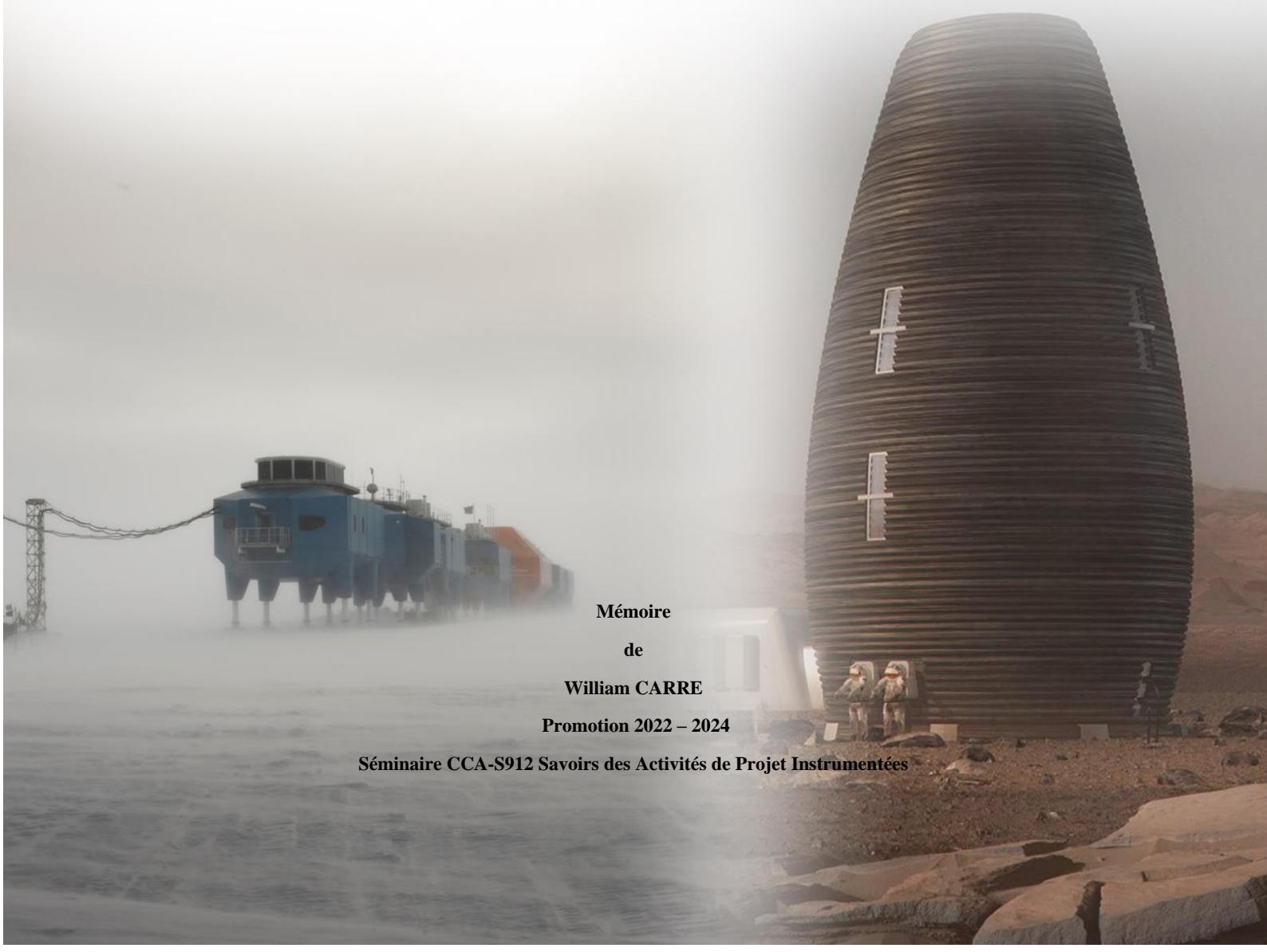




**LA « CRITIQUE C-K »  
POUR COMPRENDRE ET VÉRIFIER  
LA CONCEPTION D'HABITAT EN  
MILIEUX EXTRÊMES**



Mémoire

de

William CARRE

Promotion 2022 – 2024

Séminaire CCA-S912 Savoirs des Activités de Projet Instrumentées

**Remerciement à mes professeurs de séminaire, Joaquim Sylvestre, François Guéna, Anne Tuscher Dokic et Léa SATTLER**

## **SOMMAIRE :**

<b>Introduction : La théorie C-K pour vérifier le processus de conception d'habitat en milieux extrême .....</b>	P.4
<b>1-Etat de l'art :</b>	
1.1-L'Architecture en milieux extrême.....	P.7
1.2-La Théorie C-K méthode d'innovation.....	P.9
1.3-La théorie C-K comme critique.....	P.12
<b>2-Application de la Spéculation C-K sur le projet HALLEY VI</b>	
2.1-Contexte de HALLEY VI, une architecture modulaire.....	P.14
2.2-Expérimentation de la Spéculation C-K sur le projet HALLEY VI.....	P.21
<b>3-Application de la Spéculation C-K au projet Marsha :</b>	
3.1-Contexte de MARSHA, une architecture relevant les défis.....	P.41
3.2-Expérimentation de la Spéculation C-K sur le projet Marsha.....	P.44
<b>4-Conclusion.....</b>	P.54
<b>5-Bibliographie.....</b>	P.56

## **Introduction : La Théorie CK pour comprendre et vérifier la conception d'habitat en milieux extrême**

Quand j'étais encore lycéen, en classe de première, en 2018, j'ai eu l'occasion de tenter un concours organisé par l'astronaute français Jean Loup Chrétien, ancien élève de mon lycée. Son projet était d'emmener en voyage 2 élèves pour un séjour de 2 semaines au centre spatial de la NASA, au cœur de la ISS School (International Space School). Au cours de cette expérience, les étudiants sont regroupés en mixité avec des étudiants d'autres nations, eux-mêmes issus du même concours dans leurs pays d'origine respectifs. Chaque étudiant intègre une équipe pour réaliser successivement les différentes phases d'un pseudo-voyage spatiale sur Mars. Ce moment fut l'opportunité pour ces étudiants de travailler en groupe, d'échanger leurs connaissances et de proposer un projet complet de voyage spatiale au responsable de l'ISS. Dans mon cas personnel, je réussis une première épreuve écrite qui était la rédaction d'une candidature exposant nos motivations et nos premières intentions pour ce projets spatiale. Dans une seconde phase, je devais passer un oral en Skype pour présenter mon projet de voyage spatial plus en détail. Le niveau d'exigence fut bien plus élevé que je ne m'y attendais, avec des questions très précises comme : Quel type de carburant devra utiliser votre propulseur ? Quel système d'habitat sur Mars souhaitez-vous mettre en œuvre pour les astronautes ? Quels matériaux seraient idéales d'utiliser pour vivre sur Mars ? Mon manque de connaissance et de préparation pour cette épreuve ne m'a pas permis d'être accepté dans ce programme de découverte de l'ISS.

C'est une des raisons qui m'a particulièrement motivé, au cours de mes études d'architecture, pour découvrir et comprendre plus clairement les principes de conception architecturale . Ainsi, j'ai continué à me poser ces mêmes questions issues du concours, tout au long de mon parcours et surtout : Comment pouvais-je être sûr de la faisabilité des principes de conception que l'on imagine sur Terre, pour un projet d'habitation dans l'atmosphère et le sol martien ? J'ai donc cherché, à travers la littérature, des critères de choix de conception sur ce qui est réalisable et viable pour l'homme, dans une mission spatiale martienne.

Récemment, l'apparition des intelligences artificielles comme chat GPT a rendu encore plus difficile la possibilité d'être parfaitement critique vis-à-vis de projets présentés et de notre propre capacité à les évaluer. En effet, ces outils, fondés sur des algorithmes probabilistes, apportent des connaissances et des données dont nous ignorons la fiabilité et dont il est difficile d'identifier l'origine. Depuis Janvier 2021, nous avons assisté à un accroissement très important des investissements dans de nombreuses technologies innovantes, dont ces fameuses intelligences artificielles. Ainsi, Les outils du numériques ont pris une place imposante dans les processus de conceptions. Il est possible désormais grâce aux machines de « Deep-Learning » de réaliser des formes complexes en industrie. De plus, ces nouvelles technologies permettent de réaliser des images de synthèse de plus en plus crédibles et convaincantes pour un public ignorant les particularités spécifiques du domaine de l'architecture réalisée en milieux extrême.

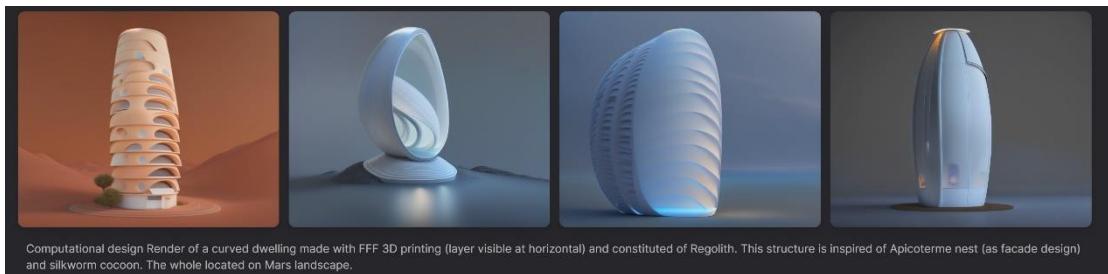


Image 2D Généré avec Stable diffusion : Génération personnel d'une forme cylindrique adapté pour l'atmosphère martien et imprimable par méthode FFF.

Comme on peut le voir sur les images ci-dessus, j'ai pu personnellement générer quelques images de structures en milieux extrême, en me basant sur des techniques d'impression et des formes adaptées à l'atmosphère martien. Ainsi, ces images sont graphiquement convaincantes, mais elles laissent planer un sérieux doute sur leurs réelles fonctionnalités adaptatives au milieu martien.

Ainsi, nous devons nous poser la question de savoir ce que sont les critères d'un bon fonctionnement d'une architecture en milieux extrême ? Par définition, selon le SATCS Space-Architecture.org, l'architecture en milieux extrême serait constituée d'habitats situés dans des contexte aux contraintes extrêmes. Ces milieux particuliers exigent que ces habitats soient entièrement indépendants de toutes infrastructures humaines, au moins pendant une certaine durée variable selon les milieux envisagés. En conséquence, sachant qu'il sera très difficile d'intervenir extérieurement pour construire ou réparer ces habitations et secourir éventuellement les occupants en cas d'incident, le principe d'autarcie , tant dans l'édification que dans le fonctionnement autonome de ces habitats est le principe central fondamental ce type d'architecture. Nous constaterons, à travers quelques exemples, que cela remet en question nos stratégies pour la conception de l'habitat, nos manières de vivre et d'utiliser les ressources locales ou importées.

Ainsi, de nombreux projets spéculatifs de ce type ont émergé de différentes filières. D'autres ont été concrètement réalisés comme le projet Halley VI (Hugh Broughton Architects), en antarctique, ou encore le projet Marsha (AI Space Factory) qui fut récompensé par la NASA lors d'un concours. Cependant, n'étant pas membres de l'un des cabinets les ayant conçus, nous ne pouvons pas connaître le fond de leurs processus de création (protection des brevets) et ne pouvons vérifier les différentes étapes des processus de conception et de réalisation.

Nous pouvons alors nous poser la question de savoir quel outil permettrait de vérifier la réel faisabilité des processus de conception de ces projets.

Parmi ces outils, il s'en trouve un particulier nommé la « Théorie C-K ». Il a été mis au point à l'école des Mines de Paris, par Armand HATCHUEL et Benoît WEIL. Il est utilisé et conseillé par les professeurs en architecture, ce qui fut mon cas lors d'un cours évoquant l'interopérabilité et les processus de conception. Cette théorie C-K a été conçue pour créer de nouveaux concepts

et de nouveaux designs, menant à la création de nouveaux objets. Son principe est basé sur la théorie des ensembles et son application à la conception architecturale permettrait de retracer les choix possibles ou envisagés par les concepteurs et, parmi eux, ceux qu'ils ont choisis. Pour le cas du présent mémoire, nous n'utiliserons pas la théorie C-K dans son usage traditionnel orienté pour créer un nouveau produit. Nous nous en servirons comme un outil d'analyse critique, au sens noble du terme, à savoir qu'au lieu de concevoir quelque chose, il permettra de déconstruire une partie des projets que nous étudierons. Ce détournement d'usage, nous permettra une analyse visant à retrouver ou à faire des hypothèses sur le processus de création qui a été mis en jeu et éventuellement de mettre en évidence les possibles manques des projets qui ne visent pas à être définitifs.

Il s'agit donc d'être critique et de posséder des outils suffisamment optimisés pour déconstruire et identifier les projets produits grâce à nos nouvelles technologies. Je vais donc développer, au cours de ce mémoire, des hypothèses pour déconstruire certains projets et vérifier leurs processus de conception.

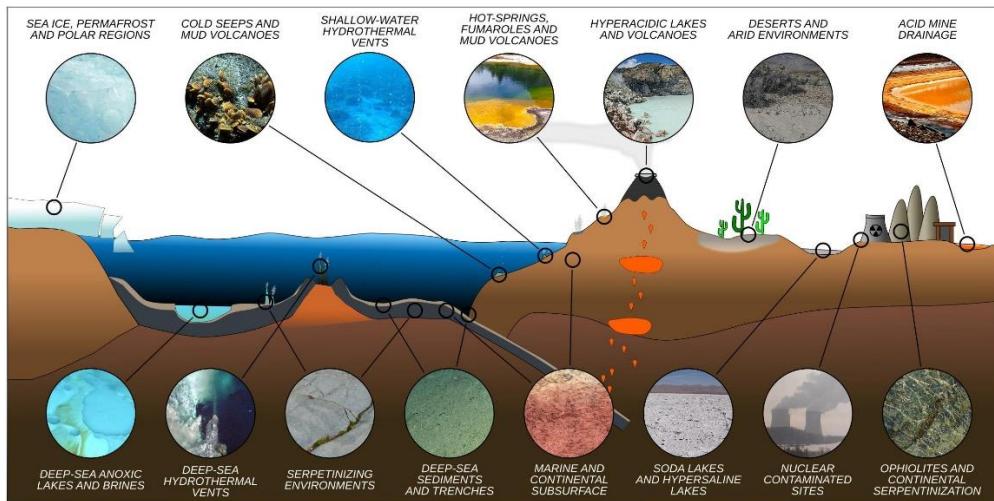
**Notre problématique sera donc d'étudier « comment L'usage rétrospective de la Théorie C-K, en tant qu'outil de critique constructive, permet-elle d'analyser un projet en milieux extrême ? ».**

Pour commencer, nous verrons ce que sont les fondements de l'architecture extrême, ainsi que les bases du fonctionnements de la théorie C-K. Ces éléments primordiaux nous permettront de comprendre de quelles manières nous pouvons réinterpréter la méthode C-K comme outil spéculatif, notamment concernant le biomimétisme. Dans ce contexte d'étude, je ferai une première application de ce détournement de la théorie C-K dans le cas du projet HALLEY VI, réalisé en Antarctique entre 2004 et 2012. Nous en tirerons quelques premières conclusions. Secondairement, je traiterai un sujet plus hypothétique surnommé MARSHA, projet visant à édifier un habitat sur Mars. Ainsi, nous pourrons évaluer si le raisonnement spéculatif de la théorie C-K est capable de vérifier le réalisme potentiel de la conception d'un projet en milieux extrême ; ceci avant d'en entreprendre sa construction réelle sur site. De ces deux expérimentations, nous tenterons de conclure sur l'efficacité de cette usage rétrospectif de la théorie C-K, notamment en usant de nos connaissances spéciales du biomimétisme.

# **1 - ETAT DE L'ART DE L'ARCHITECTURE EN MILIEUX EXTRÊMES ET DE LA THÉORIE CK :**

## **1.1 L'ARCHITECTURE EN MILIEUX EXTRÊMES :**

- Ce que sont les milieux extrêmes :

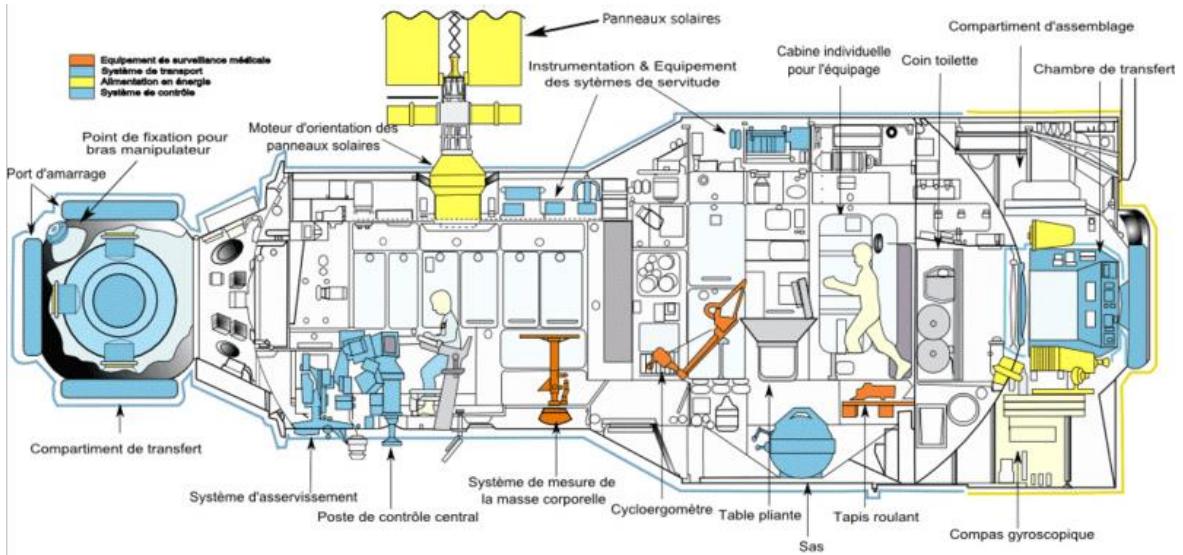


Poster illustrant les milieux extrêmes présent sur terre (source : FRONTIERS)

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.00780/full>

Selon les encyclopédies Universalis et Carleton EDUCATION, les milieux extrêmes se caractérisent par « des conditions physico-chimiques » rendant la vie animale très difficile. Ces conditions vitales considèrent notamment le taux d'humidité, le pH, les températures souvent extrêmement hautes ou basses ou avec de grandes amplitudes variations parfois très rapides, la composition gazeuse de l'atmosphère et les composés du sol. Parmi ces environnements extrêmes, on peut compter les milieux en dehors de notre atmosphère (planètes et exoplanètes), les milieux arctiques, les fonds sous-marins, les volcans ou les hautes montagnes.

