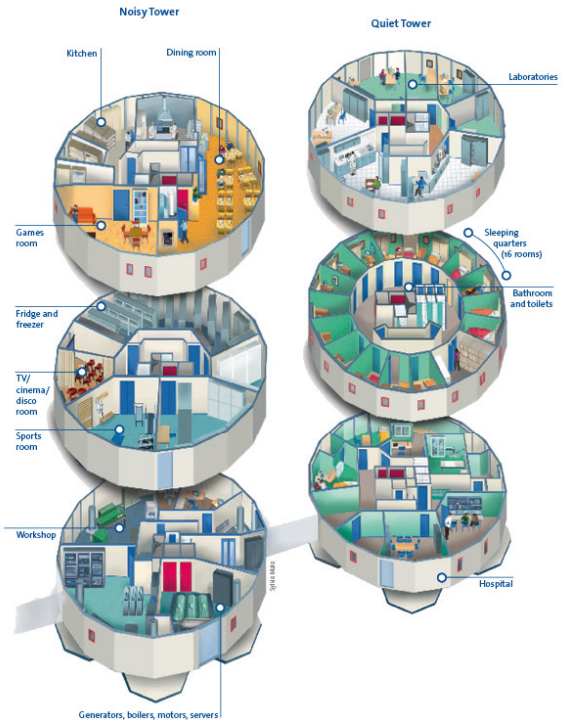
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

CONCORDIA

La station franco-italienne de recherche Concordia en Antarctique est située sur un plateau de 3270 m de glace. Dans ce lieu d'extrêmes, les températures peuvent descendre jusqu'à -80°C en hiver, avec une température moyenne annuelle de -50°C. Située à 600 km de la présence humaine la plus proche, Concordia réside dans le plus grand désert du monde, où aucun animal peut survivre - même les bactéries ont du mal à faire face à ces conditions. Cela rend Concordia une base plus isolée que la Station Spatiale Internationale, avec des temps de sauvetage plus longs, puisque pendant les neufs mois d'hiver, aucune aide extérieure ne peut être acheminée par voie terrestre ou aérienne pour atteindre la base - l'équipage doit résoudre seul les problèmes éventuels. Durant cette longue période hivernale, où le soleil disparaît complètement entre mai et août, l'équipage constitué d'une dizaine de scientifiques, de médecins, de techniciens, de cuisiniers, opère en autarcie totale.

La station est composée de deux cylindres droits adjacents, montés sur des supports rétractables pour laisser l'intérieur à niveau avec la neige. Ces deux volumes abritent les lieux de vie et de travail, alors qu'un troisième bâtiment technique comporte principalement la centrale électrique de la base. À l'intérieur, les pièces sont réparties en fonction du bruit généré et du calme demandé. Ainsi, la 'Tour Bruyante' contient les espaces de détente, la salle à manger, la cuisine, les ateliers, les locaux techniques et une salle de sport, alors que les laboratoires, les dortoirs et l'hôpital sont logés dans la 'Tour Calme'.

Vivre dans cet extrême bout de la Terre, région surnommée "White Mars", on peut facilement s'imaginer



25. Les deux volumes de la station, divisés par fonctions calmes et bruyantes

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

sur une autre planète. Les membres de l'équipage sont soumis à des pressions psychologiques et physiologiques comparables à celles des astronautes. Ils sont prisonniers du froid glacial et de la longue nuit, sauf pour les courtes sorties en combinaison spéciale qui empêche les engelures et l'hypothermie. Les scientifiques sortent presque tous les jours, pour prendre soin des instruments qui se trouvent dans un cercle d'un kilomètre de la station. Des abris chauffés à 8°C sont présents à côté des instruments pour se réchauffer. Bien s'habiller avec de nombreuses couches de vêtements et ne jamais respirer l'air extérieur directement mais qu'à travers un foulard peut faire la différence entre la vie et la mort. Le long séjour affaiblit aussi le système immunitaire, fragilise les os et diminue la masse musculaire. L'isolement et la privation sensorielle perturbent l'horloge biologique des membres de l'équipage, causant des complications de sommeil et des problèmes médicaux généraux.

26. La salle TV est un lieu habituel de rassemblement de l'équipage

Les aspects psychologiques de l'expérience hivernale présentent un intérêt considérable pour l'ESA. Une fois par semaine, l'équipe effectue un journal vidéo de ses expériences qui est ensuite analysé non seulement pour ce qui est dit mais aussi pour le langage corporel et la fréquence de certains mots. Les participants portent également des montres numériques qui détectent à la fois leur position dans la base et leur interaction avec les autres membres. Ces données aident à surveiller les préférences et les habitudes quant à la façon dont les membres passent leur temps : plus de temps dans les zones publiques ou privées, avec quels membres d'équipage ils interagissent, comment le comportement humain évolue face au stress et au confinement prolongé (Rathi, 2015).

Les repas constituent un événement central de la routine à la station Concordia. Ils sont pris à des heures fixes par l'ensemble de l'équipage, et assurent la solidité des

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

liens sociaux dès le début de la mission. Alexis, plombier, décrit la vie au sein de la station : “C’est comme une coloc. Il peut y avoir des tensions, mais on apprend à les gérer, car il est exclu de fuir devant un problème, qu’il soit technique ou humain.”

27. La station en été, se préparant pour accueillir la longue nuit polaire

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

28. La base anglaise est surélevée pour faire face à l'accumulation de la neige

HALLEY VI

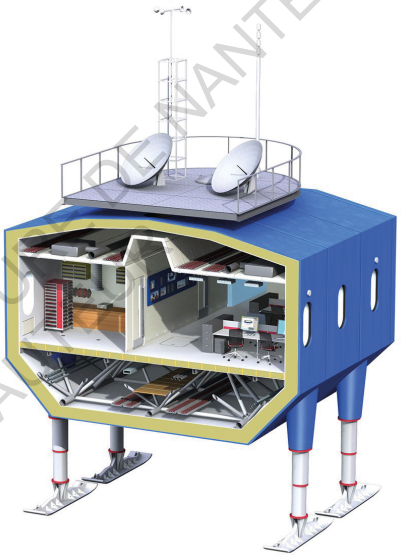
La station de recherche Halley VI est l'un des bâtiments les plus ambitieux et les plus complexes jamais construits dans le climat le plus sévère de la planète. Conçue pour être la première station de recherche antarctique entièrement relocalisable tout en étant constamment occupée, elle redéfinit l'architecture et l'ingénierie polaires. Elle se situe sur une couche plate de glace flottante et en mouvement et est soumise à des vents violents et à des accumulations annuelles de neige qui ont recouvert entièrement beaucoup d'autres stations précédentes. Travailler là-bas tout au long de l'année implique de longs mois d'obscurité et, même avec la technologie moderne, l'isolement de la famille et des amis.

Les défis auxquels les architectes ont dû faire face pour la conception de cette sixième base britannique sont l'accumulation de la neige (1,2 mètres par an) qui risque de recouvrir la station, les températures extrêmes tout au long de l'année, l'obscurité prolongée que les membres doivent endurer, et la possibilité de déplacer et relocaliser la base qui repose sur une épaisse couche de glace se déplaçant lentement mais sûrement vers la mer. Ainsi, même si une station n'est pas enfouie sous la neige, sa durée de vie à un seul endroit précis sera limitée.

Lorsque la British Antarctic Survey a lancé un concours public d'architecture pour une nouvelle station à Halley en 2004, elle a fait preuve d'audace. En raison des difficultés techniques et logistiques du travail sur place, les bases ont été conçues en mettant l'accent sur la résolution des problèmes techniques tout en veillant à ce que les besoins humains fondamentaux soient satisfaits.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

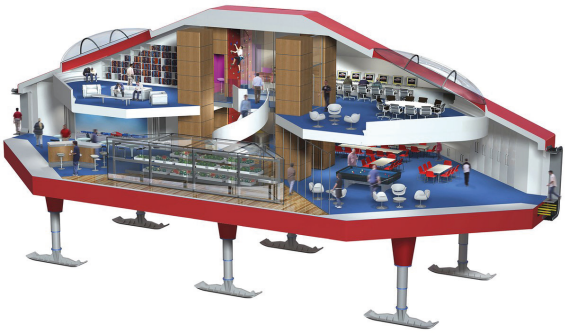
Or, vu le nombre limité d'architectes dans le monde ayant de l'expérience en conception dans l'Antarctique ou l'Arctique, le comité du concours a accepté que ce soit l'ingénieur qui devrait avoir de l'expérience dans cette région. Par contre, les architectes devaient prouver qu'ils avaient travaillé "dans des conditions extrêmes" de quelque sorte. Les lauréats du concours furent la jeune agence de Hugh Broughton, en partenariat avec AECOM. La solution proposée par l'équipe consistait en un bâtiment modulaire composé de plusieurs unités indépendantes mais liées entre elles, montées sur des skis pour le transport vers de nouveaux sites. Les volumes devaient paraître aérodynamiques, et doivent être construits à partir d'un kit de pièces facilement transportables. Avec une saison estivale qui dure 12 semaines, le temps de construction est forcément limité et il est donc souhaitable de préfabriquer autant que possible hors site. Le principal domaine de développement de la conception concernait les détails des skis fixés aux modules et le mécanisme de levage et d'abaissement de ceux-ci.



29. Les volumes préfabriqués sont montés sur des skis pour faciliter le transport

Les connotations de l'ère spatiale disparaissent cependant lorsqu'il s'agit de l'intérieur. Broughton voulait que l'équipage se sente bien chez soi. L'espace à double hauteur du module central rouge peut être utilisé de différentes manières et représente donc un espace flexible dans un lieu où tant d'autres éléments sont restreints. "C'est le seul espace à double hauteur de l'Antarctique", précise Broughton. Dans leurs dessins des espaces de vie, les architectes ont appliqué beaucoup de règles de l'architecture traditionnelle, en repensant aux interactions sociales et spatiales. Ainsi, à la fin de chaque module, le couloir s'élargit devant la salle de bain pour faciliter les interactions informelles lors des croisements. Chaque bureau contient un miroir rabattable pour que les gens puissent vérifier leur apparence avant de rejoindre leurs collègues. Les planchers sont recouverts de tapis, une finition bien

30. Le module central, englobant les activités communes



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS A DROIT D'AUTEUR

31. *L'espace commun mélange différentes activités dans un même espace*

32. *Chambre individuelle pendant l'hivers, accueille un second membre en été*

confortable, et Broughton travaille avec un psychologue de couleurs pour développer une palette de couleurs qui assure que le décor favorise les sentiments de sérénité et de confort. Chaque module a été pensé comme une destination à part entière. Le couloir s'élargit, la hauteur augmente et la lumière naturelle pénètre par les lucarnes pour créer un point focal lumineux. Le seuil des modules est marqué par des zones de couleurs vives et des vues sur le paysage environnant, ce qui renforce l'identité de chaque module et garantit que l'équipage se sent constamment connecté au paysage antarctique. Broughton estimait qu'il était essentiel d'avoir une vue sur les environs et le ciel, ainsi qu'une brève promenade extérieure entre les deux côtés de la station, afin que les membres de l'équipage ne deviennent pas trop confortables et n'oublient pas où ils sont.

Vivre en Antarctique est une expérience qui a parcouru un long chemin depuis les premières expéditions polaires du siècle précédent. Grâce aux nouvelles technologies, particulièrement aux avancements dans le domaine des communications, les équipages se sentent moins en isolement. La nécessité pour les scientifiques seniors d'être présents pendant l'hiver a diminué, puisqu'ils peuvent gérer leurs travaux depuis leurs bureaux bien chauds. L'isolement reste toujours un problème, mais la station atténue la désorientation en imposant des horaires rigides de travail et de repas afin que les gens ne perdent pas la notion du temps. Il y a aussi des événements spéciaux comme le Midwinter's Day, une période de grandes célébrations.