- Ce qu'est la profession d'architecte en milieux extrême :



Module de la station MIR : Cette coupe ci-dessus démontre la profondeur de l'aménagement pensé par les concepteurs soviétiques afin de faire coexister plusieurs individus dans un espace réduit consacré aux études scientifiques (source Wikipédia MIR).

La spécialité d'architecte spatial est née dans l'imaginaire d'écrivains tel que Jules Verne, dans son roman d'exploration « de la Terre à la Lune », écrit en 1865, où il évoque la conception utopique d'une capsule devant se poser sur la Lune et imagine toutes les contraintes spécifiques auxquelles celle-ci doit faire face. Plus tard, Constantin Tsiolkovski a élaboré des théories extraterrestres et notamment l'idée d'une station spatiale, reliée à la Terre par un ascenseur permettant d'observer la terre. Cette station, ayant la forme d'un torus, fonctionnerait par sa mise en rotation permettant de créer une microgravité proche de celle de la Terre mais dans l'espace. Ce n'est véritablement, que dans les années 1960, durant la concurrence spatiale entre les deux les deux grands blocs géopolitiques soviétique et Etats-Uniens, que la discipline devint concrète. Déjà, dans cette période de concurrence USA/URSS, deux grands projets contiennent les premiers travaux d'architectes spatiaux et de designers industriels, dans les stations spatiales d'une part Salyut 1 (Vladimir Chelomei) chez les soviétiques en 1971 et d'autre part SkyLab (Raymond Loewy), pour les USA en 1973. Petit à petit, la profession a émergé et s'est développée au cours de nouveaux projets de conquêtes spatiales en incluant une rigoureuse compréhension des dépendances et indépendances de l'homme vis à vis des ressources terrestres. Ces études ont été notamment approfondies avec la construction de la station MIR par les soviétiques. Celle-ci est considérée encore aujourd'hui comme une des habitations spatiales les mieux pensées pour le confort des astronautes (déplacements intérieures, réutilisation des ressources notamment de l'eau, confort d'utilisation etc.). Aujourd'hui encore, il s'agit toujours d'une discipline émergente et très spécialisée mais qui s'étend à d'autres terrains d'exploration, considérés comme des « milieux extrêmes » situés sur Terre. Certains de ces projets ont déjà été réalisés comme en Antarctique, tandis que d'autres restent encore utopiques, soit en attente de leurs réalisations, notamment pour la recherche de minéraux.

extraterrestres ou sous-marins ou alors serviront comme supports de réflexions pour de futures projets qui se réaliseront dans 100 ans ou plus. Plus que jamais, les concepteurs de ces milieux hyper-conditionnés doivent penser à l'autosuffisance et à l'exploitation efficace d'un environnement spécifique tout en ayant conscience des enjeux sociaux, psychologiques et biologiques de leurs écosystèmes. La profession de concepteur de l'architecture de l'extrême exige beaucoup de connaissances et d'interrelations scientifiques multidisciplinaires pour mettre au point des expérimentations ou par le biais d'expériences de pensée (chères à Einstein), puis de simulations et de mises à l'épreuve, pour remettre en question et finaliser la manière dont l'homme peut vivre dans ces milieux particuliers puis, par extension, pour questionner sous un nouvel angle la manière de vivre de l'homme en général sur la Terre.

## **1.2 LA THÉORIE C-K MÉTHODE D'INNOVATION :**

### **- Les principes de la théorie C-K :**

La théorie C-K est souvent décrite par un tableau subdivisé en deux grandes parties :

la première, souvent placée à droite du tableau, nommée « K » (pour Knowledge) expose un ensemble de connaissances : cette partie est subdivisée à son tour en 2 sous parties superposées : L'une, en position supérieure, énonce des savoirs traditionnels des personnes exploitant la méthode. L'autre , en position inférieure, évoque des savoirs spéciaux suggérés par des scientifiques ou des personnes spécialisées dans un domaine précis que l'on choisit expressément pour l'expérimentation.

La seconde partie du tableau, souvent placée à gauche, nommée « C » (pour Concept), est consacrée à l'espace de « Brainstorming ». Cette zone est dédiée aux développements des expérimentations intellectuelles étudiant successivement les points particuliers de la connaissance traitée.

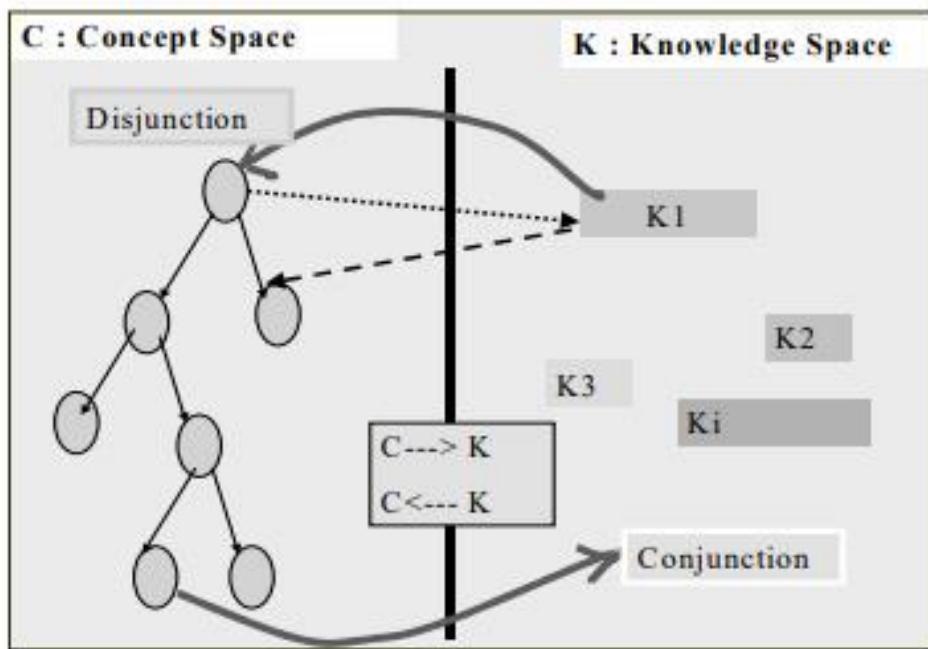


Tableau général de la théorie C-K représentant la ‘dynamique’ de la théorie : Dans cette technique , une connaissance K est sélectionnée pour être développée, analysée et subdivisée en divers sous concepts.

Parmi ces derniers, l’un prometteur est combiné avec de nouvelles connaissances K à travers une conjonction et le cycle d’étude se répète jusqu’à obtenir un résultat suffisamment prometteur.

Selon les inventeurs de la méthode C-K, Armand HATCHUEL et Benoit VEIL évoquent, dans leur revue “A new innovative design: An Introduction to C-K theory”, les quelques éléments notables suivants:

- La théorie C-K est essentiellement utilisée dans un but conceptuel. Celle-ci donne un nouveau souffle aux méthodes de recherche en innovation, notamment comme méthodologie organisationnelle pour la créativité et pour la conception en pratique de nouveaux produits, tant pour leurs propriétés que pour leurs formes. Elle permet une déconnexion entre les types de compétences spécialisées et les connaissances particulières utilisées menant à de nouveaux concepts utilisables selon de nouvelles modalités par la création d’un langage commun maniant les concepts. Un exemple est celui développé par Armand Hatchuel et Benoit Veil montrant que « La théorie C-K offre un ensemble clair de notions universelles qui peuvent aider le chercheur en sciences sociales à analyser un processus de conception sans être biaisé par trop de visions restrictives du Design ».
- Elle permet une généralisation unificatrice de différentes théories concernant la conception de nouveaux produits. Elle permet de mettre en évidence avec clarté l’élément conceptuel nouveau que l’on souhaite élaborer ou mettre en œuvre. Par exemple, le principe de l’Environnement Construit met en étroite relation tous les besoins humains fondamentaux à satisfaire et la manipulation adroite de la conception du milieu de vie visant à influencer positivement les comportements.

- En mathématiques, on peut considérer que la méthode CK se comporte comme un système relationnel entre ensembles de natures différentes, créant entre ces derniers des disjonctions ou conjonctions selon des formules mathématiques conditionnelles à définir. Des investigations sont en cours pour relier les outils mathématiques et informatiques pour modéliser les processus de la méthode CK, toujours selon Armand Hatchuel et Benoit Veil.
- Il existe des dénominations différentes pour désigner les variations du sens d'usage de la théorie , à savoir : C-K ; K-C ; C-C ; K-K.

Dans ces liens entre connaissances K ou k et concepts C ou c, l'usage de majuscules de minuscules va témoigner de l'importance donnée dans l'étude soit à des connaissances approfondies, très spécialisées, exprimées par K majuscule ou à des connaissances plus ordinaires, exprimées par un k minuscule. De même, l'usage d'un C majuscule témoignera de la domination des concepts sur les connaissances k ordinaires voire spécialisés K dans la recherche réalisée. L'usage d'un c minuscule relèvera de la minoration des concepts par rapport aux connaissances spécialisées K. Enfin la présentation C-K témoignera de l'égalitarisme exercé au cours de la création entre concepts et connaissances. Ainsi :

la méthode « c – **K** » fait intervenir des connaissances très complexes que peu de gens connaissent. Ainsi, des connaissances nouvelles sont produites régulièrement mais ne trouvent pas toujours la technologie ou les moyens pour être mises en œuvre. C'est une méthode plus efficace que les Brainstormings courant qui mobilisent des méthodes de la théorie C-k avec une logique trop dérisoire.

la méthode « **C – k** » part de savoirs très communs pour la plupart des gens. Ainsi , les résultats sont alors surprenants et parlent à l'entendement de tous car ils reposent sur des connaissances de bases que les individus n'ont pas poussé à un tel point « les concepteurs doivent accepter de suspendre leurs jugements de statut logique de certaines propositions communes, au moins pendant un certain temps , et accepter plusieurs cloisonnements de leurs idées et inventions en expansion, avant d'obtenir une conception nouvelle acceptable », selon Armand Hatchuel et Benoit Veil.

-Pour qu'une théorie C-K soit validée, trois critères de validation sont nécessaires : La théorie constitue une bonne unification des connaissances mobilisées et il s'agit de voir par la suite si cela constitue un tout cohérent dans l'ensemble. Cette nouvelle perspective contribue à ancrer la théorie dans un corps plus universel de connaissance. La théorie clarifie certaines questions pragmatiques et offre même de nouvelles voies pour les traiter avec des attentes solides.

Il existe deux techniques d'utilisation de la théorie C-K, l'une dite ascendante (Bottom-Up) et l'autre descendante (Top-Down) :

**La technique ascendante** : Cette première utilisation de la théorie C-K consiste à d'abord de comprendre et identifier les fondements d'un sujet, d'une structure ou d'un objet et de voir son fonctionnement. Il s'agit ensuite d'en dégager et d'identifier les principes majeurs qui sous-

tendent la chose étudiée pour la rendre plus compréhensible pour des personnes n'ayant pas de connaissances ou de savoirs approfondis auxquelles cet objet appartient. Ceci permet alors aux scientifiques ou concepteurs de mieux le comprendre et de se comprendre entre eux à fin de développer un produit utilisant le principe biologique ou extraits d'autres domaines d'expertise.

**La technique descendante :** Cette technique commence avec la question du problème à résoudre, ce qui mène à la recherche d'analogies. Tout comme le processus ascendant, il se trouve une étape d'abstraction afin que toutes personnes impliquées dans l'étude puissent comprendre la question et le produit qui doit être développé. Enfin, les concepteurs peuvent chercher, par ces analogies conceptuelles, à créer des connaissances nouvelles répondant à la question posée par le problème initial et enfin réaliser une production adaptée. Parfois même, il peut y avoir un manque de connaissance fondamentale et on est alors obligé de passer par « Le processus descendant étendu ».

<b>Bottom-up (du bas vers le haut)</b>		<b>Top-Down (méthode descendante)</b>	
<b>Point de départ</b>	Biologistes en recherche fondamentale	<b>Point de départ</b>	Un problème d'ingénierie
<b>Détaillage et extraction des principes</b>	Comprendre le modèle biologique et identifier les "principes"	<b>Recherche d'analogies avec le problème</b>	Recherche d'analogies dans les connaissances biologiques
<b>Abstraction</b>	Transformer le principe biologique sous une « forme neutre en solution » et recadrer la solution pour les ingénieurs compréhension	<b>Sélection avec les principes adapté</b>	Principes appropriés d'un ou plusieurs modèles biologiques analysés
<b>Technique mise en œuvre</b>	Développement de produits utilisant le principe biologique extrait	<b>Abstraction</b>	Transformer le principe biologique en une "forme neutre de solution" et recadrer la solution pour les ingénieurs
		<b>Mise en œuvre technique</b>	Développement de produits à partir du principe biologique extrait

Etapes des approches descendantes et ascendantes pour la NPD (Speck et Speck, 2008, Helms et al.,2009) – Camila Freitas Salgueiredo.

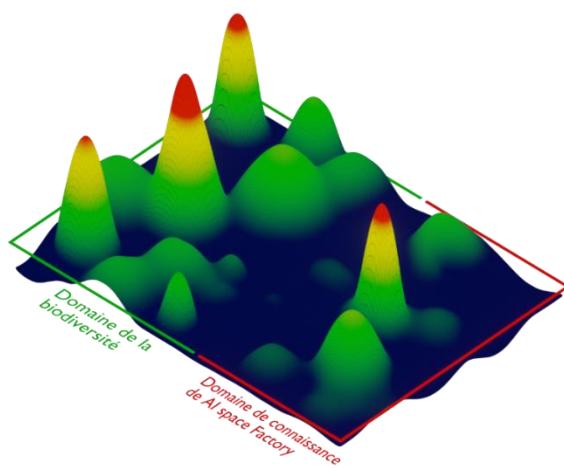
---

#### - La théorie CK comme critique : Pourquoi un usage rétrospectif de la théorie CK:

La théorie C-K a déjà été évoquée comme potentiellement intéressante par divers médias. Cependant, elle est essentiellement utilisée pour son objectif initial qui est d'innover et de créer de nouveaux produits ou de nouveaux designs. Dans le cas de l'architecture en milieux extrême ou de projets en cours de développement, il est intéressant de la considérer autrement. Si cette

théorie est efficace pour permettre la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau design à partir de connaissances de bases, alors peut-être est-elle capable de revoir les processus de conception d'un projet architecturale et de les mettre en relation avec des connaissances traditionnelles ou spécialisées permettant leurs vérifications. Il s'agirait alors d'une nouvelle manière d'utiliser cette technique de brainstorming contrôlé, en décomposant les principes fondateurs d'une architecture en milieux extrême pour vérifier chacun de ses aspects et s'appuyer sur des connaissances qui justifieront la fonctionnalité de ces parts de projet.

<b>Bottom-up (du bas vers le haut)</b>		<b>Usage rétrospectif de la méthode C-K en analyse critique</b>
<b>Point de départ</b>	Biologistes en recherche fondamentale	<b>Point de départ</b> Recherche fondamentale sur la conception pertinente d'un habitat en milieu extrême.
<b>Détaillage et extraction des principes</b>	Comprendre le modèle biologique et identifier les "principes"	<b>Détaillage et extraction des principes</b> Déconstruction des "principes" ayant prévalu à la mise en œuvre de l'habitat étudié.
<b>Abstraction</b>	Transformer le principe biologique sous une « forme neutre en solution » et recadrer la solution pour les ingénieurs compréhension	<b>Critique</b> 1 - critique des principes utilisés : Avantages et inconvénients.  2 - critique vis à vis des connaissances (K spécial) spécialisées provenant du biomimétisme ou d'autres origines.
<b>Technique mise en œuvre</b>	Développement de produits utilisant le principe biologique extrait	<b>Technique mise en œuvre</b> Justification de la critique par des produits ou prototypes fonctionnels.  Projection de ce que la critique peut apporter à la conception technique des projets.



Principe de L'Optimum Local : ajout du domaine de la biodiversité aux connaissances du projet Marsha – réalisé par moi-même.

Bruno Latour, dans son œuvre, illustre notre utilisation massive du biomimétisme par les expressions « Nous n'avons jamais été moderne » et « Tout existait déjà dans la nature ». À travers ses récits, Bruno Latour nous livre ses perceptions selon lesquelles nous n'aurions jamais rien réellement inventé ex nihilo mais que nous imitons, à notre échelle, les inventions que la nature a mis des millions d'années à mettre au point. Il est donc possible de croire que les mécanismes biologique qui seront exploité ici, pourraient être des source d'inspiration fiable pour penser de nouvelle technologies.

## **2- APPLICATION DE LA THÉORIE CK AU PROJET HALLEY**

### **VI :**

#### **2.1 CONTEXTE DE HALLEY VI, UNE ARCHITECTURE MODULAIRE.**

##### Historique :

*Le programme Halley , primitivement dénommé programme Edmond Halley, vient du nom de l'astronome Edmond Halley. Il fut Changé en programme Halley en 1977. La première station créée par ce programme scientifique a été mis en place en 1956. Cela fait donc environ 67 ans que le programme est en évolution. Les anciennes constructions du programme Halley se sont enfouies sous la neige, pour la plupart, depuis leurs abandons. La station Halley VI, la plus récente, est spécialisée aussi dans le BAS glaciologists studying : Le niveau de la glace avait notamment impacté l'emplacement de Halley V.*



View of snowed up station complex taken from the met mast, Jan 1957. (Photographer: George Hemmen; Archives ref: AD6/19/3/C/Z6).



Halfway through construction of Halley IV, 25 Jan 1983 (Archives ref: AD6/2Z/1983; Photographer: Doug Allen)



The new (1967) Halley buildings – windowless, as they will be permanently buried. (Photographer: Maurice Sumner; Archives ref: AD6/19/3/C/Z25)



Construction of Halley III, showing interior of the Armco steel tube in which the new station buildings would be housed, 1973 (Archives ref: AD6/19/3/C/Z38). Photographer: Vivian Fuchs (Director, FIDS)



Photos des premiers projets de la mission HALLEY depuis 1977 : Chaque projets à progressivement évolué en incluant des améliorations pour répondre aux enjeux évolutifs atmosphériques et des glaces que les scientifiques ont découvert aux files des années.

(British Antarctic Survey : <https://www.bas.ac.uk/about/about-bas/history/british-research-stations-and-refuges/halley-z/>)

Halley VI est né d'un concours lancé en Juin 2004 par RIBA Compétitions et British Antarctique Survey. Le Design qui a remporté ce concours est celui de Faber Maunsell et Hugh Broughton Architects choisis en Juillet 2005.

Depuis plus de 50 ans, le secteur Halley est un lieu de recherche pour les scientifiques britanniques. Le début de ces recherches avait commencé par des cabanes de bois. Désormais, ils ont un habitat high-tech qui est la station la plus isolée de grande bretagne.

Les modules peuvent être détachés puis attaché individuellement sur la glace. Ce qui est essentiel pour la survie de la station qui repose sur une plaque glacière qui s'écoule tout au long de l'année vers la mer de près de 400m. Elle est installée sur des pieds hydrauliques qui peuvent se surélever pour s'adapter aux conditions climatiques hostiles de l'Antarctique et notamment ne pas se laisser enfouir sous la neige parfois très abondante. Le projet a pris 4 ans à être construit car les équipes de constructions ne pouvaient travailler que pendant les étés et non durant les hivers trop rudes du fait de froids et de vents extrêmes, par rapport au reste de la Terre.

Avec le temps, les scientifiques ont collecté des données essentielles permettant de mesurer avec précision l'évolution du changement climatique et ont développé la météorologie spatiale. C'est grâce à cette station que l'on a découvert le premier « trou dans la couche d'Ozone ». C'est aussi le lieu où l'atmosphère est la plus propre du monde car très peu de petits changements n'interviennent dans les concentrations des gaz. Cela signifie qu'on peut mesurer plus facilement comment l'air se modifie en fonction de l'évolution de la population terrestre.

La nouvelle station possède une bonne passerelle d'observation et cela permet des mesures d'ozone plus aisées. Halley VI est un environnement pour scientifiques, cuisiniers et ingénieurs.

#### Atmosphère et localisation :

*la station Halley VI est située à 10 000 miles du Royaume-Uni (UK), sur les 150 miles de la « Floating Brunt Ice Shelf ». Nous avons vu que cette couche glacière se déplace de 400mètres par année vers la mer. Le niveau de neige globale de ce glacier monte de 1mètre tous les ans. Le soleil ne se lève au-dessus de l'horizon que durant 105 jours durant l'hiver. Les températures subies par Halley VI sont rarement supérieures à 0°C. Des températures de -10°C sont souvent mesurées durant l'été. Les températures d'hiver sont souvent très en dessous de -20°C. Au cœur de l'hiver, les températures extrêmes descendent en dessous de -55°C. Le terrain glacié peut être secoué, à tout moment, par des vents pouvant atteindre les 100 mph. L'accès au continent antarctique par bateau ou avion se limite à une fois tous les 3 mois. Il y a 24 h/24h d'obscurité pendant 105 jours par an. Pendant cette période, les résidents sont complètement isolés du reste du monde tant par la mer que par la glace ou par les airs. En effet, il est alors impossible de voler dans ces conditions. Le vent vient principalement de l'Est et ces derniers chargés de neige peuvent réduire la distance de visibilité à quelques mètres. La visibilité se réduit à un « mur blanc ». La localisation de Halley VI permet la vision d'une aurore boréale ovale qui donne fréquemment de fabuleux spectacles célestes, notamment durant les 105 jours d'obscurité.*

*Le poids des livraisons de matériel peut facilement induire des fissurations de la glace pouvant devenir dangereuse.*

### Conception General :

La station combine les principes dit de « Jackable » (modules détachables et rattachables individuellement) et de « Fondations à Base de Ski » permettant le déplacement sur les glaces enneigées. La station est composée de 8 modules individuels reliés entre eux par un couloir unique flexible. L'intérêt de garder la station surélevée sur des skis est de pouvoir la déplacer à tout moment selon les saisons et ce sur des kilomètres. Pour cela, les modules sont détachés les uns des autres ; ils sont ensuite tirés individuellement par un bulldozer ; puis enfin, ils sont reconnectés entre eux plus tard sur un nouveau site.



Ci dessus, différente photo présentant l'aspect extérieure de HALLEY VI par British Antarctica Survey.

### Analyse de module :

Le design des modules a été pensé pour permettre des expériences scientifiques à travers les différents milieux en Antarctique, sans négliger le confort de vie des scientifiques. Le design d'ensemble doit aussi être flexible au maximum. Ainsi, le système modulaire est idéal pour permettre tous types d'opérations scientifiques : Cela permet une mobilité sur le terrain pour les analyses, pour la maintenance, pour la sécurité contre les incendies et présente des bénéfices pour l'acoustique. Les modules situés dans la partie au Nord du système sont réservés aux études scientifiques. C'est ainsi la toute première station de recherche scientifique délocalisable.

La complexité réside davantage dans la conception des éléments intérieurs des modules. Par contre, il a fallu garder un aspect extérieur assez simple mais robuste.

### Phase de construction :

Les conditions extrêmes de la nature en Antarctique ont conduit à la prudence sur les détails de constructions. Une des principales contraintes était le poids de charge de 9,5 tonnes par module. Ce qui a conduit à assembler les éléments du projet, apportés en pièces détachées successivement sur la glace, au lieu de l'apporter tout assembler.

Les composants les plus gros sont des structures tubulaires en acier mesurant 9.5 m x 18.5 m , constituant l'ossature de chacun des modules. Ces pièces métalliques ont été renforcées en usine et chacune d'entre elles a été acheminée sur la glace par des skis temporaires. Une couche APTFE a été appliquée en dessous de chaque ski pour s'assurer qu'aucun d'entre eux ne se bloque sur la glace, quand un repositionnement est nécessaire.

L'étape suivante de l'assemblage a consisté à installer des poutres et un sol en acier en cassette sur le haut de la structure tramée. Les parties devant contenir des matière vivantes (plantes, échantillons) sont sécurisées sur le pont. Par la suite, des portiques en acier ont été mis en place pour recevoir le reste des panneaux de murs et de toits (en FRP – fibre de polymère renforcé). Ce matériau à un faible coefficient d'expansion thermique, ce qui assure la stabilité des joints entre les panneaux. De plus, il est adapté à la construction de panneaux très larges ne requérant pas de couche supplémentaire de renfort, ce qui est plus simple et plus rapide.

### Systèmes de contrôle et fonctionnement interne :

Une suite d'instruments autonomes de mesure, représente 90% des éléments préinstallés de la station. La station enregistre alors de nombreuses données comme la «météorologie et la surveillance de l'ozone, Chimie troposphérique et climat, et météorologie spatiale et observations atmosphériques supérieures. Le système a fonctionné avec succès, mais avec quelques obstacles techniques qui ont été surmontés jusqu'à nos jours. » - British Antarctica Survey.

L'énergie de la station est fournie par un système de production d'électricité à micro-turbines (nommées Capstone C30), celles-ci ont été installées entre 2018 et 2019 avec succès. Elles ont été choisies en raison de leurs cadences de maintenance peu fréquentes (environ toutes les 8000 heures). Ce système de micro-turbines fonctionne automatiquement, sans pilote, pendant la période hivernale. Il possède un système d'alimentation autonome qui aspire son carburant à partir de 2 réservoirs extérieurs. Ces derniers sont abrités dans des conteneurs à température régulée abritant également les mini-turbines. Ce dispositif est très attentivement surveillé grâce à une série de dispositifs dont des capteurs de pression, de température et des webcams. « Le système a effectué environ 150 ravitaillements autonomes au cours d'une période de 265 jours. Il a fourni en moyenne 9,5 kW de puissance au réseau Halley Science. » - British Antarctica Survey.

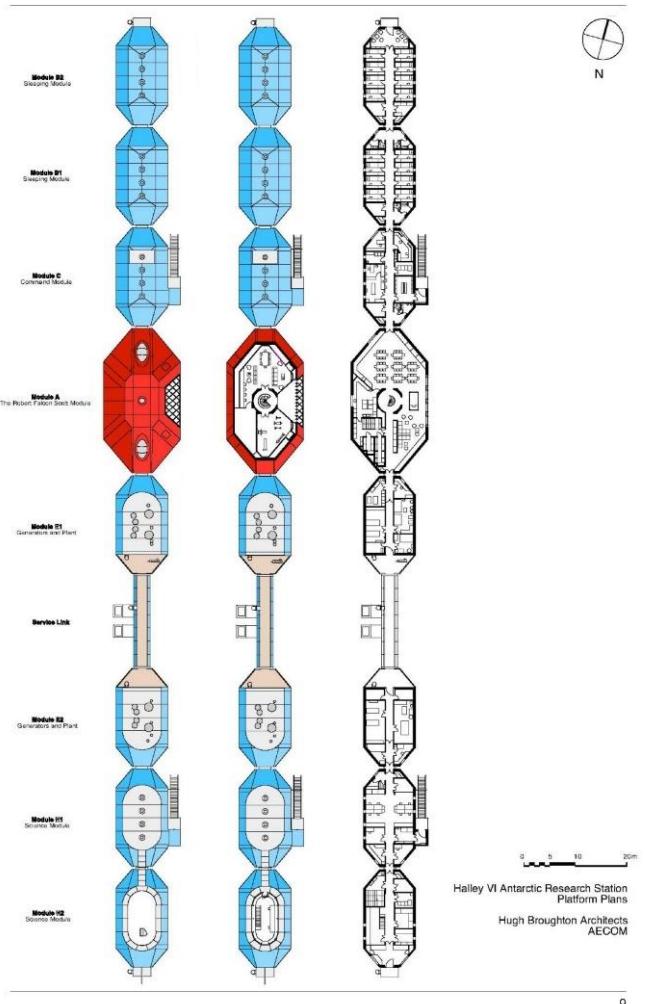
Chaque bâtiment externe est alimenté par ces micro-turbines. D'autres bâtiments sont maintenus au chaud pour entretenir les instruments scientifiques mais à des températures moins élevées que celles abritant les équipages.

**Avantage écologique :** La collecte de données sans intervention humaine permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, étant donné qu'il n'y a pas besoin d'emporter beaucoup de personnel trop régulièrement sur le site. La consommation annuelle de carburant est réduite de 75% en raison de technologies automatisées pendant les mois d'hiver. Le système de micro-turbines brûle actuellement du AVTUR, un combustible fossile, mais ce système peut aussi marcher avec des combustibles de synthèse. La station cherche toujours à avoir un bilan carbone net proche de zéro : ils parient notamment sur les éoliennes et l'énergie solaire.

**Eaux** = Pendant les heures d'ensoleillement, la chaleur permettant la fonte de la neige située dans le Tank de fonte est fournie par des équipements solaires où de l'eau froide passe à travers un sandwich de plaques de verre claire et de réflecteurs. Par la suite, l'eau selon qu'elle est froide ou réchauffée passe par de multitudes tuyaux jusqu'aux WC ou aux robinets pour tous les usages.

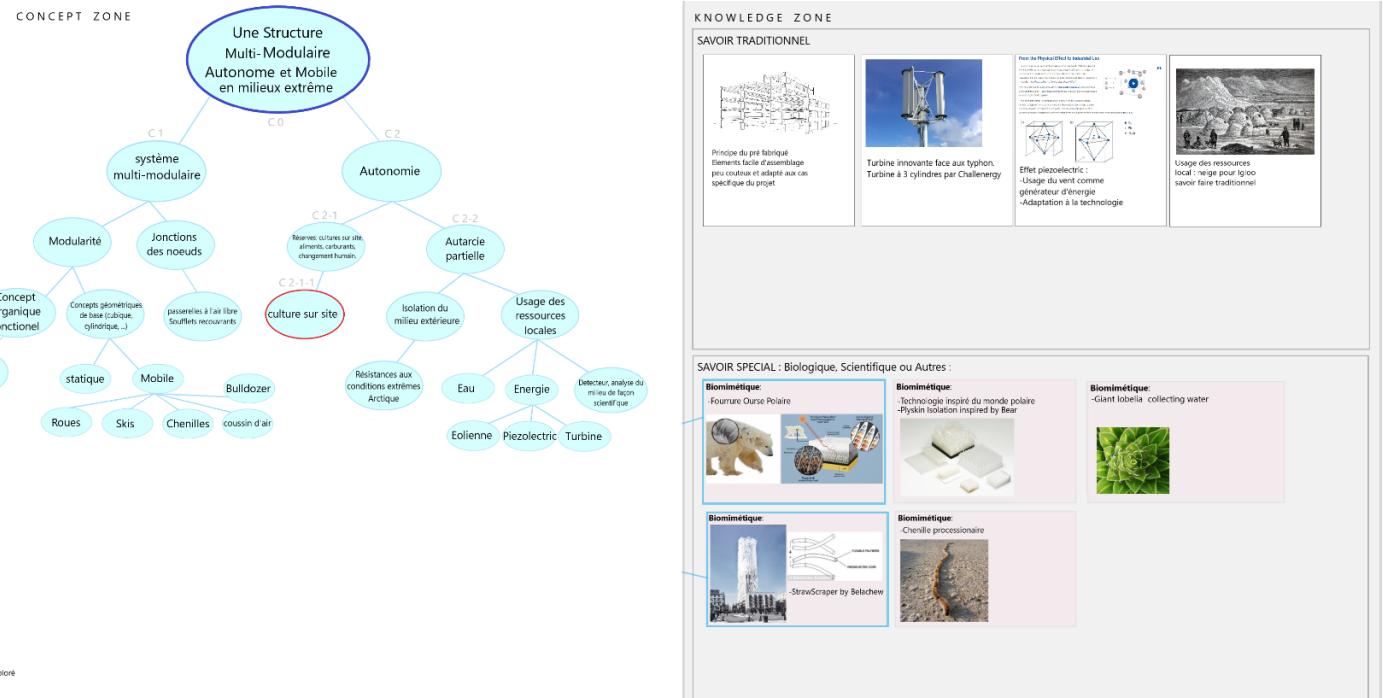
Cette eau est filtrée et stérilisée en passant à travers un tube émettant des rayonnements UV C puis traversant des filtres à 5 microns. L'eau usagée est évacuée à l'autre bout du système avec tous les autres déchets en passant dans un bioréacteur. Les déchets et résidus d'eau tombent ainsi dans un conteneur et seront ensuite emmenés sur les îles Falkland pour être utilisés comme fertilisant.

Ce système de chauffage de l'eau n'utilise plus le rayonnement solaire et ne dépend alors que de l'électricité produite par les micro-turbines durant les 9 mois d'hiver, s'étendant de février à décembre, ceux-ci étant des mois trop sombres.



Ci dessus, différentes photos intérieures des chambres du modules habitation par British Antarctica Survey. A gauche, plan général de la station avec les modules chambres tout au SUD (Haut), au centre le module de divertissement Rouge (Centre) et au Nord (Bas) les modules scientifiques.

## 2.2 EXPÉRIMENTATION DE LA SPÉCULATION C-K SUR LE PROJET HALLEY VI :



Pour Résumer les étapes de l'expérimentation, j'ai donc établit un tableau de concepts et un tableau de Knowledge tel la théorie de base nous le propose.

Comme précédemment la Spéculation C-K est utilisé à travers la technique descendantes, afin d'établir la plupart des possibilités que les architectes et concepteurs ont pu envisager pour concevoir Halley VI. La méthode appliquée actuellement est la technique descendante : Il s'agit de suggérer des concepts à partir des premiers concepts établis. Ainsi en multipliant les possibilités, nous assistons à un brainstorming qui contrôlé permet d'ouvrir des possibilités, et d'imaginer les choix de concepts que pouvait envisager les concepteurs.

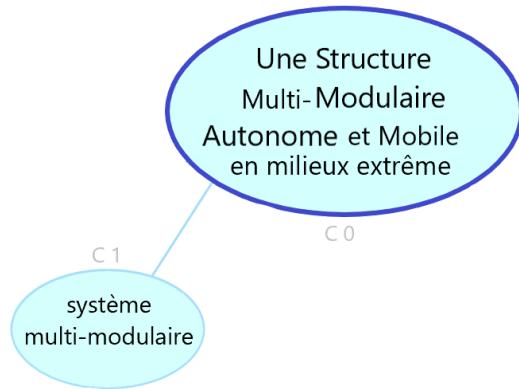
**Les règles de l'expérience C-K sont :**

**-Retracer les possibilités envisagées par les créateurs et quels sont les avantages et désavantages de chacun des choix.**

Nous choisirons également comme domaine de connaissances K spécial, la Biologie. Nous ne pourrons étudier que 2 aspects principaux du projet HALLEY VI. Au vu de la complexité du projet et afin d'évaluer très précisément si le projet est suffisamment viable sur ces parties de

modularités et d'Autarcie. Nous prenons également en compte, tout au long du processus le Climat de Antarctique, car il est la contrainte majeure :

## 1 - POURQUOI LA MULTI MODULARITÉ ? ( CRITIQUE DE CONCEPTS C0 / C1 )



### Les Avantages :

- 1-Il s'agit de permettre la séparation des fonctions : Scientifiques, de zones de repos, d'alimentation et détente. Il y a ainsi une spécialisation des modules.
- 2-Pouvoir abandonner des segments non fonctionnels pour ne pas s'handicaper avec eux.
- 3-La Modularité est essentiel pour la mobilité car cela segmente les charges en unités plus petites, moins lourdes, plus facile à déplacer.
- 4-Permet des réarrangements : dispositions différents, allongement de la structure, échange d'éléments, soit pour défaut de fonctionnement soit pour intégrer des évolutions futures.
- 5-Montage plus aisé, sur le site initial loin des côtes, des pièces détachées pour chaque module.
- 6-Nécessite des systèmes de jonctions efficaces.

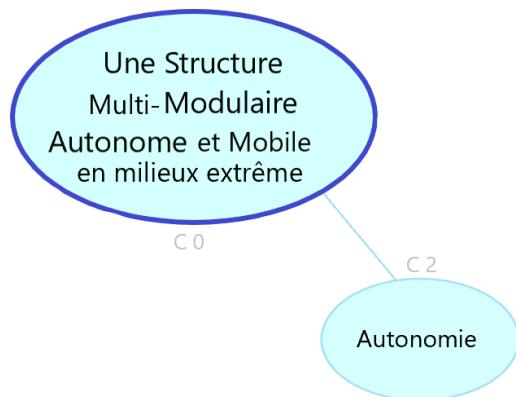
### Les Inconvénients du multi-nodulaire :

- 1-Fragilité des zones de fonctions de modules
- 2-Limitation des voies de communication entre modules
- 3-Peut-être plus cher et compliqué à mettre en œuvre, notamment difficulté d'assemblage dans le froid pendant 6 mois environ. En effet les éléments constructifs sont apportés en pièces détachées, car chaque élément lourd et à apporter en 1 site initial loin des côtes. Dans le cas de Halley VI il a fallu plusieurs années pour assembler l'entièreté de la station

### Bilan critique :

Ainsi nous pouvons valider l'idée d'un principe modulaire qui présente plus d'avantage que de désavantages. Le Principe modulaire permet de créer une station flexible et capable de s'adapter en cas de situation d'urgence. Elle serait alors capable de faire face aux conditions d'Antarctique, en particulier du glissement de la banquise vers la mer, nécessitant la mobilité de chaque module. Si l'un de ces derniers finit par devenir non fonctionnel (incendie, problèmes techniques), le reste station peut continuer de fonctionner sans celui-ci. Il a été très donc nécessaire de faire face aux difficultés constructives, tel que le fabriqué sur place, car amener la station entièrement constituée représente un problème de poids pour les navires et un souci pour emporter la station au-dessus des côtes.