Selon Agnieszka Fryckowska, chef de station, "Halley VI est assez luxueuse comparée à Halley V. Nous avons des fenêtres fantastiques." Elle affirme que "quand les gens arrivent et voient pour la première fois la station à l'allure futuriste, ils sont tellement excités. Ils veulent juste se précipiter pour tout faire" (Slavid, 2015).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCES
DOCUMENT SOUMIS AU PROTOCOLE DE LECTURE

Qu'il s'agisse de scientifiques ou de personnel de soutien, ces personnes ne font pas seulement un travail, mais ils adoptent un mode de vie totalement différent. Quand Hugh Broughton a visité brièvement la nouvelle station pendant l'accrochage, il a vu que les gens tiraient les tables à manger à travers l'espace à double hauteur d'une manière qui n'avait pas été envisagée. En d'autres termes, ils le traitaient comme s'ils étaient chez eux. Il ne pourrait y avoir de plus grande reconnaissance.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

33. Vue globale de la base modulaire. Les espaces de vie et de contrôle sont à droite de la passerelle, tandis que les laboratoires se trouvent à gauche

HAUGHTON-MARS PROJECT

Le projet Haughton-Mars (HMP) est un programme international multidisciplinaire de recherche consacré à l'avancement de la science et de l'exploration planétaire, fondé par la 'SETI Institute'. Le HMP est centré sur l'étude scientifique du cratère d'impact du météorite de Haughton et du terrain environnant sur l'île Devon, la plus grande île inhabitée de la planète, considérée comme un lieu analogue planétaire, en particulier pour la Lune et Mars. Le programme d'exploration du HMP, avec la NASA, vise à utiliser le site pour développer, tester et valider de nouvelles technologies et stratégies afin de planifier la future exploration humaine et robotique de la Lune et de Mars. Les systèmes d'exploration étudiés comprennent les habitats, les combinaisons spatiales, les véhicules de surface, les drones et les robots, les foreuses, les instruments et outils de survie, les systèmes de croissance végétale, les communications et les systèmes informatiques. Des études importantes sont également réalisées sur les facteurs humains et la gestion de l'équipage au sein de la base (Mars Institute, 2018).

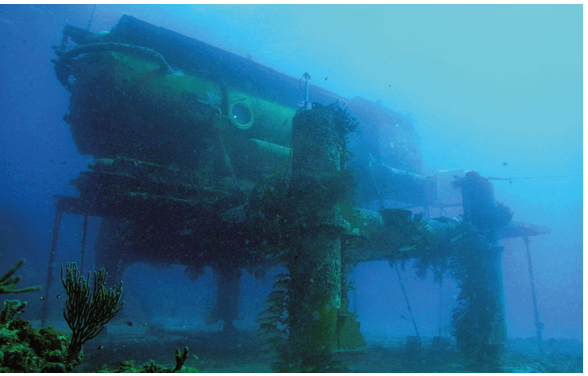
Construite en 2000, la base HMP est actuellement la plus grande station privée de recherche polaire dans le monde, et la seule qui se consacre à la science des sites analogues planétaires et aux études d'exploration. Chaque été, le site accueille des dizaines de chercheurs, des étudiants, du personnel de soutien et des journalistes. La base possède une capacité maximale de 30 personnes à tout moment, alors qu'une équipe fixe de dix personnes y passe tout l'été. D'autres chercheurs et visiteurs se déplacent pour des périodes plus courtes.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AUX DROITS D'AUTEUR

Cela crée donc une dynamique dans l'équipage présente, qui rend les échanges sociaux plus intéressants. À part ces quelques visites et des livraisons aériennes de la Marine américaine, les membres de l'équipage sont isolés du reste du monde pendant les mois d'été. En plus, pour mieux simuler les futures missions sur Mars et la barrière spatiale entre les deux planètes, un délai de 20 minutes a été introduit à tout genre de communications sortantes et entrantes à la base (Lee, 2002).

34. L'habitat en solitude sur l'île Devon

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

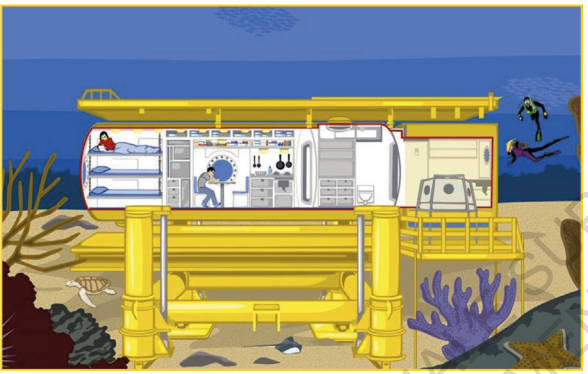


35. *Le laboratoire Aquarius, seule station de recherche sous-marine au monde*

NEEMO

'NASA Extreme Environment Mission Operations' est une mission analogue de la NASA qui consiste à envoyer des groupes d'astronautes, d'ingénieurs et de scientifiques pour habiter dans Aquarius, la seule station de recherche sous-marine au monde, pour des périodes de trois semaines. Aquarius est située à 5,6 kilomètres au large de Key Largo, dans la réserve marine nationale de la Floride. Elle est déployée à proximité de récifs coralliens à 19 mètres de profondeur.

Le laboratoire a accueilli plus de 200 scientifiques représentant plus de 90 organisations, dont la NASA et des universités américaines et étrangères. Les participants cherchent à comprendre l'évolution de l'océan et l'état des récifs coralliens, qui sont menacés aux échelles locales, régionales et mondiales par une pollution croissante, une pêche excessive, différentes maladies et des changements climatiques. Aquarius est composée de trois éléments : une bouée de survie à la surface, l'habitat et une base qui stabilise l'habitat au fond de l'océan.



36. *L'habitat est divisé en quatre espaces: l'entrée, le sas, l'espace de vie, et la chambre à coucher*

À l'intérieur, cet habitat dispose d'environ 37 m² d'espaces de vie et de laboratoires (Wright, 2013). Près de l'habitat se trouvent d'autres installations pour assister les plongeurs. Deux postes de travail contenant des poches d'air offrent aux plongeurs un espace de pause afin de remplir leur réservoir d'air et de discuter. Le laboratoire sous-marin n'est pas si différent en taille d'un module typique d'une station spatiale, et peut habituellement accueillir 6 personnes à la fois. L'entrée se situe au dessous de l'habitat, dans laquelle les plongeurs peuvent grimper dans une poche d'air maintenue par la pression ambiante de la salle. En franchissant un sas destiné à régler les pressions d'air et contenant le laboratoire

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

scientifique, nous accédons à la salle principale. Celle-ci abrite l'espace de vie avec une cuisine, une table de repas, des espaces de rangement, et une chambre à coucher. Les lits, superposés et en face-à-face, n'offrent pas des espaces intimes, que ce soit visuellement ou acoustiquement.

37. *Le seul espace de vie abrite une table polyvalente, un hublot, une cuisine, et des espaces de rangement*

L'habitat et ses environs constituent un analogue convaincant pour l'exploration spatiale. Tout comme l'Espace, le monde sous-marin est un endroit hostile et étranger pour les êtres humains. Les membres de l'équipage de la mission NEEMO, appelés aquanautes, font face à certains défis semblables à ceux vécus sur un astéroïde ou une planète éloignée. Les aquanautes peuvent simuler la vie à bord d'une station spatiale et mettre à l'essai des techniques d'activité extravéhiculaire, ainsi que des concepts d'exploration pour des missions spatiales futures. L'environnement sous-marin présente l'avantage de permettre aux aquanautes de simuler différents niveaux de gravité.

Sur la côte, les installations de contrôle de mission permettent une transmission en continu de données vidéo et audio de l'équipage à l'intérieur de l'habitat, ainsi qu'à l'extérieur lors des sorties extravéhiculaires. Un temps de latence peut être introduit dans les deux directions des signaux pour simuler les retards de communication qui surviennent lorsque l'homme s'aventure dans l'espace lointain. Par exemple, des destinations comme la surface de Mars ou sa lune Phobos introduiraient des délais de communication avec la Terre de 4 à 22 minutes dans chaque direction.

38. *L'équipage de NEEMO peut rester plusieurs semaines en profondeur grace à la technique de plongée en saturation*

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCY
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

MARS500

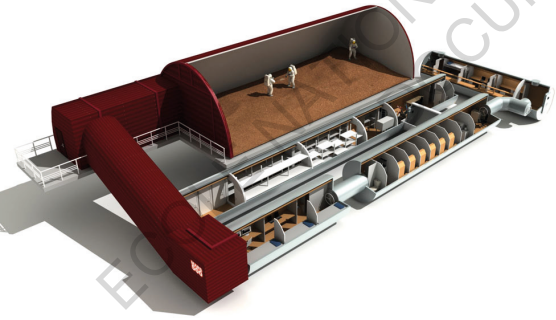
La mission MARS500 était une expérience d'isolement psychologique et social menée entre 2007 et 2011, pour se préparer à la possibilité d'un futur vol spatial habité vers la planète Mars. Le projet, qui se déroule à Moscou, est une collaboration entre la Russie, l'ESA et la Chine. L'objectif du projet est d'étudier le système 'homme - environnement' et d'obtenir des données expérimentales sur l'état de santé et la capacité de travail de l'équipage séjournant pour une longue période dans un environnement étanche et un espace limité. La mission implique la simulation des principales particularités du vol martien comme la longue durée, l'autonomie, les retards de communication avec la Terre, les ressources consommables limitées...

Les participants font l'objet de recherches scientifiques visant à évaluer l'effet de l'isolement sur divers aspects psychologiques et physiologiques, tels que le stress, la régulation hormonale, l'immunité, la qualité du sommeil, l'humeur et l'efficacité des compléments alimentaires. Les connaissances acquises au cours de l'étude sont d'une valeur inestimable, dans la mesure où elles serviront de base à l'élaboration éventuelle de contre-mesures pour faire face aux effets secondaires indésirables d'une opération similaire. En outre, ces expériences peuvent aider, à un coût modeste, à sélectionner les astronautes des missions futures (ESA, 2012, p. 500).

Le complexe a accueilli trois équipages pour des missions de durées différentes. La plus longue, qui avait pour but de simuler une mission de 520 jours, était constituée d'un équipage de six hommes : trois Russes, un Italien, un Français et un Chinois.

Quatre blocs principaux de taille et de fonction différentes sont mis à la disposition des 'cosmonautes'. L'EU-100, ou

39. Les quatre cylindres principaux de la mission, le plus grand englobant un simulateur de la surface de Mars.



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

le module médical logé à l'intérieur d'un cylindre de 12m, abrite le laboratoire dédié aux recherches psychologiques et médicales. Le module d'habitation EU-150 est composé de six chambres individuelles de 3m² chacune, de la salle commune et de la cuisine. Il sert également de poste de commande principal. L'EU-250 appelé module utilitaire, est divisé en quatre compartiments, permettant de stocker de la nourriture et d'autres provisions, d'abriter une serre, un gymnase et une unité de réfrigération. Tous ces modules étaient recouverts de bois de l'intérieur, ce qui donnait à ce dernier le caractère d'un "bain". L'EU-50 reproduisait le module d'atterrissage martien et a été conçu pour des séjours de 2-3 mois. Un simulateur de la surface martienne y était relié, à l'intérieur duquel les astronautes simulent des sorties dans l'environnement de la planète rouge.

40. Simulation d'une sortie sur la planète rouge par un membre de l'ESA.

Certains membres de l'équipage se sont moins bien débrouillés que d'autres. L'un d'eux a commencé à vivre des journées de 25 heures et a rapidement perdu la routine avec ses collègues. Un autre dormait la nuit mais faisait des siestes de plus en plus longues pendant la journée. Ensemble, les deux hommes ont passé un cinquième de leur temps endormis lorsque le reste de l'équipage était réveillé. Un troisième membre de l'équipage a tellement mal dormi qu'il a souffert de manque de sommeil chronique et a commis à lui seul la majorité des erreurs dans les tests de concentration et de vigilance. L'équipe décrit également une quatrième personne qui souffrait d'une légère dépression (Sample, 2013). Pendant les 17 mois de la mission, l'équipage n'avait aucun contrôle sur la quantité d'exercice, les repas et l'éclairage ambiant. Un bon éclairage est essentiel pour maintenir un cycle régulier de sommeil et de réveil. L'amélioration de l'éclairage pour imiter le jour et la nuit pourrait aider certains astronautes à faire face aux longues missions.

41. Les locaux de vie et de travail sont dépourvus de fenêtres vers l'extérieur

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

42. Le dôme en toile et les équipements techniques du projet HI-SEAS

HI-SEAS

Au milieu d'un paysage découpé de pierres de lave rouge sur le Mauna Loa d'Hawaii, à 2500 mètres d'altitude, se trouve un dôme, un point blanc abandonné avec un réseau photovoltaïque comme seul voisin dans un rayon de quelques kilomètres. Ce volcan est presque comparable à l'environnement extraterrestre de Mars, ici sur Terre. C'est également le site de HI-SEAS (Hawaii Space Exploration Analog and Simulation), un projet de recherche financé par la NASA et géré par l'Université de Hawaii à Manoa depuis 2013.

Le principal objectif du programme est la recherche comportementale, en particulier sur les changements psychologiques et psychosociaux qui se produisent dans la vie des individus durant les missions épuisantes et isolantes. En effet, pour mieux déterminer les critères nécessaires pour rendre l'équipage productif et en bonne humeur, les études se sont axées sur le moral, la gestion du stress et la résolution des problèmes en groupe.

43. Les chambres individuelles qui manquent d'isolation acoustique

L'habitat héberge en général six personnes à la fois, pour une durée allant de 4 mois jusqu'à un an. Ils préparent des repas congelés, prennent des douches de 30 secondes pour économiser l'eau et portent des combinaisons spatiales chaque fois qu'ils quittent le dôme. Pour répliquer le décalage de communication entre la Terre et Mars, toute communication est retardée de 20 minutes.

L'habitat HI-SEAS est un dôme géodésique préfabriqué, offrant un espace ouvert conçu par Blue Planet Research. La structure présente un volume habitable d'environ 360 m3, divisé en 50 m² au rez-de-chaussée, un grenier au deuxième étage et un atelier dans un conteneur adjacent. La salle de séjour principale à double hauteur comprend une cuisine, un laboratoire, une salle de bain, un sas simulé, une unité de rangement, une salle à manger,

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

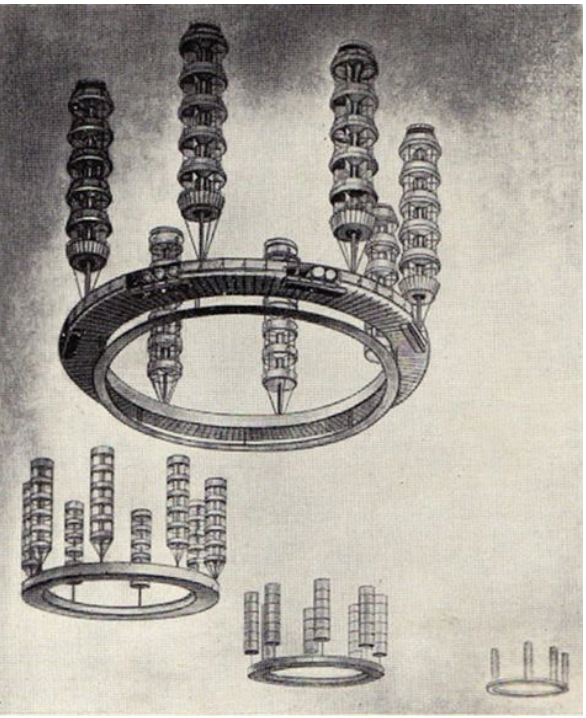
un espace public et une salle de télémesure. Au second étage se trouvent six chambres à coucher et une salle de bain. Un panneau solaire de 10 KW sur le côté sud du bâtiment et un générateur secondaire équipé d'une pile à combustible fournissent de l'énergie.

La première mission HI-SEAS a eu lieu en Avril 2013 pour une durée de 4 mois. Un an après, une mission similaire s'est reproduite avec 6 nouveaux membres. Pour la troisième mission, la durée de séjour a doublé. Le 28 Août 2015, HI-SEAS IV s'est déclenchée et a duré un an, formant ainsi la plus longue simulation de l'espace financée par NASA. Deux autres missions se sont poursuivies, la dernière interrompue dès le quatrième jour à cause de l'électrocution d'un des résidents.

L'équipage de HI-SEAS IV comportait un architecte, Tristan Bassingthwaighte, spécialiste de l'architecture des milieux extrêmes. Suite à son expérience, il constate que le dôme a été fabriqué de façon très technique mais le caractère humain a été pratiquement ignoré. L'espace intérieur manquait d'isolation acoustique et de discrétion entre les pièces, vu que l'habitat a été construit à partir de matériaux légers tels que la toile et le contreplaqué pour assurer sa mobilité, aggravant ainsi la situation en cas de conflits. Bassingthwaighte suggère alors d'étudier préalablement le caractère de chaque membre et de l'incorporer dans la conception de sa chambre, tout en utilisant de la lumière aussi naturelle que possible. Il propose d'incorporer de nouvelles technologies pour changer l'état d'esprit comme la réalité virtuelle (Martin, 2017).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

44. Les membres de l'équipage sont obligés de porter des combinaisons spatiales à chaque sortie de l'habitat



45. Ville volante de Krutikov

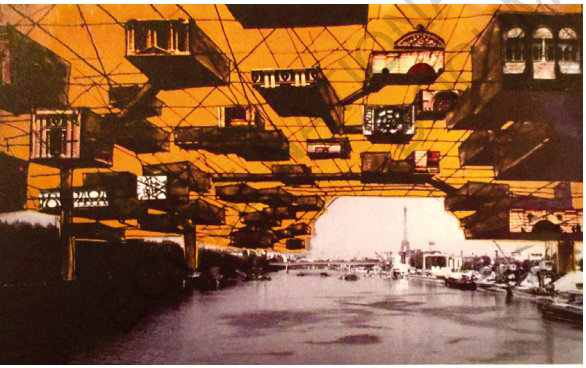
4.3 VISIONS FUTURES DES HABITATS ÉLOIGNÉS

Même avant que les humains n'atteignent l'espace, des visionnaires ont imaginé des colonies et des habitats humains dans les coins les plus éloignés. Ils proposent des solutions pratiques aux défis généraux que pourront rencontrer les premiers occupants, en mettant en oeuvre les technologies disponibles dans de nouvelles applications possibles.

Georgii Krutikov, un architecte avant-gardiste russe, présente en 1928 un projet de thèse qu'il intitule La Ville Volante. Il imagine les êtres humains vivant dans des villes résidentielles flottantes, et se déplaçant entre la surface de la Terre et ces villes au dessus. Il avait été fortement influencé par les imaginaires de la conquête de l'Espace, et produit des dessins techniques sur la possibilité de vols orbitaux en mettant l'accent sur le caractère social et architectural des habitations plutôt que sur les contraintes technologiques de l'époque.

En 1956, Yona Friedman présente son projet de Ville Spatiale dans lequel il souligne la relation entre la dynamique sociale et l'architecture dans le monde postmoderne et suggère aux architectes la manière dont ils pourraient inclure cette relation dans leur réflexion sur l'avenir. Il imagine une ville sans forme prédéfinie suspendue à l'aide d'une trame structurelle qu'il nomme Infrastructure Spatiale.

46. Yona Friedman et l'infrastructure spatiale

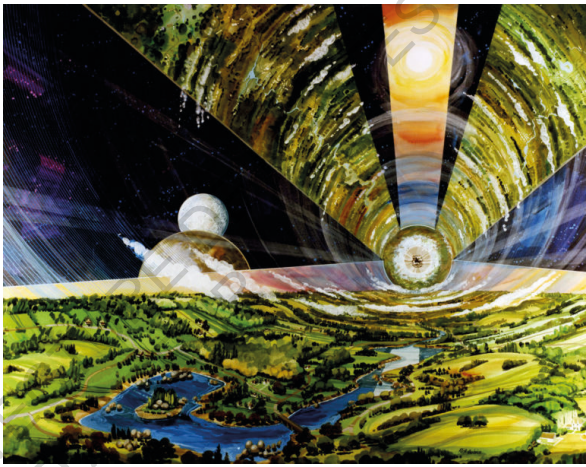


Pour défier les obstacles liés à l'exploration et aux aventures spatiales, l'ingénieur Wernher von Braun propose la première version d'une station orbitale en 1952. Cette "roue" vise à pallier l'absence de gravité en tournant sur elle-même en raison d'une rotation chaque 22 secondes, générant ainsi un tiers de la gravité de la Terre. En imaginant des structures gonflables pour le

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENTS SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

transport, von Braun tente à contrôler l'environnement intérieur et à protéger les habitants, en réglant la température à l'aide de thermostats qui commandent des panneaux extérieurs mobiles.

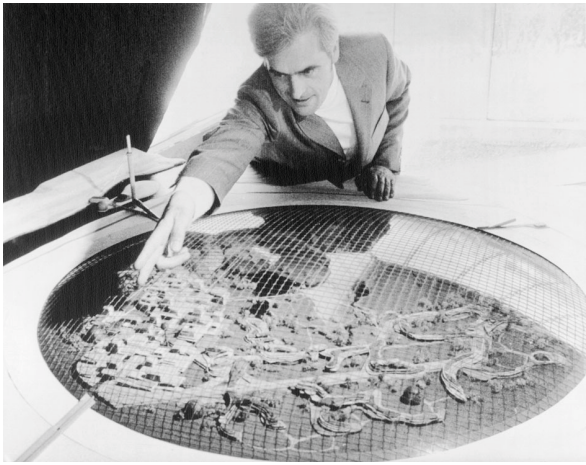
Quelques années plus tard, l'Université Stanford et le physicien Gerard O'Neill développent l'idée d'une base orbitale, en s'inspirant du projet de von Braun. Ils poussent l'idée encore plus pour englober des sociétés complètes, en ayant des niveaux de confort similaires à ceux trouvés sur Terre. La station est formée de deux cylindres de 32 km de long en rotations opposées, produisant une gravité artificielle à l'aide de la force centrifuge. À l'intérieur nous trouvons toutes les fonctions et les zones habituelles, comme l'agriculture, l'industrie, et les zones de vies avec des logements, des écoles, des prairies et des espaces de récréation. Des miroirs placés tout le long des cylindres réfléchissent la lumière solaire pour simuler le jour, puis s'ouvrent complètement pour donner une vue vers le cosmos noir. L'habitat promet une vie normale dans les mêmes conditions que celles sur Terre, même si la rotation continue de l'habitat peut créer des vertiges minimes pour une petite portion de la population, en raison des forces de Coriolis agissant sur l'oreille interne.