## **2 - POURQUOI L'AUTONOMIE DE 6 MOIS ? (CRITIQUE DE CONCEPTS C0 / C2 )**



### **Avantages :**

- 1-Permet des missions scientifiques à long terme : En particulier pour Halley VI, il s'agit de l'analyse à long terme du ciel, des gaz atmosphériques, des glaces en profondeur, des variations des températures (étude du réchauffement climatique), analyse des carottes de neige.
- 2-Economies sur les déplacements des personnes et des matériels beaucoup moins fréquents.  
Moins de matériels à déplacer à chaque intervention sur site.
- 3-Impact environnemental réduit
- 4-Indépendantes des situations socio-économiques et géopolitiques pendant 6 mois.

### **Désavantage :**

- 1-Entretiens des matériels de maintenance et scientifique très exigeant au risque de mettre en grand danger les personnes (exemple : Quand le bulldozer tombe en panne, inutilisable, il sera alors nécessaire de remplir les Tank de Fonte de la neige à la pelle. Chaque matin, un scientifique devra remplir le Tank pour permettre la station de fonctionner en continue.)

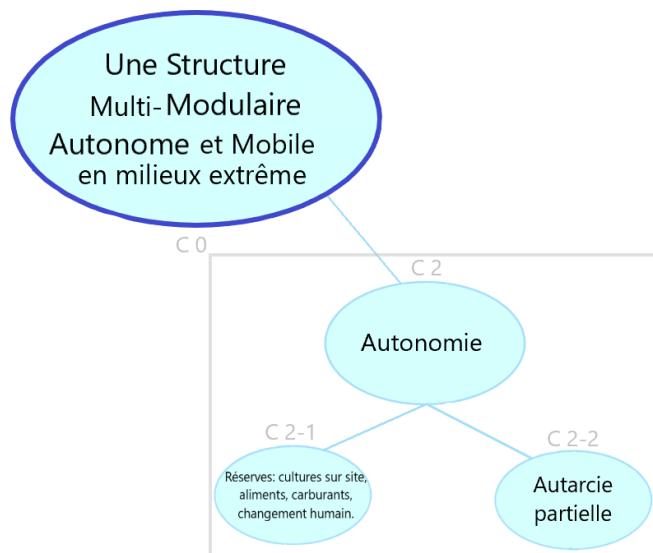
2-Plus coûteux qu'une installation temporaire plus légère et moins sophistiquée.

3-Plus fragile car plus complexe et susceptible d'augmenter les pannes.

#### Bilan critique :

Pas d'argumentation négatif rédhibitoire si on accepte le coût humain et financier de l'opération.

### 3 - COMMENT ASSURER « AU MIEUX » L'AUTONOMIE ? ( CRITIQUE DE C2 / [ C 2-1 + C 2-2 ] )



#### Avantages :

1-L'autonomie ne peut pas être totale : Car tout système contenant de la matière organique vivante a besoins d'énergie pour perdurer. Les humains occupant un système autonome ont besoins d'énergie

S'ils ne peuvent pas tout produire à partir de l'énergie solaire (comme la terre vis-à-vis du soleil) des apports d'aliments non produits sur place et de carburant (énergie concentrée se mettant en contribution avec l'oxygène de l'air locale) sont nécessaire. (Pas d'usage d'énergie nucléaire)

-Besoins de communication avec le monde extérieur. En conséquence l'autonomie est partielle.

2-L'Autarcie est partielle (Possibilité la plus envisageable)

-Améliore l'indépendance pour 6 mois environ jusqu'au changement de l'équipage scientifique. Cette période correspond aux mois d'hiver et donc d'inaccessibilité à la station.

-Empreinte écologique réduite sur un milieu fragile car le rejet de déchets ne serait pas régulé par la nature. Dans cette conception, on évite de multiples transports aller et retour pour approvisionner ou récupérer les déchets.

-Consommation d'énergie réduite.

#### **Désavantage :**

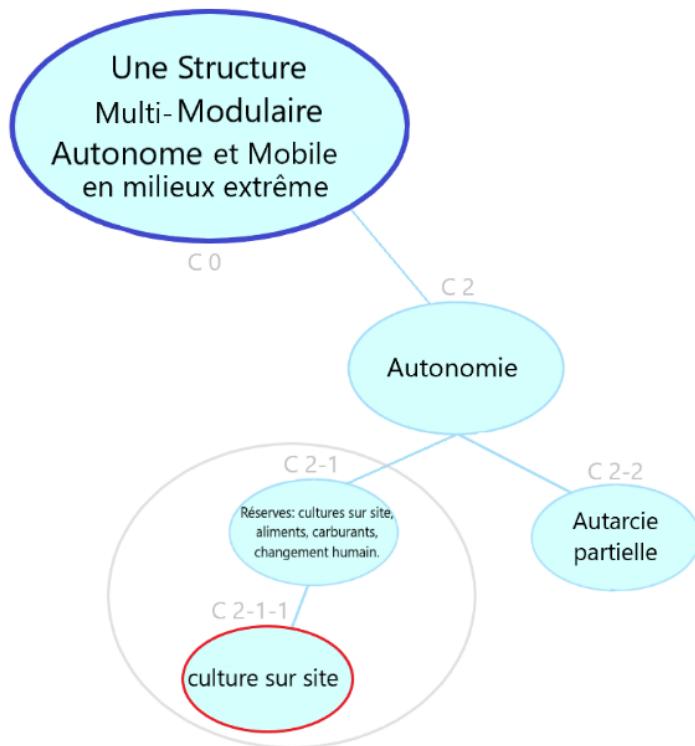
1-Le système Halley VI a toujours besoin d'être entretenu journellement par le personnel local et régulièrement (3 à 6 mois) par personnel à distance (pièce de répartition, carburant, amélioration, nourriture, service de santé ou de secours, changement des personnels de la stations)

-Nécessite plus d'aménagements des modules pour neutralisation des effets du froid, du vent, capter les ressources locales (neige, air froid). Également système de transformation de la ressource (transformation de neige en eau, puis transfert dans les unités mobiles).

#### **Bilan critique :**

La station Halley VI possède donc d'avantage d'intérêt à se devenir partiellement autonome, étant donné que les conditions climatiques de l'Antarctique permet un ravitaillement durant la période de l'été. Une autonomie complète serait probablement excessif pour un projet qui à les moyen de communiquer et d'être ravitaillé avec le reste du monde par avion ou bateau.

#### 4 - En Autonomie partielle, comment réduire la dépendance aux réserves alimentaires ? (CRITIQUE DE C 2-1 / C 2-1-1 ] )

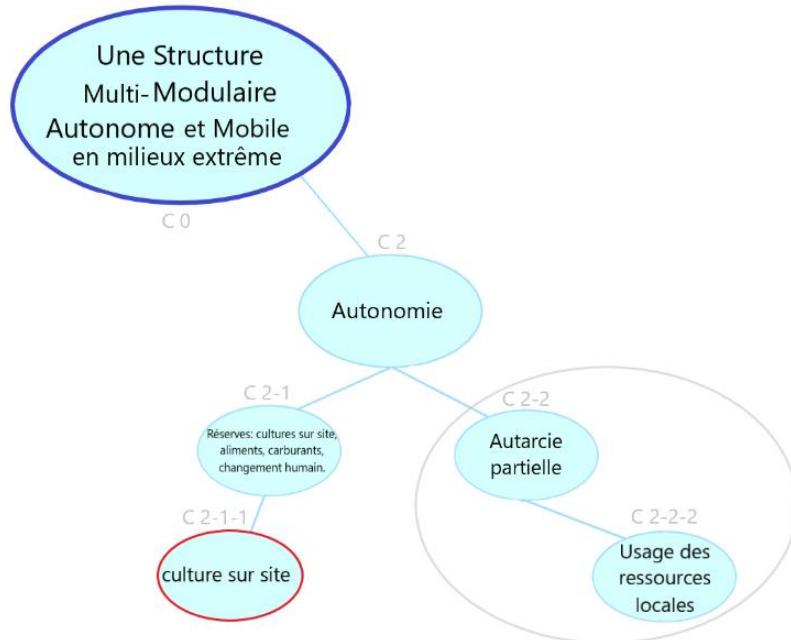


-Les concepteurs d'Halley VI ont rejeté cette solution.

-Contre argument: Il serait envisageable de créer des unités mobiles supplémentaires (également des modules) relativement larges et longs avec une couverture transparente très isolante, probablement doté de vitrages spéciaux, associés à des couvercles mobiles et articulés réfléchissant la lumière solaire (contrôlés par ordinateur automatisant et maximisant l'ensoleillement) sur des serres avec grand bacs peu profonds contenant des compostes idoines permettant la culture de plantes.

-Critique du contre argument : Cependant cette idée ne fonctionnerait pas pendant 9 mois de l'année et sa productivité serait probablement faible par rapport aux besoins de l'équipage. De plus son fonctionnement (probablement coûteux) correspond à la période où le ravitaillement de la station est possible en été, ce qui rend son utilité plus accessoire.

## 5 - QUE NÉCESSITE L'AUTARCIE PARTIELLE EN CE MILIEUX EXTRÊME ? (CRITIQUE DE C 2-2 / C 2-2-2 )



### Contexte :

#### 1) Les nécessités primaires pour le fonctionnement de la station HALLEY VI

-Comme nous l'avons vu précédemment, le système de Halley VI nécessite un apport d'eau pour boire, se laver, expérimenter et autres tâches essentielles. Celle-ci peut être fournie localement comme nous l'avons vu précédemment.

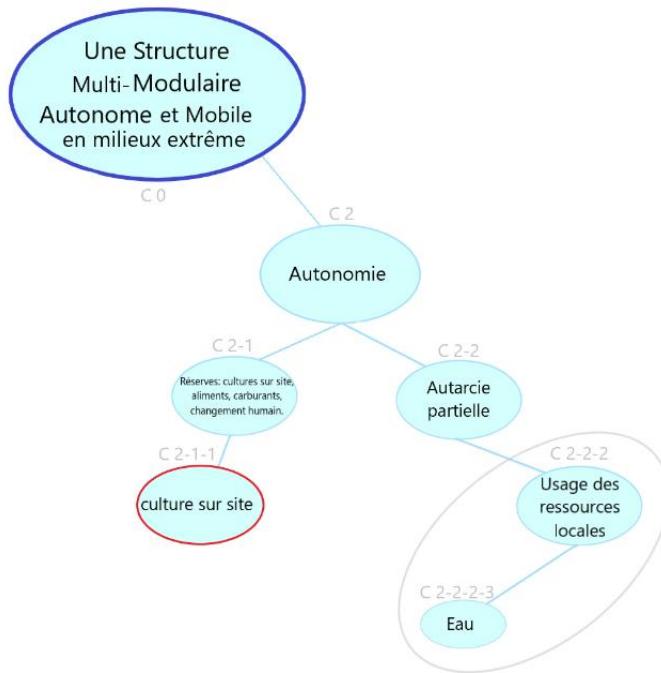
-La station exige également de l'énergie et des appareillages qui permettent sa transformation utile.

-Des systèmes d'analyses scientifiques autonomes mais capables de communiquer leurs résultats aux laboratoires du monde entier pour l'exploitation des résultats obtenus. Par exemple, la mission Halley a découvert en 1985 de la destruction progressive de la couche d'Ozone ayant eu des répercussions industrielles importantes. Notamment interdiction des aérosols fluorés.

#### 2) Éviter la perte d'énergie par l'isolation thermique des structures abritant les humains et les matériels scientifiques ou de distribution d'eau.

Isolation également contre des vents extrêmes accélérant la perte d'énergie et pouvant déstabiliser la structure modulaire de Halley VI.

## 6 - COMMENT GÉRER L'APPORT ET L'USAGE D'EAU ? ( CRITIQUE DE C 2-2 / C 2-2-2-3 )



Le concept de base étant d'exploiter la neige en abondance localement pour la liquéfier et la mettre en circulation dans la station HALLEY VI, nous pouvons imaginer que le fonctionnement vis à vis de l'eau, des plantes comme les "Skunk Cabbage" (ou *Lysichiton goetidus* ou le *Veratrum californium* ou le *Lysichiton Camtschatcensis*) ait pu être une source d'inspiration biomimétique à la réalisation du fonctionnement pragmatique de la station: En effet, cette plante a des feuilles libérant de la chaleur; celles-ci faisant fondre la neige qui la couvre (production d'eau et libérant la surface de ses feuilles pour recevoir l'énergie solaire). L'eau qui s'accumule dans la terre, faisant office de récipient collecteur. Elle alimente les racines de la plante à type de tuyau distribution et de pompage vers les centres d'utilisation de la plante.

On retrouve ce même fonctionnement avec l'usage du tank de fonte qui liquéfie la neige et la transmet au reste de la station pour alimenter les fonctions de consommation sanitaire ou alimentaire.

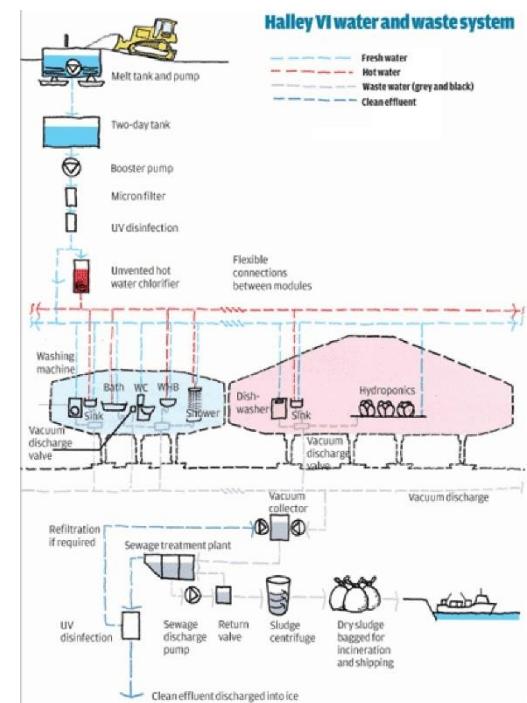


Illustration de HUGHBROUGHTON Architects présentant la récupération et le traitement de l'eau pendant et après usages



Ci dessus, la Skunk Cabbage est une plante qui survie à l'hiver en faisant fondre la neige qui l'entoure (Gauche, Source : The Local Revive. Droite source : FLNPS)

-La collecte de neige par des bulldozer pour alimenter les tank de fontes n'a pas, à ma connaissance, d'équivalent dans la nature hormis la notion de transport de matériaux solides d'un point à un autre par toutes sortes d'animaux (crabes, poisson, insectes, ...).

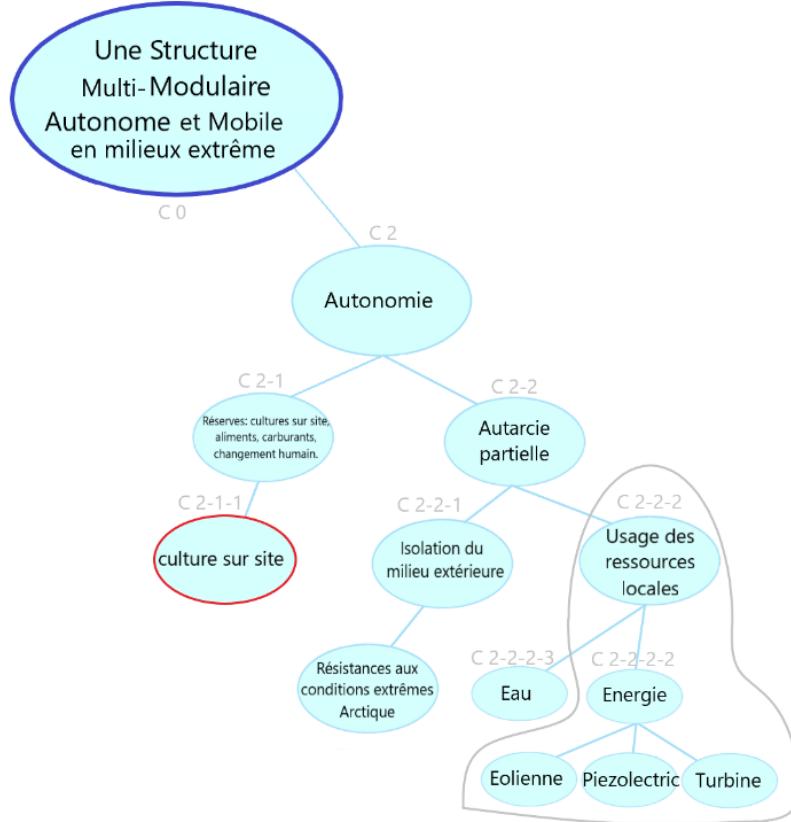


Ci dessus à gauche le Bulldozer chargé de pousser les masses de neige en direction du tank de fonte. A droite l'avions venant ravitailler l'équipage.  
Source : British Antarctica.

### Bilan critique :

Cette méthode est élémentaire mais contraignante en énergie et un temps de travail des équipes. Elle reste essentielle à la survie et au bon fonctionnement de la station. Elle était déjà en usage chez les esquimaux de façon plus primitives (à l'aide de puits et de sceaux) il n'existe pas tellement d'autre alternatives.

## 7 - La station Halley VI a besoin d'énergie pour fonctionner. Comment gérer l'apport et l'usage de l'énergie ? ( CRITIQUE DE C 2-2-2 / C 2-2-2-2 ] )



1) **Importation** de l'énergie sous la forme du carburant AVTUR par bateau puis par tracteur citerne. Celui-ci doit pouvoir être conservé malgré des températures pouvant atteindre  $-56^{\circ}\text{C}$ , dans le climat de l'antarctique. Cela inclus également des rafales de vents à 160 Km/h et donc l'impossibilité d'accéder et de ravitailler la station pendant 6 à 9 mois par avion ou bateau.

### 2) Usage de l'énergie :

-Le choix porté par les concepteurs est uniquement des micro-turbines (Capstone C30) très robustes. Celles ci sont productrice d'électricité à partir du combustible importé.

-Les turbines C-30 ont dans leur ensemble une très bonne capacité de production d'énergie électrique. Pour une mission scientifique (durée de 6 mois en période hivernale), elles sont capables de fonctionner environ 8000 heures sans maintenance et nécessite peu d'entretien. Nous avons vu qu'elles fournissent une puissance de 9,5 kW pour HALLEY Science et peuvent produire un maximum de 30 kW. D'où 60 MW sur une année, nécessitant 150 remplissages des réservoirs de carburant (transfert du carburant d'un container de réserve tempéré vers la réserve de la turbine pour la faire fonctionner).



Ci dessus, le container extérieure contenant du matériel de mesure scientifique ainsi que les turbines C30. Certains des modules de Halley VI possèdent leurs propres turbines C30 en cas d'avarie.

**Néanmoins Halley VI indique vouloir atteindre un objet d'émission Net 0**, en mettant au point des technologies qui lui permettrait de se passer des énergies fossiles. Les équipes de développements souhaiteraient s'orienter surtout dans l'éolien et les panneaux photovoltaïques.