47. Le cylindre O'Neill offrant un niveau de vie comparable à celui de la Terre

En 1971, l'architecte allemand Frei Otto présente un projet pour une ville de 40.000 habitants dans le cercle arctique, édifiée sous un dôme pneumatique de 2 km de diamètre. L'intérieur abrite une zone industrielle importante, qui constitue la vocation principale de la ville. Une voie périphérique immergée dans le dôme relie les logements à une zone administrative centrale et à un quartier de loisirs. Cette proposition se justifiait à l'époque pour diverses raisons. D'une part, une nouvelle obsession des conditions aux limites s'est dessinée. Le grand enthousiasme de savoir que l'humanité se dirigeait vers l'espace et la lune a focalisé l'attention sur d'autres régions éloignées : des expéditions étaient

48. Frei Otto devant le dôme de la ville arctique



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE LYON
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

organisées au fond de l'océan, des plans étaient dressés pour industrialiser les déserts et les forêts tropicales. D'autre part, la course aux matières premières et aux ressources, combinée à l'émergence de nouvelles technologies, rendait économiquement plausible le passage à des environnements de plus en plus extrêmes.

Au cours de la dernière décennie, l'industrie spatiale est passée des expéditions pionnières à court terme vers la planification des colonisations à long terme, ainsi que vers des projets innovateurs tels que le tourisme spatial. Les architectes participent désormais à la conception des intérieurs de structures habitables à long terme dans l'espace, à la recherche de technologies de fabrication robotique avancées pour la construction de structures sur la Lune et sur Mars, à la conception de nouveaux "yachts spatiaux" et à la construction de nouvelles installations en rapport avec le domaine spatial. Cette évolution du métier vient bouleverser les idées établies sur l'étendue et la portée des compétences des architectes (Leach, 2014).

En collaboration avec l'Agence Spatiale Européenne, l'agence d'architecture Foster + Partners développe des projets d'habitats sur la Lune et sur Mars. Employant les nouvelles innovations technologiques, l'agence propose des structures modulaires construites à partir du régolithe trouvé sur place par des robots autonomes. Conçus pour des équipages de quatre personnes, ces habitats sont dotés d'une enveloppe externe qui sert à protéger les astronautes des météorites, des rayonnements gamma et des fortes variations de température. La proposition examine plusieurs aspects du projet, de la livraison et du déploiement, à la construction et l'exploitation. La base est d'abord dépliée à partir d'un module cylindrique qui peut être transporté par une fusée spatiale. Un dôme gonflable s'étend ensuite à partir d'une extrémité de ce cylindre pour fournir une structure de soutien à la

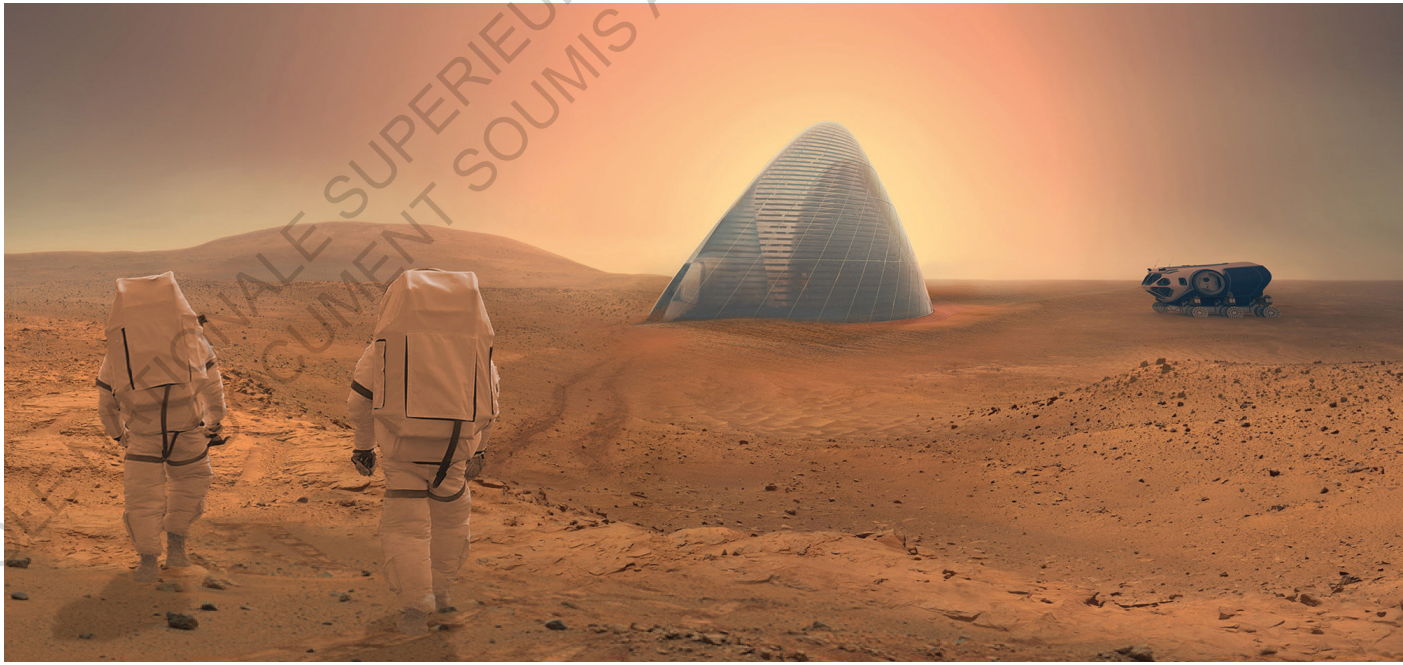
49. La base lunaire de Foster en cours de construction par des robots autonomes

SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

construction. Des couches de régolithe sont ensuite superposées sur le dôme par des imprimantes 3D robotisées pour créer une coque protectrice. Par contre, cela implique une absence ou une réduction des ouvertures vers l'extérieur. Les astronautes seront logés dans une 'grotte' construite et dépendront des lumières artificielles.

Pour faire face à ce problème, le collectif SEArch+ et Clouds AO propose d'utiliser de la glace translucide pour couvrir l'habitat, au lieu de le cacher sous du régolithe. Le 'Mars Ice House' réintroduit le principe terrestre de variations douces entre l'intérieur et l'extérieur. Le cœur de la structure abrite les pièces d'habitation, qui bénéficient de la protection des enveloppes de pression. En se déplaçant vers l'extérieur, et vers le périmètre de la barrière de glace, nous trouvons des ensembles de plantes éclairées naturellement et des perspectives sur le paysage martien, assurant le lien avec l'environnement extérieur.

50. Vue de la 'Mars Ice House' montrant la façade protectrice transparente



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

To JEM
To PMA2
To MPLM

5

ANALYSE ET SYNTHÈSE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

5.1 MÉTHODE EMPLOYÉE

Pour pouvoir analyser les projets illustrés, et afin d'identifier les points positifs et de dégager les traits forts de la conception, ainsi que les caractéristiques qui pourraient s'avérer inefficaces ou contre productives, nous allons nous baser sur une grille inspirée des défis soulevés dans la partie 3. La grille interroge les choix architecturaux en rapport avec la sensation de confinement vécue à l'intérieur des habitats des extrêmes.

Chaque critère dans la grille servira comme filtre d'information, qui sera analysé de façon indépendante afin de dégager une idée claire des caractéristiques propres des habitats, ainsi que des solutions apportées par les concepteurs. Dans leur globalité, les critères de la grille nous permettront de comprendre les différents choix et orientations des différents projets, et d'en déduire la raison derrière certains échecs ou réussites rencontrés. Dans cette grille, nous essaierons de couvrir le plus grand nombre possible de défis auxquels les architectes doivent faire face, sans prétendre d'inclure la totalité des critères qui entrent en jeu dans la conception des habitats. Nous ne traiterons pas les concepts architecturaux, les méthodes de construction, le transport et la mise en place des équipements, la production d'énergie, les matériaux structurels et externes, sauf s'ils entrent exceptionnellement en lien direct avec le bien-être de l'équipage. La liste non exhaustive des critères dégagés se présente comme suit:

- Durée de la mission
- Espace privé
- Équipage et dynamiques sociales
- Espace accessible
- Repères terrestres
- Contrôle et Hygiène

Pour essayer de quantifier les critères et dans le but de dégager des résultats qui peuvent être comparés, nous allons introduire une échelle

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

commune à la grille. À l'exception de la durée de la mission, qui signale la nature et les objectifs des projets, les critères énoncés servent comme indicateurs qui peuvent être plus ou moins bénéfiques au bien-être de l'équipage. L'échelle ira de 0 à 100, où la valeur maximale désigne un critère tel que nous pouvons l'observer dans une vie moyenne sur Terre, alors que le zéro indique le manque de cette caractéristique dans l'habitat. Pour notre analyse, nous considérons comme vie moyenne le niveau de vie et le confort qui caractérisent un pays développé au XXIe siècle. Les valeurs seront attribuées de façon plus ou moins subjective, suivant les observations et les informations récoltées des différents projets présentés. Compte tenu de la rareté de la littérature évoquant spécifiquement l'aspect architectural des projets, la majorité des déductions sont basées sur les descriptions techniques, les images et les retours des personnes ayant vécu dans ces espaces confinés.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

5.2 DISCUSSION

Pour comprendre les choix architecturaux et leurs effets sur l'équipage, nous allons maintenant analyser un par un les critères de la grille d'évaluation. Nous commençons par le seul critère qui n'est pas en rapport direct avec le bien-être global, mais constitue plutôt le facteur principal qui influence les décisions et oriente la conception dès le début : la durée de la mission. Ensuite nous présenterons les cinq critères qui abordent la problématique de confinement au sein des habitats, de façon aléatoire et non par ordre d'importance.

DURÉE DE LA MISSION

Un des éléments les plus importants dans la conception des espaces d'habitation est de savoir la durée pendant laquelle un équipage va vivre isolé à l'intérieur. Les grandes décisions de conception se font en fonction de ce facteur. C'est le point qui influence tous les autres critères, qui doivent s'adapter aux changements temporels des missions. En vue des objectifs futurs de l'humanité, et de la tendance des missions à devenir de plus en plus longues, ce facteur aura un poids croissant et imposera les grandes orientations de conception.

Pour ces raisons, nous constatons que les missions de longue durée comme celles de Biosphère II (2 ans), MARS500 (520 jours), et la mission de Valeri Polyakov dans la station Mir (437 jours) demandent beaucoup plus de préparation que des missions plus courtes et plus accessibles comme le laboratoire Aquarius de NEEMO.

Posé sur l'axe de abscisses dans le tableau, ce critère sert à comprendre les variations des cinq autres caractéristiques en fonction de la durée du séjour dans les conditions extrêmes.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ESPACE PRIVÉ

Dans la plupart des retours d'expériences des équipages, les individus ont évoqué l'importance d'avoir un espace personnel isolé du reste du groupe. Le besoin de repos, de récupération, de discussions intimes et de travail sans distractions est une exigence architecturale quand il s'agit de séjours de longue durée. En outre, avoir une intimité visuelle et auditive dans les équipements d'hygiène personnelle est aussi parmi les demandes signalées par les personnes présentes.

Dans l'espace, et dans la première station spatiale Saliout ainsi que dans Mir, les cosmonautes russes et les astronautes américains dormaient dans des sacs de couchage attachés à un espace disponible sur les parois de la capsule. Skylab, encore considérée comme l'une des stations les plus confortables et élégantes, abritait des compartiments personnels pour chaque membre avec des cloisons de séparation et des rideaux pour assurer l'intimité. L'ISS présente un modèle plus avancé avec une meilleure isolation sonore au niveau de la porte d'accès.