Le procédé employé est fiable car vérifié lors des précédentes missions. Il est même redondant ce qui est rassurant pour les équipages possédant une turbine C-30 par Module. Elles peuvent également se ralyer entre les unes et les autres.

Cependant, les apports externes d'énergie fossile vont contre l'autonomie et contre le "Net 0", expression signifiant la volonté de ne pas utiliser d'énergie fossile (ou que sa production de CO<sub>2</sub> soit entièrement compensée par une fixation de ce même CO<sub>2</sub> en qualité égale).

Ainsi, dans cet esprit, nous pourrions regretter que d'autres sources d'énergie n'aient pas été mises à contribution comme nous allons en citer quelques unes liées aux sources d'énergies locales que sont les vents et la lumière solaire :

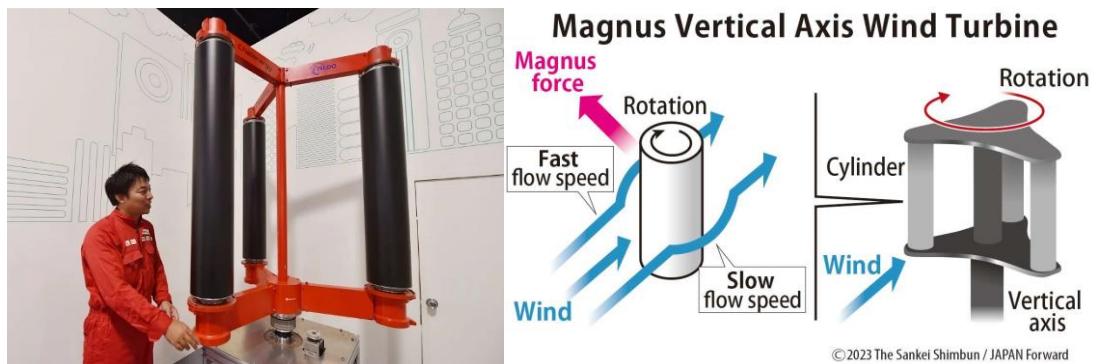
### **1-Panneaux solaires / usage de l'ensoleillement :**

Le défaut principal du procédé, c'est qu'il ne fonctionne moins de 6 mois par an et non quand on en a le plus besoins, pendant l'hiver austral. Il peut cependant être incorporé sur les surfaces verticales des modules sans être un obstacle au vent, donc non déstabilisateur. Le sujet est cependant à l'étude pour l'évolution d'Halley VI.

### **2-Eoliennes génératrices d'électricité / usage du vent :**

Je présente ici une connaissance traditionnelle (K) produite par Challenergy. Les éoliennes pourraient être très efficaces pour la captation de l'énergie du vent, ici très puissant. La difficulté est de créer des systèmes de pales qui supporteraient des vents parfois intenses (certaines rafales atteignant 150 Km/h) et irréguliers en rafales. Pour cela, les concepteurs pourraient s'inspirer des éoliennes-typhons en développement technique actuel au Japon par la société Challenergy. Mais il est nécessaire qu'elles soient conçues pour ne pas déstabiliser les modules et qu'elles ne permettent pas une accumulation de neige anormale. Elles pourraient faire l'objet de modules spéciaux plus larges, plus stables, à toit moins plat pour ne pas accumuler la neige.

Éolienne à typhon de Challenergy - Connaissance K traditionnel :



Ci dessus, un petit prototype de challengergy qui révolutionne le domaine éolien. La rotation de 3 cylindres dans un système de 3 axes permet de tripler la production d'énergie plus qu'une éoliennes classique et avec des rafales de vents extrême lors des typhons - Challenergy



Ci dessus, une éolienne à Typhon installé sur la côte Est du Japon – Geo (Géo reportage – Japon terre extrême)

### 3-Eoliennes génératrice de prise de force / vent :

Elles pourraient par simple transmission de la force du vent, grâce à des engrenages protégés, contribuer au pompage de l'eau ou à faire fonctionner d'autres systèmes mécaniques dans les modules. Cependant, l'intégration de ce type de technologie doit être bien réfléchie, étant donné

que la forme des modules est conçue pour dévier le vent. Leur ajout peut possiblement déstabiliser la structure et modifier l'aérodynamisme de la station.

#### 4-Usage de l'effet Piézoélectrique / vent :

Nous pouvons faire appel à une autre connaissance (K) spécial qui correspond à l'effet piézoélectrique, très rependu dans notre quotidien et que certaines industries en architecture ont tenté de penser comme revêtement de facade.

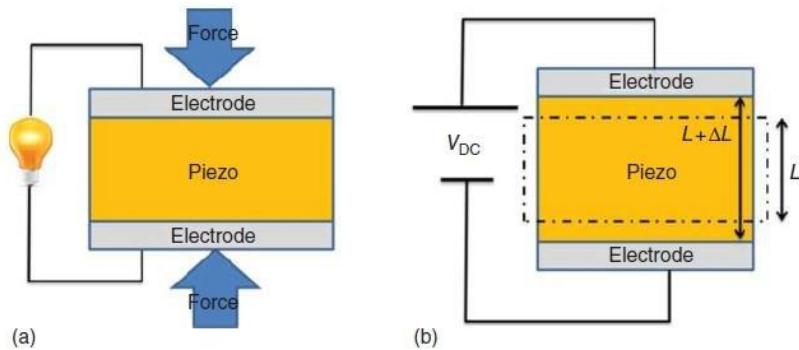


Illustration de l'effet piézoélectrique avec la compression d'un matériau piezo qui libère alors de l'énergie pour alimenter une ampoule – source ResearchGate

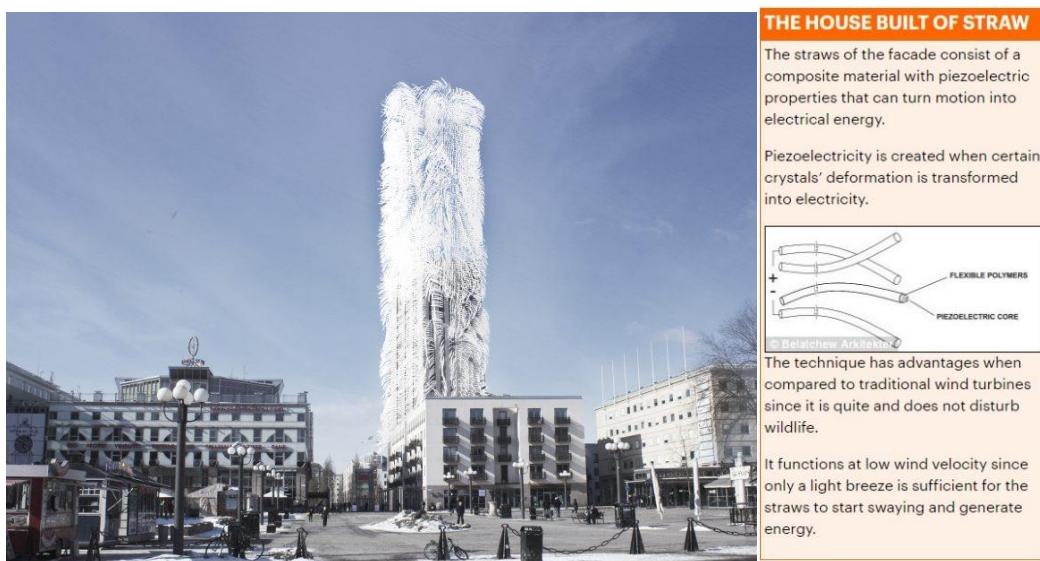


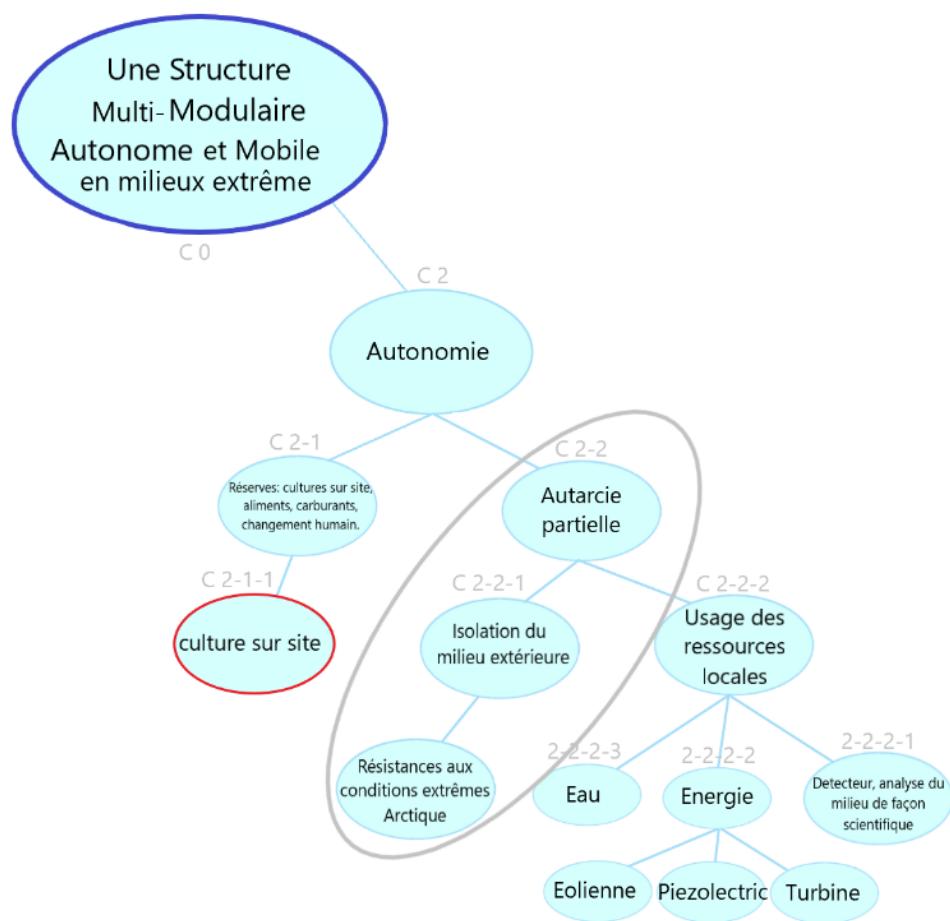
Illustration du Cabinet Belachew présentant une tour qui remplace la base d'un phare. Les structures structure composant la "fourrure" extérieure sont des assemblages de matériaux piézoélectrique qui mis en compression par la flexion du vent produisent de l'énergie.

A la manière du projet de la Tour "Strawscraper" par le cabinet Belachew, à construire à Stockholm, des tiges perpendiculaires aux parois des modules, intégrant une multitude de systèmes piézo-électriques sur leurs longueurs, qui, lors de leurs flexions sous l'effet du vent, produisent de l'électricité.

L'avantage est qu'ils seraient très efficaces au cœur de l'hiver. Leurs conceptions adaptées aux modules pourraient être intéressantes, toujours avec la difficulté majeure à résoudre de ne pas accumuler la neige sur les modules ni de les déstabiliser sous l'effet du vent.

Ces exemples montrent que dans l'état de l'art actuel, les choix réalisés pour Halley VI sont très pertinents mais que l'évolution technologique ouvre de nouvelles perspectives vers plus d'autonomie et de moindre empreinte écologique si toute fois ces nouveaux outils de productivité d'énergie ne sont pas fabriqués de façon trop polluante pour l'environnement et que le réemploi de leurs composants soient prévus dès leurs conceptions.

## 8 - POUR ATTEINDRE L'AUTARCIE PARTIEL, COMMENT PARVIENT-ON À ÉCONOMISER L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE AU BON FONCTIONNEMENT DE LA STATION HALLEY VI ? (CRITIQUE DE C 2-2 / C 2-2-1)



Les différentes parties qui dépendent de l'énergie sont les suivantes :

**-Éclairage :** La station économise beaucoup la lumière lors de son utilisation. Les pièces non utilisées sont éteintes, ainsi que les couloirs. Il s'agit alors d'économiser le plus d'énergie dans l'usage et les systèmes.

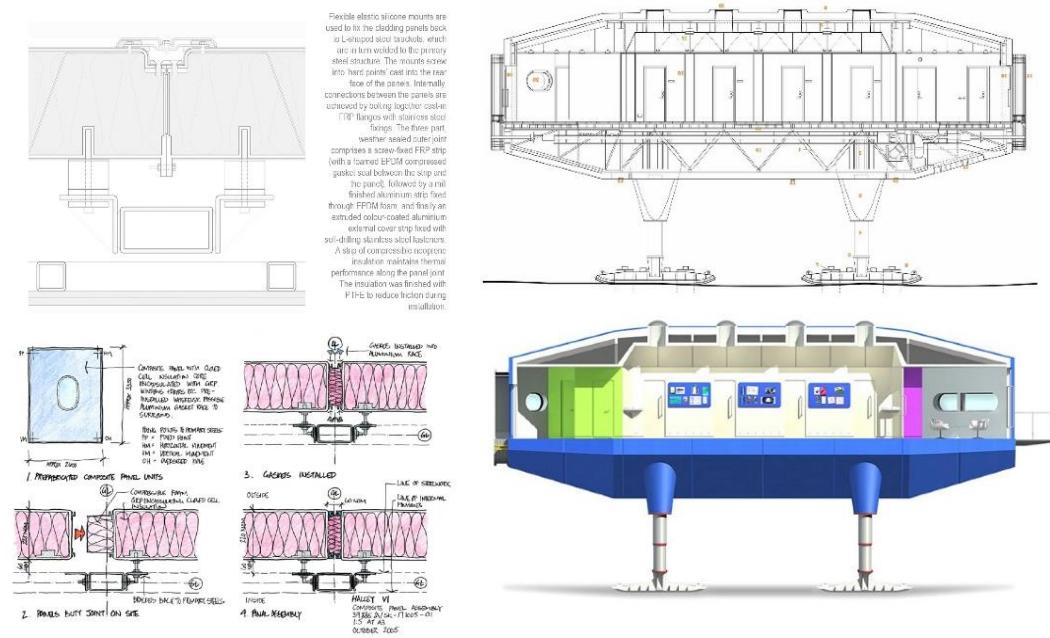
**-Chaleur :** Pour survivre dans un milieu où les températures atteignent les -56°C, il est primordial de conserver la chaleur dans les lieux les plus occupés et essentiels, comme les chambres, les laboratoires et les salles de réunion. Les couloirs en revanche ont moins d'importance au réchauffement. Les scientifiques doivent souvent fermer et ouvrir les portes coupe feu de celles-ci. Ainsi, il s'agit d'éviter les fuites d'air chauds, ainsi que les infiltrations d'air froid ou de neige.

**-appareil scientifique :** Il s'agit d'éviter la congélation ou l'infiltration de la neige qui pourrait se liquéfier dans les systèmes de communication. Les scientifiques transmettent régulièrement des résultats de données atmosphériques.

**-circulation de l'eau :** Les canalisations sont parfaitement isolées afin de conduire l'eau chaude jusqu'aux différents fonctions d'usage sanitaire ou autres.

**-renouvellement de l'air :** des systèmes d'aération double flux, à faible consommation, permettent le renouvellement de l'air tout en conservant la chaleur. Il existe cependant peu d'information à ce sujet dans la documentation concernant Halley VI.

#### Détail technique :



Coupe longitudinale de Boughton Architects et Coupe Détail démontrant de la profondeur technique de l'isolation de Halley VI.

Selon les concepteurs Broughton Architects, Les panneaux de bardages font 32'H x 11'W, 8-1/2 thick. Avec une valeur de 113 W/m<sup>2</sup>K et remplie de 7"PIR de case fermée pour l'isolation.

Des panneaux de revêtement sont placés sur des supports en acier en forme de L. Ces éléments en L sont soudés à la structure principale. Les connexions entre panneaux sont assurées par un boulonnage avec brides FRP et fixations en acier inoxydable. Il est installé une mousse EPDM comprimée entre la bande et le panneau.

Fenêtre : Le verre est triplement gazé et incorpore une couche de réflexion solaire. La forme du verre correspond aux contours des panneaux. Le compartiment rouge au centre de la station possède des verres d'isolation nanogel de Light-diffuse. Cela permet de réduire les reflets avec une transmission de 38% et une valeur d'UV de 0.6 W/m<sup>2</sup>K.

La connexion entre les modules est assurée par des membranes en silicones gonflable, isolées et flexibles.

Precedents / Halley VI Research Station

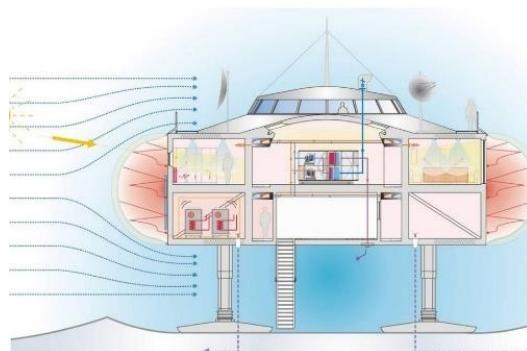


Illustration de HUGHBROUGHTON Architects présentant l'ensemble des systèmes d'aération et de chauffage, ainsi que d'éclairage. L'ensemble vise à être économisé.

#### Alternative possible grâce au biomimétisme :

Étant donné l'efficacité de l'isolation, il est alors question de voir si cette enveloppe est optimisable. Au vu des performances de Halley VI, non seulement cette enveloppe est efficace en termes d'isolation, mais aussi, celle ci pourrait devenir génératrice de chaleur pour l'intérieur de la station.

En effet, pour expérimenter les connaissances (K) spéciales biomimétiques à disposition, Je fais intervenir ici une référence concernant la fourrure de l'Ours polaire. En 2022, durant mon semestre 7, en cours de projet à l'école de Paris-la Villette, j'étais inclus dans un atelier qui traitait le biomimétisme comme source d'inspiration des designs. Au cours de ce projet, j'ai découvert que l'Ours polaire possédait une fourrure qui l'isole mais pouvait aussi capter l'ensoleillement pour stocker la chaleur.