NEEMO est le seul projet sur Terre ne présentant pas des chambres personnelles isolées. Cela pourrait être expliqué par les courtes durées des missions (3 semaines), et le budget limité. La plupart des bases terrestres offrent des salles de bain bien isolées, comme celles de Concordia et de Halley, ainsi que des chambres individuelles pendant l'hiver en Antarctique. En été, vu qu'il y a plus de visiteurs, certaines chambres sont partagées par deux membres de l'équipage. En plus de la dualité espace privé et espace public, Halley propose des espaces qui peuvent être utilisés pour la contemplation et la tranquillité en plus du travail. Dans l'habitat HI-SEAS, chaque membre possède sa propre chambre, mais les isolations acoustiques sont presque absentes, ce qui diminue le confort ressenti.

Nous constatons alors que la présence de séparations physiques entre les lits augmente le confort global de l'habitat et le rend plus accessible. À la suite des développements en matière de l'isolation des espaces privés, nous pouvons difficilement imaginer des astronautes ou des scientifiques prêts à partager leur espace de sommeil comme c'était le cas dans les premières missions.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ÉQUIPAGE ET DYNAMIQUES SOCIALES

L'être humain vit toujours en communauté, et le confort individuel reflète la qualité des liens sociaux dans le groupe. Les membres de l'équipage se servent de l'architecture de leur habitat limité pour développer leur micro-communauté, aussi bien que pour former les règles élémentaires de la vie culturelle de la collectivité.

L'habitat peut offrir des espaces uniquement dédiés aux relations sociales, comme c'est le cas dans Halley, où le volume le plus grand abrite des espaces d'activité physique, de jeux de groupe, de repas, et de détente. Nous trouvons une salle télé à l'intérieur du volume bruyant de Concordia, où la totalité de l'équipage se regroupe pour des soirées collectives. Certaines missions imposent des temps collectifs quotidiens, comme des repas en groupe au sein de l'ISS et Concordia, où ils sont pris à des heures fixes. Dans certains habitats, les différents équipages qui ont déjà effectué des séjours en confinement ont instauré des traditions et des évènements annuels dans lesquels tout le monde se regroupe dans le même espace pour célébrer, souvent avec des plats spéciaux cuisinés.

Un équipage mixte et dynamique qui se renouvelle est aussi encouragé. C'est le cas de la Station spatiale internationale, quelques missions de Mir et de NEEMO. Dans les missions complètement fermées, comme Biosphère II, où l'équipage reste le même durant toute la durée, nous remarquons que les relations sociales entre les membres risquent d'être tendues. Des personnes qui ont été amis proches avant la mission se sont transformées en ennemis qui risquaient l'échec total de l'expérience.

ESPACE ACCESSIBLE

Plus l'espace disponible est restreint, plus les êtres humains perçoivent les effets amplifiés du confinement. La première station spatiale Saliout 1 offrait juste 90 m3 d'espace habitable pour un équipage de trois personnes. Avec les avancements technologiques, les habitats dans les milieux extrêmes sont devenus de plus en plus spacieux, en séparant les zones par fonction. Comme les humains sont habitués aux étendues visuelles et aux paysages infinis ouverts et vastes, les habitats isolés

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

doivent lutter contre la sensation de claustration, soit en offrant plus de volume libre comme dans le cas de Halley, soit en jouant sur les couleurs, les équipements, le mobilier et les espaces de rangement comme nous apercevons dans le travail de Galina Balashova sur les stations russes.

La possibilité de sortir temporairement de l'habitat aide énormément à garder un bon moral collectif. La présence d'une activité en dehors de l'espace confiné ajoute une nouvelle étendue accessible et rend l'isolement un peu moins pénible. Dans une mission telle que NEEMO, les scientifiques présents peuvent se réjouir à l'idée de pouvoir sortir et travailler dans un lieu différent de leur habitat enclavé. Dans l'expérience MARS500, même si les participants pouvaient sortir et explorer la surface de Mars, ils se trouvaient toujours à l'intérieur de la simulation cylindrique. Cela les a affectés négativement au niveau psychologique. Dans la station Halley VI, l'architecte Hugh Broughton a introduit une passerelle extérieure entre les deux parties de l'habitat, pour rappeler l'équipage dans quel environnement il se situe, et lui offrir un espace complètement ouvert pour compenser le temps passé en confinement. Dans les missions offrant des possibilités de sortir, l'image de l'habitat sera celle d'un refuge protecteur dans lequel nous nous sentons en sécurité, plutôt que celle d'une cellule enveloppante qui constitue les limites de l'espace de vie disponible.

REPÈRES TERRESTRES

Plus l'habitat offre une atmosphère qui ressemble à celle que nous trouvons habituellement dans les climats tempérés de la Terre, moins les équipages se sentent enfermés. Presque toutes les personnes impliquées dans les missions vers les milieux extrêmes sont d'accord que la présence de fenêtres est obligatoire pour la santé psychologique de l'équipage. Au début des programmes spatiaux, les concepteurs et les astronautes devaient se battre pour convaincre les ingénieurs et les directeurs d'introduire des ouvertures dans les capsules lancées. MARS500 est la seule mission qui n'a pas été munie de fenêtres, et cela a eu des effets dramatiques sur l'équipage qui ne disposait que des courriers électroniques pour communiquer avec le monde extérieur.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

En dehors de la fenêtre, avoir un paysage familier à contempler est un atout, comme est le cas dans Biosphère II, HI-SEAS et le HMP. Les bases polaires profitent de la lumière solaire pendant les trois mois d'été pour travailler et observer le panorama blanc, avant de plonger dans le noir total pendant tout le reste de l'année. Les ouvertures sont alors totalement couvertes pour éviter les interférences lumineuses.

En Espace, le facteur principal qui désoriente les astronautes est le manque de gravité avec laquelle les organismes vivants ont évolué pendant des millions d'années. Les équipages flottants dans le vide peuvent se réjouir avec une vue sur notre planète, tout en éprouvant 'l'effet de surplomb' bouleversant déjà vécu par plusieurs astronautes.

CONTRÔLE ET HYGIÈNE

La nature des équipements présents dans l'habitat peut totalement influencer le confort général des résidents. Dans sa théorie des trois conforts, Pascal Amphoux cite le confort de maîtrise comme un des 3 piliers qui influencent la conception architecturale du point de vue du confort (Amphoux, 1990). L'usager est le maître de son confort, en s'appropriant les objets par le corps. Les habitats étudiés offrent différents niveaux de réglage du niveau de confort, pour assurer le bon déroulement des missions, et réduire les incidences de la présence humaine dans un milieu extrême. Dans les premières aventures spatiales, les cosmonautes et astronautes avaient la possibilité de régler la quantité de lumière extérieure en couvrant les fenêtres pour bien dormir et garder un rythme de sommeil régulier. Les habitats offrent aussi la possibilité de contrôler la lumière ambiante à l'aide des éclairages électriques qui simulent les 24 heures de la journée terrestre. Les résidents peuvent souvent contrôler les isolations visuelles et acoustiques comme les cloisons souples et les portes pour se mettre en isolation ou pour socialiser avec les autres membres. La possibilité de maîtrise de la ventilation est aussi un facteur déterminant dans le confort de l'habitat : c'était un des points faibles de la station Skylab.

L'acte de prise de contrôle peut être aussi repéré dans la division des espaces et des zones de vie, en offrant aux équipages le plus de variations

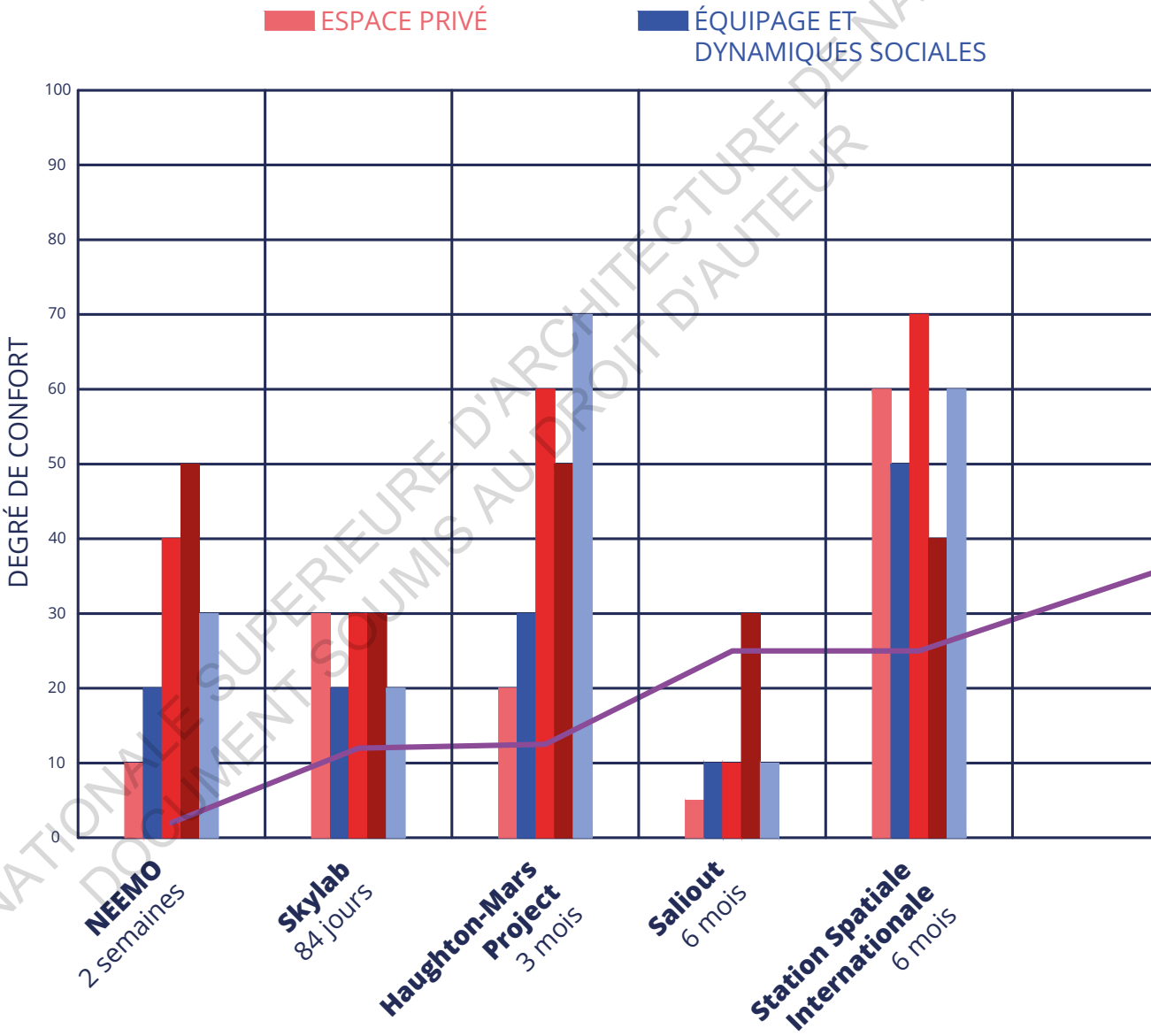
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

possibles. Dans la station Concordia, les personnes présentes peuvent choisir de passer le temps dans une salle commune, dans une salle de sport, ou se retirer dans leurs chambres personnelles. Les deux volumes sont conçus de manière à séparer les fonctions par leur caractéristiques sociales, donnant ainsi plus de contrôle aux individus.

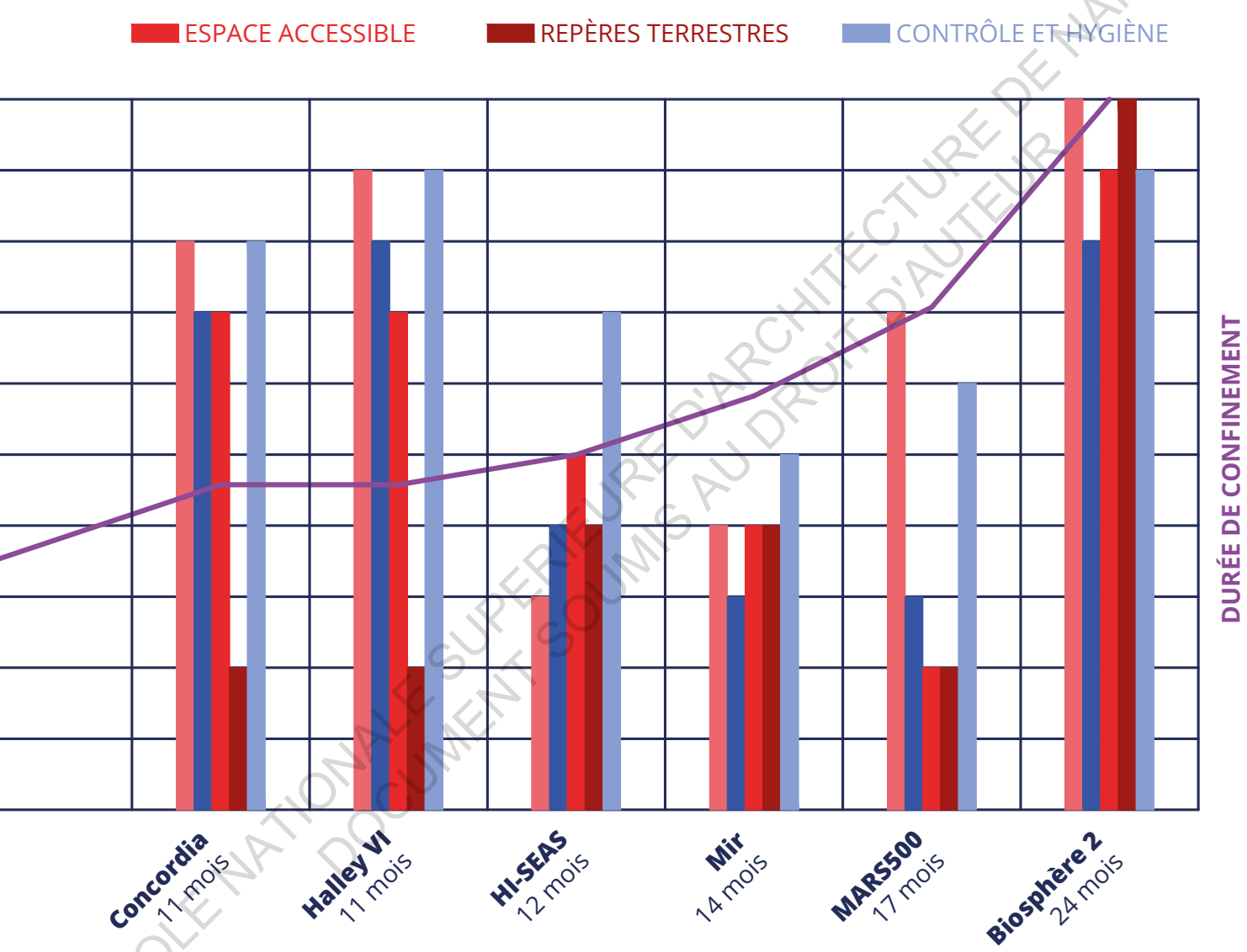
En plus du contrôle de l'image de soi projetée aux autres, à l'aide des dispositifs présents dans les parties privées, les personnes doivent avoir la possibilité de prendre soin de leur hygiène corporelle. Cela est un défi plus important dans l'espace à cause du manque de gravité, qui complique l'utilisation des équipements sanitaires. Les astronautes apportent avec eux une trousse d'hygiène personnelle comprenant une brosse à dents, du dentifrice, du fil dentaire, un peigne, un rasoir ... Les astronautes ne prennent pas de douches mais se font de petits bains dans un grand cylindre entouré d'un sac en plastique pour empêcher l'eau de s'échapper. Ils se rincent avec de l'eau à l'aide d'une buse, puis aspirent toute l'eau de leur peau à l'aide d'un tuyau à vide. Pour se laver les cheveux, ils utilisent un shampooing sans rinçage (Watson, 2008). En outre, chaque membre de l'équipage de la station se relaie pour les tâches ménagères, qui consistent à ramasser les déchets et à nettoyer la salle à manger, les murs, les planchers et les filtres à air. Dans la mission HI-SEAS, les douches sont limitées à 30 secondes par personne, pour simuler les faibles volumes d'eau sur Mars.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

51. Diagramme montrant le degré de confort en fonction de la durée de confinement



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

5.3 OBSERVATION

En regardant le diagramme compilant les différents facteurs de la grille d'analyse, nous pouvons distinguer les degrés d'accessibilité des différents projets. En premier lieu, les habitats sont classés sur l'axe des abscisses en fonction de la durée maximale de séjour des équipages. Cela implique que les habitats à droite du tableau sont moins abordables et demandent plus de préparation et une meilleur sélection des membres du groupe. Nous constatons ce fait dans la mission la plus longue de Biosphère 2.0 qui, même en proposant de très bonnes conditions de vie, a été critiquée pour ses choix d'équipages, pas suffisamment qualifiés selon le journaliste Marc Cooper (Veggeberg, 1996).

Les cinq autres caractéristiques de bien-être dans l'histogramme présentent une quantification des diverses couches de confort que nous trouvons dans ces habitats. En examinant globalement, nous pouvons détecter une tendance d'amélioration des niveaux de confort avec l'augmentation de la durée de confinement. Nous remarquons aussi quelques exceptions à cette règle, comme la station Saliout, qui présente des niveaux assez bas de confort par rapport à d'autres habitats. Cela est compréhensible puisque c'était l'une des premières stations à être lancées, dans une époque où le confort des cosmonautes était au bas de la liste des priorités. MARS500 est une autre dérogation, puisque nous pouvons observer les conséquences psychologiques et sociales vécues par les participants à cette expérience.

D'autre part, les stations polaires, Concordia et Halley VI, souffrant d'un manque de repères terrestres à cause de l'obscurité totale prolongée, ont pu contrebalancer la durée de séjour en offrant des dispositifs pour se distraire et se soulager, en privilégiant les interactions sociales, tout en mettant en disposition des espaces privés qualitatifs.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

5.4 REGARD PROSPECTIF

Les êtres humains sont exceptionnellement adaptables, comme en témoignent les conceptions d'habitations dans le monde entier. Cependant, à mesure que les populations spatiales augmentent, et surtout du fait que ces populations sont composées d'une part croissante de passagers d'affaires et de loisirs, la tolérance aux conditions environnementales très anormales diminuera. Par conséquent, les aménagements intérieurs doivent inclure de nombreux éléments courants sur Terre : contrastes et isolations sonores des espaces, éclairage et finitions intérieures variés, respect de l'intimité, connectivité individuelle sur le réseau et les systèmes de communication, bonne hygiène dans les salles de bain et préparation des repas dans les cuisines, alimentation fraîche (produite sur place ou fournie régulièrement) et soins médicaux modernes comprenant de la chirurgie.

Dans le futur, l'architecture habitable ne se limitera plus uniquement à l'assemblage de modules cylindriques et rigides. Des inventions comme TransHab permettent d'envisager de nombreuses configurations merveilleuses et sophistiquées sur le plan architectural au XXIe siècle. Les progrès dans le développement des matériaux et les techniques de fabrication permettent des opérations planétaires à grande échelle, comme la colonisation éventuelle de Mars et d'autres mondes, et la migration des êtres humains dans l'espace. Ces progrès englobent des structures durables et légères, des techniques pour installer, édifier, déployer ou fabriquer des habitats dans l'espace, ainsi que des structures et des matériaux intelligents qui "s'autoréparent".

Les exigences relatives aux enveloppes sous pression et aux abris non pressurisés nous pousseront à innover dans les systèmes de structures qui combinent des matériaux à haute résistance et de faible poids pour obtenir fiabilité, durabilité, réparabilité, radioprotection, efficacité des emballages et rentabilité sur le cycle de vie. Les structures gonflables sont en tête dans la recherche de nouvelles technologies prometteuses pour les structures spatiales habitables. Les enveloppes gonflables ouvrent de nouvelles possibilités de formes et de tailles d'habitat et modifient donc notre façon de concevoir les habitats, les laboratoires, les hôtels et

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

les stations spatiales. En outre, un certain nombre de techniques sont proposées, fondées sur les progrès de la robotique et de l'autonomie, pour permettre la livraison et l'installation de ces habitats dans l'espace et à la surface de la planète, ou même leur fabrication et leur construction in situ, avant l'arrivée des humains (Howe & Sherwood, 2000).

Dans le cadre de l'architecture sociale, récréative et résidentielle, les plantes hydroponiques apporteront un soulagement psychologique en simulant l'environnement naturel sur Terre. Le sol, bien que lourd, sera également utilisé comme milieu d'enracinement pour accueillir des réacteurs chimiques et biologiques afin de rafraîchir l'atmosphère et de purifier l'eau dans les systèmes de survie écologiques.

L'eau sera probablement un élément particulièrement intéressant dans l'architecture des habitats spatiaux. Étant donné ses nombreuses utilisations, comme la radioprotection, la modération thermique, la potabilité, la fonction de tampon de survie, la récréation et l'art, l'eau deviendra un élément architectural clé malgré son poids. Les volumes régulièrement utilisés par les résidents comme les aires de repos seront probablement entourés de boucliers à eau. Des chambres entièrement remplies permettront la nage sous-marine conventionnelle. Des chambres partiellement remplies offriront des possibilités sportives et récréatives.

Le trait architectural le plus remarquable sera l'ajout d'une troisième couche de protection et de cloisonnement. Sur Terre, la plupart des architectures se caractérisent par des espaces "intérieurs" et "extérieurs". Les exceptions notables sont l'architecture urbaine romaine et les centres commerciaux modernes, dans lesquels une couche intermédiaire est introduite : "l'extérieur contrôlé", une sorte de faux extérieur dans lequel l'espace, la lumière, le son, les plantes, l'eau et les ambiances sont exploités et utilisés pour générer des effets psychologiques positifs sous protection et contrôle climatique. Dans les environnements extrêmes, ces extérieurs fermés, comme les "parcs clos", formeront une partie essentielle dans la conception des habitats où le bien-être de l'équipage est primordial.

Les populations des habitats spatiaux espèreront pouvoir observer

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

la Terre ou les objets célestes. Elles s'attendront à des opérations intéressantes et dynamiques. Elles chercheront la solitude et le calme, ainsi que le rassemblement. Elles auront besoin de conditions dynamiques d'apesanteur et de pesanteur et de pouvoir passer facilement de l'un à l'autre. Elles auront envie de "sortir" à l'extérieur, de faire des sorties dans l'espace ou des activités extravéhiculaires, rapidement et en toute sécurité. Elles voudront que les installations fonctionnent sans trop d'attention et elles souhaiteront que l'architecture ne leur fasse pas obstacle. Elles rêveront de grands volumes, de vues panoramiques sur l'environnement, d'un vaste espace dégagé et d'un ciel dominant. Elles insisteront pour avoir des plantes et des animaux dans leurs lieux de vie, sur la possibilité de décorer leurs quartiers, et lorsqu'elles sont réunis dans un espace, elles voudront une orientation commune.