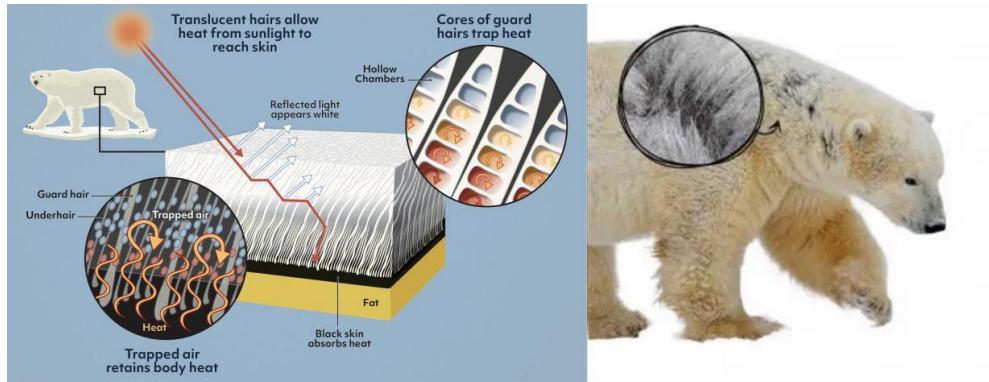


Illustration représentant le système de captation de la chaleur par la fourrure d'Ours (à gauche CANARIAS7). Il est possible d'Observer naturellement ce système en soulevant les poils pour voir la transition de blanc à noir (A droite, de QUORA)

La peau de l'ours est composée de différents épaisseurs protectrices : Une couche de gras, en profondeur, lui permet une première isolation contre le froid. Nous pouvons assimiler celle-ci à l'isolant des parois dans le projet Halley VI. Sa peau noire recouvre cette épaisseur, puis les poils font preuve d'un système de captation de la chaleur : Lorsque le soleil atteint la fourrure, la chaleur du aux rayonnements infrarouges est emprisonnée dans des cavités qui constituent l'intérieur de chaque poile. Ces poiles sont blancs en surface et noirs à leurs bases. Par cette gradation de couleur, la chaleur migre vers la base et y est emprisonné au contact de la peau par les sous poils, à la façon d'un duvet. Ainsi l'Ours peut se réchauffer efficacement au soleil tout en restant bien exposé.

Je peux donc émettre l'hypothèse qu'une technologie peut être mise au point pour reproduire ce système de la fourrure d'Ours. En effet, la station HALLEY VI est de couleurs blanche, rouge et bleu comme les couleurs patriotiques du Royaume-Uni en Antarctique selon les concepteurs de Brughton Architects. Au lieu d'avoir une apparence symbolique, la station pourrait être recouverte d'un dispositif de fourrure peu épais qui influencerai peut l'aérodynamisme de la station. Cette enveloppe poilue blanche en surface et noire à sa base permettrait alors de gagner en chauffage durant les jours ensoleillé (possiblement hors hiver) et économiser de l'énergie.

Pour justifier cette hypothèse, il existe des savoir-faire actuels qui exploitent déjà les capacités de la fourrure d'Ours en isolation. C'est le cas de la technologie dite de « Pulskin » au Pays Bas, mis au point par le designer Lindey Cafsia.

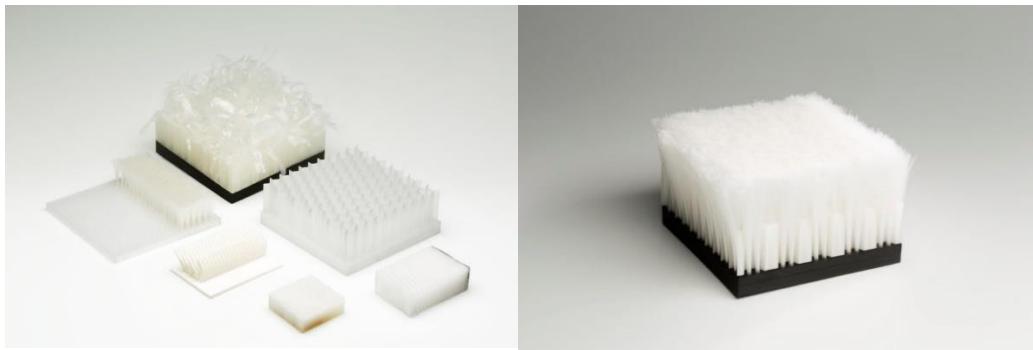


Photo par Lindey Cafsia présentant les divers prototypes d'isolation actuellement en vente et en accord avec les lois du gouvernement des Pays Bas. Ces isolant sont appliqués actuellement sur des maisons.

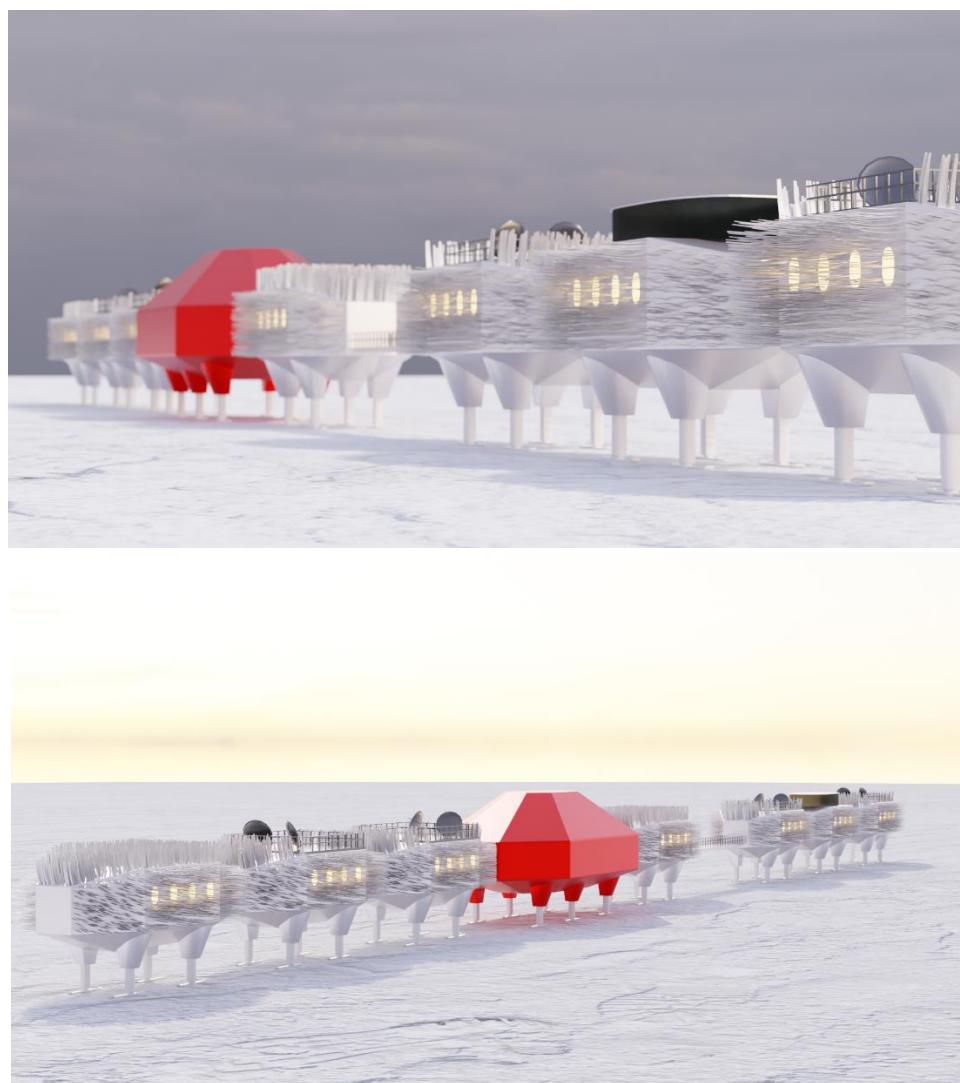
Cette technologie Pulskin a été approuvée par la Royal Academy of Art de La Haye au Pays Bas. Lindey Cafsia présente donc des isolants inspirés de peau d'ours en reproduisant ses propriétés de la même manière. Cette recherche a eu lieu pour rechercher des alternatives aux effets nocifs que présentent de nombreux isolants actuels. Ainsi, “*L'isolation est composée de trois couches. La couche extérieure est un blanc 'fur' fabriqué à partir de polyamide recyclable, qui ressemble à des cheveux tant à la vue qu'au toucher. Cette couche est translucide et a une fonction isolante, car les 'hairs' (cheveux) capturent et retiennent l'air qui y est stationnaire. La deuxième couche a une structure en nid d'abeille, ce qui rend le panneau rigide. Il absorbe également une partie du rayonnement thermique. La troisième couche est noire et creuse, remplie d'un matériau absorbant la chaleur et servant de tampon thermique. Ces deux dernières couches sont en PET et en PLA biosourcés. Le prototype de la peau a été imprimé en 3D.*” – Lindey Cafsia – Material District.

Ces isolants se vendent actuellement pour constituer les revêtements extérieurs de maison aux Pays-Bas. Certains modèles de ces isolants sont vendus par la société Sto. Cette référence fonctionnelle nous permet donc de justifier que l'utilisation de matériaux mettant en œuvre, par biomimétisme, les principes fonctionnels de la fourrure d'Ours polaire est possible et notamment dans le projet HALLEY VI. Il conviendra néanmoins de faire des tests de mise en œuvre de différents modèles pour identifier les plus adaptées au milieu extrême Antarctique.

Ainsi, l'ours étant un animal capable de survivre à des températures extrêmes dans l'Arctique pourrait être une source d'inspiration et d'optimisation de la technologie d'isolation de HALLEY VI face à son environnement très contraignant.

## HYPOTHESE D'OPTIMISATION DE HALLEY VI:

En résumé, de ces expérimentations de critique C-K, j'ai pu réaliser personnellement quelques rendus 3D qui permettrait de se représenter approximativement ce que donnerait les optimisations envisagées grâce au biomimétisme, si elles étaient incorporées à HALLEY VI. L'association des systèmes piézoélectriques, d'une part, et des isolations à type de fourrure d'Ours , d'autre part, pourraient donner à la station une apparence de fourrure extérieure, productrice d'énergie et réchauffante. Ces hypothèses se basent alors sur les savoirs existants et des expérimentations déjà réalisés, permettant alors d'attester leurs viabilités dans le monde de la construction. Cependant, une réflexion plus approfondie sur l'esthétique et les raccordements intégratifs de ces nouveaux systèmes est à réaliser pour que ces technologies soient mises en œuvres de manière plus fonctionnelle et efficace.



Rendus de modélisation BLENDER 3.1 réalisés par moi-même à l'issue de ces critiques C-K. Elle présente une station d'une apparence plus fourrure mais avec un intérêt fonctionnel en terme d'énergie et de chaleur.



Rendus de modélisation BLENDER 3.1 réalisés par moi-même à l'issue de ces critiques C-K. J'ai ajouté une nuance de couleur Noire à la surface module et des palmes piézoélectriques avec une gradation Noir vers Blanc pour être également des capteurs de chaleur.

### **3- Application de la théorie CK au projet MARSHA :**

#### **3.1-Contexte de MARSHA, une architecture relevant les défis.**

##### Histoire :

En 2003 La Nasa a reçu l'autorisation législative d'utiliser des fonds qui lui sont alloués pour organiser des concours avec des prix destinés au grand public et à des industries indépendantes afin de contribuer à l'amélioration des hautes technologies, en vue d'une futur mission spatiale d'exploration martienne en 2030. En 2014 donc commence alors un grand concours surnommé « The Centennial Challenges » organisé par la NASA elle-même et visant à développer les techniques spéciales d'impression 3D. Les entreprises participantes à ce concours pouvaient donc bénéficier des capacités exceptionnelles de l'industrie de la création 3D et devaient par là démontrer leurs capacités à imprimer leurs projets.

Parmi les entreprises participantes à ce concours, AI Space Factory s'est démarquée de tous les autres grâce à sa proposition de création d'un habitat vertical, imprimé par la méthode FFF (méthode par addition de couches superposés) et en utilisant le matériau local abondant sur Mars dénommé la régolithe. Son projet a été nommé MARSHA et celui-ci a remporté avec succès le prix de la phase 3 du concours avec une récompense de 500 000 \$. Ce projet a alors été très publié comme étant un exemple prometteur pour l'exploration martienne et comme étant profondément pensé.



Rendus par la société AI Space Factory présentant l'idée global d'une installation martienne construite à partir de Régolithe et imprimer en 3D. L'ensemble répond à une logique de verticalité et bénéficie d'un large paysage.



Ci-dessus, le R+3 (A gauche) est l'espace de divertissement de l'équipage. Le R+2 (à Droite) constitue le lieu de repos où chaque astronaute possède sa propre chambre qualifiée de « Pod » suffisamment grande pour installer un lit.



Ci-dessus 2 plans d'un habitat du projet Marsha. R+1 (à gauche) avec un laboratoire combiné à la cuisine et organisé dans une forme carrée. Le RDC (à droite) est le point d'entrée de la station que l'on réalise soit à l'aide de combinaisons d'astronaute soit à l'aide d'un rover pressurisé. Il inclut également un laboratoire sec.

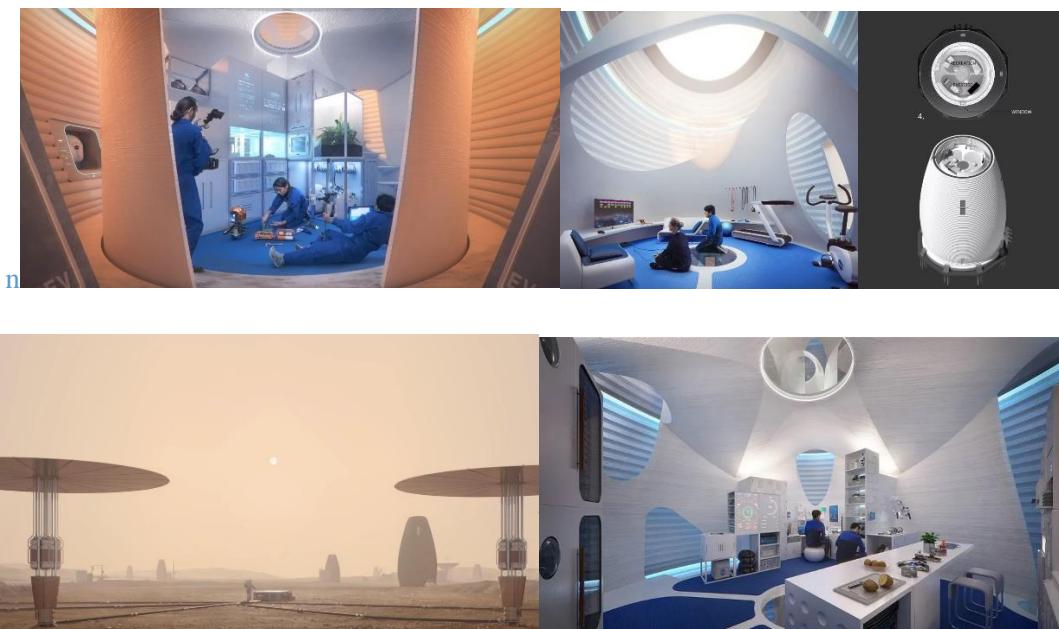
Le concours a été organisé en 3 phases différentes de 2014 jusqu'à 2018 :

- Dans la phase 1, les équipes sont évaluées sur leurs capacités à définir un concept architectural adapté aux missions qui seront menées sur Mars et sur leurs moyens d'imprimer ces habitats. La mission devait pouvoir se passer aussi bien sur Mars que sur la Lune.
- Dans la phase 2, les participants devaient ensuite réfléchir aux matériaux à utiliser pour être imprimés. La Nasa avait imposé, comme critère essentiel, que les matériaux utilisés devaient être issus du milieu naturel où l'impression devait avoir lieu (un matériau martien sur Mars) et que le système d'impression soit entièrement autonome. Les participants avaient le choix entre une imprimante 3D à portique pour une impression à partir de rails, permettant au bras de bouger dans les 3 axes, ou une

imprimante à bras robotisé. L'équipe de Marsha a opté pour une imprimante à bras robotisé, en s'inspirant d'un prototype du MIT rendu autonome grâce à des panneaux solaires.

- Dans la phase 3, débutée en 2018, l'épreuve finale consistait à imprimer à l'échelle le projet établi. Il était alors mis à disposition des équipes les imprimantes de leurs choix (sur portiques ou bras robotisé). Aussi, les équipes devaient opérer par BIM pour imprimer leurs habitats, en limitant au maximum leurs interventions directes sur le modèle au cours de l'impression 3D. Le temps d'impression était subdivisé en deux périodes : Au bout de la première période, 60% du volume du modèle devait avoir été imprimé. À la fin de la deuxième période, 100% du modèle devait avoir été réalisé. L'équipe de MARSHA a fait face à un autre projet très apprécié, celui de SEARCH+. Par la suite, pour les départager, les deux modèles ont subi deux épreuves de force pour vérifier la solidité de leurs réalisations : Un premier test était celui de placer un émetteur de fumée colorée à l'intérieur de la structure afin de vérifier l'étanchéité aux gaz de son enveloppe. Si de la fumée s'échappait des parois de l'habitat, alors cette structure était mal notée pour son impression. La seconde épreuve était un test de compression verticale, simulant les micrométéorites pouvant percuter cette habitation sur Mars ou sur la Lune ; ainsi, un tractopelle devait comprimer à plusieurs reprises la structure par le haut de celle-ci. Marsha a résisté avec succès à chacune de ces épreuves et s'est vue recevoir le premier prix de cette troisième phase d'impression.

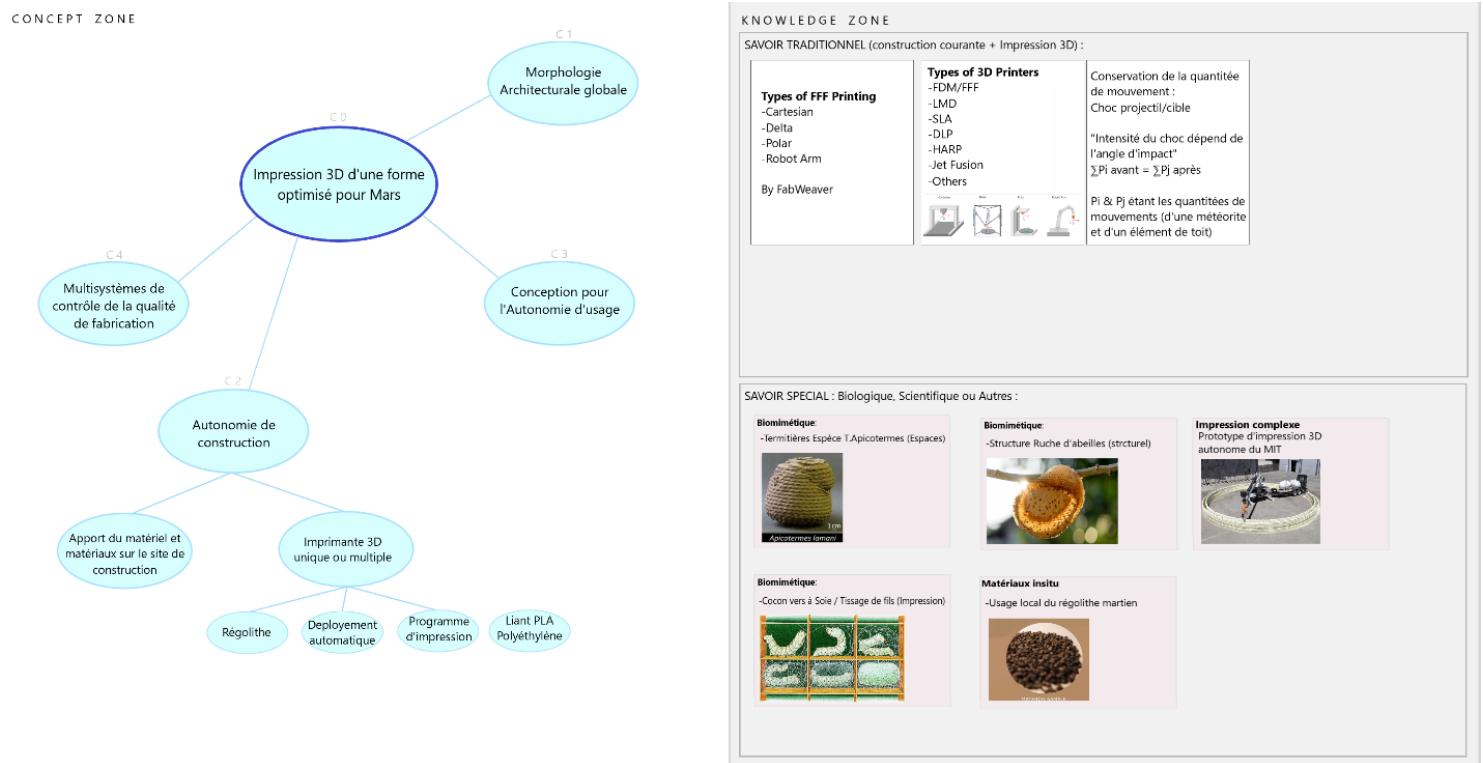
Le projet Marsha est présenté alors avec des rendus 3D montrant le mode de vie possible de ses occupants. Marsha se veut être un projet innovant, imprimable de manière autonome avec une seule imprimante à bras robotisé et présentant une grande modernité pour des astronautes qui pourraient l'habiter.



Ci-dessus, un rendu présentant les scientifiques en action. Source : AI Space Factory.

### 3.2 Expérimentation de la Spéculation C-K sur le projet MARSHA

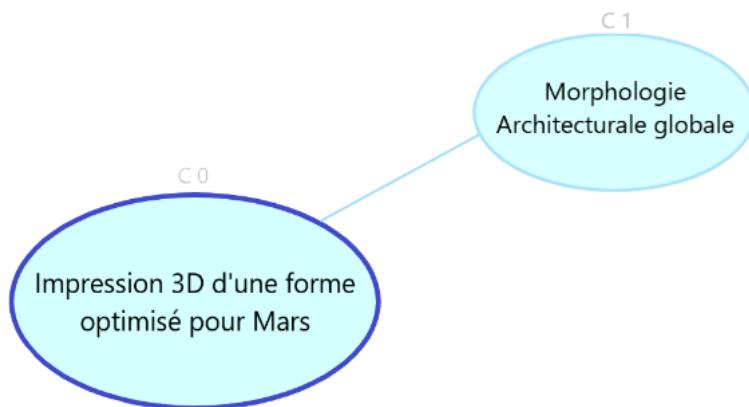
Ainsi, il peut être intéressant dans le contexte de ce mémoire, de vérifier si une utilisation rétrospective de la théorie C-K peut permettre de vérifier ce projet avant même que celui-ci ne soit construit. Ceci permettrait alors de s'assurer de la viabilité d'un projet encore en plan et en 3D avec une pensée établie.



Ci-dessus, différente modélisation de AI Space Factory créer afin de tester la courbure la plus efficace contre les rayon cosmique.

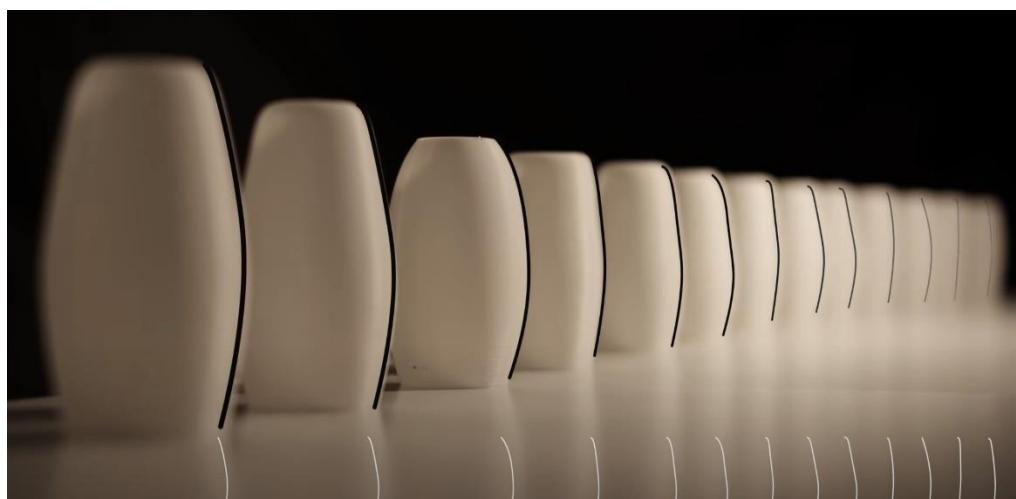
### **3.2.1- QUEL EST LA MORPHOLOGIE CONSTRUCTIVE LA PLUS ADAPTÉE POUR UNE PREMIÈRE INSTALLATION D'UNE STATION SCIENTIFIQUE SUR MARS ?**

**( CRITIQUE DE C0 / C1 )**



-Une station Martienne doit impérativement satisfaire certaines exigences locales très contraignantes notamment la présence d'une irradiation cosmique importante, de pluies de micrométéorites fréquentes et d'une atmosphère irrespirable pour l'homme et très peu dense (95% CO<sub>2</sub> ; 2,5 % N<sub>2</sub> ; 0,13% O<sub>2</sub> et 1,6% d'Argon). Ceci exigera donc des parois de la construction à la fois étanche aux gaz, réfléchissante ou absorbante les rayons cosmiques et suffisamment solide pour résister aux micrométéorites ainsi qu'aux variations de pression entre les milieux externes et internes, et ceci avec un coefficient de sécurité important.

-Les formes volumiques classiques (cubes, parallélépipèdes rectangles etc...) et beaucoup de formes ayant des angles aigus ou de grandes surfaces planes horizontales sont souvent inadaptées pour résister à ces contraintes environnementales. De plus la structure doit pouvoir subir les variations élevées de températures entraînant des dilatations importantes des parois.



Ci dessus, différente modélisation de AI Space Factory créer afin de tester la courbure la plus efficace contre les rayon cosmique.

### **Avantages :**

-Le projet Marsha répond astucieusement à ces contraintes par un concept cylindroïde, un peu de la forme d'un tonneau verticale, offrant peu de surface au sol, une bonne déflexion des rayonnements et des micrométéorites la percutant par le dessus, ainsi qu'une capacité à supporter les dilatations thermiques ; son efficacité adaptative est liée intimement à la verticalité de ses parois, capables de dilatation grâce à la nature des matériaux utilisés. L'ensemble est solidement ancré au sol.

### **Intérieur de Marsha :**

**Avantages :** L'aménagement intérieur est plutôt bien conçu mais sera développé d'une autre manière à l'avenir.

**Désavantage :** Les ouvertures vitrées en polycarbonate, de quadruple épaisseur, réduisent énormément le champ de vision extérieur, d'autant plus que les doubles parois de la structure sont très épaisses et que ces fenêtres sont très peu larges à la façon des meurtrières des châteaux forts.

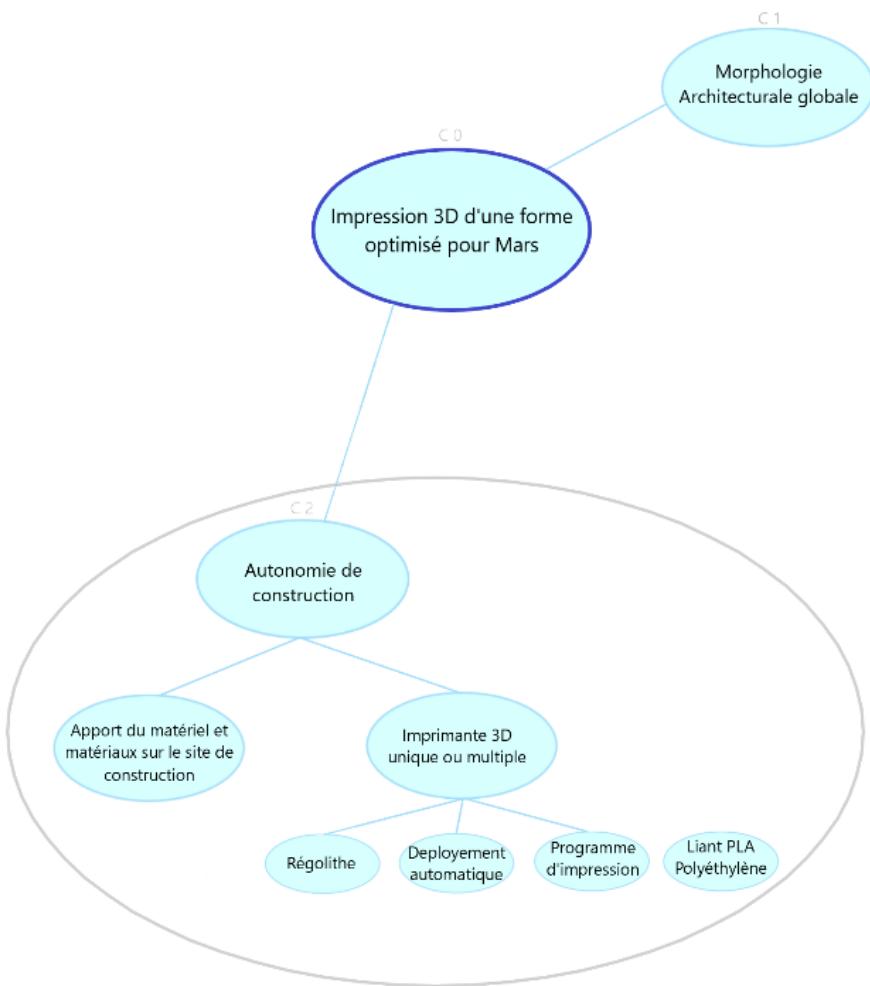
- On ressent une impression d'obscurité global, la lumière ne parvenant pour l'essentiel que d'une coupole transparente au sommet de l'édifice. Les concepteurs ont alors rajouté des lumières artificielles pour éclairer les zones ombragées.

-L'extensibilité de ce projet paraît très limitée à part la création d'autres structures de même type à son voisinage. De plus, aucun moyen de liaison entre plusieurs constructions n'est prévu, hormis l'usage d'un rover. En cas d'avarie majeure, il n'existe pas d'échappatoire vers une autre structure de repli.

### **Bilan critique :**

Ceci peut faire douter de la réelle viabilité de ce projet même si sa constructibilité est possible. Notre analyse met en évidence certaines limites qu'il serait souhaitable de dépasser sachant que les futurs habitants de ces habitats y sont théoriquement pour relativement longtemps.

### **3.2.2 - COMMENT LE PROJET MARSHA ENVISAGE-T-IL DE RÉALISER L'AUTONOMIE DE CONSTRUCTION DE SON HABITAT MARTIEN ? (CRITIQUE DE C0 / C2 )**



### Impression 3D d'une forme cylindroïde :

**Avantage :** Les concepteurs du projet Marsha ont imaginé de transporter par fusée transplanétaire une imprimante 3D grand format avec un bras central montant à environ 20m de haut et pouvant réaliser des objets d'une largeur de 10m. Elle devrait être très pliable pour atteindre une grande compacité pour son transport. Elle serait mobile sur 6 roues et autopilotée pour atteindre son site de création. Il est à noter l'avantage que les matériaux utilisés sont recyclables.

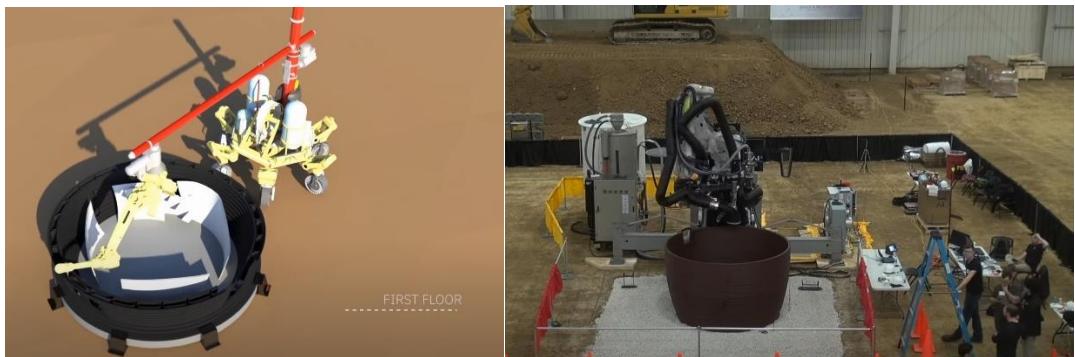
**Désavantages :** Cependant, il n'a été réalisé en laboratoire qu'une imprimante montant à 6m de haut environ avec une largeur de construction de 3m. Il a obtenu un franc succès, dans la phase 3 du CENTENAL CHALLENGE PRINTING de la NASA pour l'impression d'un modèle réduit ayant une bonne résistance à la compression verticale lors des épreuves de solidité. Cependant, sa résistance à la compression horizontale semble faible (Destruction très facile par un tractopelle à la suite de l'épreuve).



Ci dessus : Impression du prototype pour la phase 3 du concours Centenal Printing de la NASA (à droite). A la fin des épreuves du concours un tractopelle détruit le prototype par une poussée à l'horizontal, ce qui peut poser question sur la résistance horizontal de la matière.

#### Impression de matériaux :

**Avantage :** En effet, nos concepteurs ont choisi d'utiliser de la régolithe, matériau en abondance sur le sol martien mais qui doit être prétraité pour obtenir une granulométrie adaptée à l'imprimante (grains de diamètres d'environ 0,17 micron). Ce régolithe est riche en divers oxydes métalliques et métaux mais sans carbone.



Ci-dessus la représentation 3D de l'imprimante par AI Space Factory inspiré du prototype autonome du MIT (à gauche). Cette disposition est en contraste avec la réalisation testée en 2018 avec une imprimante fixe nécessitant beaucoup de coordination et de réserves (à droite).

Le liant du régolithe choisi est du PLA (Acide polylactique renforcé avec des fibres de basalte) qui est un thermoplastique recyclable résistant à la traction. Les proportions de liant par rapport au régolithe ne nous sont pas connues.

Enfin, l'ensemble des systèmes doit être entièrement piloté par des ordinateurs locaux, donc avec des systèmes de contrôles automatisés de la fabrication car les échanges de communications par radiofréquences avec la terre vont d'environ 4 à 20 minutes dans un seul sens. Donc de 8 à 40 minutes pour un ordre et la réponse à cet ordre, selon les positions relatives de la Terre par rapport à Mars dans leurs cycles autour du Soleil.

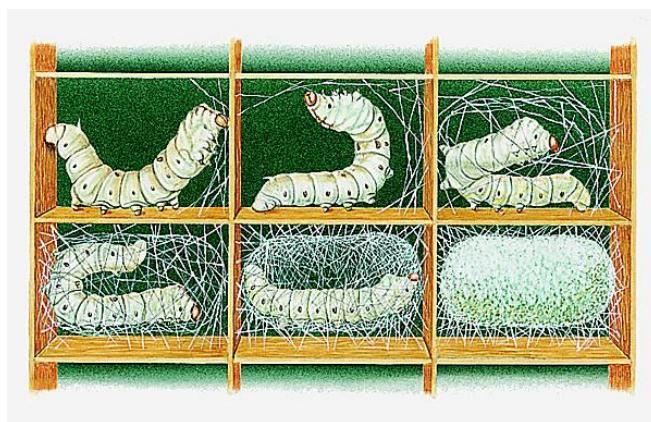
#### Faisons Appel à 3 connaissances biologique spéciale (K):

Il est alors intéressant ici de mettre en relation ces systèmes d'impression 3D avec quelques références biologiques qui trouvent leurs places en biologie, dans le monde des insectes, avec

la high tech. J'introduit ici les insectes qui ont développé l'art de concevoir des structures en collectant des matériaux locaux et en réalisant des formes très stables et habitables.

Chez les fourmis, tout comme chez les termites et les abeilles, il existe une partie importante des individus constitués d'ouvrières bâtieuses et une très petite portion des individus liée à la reproduction et à la protection de l'espèce sur un territoire. Cette structure de société est un système qui permet d'organiser la construction durable d'un habitat avec un certain nombre d'individus ayant chacun un rôle spécifique.

Comme vu dans le cas du projet Marsha, il se trouve une seul imprimante pour la réalisation général du village Martien. Afin d'éviter une paralysie générale du projet, il est possible d'imaginer que s'il existait plusieurs machines d'impression, les risques de panne paralysante seraient diminués. Cela induirait également que la mise en œuvre du projet pourrait être plus flexible temps pour la collecte des matériaux que pour l'impression ou d'autres rôles attribués à chaque machine qui pourrait être multimodale.



Ci-dessus : Les connaissances spéciales K comme mécanisme biologique. A gauche, une fois que Les vers à soie ont terminé de collecter leurs matières alimentaires, ceux-ci tissent leurs cocons de forme ovulaire, similaire à la structure de Marsha (source : )



Ci-dessus, une ruche de thermique Apicoterme, construite par les ouvrières à partir de la terre local. La ruche se compose d'étages et même d'escaliers pour thermites, proche du principe de Marsha (source : Guy Theraulaz/CNRS, CRCA, CBI, Toulouse 2024)



Ci-dessus, une ruche d'abeille en formation, constitué par un rayon suspendu à une branche. Celui-ci est autoportant, structuré par un système d'hexagones (source : Pollinis 2024)

Nous pouvons voir comment relier un nouveau principe d'impression avec ces trois références biologiques. En particuliers avec les termites de l'espèce Apicoterme Lamini en Afrique. Les ouvrières collectent de l'argile de leur environnement et la mélange à leur salive. Le matériau de construction ainsi fabriquée sert alors à créer leurs habitats soit sous terre, soit dans des cavités, soit dans un endroit où le sol est facile à travailler. Leur habitat à une structure en forme de poterie, contenant de multiples étages et même des escaliers. Ces constructions ont alors été qualifiées d'architectures complexes par le National Academy Of Science. Le nid de thermite ainsi construit possède également une organisation interne avec des cavités dédiées à l'élevage des larves. «... Le fait observé expérimentalement que les phéromones sécrétées par les termites servent d'indicateurs d'une activité antérieure dans l'environnement et fournissent un signal pour construire une action » - "Self-organized biotectonics of termite nests," par Alexander Heyde, Lijie Guo, Christian Jost, Guy Theraulaz, and L. Mahadevan.