Ces facteurs complexifient énormément la conception et la fabrication des habitats, c'est pour cela qu'ils ont été souvent ignorés ou réduits à des limites minimales. Or, avec la durée croissante de séjour et le nombre important de personnes à bord, il sera plus important que jamais d'appliquer des standards élevés en architecture et en urbanisme et de fabriquer de bonnes conditions agissant sur les facteurs environnementaux et comportementaux humains.

"Une société humaine mature est aussi éloignée d'un sous-marin militaire que New York l'est d'un campement militaire. L'architecture - et non les individus - doit tenir compte des besoins et s'adapter."[1]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 "A mature human society is as far removed from a military submarine as New York City is from an encampment. The architecture—not the people—must accommodate." Howe, A. S., & Sherwood, B. (2000). Out of This World : The New Field of Space Architecture, p30.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

CONCLUSION

Aujourd'hui, suite aux avancées marquantes de la technologie, et à l'atteinte des lieux les plus reculés, le regard de l'humanité retourne vers le cosmos mystérieux. Dotés de la volonté historique innée d'explorer tous les coins extrêmes inconnus, les êtres humains se mirent à développer des moyens pour surmonter les obstacles.

La NASA vient de lancer un programme pour envoyer des astronautes américains sur la Lune d'ici 2024 (Mahoney, 2019). L'ESA envisage de construire un village lunaire permanent, et a déjà lancé des concours pour imaginer la forme et la construction des habitats (Bennett, 2016). En même temps, des entreprises privées sont en train de tester de nouvelles façons de transport de la Terre vers l'Espace, comme c'est le cas de SpaceX qui a réussi à réduire considérablement le prix des lancements de fusées. Ce nouvel intérêt collectif présente de nouveaux défis qui doivent être résolus par les différents spécialistes du domaine.

Dans les premiers jours de la course spatiale, peu de programmes ont pensé à la santé mentale des astronautes. Pour les États-Unis, l'objectif était de devancer les Soviétiques sur la Lune. Il y avait peu de temps pour considérer la dimension humaine des équipages de Mercure, Gemini et Apollo. À partir des années 1990, les nations spatiales ont commencé à

prendre plus au sérieux la dimension psychologique des vols spatiaux, et de plus en plus d'architectes ont été appelés à travailler à réduire les effets du confinement sur les équipages.

Avant cela, deux architectes et designers se distinguent par leur rôle dans l'avancement des notions de bien-être dans les habitats de l'extrême. Galina Balashova, architecte du programme spatial russe, fût la première à se voir assigner une mission d'aménagement de l'intérieur des stations spatiales. Le designer franco-américain Raymond Loewy travailla sur l'intérieur de Skylab, la première station américaine. Même s'ils ne réussirent pas à bouleverser les orientations de conception des habitats au sein d'un environnement très technique, ces pionniers de l'architecture spatiale ont pu introduire les premières idées de confort et ont préparé le terrain aux autres concepteurs des projets ultérieurs. Suite à l'augmentation de la durée des missions et des exigences de confort, les aspects architecturaux des habitats ont commencé à prendre de l'ampleur. Les architectes, davantage impliqués dans le processus de conception, ont dû faire face à plusieurs défis physiologiques, psychologiques et sociaux.

Pour mieux étudier les effets du confinement sur l'équipage dans les cas des missions spatiales, les agences et les chercheurs se sont tournés vers des milieux extrêmes sur Terre, considérés comme des sites analogues d'autres planètes. Ces projets ont vu le jour après le lancement des stations spatiales américaines et russes, qui nous ont donné un aperçu précieux sur la nature des problèmes que peuvent rencontrer les équipages. Les habitats des sites analogues terrestres sont venus complémenter les recherches de solutions pour le confinement. Bien qu'ils ne présentent pas les mêmes conditions trouvées dans les milieux extra-terrestres, ces simulations nous permettent de travailler avec plusieurs variables, et de comprendre les réactions et comportements des êtres vivants à l'intérieur. Cette manière de pratiquer l'éthologie est beaucoup plus économique, accessible, sûre, et rapide.

En outre, plusieurs habitats hypothétiques ont été imaginés par des architectes et des concepteurs, dans le but d'apporter des réponses théoriques et de pousser la réflexion sur la problématique de l'isolement, tout en étant libérés des contraintes exigées dans les projets construits.

La nouvelle génération d'architectes doit prendre en compte l'ensemble

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

des expériences récoltées durant le dernier siècle, en Espace et sur Terre, pour assister et faire partie de cette aventure incontournable de l'histoire de l'humanité. Pour comprendre les différentes solutions intégrées dans les habitats des extrêmes et étudier leur efficacité, une grille d'analyse constituée de six points globaux a été dressée. Celle-ci prend en compte les facteurs qui influencent et sont en rapport direct avec la sensation de confinement. En étant la variable principale dans toutes les études préliminaires, la durée de confinement est le facteur qui influence majoritairement les choix architecturaux. Les cinq facteurs qui doivent évoluer proportionnellement à l'étendue d'isolement ont été définis comme suivant : la qualité de l'espace privé, la sélection de l'équipage et les dynamiques sociales, le volume de l'espace accessible, la présence de repères terrestres, et la maîtrise des équipements et de l'hygiène personnelle.

Les architectes et les ingénieurs dessinent l'environnement humain en construisant, et façonnent ainsi notre avenir sur Terre et dans l'Espace. En travaillant "à l'intérieur du système", les architectes spatiaux contribuent à faire en sorte que les agences spatiales nationales et l'industrie aérospatiale intègrent des principes et des pratiques judicieux de conception architecturale dans leurs scénarios de mission, leurs habitats, leurs véhicules spatiaux, leurs bases planétaires et leurs entreprises commerciales. Des travaux innovateurs sont en train de mettre en place les bases technologiques pour les prochaines décennies. Bien qu'un progrès important a été réalisé depuis le vol séminal de Yuri Gagarin, il reste encore beaucoup de travail sur Terre et dans l'Espace pour se préparer à vivre et travailler sur la Lune et sur Mars.

Ce travail de mémoire étant une exploration des possibilités d'intervention des architectes pour trouver des solutions aux problèmes de confinement, il serait intéressant de visiter d'autres pistes dans lesquelles ces concepteurs pourront prendre part, comme les méthodes de construction et la recherche de matériaux pour les habitats spatiaux futurs.

L'architecture spatiale est un domaine fascinant, plein de technologie de pointe et de possibilités illimitées. Les architectes des milieux extrêmes sont aujourd'hui en tête de l'étape de l'évolution où l'architecture s'affranchit des limites terrestres pour explorer comment l'humanité colonisera l'Espace et les autres planètes.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

BIBLIOGRAPHIE

Amphoux, P. (1990). Vers une théorie des trois conforts. *Annuaire 90*, 27-30.

Belnet, F. (2012). Les premiers habitats de l'homme. Consulté 30 juillet 2019, à l'adresse Hominidés : https://www.hominides.com/html/references/les-premiers-habitats-de-l-homme-0638.php

Bennett, J. (2016). The Bold Plan for a Moon Base Is Coming Together. Consulté 18 août 2019, à l'adresse Popular Mechanics : https://www.popularmechanics.com/space/moon-mars/a24427/europe-plan-moon-base/

Chladek, J., & Anderson, C. C. (2017). *Outposts on the Frontier : A Fifty-Year History of Space Stations*. Lincoln: University of Nebraska Press.

Damjanov, K., & Crouch, D. (2019). Orbital Life on the International Space Station. *Space and Culture*, 22(1), 77-89.

ESA. (2012). Mars500 : Study overview. Consulté 5 août 2019, à l'adresse European Space Agency : http://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Mars500/Mars500_study_overview

Fuller, R. B. (2016). *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial « Terre »*. Consulté à l'adresse https://www.lars-mueller-publishers.com/manuel-dinstruction-pour-le-vaisseau-spatial-terre

Harland, D. (2005a). Mir | Description, Launch, History, & Facts. Consulté 3 juin 2019, à l'adresse Encyclopedia Britannica : https://www.britannica.com/topic/Mir-Soviet-Russian-space-station

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Harland, D. (2005b). Salyut | History & Facts. Consulté 26 mai 2019, à l'adresse Encyclopedia Britannica : https://www.britannica.com/technology/Salyut

Harland, D. (2005c). Space station. Consulté 26 mai 2019, à l'adresse Encyclopedia Britannica : https://www.britannica.com/technology/space-station

Harland, D. (2019). International Space Station. Consulté 12 juillet 2019, à l'adresse Encyclopedia Britannica : https://www.britannica.com/topic/International-Space-Station

Häuplik-Meusburger, S., & Lorenz, S. (2002). *Psychological aspects of living in space—Architectural challenges*. 313-321.

Howe, A. S., & Sherwood, B. (2000). *Out of This World : The New Field of Space Architecture*. Reston, UNITED STATES: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Howell, E. (2018a). International Space Station : Facts, History & Tracking. Consulté 12 juillet 2019, à l'adresse Space.com : https://www.space.com/16748-international-space-station.html

Howell, E. (2018b). Skylab : First U.S. Space Station. Consulté 22 juin 2019, à l'adresse Space.com : https://www.space.com/19607-skylab.html

Koivu, A. (s. d.). Out of this world : The space-age designs of Galina Balashova. Consulté 22 mai 2019, à l'adresse http://kvadratinterwoven.com/out-of-this-world-the-space-age-designs-of-galina-balashova

Leach, N. (2014). *Space Architecture : The New Frontier for Design Research* (3e éd.). London: John Wiley & Sons.

Lee, P. (2002). Mars on earth : *The NASA Haughton-Mars project*. Consulté à l'adresse https://space.nss.org/ad-astra-volume-14-number-3-2002/

Mahoney, E. (2019). NASA Accepts Challenge to Send American Astronauts to Moon in 2024. Consulté 18 août 2019, à l'adresse NASA : http://www.nasa.gov/feature/sending-american-astronauts-to-moon-in-2024-nasa-accepts-challenge

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Mars Institute. (2018). Haughton-Mars Project (HMP). Consulté 4 mai 2019, à l'adresse https://www.marsinstitute.no/hmp

Martin, O. (2017). A Hawaii-based Mars simulation poses tough design challenges. Consulté 24 août 2019, à l'adresse Archpaper.com : https://archpaper.com/2017/10/university-hawaii-life-on-mars-nasa/

Martinez, V. (2007). Architecture for space habitats. Role of architectural design in planning artificial environment for long time manned space missions. *Acta Astronautica*, 60(4), 588-593.

Meuser, P. (2015). *Galina Balashova : Architect of the Soviet Space Programme*. Berlin: Dom publishers.

Meyer, C. (2017). *Vivre ailleurs—Architecture extra-terrestre et ses apports pour nos villes sur Terre*. ENSA Strasbourg.

MIÈGE, J.-L. (s. d.). *EXPLORATIONS*. Consulté à l'adresse https://www.universalis.fr/en/encyclopedie/explorations/

NASA. (1999). Mir Space Station. Consulté 3 juin 2019, à l'adresse https://history.nasa.gov/SP-4225/mir/mir.htm

Novak, M. (2014). Raymond Loewy's NASA Designs Are The Space Future That Never Was. Consulté 4 juin 2019, à l'adresse Paleofuture : https://paleofuture.gizmodo.com/raymond-loewys-nasa-designs-are-the-space-future-that-n-1645668220

Pangburn, D. J. (2015, août 18). The Soviet Architect Who Drafted the Space Race. Consulté 19 mai 2019, à l'adresse Vice : https://www.vice.com/en_us/article/ae3beg/the-soviet-architect-who-drafted-the-space-race

Rathi, A. (2015). What life is like in the most remote corner of the world. Consulté 15 mai 2019, à l'adresse Quartz : https://qz.com/486073/what-life-is-like-in-the-most-remote-corner-of-the-world/

Rogers, K. (2011). Biosphere 2 | scientific research facility. Consulté 11 mai 2019, à l'adresse Encyclopedia Britannica : https://www.britannica.com/topic/Biosphere-2

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Sample, I. (2013). Fake mission to Mars leaves astronauts spaced out. The Guardian. Consulté à l'adresse https://www.theguardian.com/science/2013/jan/07/fake-mission-mars-astronauts-spaced-out

Slavid, R. (2015). *Ice Station : The Creation of Halley VI. Britain's Pioneering Antarctic Research Station*. Zurich: Park Books.

Torchinsky, J. (2013). Why Skylab Was America's First And Best Home In Space. Consulté 3 août 2019, à l'adresse Jalopnik : https://jalopnik.com/why-skylab-was-americas-first-and-best-home-in-space-505269461

Vakoch, D. (Éd.). (2012). Psychology of Space Exploration : Contemporary Research in Historical Perspective. Space Policy, 28(3), 206-208.

Veggeberg, S. (1996). Biosphere's image : Rise, fall, and rehabilitation. Consulté 22 août 2019, à l'adresse Matenews : http://www.columbia.edu/cu/21stC/issue-1.3/metasphere.html

Vogler, A., & Jørgensen, J. (2005). Windows to the World, Doors to Space : The Psychology of Space Architecture. Leonardo, 38(5), 390-399.

Walford, R. (2004). Biosphere 2. Consulté 13 mai 2019, à l'adresse https://roy.walford.com/biosphere2.html

Watson, S. (2008). How do astronauts eat in space? Consulté 14 août 2019, à l'adresse HowStuffWorks : https://science.howstuffworks.com/astronauts-eat-in-space.htm

Wright, J. (2013). About Aquarius. Consulté 3 août 2019, à l'adresse NASA : http://www.nasa.gov/mission_pages/NEEMO/facilities.html

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. Davlashyan, N. (2016). L'architecte russe Galina Balachova. Consulté à l'adresse https://www.geo.fr/environnement/galina-balachova-l-artiste-cachee-du-programme-spatial-sovietique-167229
2. Balashova, G. (1963). Design for Soyuz Spacecraft. Consulté à l'adresse https://www.vice.com/en_us/article/539bqn/does-a-new-cold-war-mean-a-new-space-race
3. Balashova, G. (1980). Design for the cabin of the Mir Space Station. Consulté à l'adresse https://www.vice.com/en_us/article/539bqn/does-a-new-cold-war-mean-a-new-space-race
4. Balashova, G. (1980). Typography design for the Mir space station. Consulté à l'adresse http://www.frontiere.eu/galina-balashova-architetto-progetto-luna/
5. Loewy, R. (1967). EVA space taxi. Consulté à l'adresse https://www.theavanti.com/nasa.html
6. Loewy, R. (1967). Going beyond the ordinary. Consulté à l'adresse https://formfunctionart.com/product-spotlight-skylab/
7. Balashova, G. (1963). Design for the Salyut space station. Consulté à l'adresse https://www.vice.com/en_us/article/539bqn/does-a-new-cold-war-mean-a-new-space-race
8. Salyut 1 Rocket. (s. d.). Consulté à l'adresse http://hos-ting.info/linked/salyut-1-rocket.html
9. Galina Balashova. (1964). Galina Balashova, the Russian Architect. Consulté à l'adresse https://twitter.com/dearquitectos/status/1051093332250820608
10. IMDB. (2017). Salyut -7. Consulté à l'adresse https://www.imdb.com/title/tt6537238/mediaindex
11. NASA. (1973). Cutaway view of the orbital workshop. Consulté à l'adresse http://history.nasa.gov/SP-400/p3.htm
12. NASA. (1973). Showering Aboard Skylab. Consulté à l'adresse https://www.flickr.com/photos/nasacommons/9456594881/in/album-72157634972333678/

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

13. NASA. (1974). Skylab and Earth Limb. Consulté à l'adresse https://www.flickr.com/photos/nasacommons/9459374852/in/album-72157634972333678/

14. NASA. (1998). The Mir Space Station and Earth limb. Consulté à l'adresse https://www.rawpixel.com/image/441784/free-photo-image-cloud-aerospace-astronaut

15. NASA. (1996). Cosmonaut Yury I. Onufrienko, commander for the Mir-21 mission. Consulté à l'adresse https://airandspace.si.edu/stories/editorial/unlikely-comparison-subway-car-enterprise-and-mir-space-station

16. NASA. (1995). Mir in orbit. Consulté à l'adresse https://spaceflight.nasa.gov/history/shuttle-mir/photos/sts71/mir-imax/hmg0018.jpg

17. NASA. (2018). Iss Space Walk. Consulté à l'adresse https://pixels.com/featured/3-iss-space-walk-nasa.html

18. NASA. (2013). Photographing Earth from the Cupola on the International Space Station . Consulté à l'adresse https://petapixel.com/2013/06/10/photographing-earth-from-the-cupola-on-the-international-space-station/

19. NASA. (2005). ISS photo taken from shuttle Discovery in August 2005. Consulté à l'adresse http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_390.html

20. NASA. (2016). Reid Wiseman finds a little peace and quiet in the station. Consulté à l'adresse https://www.airspacemag.com/ask-astronaut/ask-astronaut-it-quiet-onboard-space-station-180958932/

21. Pesquet, T. (2016). Crew Quarter. Consulté à l'adresse https://twitter.com/thom_astro/status/805139215126298624

22. Ellis, M. (2016). Inside Biosphere 2. Consulté à l'adresse https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photo_Mar_21,_1_23_14_PM_(2).jpg

23. Minor, S. (2009). Habitat, Lung and Biosphere 2. Consulté à l'adresse https://www.flickr.com/photos/sminor/4087047308/

24. Turner, C. (1989). Group photo of candidates for Biosphere 2, 1989. Consulté à l'adresse http://www.cabinetmagazine.org/issues/41/turner.php

25. IPEV. (2016). Floor plan of the Concordia station. Consulté à l'adresse http://blogs.esa.int/concordia/2016/06/07/part-3-white-mars/

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

26. ESA. (2015). Concordia crew calling ESA. Consulté à l'adresse https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conference_call_(18693845142).jpg

27. ESA. (2012). Concordia Base. Consulté à l'adresse https://www.flickr.com/search/?w=54183220@N06&q=concordia

28. Morris, J. (2013). Halley VI Antarctic Research Station by Hugh Broughton Architects. Consulté à l'adresse https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station/

29. Hugh Broughton Architects. (2005) Science Module. Consulté à l'adresse https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station/

30. Hugh Broughton Architects. (2005). Central Module. Consulté à l'adresse https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station/

31. Morris, J. (2013). Bar Area Central Module. Consulté à l'adresse https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station/

32. Morris, J. (2013). Bedroom in Halley VI. Consulté à l'adresse https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station/

33. Morris, J. (2013). Halley VI Antarctic Research Station by Hugh Broughton Architects. Consulté à l'adresse https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station/

34. HMP. (2017). Aerial view of the Haughton-Mars Project Research Station . Consulté à l'adresse https://nationalpost.com/news/canada/devon-island-nunavuts-mars-on-earth-mapped-by-google-street-view

35. NASA/JSC. (2017). Aquarius habitat. Consulté à l'adresse https://zortrax.com/blog/3d-printing-functional-prototypes-nasa/

36. FIU. (2019). Aquarius Lab. Consulté à l'adresse https://aquarius.fiu.edu/dive-and-train/facilities-and-assets/aquarius-undersea-laboratory/index.html

37. NASA/JSC. (2017). Crew onboard the Aquarius habitat. Consulté à l'adresse https://zortrax.com/blog/3d-printing-functional-prototypes-nasa/

38. NASA/JSC. (2017). NEEMO crew that performed tests with METS. Consulté à l'adresse https://zortrax.com/blog/3d-printing-functional-prototypes-nasa/

39. Mann, A. (s. d.). Mars 500 Habitat. Consulté à l'adresse http://www.bisbos.com/ill_technical.html

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

40. ESA/IBMP. (2011). Simulated Marswalk. Consulté à l'adresse http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2011/02/Simulated_Marswalk

41. ESA. (2011). A day in isolation. Consulté à l'adresse http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2011/01/A_day_in_isolation

42. NASA. (2016). HI-SEAS Dome. Consulté à l'adresse https://www.businessinsider.com/mars-colony-volcano-hawaii-hi-seas-2016-1

43. Proctor, S. (2016). The second-floor bedrooms. Consulté à l'adresse https://www.architectmagazine.com/technology/q-a-hi-seas-mission-iv-crew-architect-tristan-bassingthwaighte_o

44. CNN. (2016). Can our minds handle Mars?. Consulté à l'adresse https://edition.cnn.com/specials/us/way-up-there-space-series

45. Krutikov, G. (1928). Design for Utopian future. Consulté à l'adresse https://www.pinterest.com/pin/140737557084287072

46. Friedman, Y. (1956). Improvised Volumes 'Floating' In Space, Like Balloons. Consulté à l'adresse https://www.archdaily.com/781065/interview-with-yona-friedman-imagine-having-improvised-volumes-floating-in-space-like-balloons

47. NASA. (1970). O'Neill Cylinder. Consulté à l'adresse https://www.geekwire.com/2016/jeff-bezos-space-colonies-oneill/

48. Bettmann/Corbis. (1971). Frei Otto with his model of an arctic city. Consulté à l'adresse https://www.nybooks.com/daily/2015/05/06/pritzker-prize-frei-otto-airborne/

49. Foster + Partners. (2012). Lunar Habitation. Consulté à l'adresse https://www.fosterandpartners.com/projects/lunar-habitation/

50. Clouds Architecture Office. (2015). Mars Ice House. Consulté à l'adresse https://cloudsao.com/MARS-ICE-HOUSE

51. Diagramme par l'auteur.

Introductions de chapitres :

p6. NASA. (2017). Painting with Jupiter. Consulté à l'adresse https://apod.nasa.gov/apod/ap180407.html

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

p11. Collins, M. (1969). The Apollo 11 lunar module, the Moon, and the Earth. Consulté à l'adresse https://apod.nasa.gov/apod/ap180407.html

p12. Royal Geographical Society (with IBG). (1914). Sir Ernest Shackleton's exploration of the Antarctic. Consulté à l'adresse https://www.thecourier.co.uk/fp/news/scotland/652165/sir-ernest-shackleton-shorthand-mystery-solved-with-the-help-of-the-courier/

p21. NASA. (1993). The first servicing mission to the Hubble Space Telescope. Consulté à l'adresse https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/servicing/index.html

p32. Garan,R. (2011). Cupola (ISS module). Consulté à l'adresse https://en.wikipedia.org/wiki/Cupola_(ISS_module)

p44. Healey,B. (2016). Step to the stars. Consulté à l'adresse https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2016/06/Step_to_the_stars2

p86. NASA. (2017). Harmony Node 2. Consulté à l'adresse https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_941.html

p102. NASA. (2012). Blue Marble. Consulté à l'adresse https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=79790

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

MÉMOIRE DE MASTER EN ARCHITECTURE
ENSA NANTES