Le principe est le même chez les abeilles. Seules les ouvrières jeunes sont capables de produire de la cire. Celles-ci changent de mode de travail en cours leur vie, en commençant d'abord par produire de la cire dans leurs 21 premiers jours de vie. Tandis qu'à la suite de leurs croissances et de l'épuisement de leurs glandes sécrétrices de cire, elle s'envolent pour aller collecter du pollen. Pour produire cette cire, leurs ainées plus âgées vont produire du miel et le leur donner pour alimenter les glandes des abeilles cireuses. Pour réaliser des rayons à structure hexagonale dans la ruche, les jeunes ouvrières consomment le nectar et le miel leur permettant de synthétiser des flocons de cire qu'elles façonnent ensemble pour produire les hexagones des rayons. Ainsi les abeilles produisent une structure très stable, capable d'être suspendue – La Fabrique de l'abeille - Carla-Bayle 2024.

Dans le cas du vers à soie, on retrouve également un système de collecte de matière pour produire. Grâce à sa mobilité sur de longues distances, le ver est capable de consommer suffisamment de matière organique pour se constituer un cocon, le moment venu. Il construit de manière analogue à celle qu'une imprimante 3D pourrait le faire avec un fil de soie.

Dans une hypothèse d'optimisation inspirée de ces trois références biologiques, nous pouvons imaginer que le système d'impression 3D pourrait ne pas être constitué d'une unique machine mais de multiples machines. La robotique pourrait alors être utilisée afin de réalisé différents robots capables de collecter chacun de la régolithe et de devenir eux-même des machine d'impression, tel le sont les termites dans leurs communautés. Il est imaginable aussi en pensant aux systèmes des abeilles, que certains robots autonomes seraient dédiés à une tache plus spécifique, tandis que d'autres pourraient être des robots imprimeurs que les robots collecteurs viendraient imprimer.

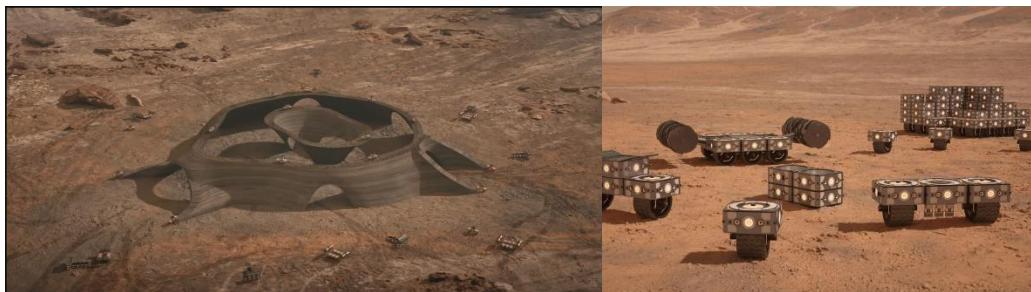
Cette méthode pourrait avoir alors pour avantage de réaliser des habitats mais aussi de réutiliser ces robots pour répondre à d'autres taches comme le transport ou des missions d'exploration.

Cependant, l'idée possède une limite qui est la question du transport. Cela serait techniquement difficile d'importer un ensemble de robots en plus d'autres matériels et matières premières. Ainsi on peut émettre l'hypothèse que si un ver à soie est capable de produire sa propre enveloppe, ou qu'une reine puisse produire ses propres ouvrières, il est possible d'imaginer qu'un robot unique de grande taille soit capable de produire de nombreux petits robots dédiés à différentes tâches ou multitâches.

Pour justifier ces hypothèses alternatives, il faudrait faire référence à l'état de la technologie actuelle : Dans cette logique, on peut penser aux drones coordonnés que met en place la société Amazon en 2024 pour envoyer des colis chez les particuliers depuis un dirigeable. En effet, ces principes d'un robot principal coopérant avec un robot secondaire existe déjà dans le domaine de l'exploration martienne.

Par exemple, le dernier Rover Perseverance a été envoyé sur Mars en 2020. Il possède, pour ses missions d'exploration, d'un petit hélicoptère nommé Ingenuity. Cet hélicoptère peut voler en tout 127 minutes dans l'atmosphère martienne, pouvant s'élever à une hauteur maximal de 24 mètre pour 70 vols au total en 2024. Il est principalement utilisé pour prendre des photos en petite altitude.

Il est justement intéressant de noter que, dans le même concours du Centinial Challenge Printing de la NASA, l'équipe HASSELL a justement réalisé une proposition où de multiples robots seraient mobilisés pour constituer un habitat martien à partir de régolithe. Dans une première phase, ces robots seraient capables de remplir chacun les mêmes taches : collecter de la matière première (régolithe), se transformer chacun en imprimante 3D, s'assembler et se coordonner entre eux pour accomplir diverses taches. Ce processus a également été repris par le cabinet d'Architecte de Norman Foster dans une autre proposition.



Ci-dessus, la simulation 3D présentant un habitat constitué par des robots d'impression pendant 3 ans. Ces robots de forme cubique peuvent ainsi s'inter-connecter et serviront de moyen de transport après avoir eu leurs activités d'imprimantes 3D (source : Hassell 2018)



Ci-dessus le rover Perseverance ainsi que son hélicoptère Ingenuity (source : Hassell 2018)

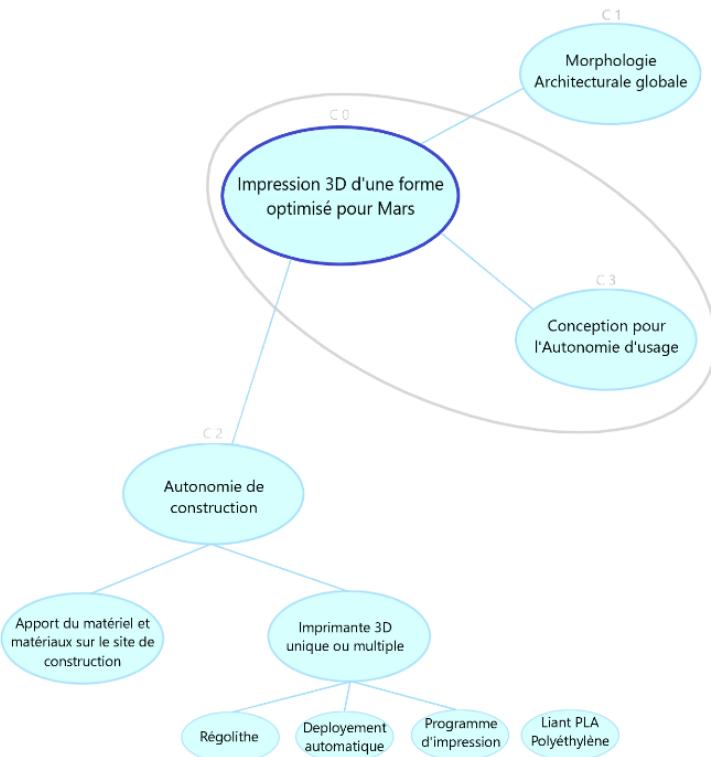
Le domaine de la robotique est un secteur en pleine évolution et il est possible de croire qu'à l'avenir des technologies seraient capables d'accomplir ces tâches de la même manière que des abeilles ou des termites coopératives. De plus, cette recherche a déjà commencé dans l'université d'Ohio avec l'idée de développer des drones capables d'imprimer des rovers de plus petites tailles qu'eux, à partir d'une nouvelle méthode d'impression laser par photopolymérisation. Ces chiens trois de deux

#### **Bilan critique :**

Si on se met en situation réelle, cette imprimante devra être volumineuse donc d'un transport difficile. Elle pourrait être acheminée en plusieurs parties et s'auto-remonter sur place. Ceci rend sa structure plus complexe voire plus fragile. Aura-t-elle les moyens d'auto-opération ? Si elle est unique, tout le projet peut s'effondrer sur la moindre panne (faux contact), s'il n'existe pas de redondance de réparabilité.

La préparation et notamment le calibrage des grains de régolithe n'est pas explicitement étudié dans cette expérimentation et pourrait présenter des problèmes inattendus. Des expérimentations en réel sur Mars seront probablement nécessaire.

### 3.2.3 - LE PROJET MARSHA EST-IL ASSEZ ABOUTI POUR ENVISAGER UNE AUTOMATISATION D'USAGE ? ( CRITIQUE DE C0 / C3 )



**Avantage :** Vis-à-vis de l'isolation du milieu extérieur, tant en ce qui concerne l'atmosphère martienne irrespirable (95% CO<sub>2</sub> ; 2,5 % N<sub>2</sub> ; 0,13% O<sub>2</sub> et 1,6% d'Argon) que des températures très variables et de grandes amplitudes (-116°C à 20°C), le projet Marsha a prévu une double peau étanche séparée par une couche d'air entre la paroi extérieure et la paroi habitée intérieure. La couche extérieure en régolithe et l'implantation au sol dilatable semble adaptées pour subir les dilatations et rétractions dues aux changements de températures. La couche intérieure semble elle-même en régolithe mais ce point n'est pas clairement spécifié dans la documentation. Elle est peut-être hypothétique pour l'instant. Évidemment des tests en milieu réel seront nécessaire pour prouver sa réelle efficacité.

**Désavantage :** Les images illustrant l'intérieur du projet Marsha, présentées pour valoriser le projet semblent très esthétiquement belles mais peu adaptées à la vie réelle sur Mars : Pas de garde-corps aux escaliers en regard d'un grand espace vide. Espace de la cuisine pas assez représenté et semblant très succinct. Espace d'expérimentation scientifiques assez étroits, il en est de même des représentations en 3D du travail au sol. L'espace de culture est sans commune mesure avec les dimensions attendues pour alimenter 4 personnes au cours d'un temps relativement long (plusieurs mois).

On peut imaginer et c'est ce qui est exposé sur une image conceptuelle de l'implantation de Marsha que les sources d'énergie seront à distance du module habitable, à type de panneaux solaire voire de générateurs nucléaires. La production et la régénération de l'eau potable, des

gaz respirables ( $O_2 + N_2$ ), l'alimentation au long court, les éléments de communications transplanétaires et les problèmes de vie sociale induits par l'expédition sur Mars ne sont pas évoqués de façon significative dans ce sujet.

#### **4 - CONCLUSION :**

À travers ce mémoire, je dirai qu'il m'a été possible d'identifier les enjeux d'une architecture dans un contexte très contraignant, comme le sont l'Antarctique ou la surface planétaire de Mars, avec leurs climats et les besoins pour la survie d'une équipe scientifique. Pour commencer, l'usage rétrospectif de la théorie C-K permet donc de questionner les fondements des prises de décision vis-à-vis de l'autarcie pour chacun des projets étudiés. Ceci permettant alors de tracer le cheminement intellectuel ayant permis les prises de décisions des concepteurs, depuis l'idée générale directrice et les objectifs précis du projet, jusqu'aux solutions techniques mises en œuvre dans le détail. En progressant dans ce cheminement de la pensée architectural, à travers des arbres de concepts, on peut à un certain moment faire intervenir des connaissances (K) biomimétiques ou traditionnelles qui aident à repenser notre propre vision de l'architecture extrême.

A partir de cet instant, la critique C-K permet trois choses essentielles :

La critique C-K aide à revoir les bases des projets architecturaux en précisant clairement les raisons de base d'un choix ou d'une prise de partie de la part des concepteurs. Elle prend en compte les aspects et les limites techniques, climatiques et innovatrices. Cette critique aide également à apporter un nouveau regard dans les innovations, notamment en choisissant le biomimétisme comme source d'inspiration très développée pour l'intégrer ou penser autrement à un point spécifique du projet.

Dans le cas d'un projet ayant été réalisé comme HALLEY VI et sur la base de références de biomimétisme, la critique C-K permet de proposer de nouveaux chemins de développement qui étendent les capacités du projet architecturale. La confrontation de système biologique interagissant avec les solutions techniques trouvées par les concepteurs au moment de la conception initiale du projet, mène à élargir sa pensée. Notamment, la référence à des animaux vivants eux-mêmes dans des milieux extrêmes, comme l'ours polaire, prouve que des mécanismes biologiques sont capables de remplir les critères nécessaires à la survie tout comme l'enveloppe de la station HALLEY VI. Selon les résultats obtenu via la critique C-K, la station Halley VI pourrait être encore plus performante quant à son enveloppe : celle-ci pourrait devenir productrice d'énergie par le vent et plus isolante voir réchauffante. Ceci nécessiterait de dépasser la dimension purement symbolique des couleurs actuelles de la station. Ces améliorations seraient justifiées par l'existence de technologies déjà inspirées par la fourrure d'Ours et qui prouve que le domaine de connaissances en biomimétisme pour l'Antarctique est déjà suffisamment avancé pour commencer à produire des technologies qui

pourraient améliorer la station. Néanmoins Halley VI reste une station très innovatrice pour son temps, son architecture modulaire et mobile sont des nouveautés très prometteuses pour l'avenir des explorations polaires.

Pour le cas du projet Marsha, la critique C-K a démontré qu'il y avait encore des manques importants sur les aspects fonctionnels, en relevant notamment les aspects de la vie sociale et technique des scientifiques, notamment le bien-être à bord, ainsi que d'autres problématiques techniques encore insuffisantes. Ce projet a répondu aux attentes d'un concours de la NASA pour sa capacité à supporter les rayonnements cosmiques, d'être stable dans sa forme malgré les variations importants de températures du milieux, ainsi qu'à utiliser les matériaux in situ. Ainsi, la critique C-K permet aussi d'ouvrir la voie pour ces insuffisances et d'identifier de potentiels solutions si les moyens nécessaires sont mis à disposition pour les développer. En effet, la critique C-K possède une limite : Le domaine de connaissance doit être suffisamment développé pour pouvoir proposer des solutions assez réalisables. Si celui-ci n'est pas assez développé, alors la critique C-K ne peut pas proposer de solutions réalisables actuellement. Cependant, elle peut orienter la recherche vers des voies nouvelles qui pourraient être suffisamment prometteuses, toujours en s'inspirant notamment du bio mimétisme. Il s'agit donc de poursuivre les recherches jusqu'à obtenir un résultat convaincant et techniquement constructible. Néanmoins, ce projet reste ambitieux et toujours en développement, notamment avec un autre projet reprenant les mêmes principes et nommé TERRA.

Ainsi, pour pouvoir être appliquée dans le monde industriel, la critique C-K aurait probablement besoin d'être encore optimisée ou poussée très loin dans son analyse, en espérant disposer de la totalité de l'ensemble de la documentation du projet, pour permettre une meilleur certification des projets réalisés ou en cours de développement. Néanmoins elle ouvre des possibilités d'optimisation importantes, tout comme la théorie C-K à son origine devait le permettre pour produire de nouveaux designs ou produits.

## **5-Bibliographie :**

### **Théorie CK :**

- Institut interdisciplinaire de l'innovation (CK) <https://i3.cnrs.fr/>
- Armand HATCHUEL wiki (accès aux sources) : [https://en.wikipedia.org/wiki/Armand\\_Hatchuel](https://en.wikipedia.org/wiki/Armand_Hatchuel)
- A. HATCHUEL Google scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=0UQgWBcAAAAJ>
- A new approach of innovative Design an introduction to CK theory - Armand Hatchuel and Benoît Weil
- 5th Tutorial of the DESIGN THEORY SIG 27th Jan – 29th Jan, 2020 in Paris – The Design Society
- Modeling inspiration for innovative NPD: lessons from Biomimetics - Camila Freitas Salgueiredo

### **Marsha :**

- Planète Mars.eu : <https://www.planete-mars.eu/les-concepts-dhabitats-martiens.php>
- Concept d'impression de Marsha + Marerial – AI spacefactory : [https://www.youtube.com/watch?v=C\\_KxqCL5L5Q](https://www.youtube.com/watch?v=C_KxqCL5L5Q)
- Conception theorique de Marsha – AI Spacefactory : <https://www.youtube.com/watch?v=XnrVV0w2jrE&t=1s>
- From 3D-Printing Lunar and Mars Habitats to Affordable Sustainable Housing on Earth - 50th International Conference on Environmental Systems 2020
- 3D Printed Martian Habitats and Challenges to Overcome - Journal of Space Science & Technology
- NASA Centennial Challenge: 3D-Printed Habitat - National Aeronautics and Space Administration (NASA)

### **HALLEY VI :**

- Inside Halley VI Antarctica par un scientifique à bord 2019 : <https://www.youtube.com/watch?v=X3LnyNus7vI>
- British Antarctic Survey – Halley VI research station – par les architectes: <https://www.youtube.com/watch?v=dhR-JZLtzvQ>
- Cool Antarctica: <https://www.coolantarctica.com/Bases/Halley/halley-V-construction.php>
- Penguido – Inside Halley VI station: <https://www.youtube.com/watch?v=X3LnyNus7vI>

### **Recherche sur les insectes ver à soie, Abeille et thermite :**

- Deep Look Silkworms Spin Cocoons That Spell Their Own Doom: [https://www.youtube.com/watch?v=cgavTIBQ\\_Z0](https://www.youtube.com/watch?v=cgavTIBQ_Z0)
- La Fabrique de L'abeille – Carla Bayle : <https://lafabriquedelabeille.fr/blogs/le-guide-de-la-cire-dabeille/fabrication-cire>
- Des défauts topologiques à l'origine de la complexité des nids de termites Apicotermes - CNRS INSB 2021
- Explaining the formation of termite nests – ErektAlert : <https://www.eurekalert.org/news-releases/689902>
- Des défauts topologiques à l'origine de la complexité des nids de termites Apicotermes- CRCA 2021
- Morphogenesis of termite mounds – PNAS

### **3D Printing:**

- A Short History of 3D printing (google scholar – 03/05/2023): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7307314>
- What are the different Types of 3D Printing (Brave - 03/05/2023): <https://www.futurelearn.com/info/courses/getting-started-with-digital-manufacturing/0/steps/184102>
- <https://blog.fabweaver.com/3d-printing-method-fff-most-popular-3d-printer-0>
- History of 3D Printing – A History of 3D printing since 1980: <https://www.youtube.com/watch?v=3xyx6VsbkRg>
- Types of 3D Printers – 11 Different Type of 3D printers (RainMaker3D): <https://www.youtube.com/watch?v=DMWzMpjSJLM>
- [OHIO UNIVERISTY printing rovers: https://www.youtube.com/watch?v=V6OOxByICUY](https://www.youtube.com/watch?v=V6OOxByICUY)

3D printing Stereolithography : [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1422-0067%2F23%2F7%2F3790&psig=AOvVaw3-9AMsh64KjcnRTBe8a2l1&ust=1685446631355000&source=images&cd=vfe&ved=0CBMQjhxqFwoTCPj\\_1JC4mv8CFQAAAAdAAAAABAH](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1422-0067%2F23%2F7%2F3790&psig=AOvVaw3-9AMsh64KjcnRTBe8a2l1&ust=1685446631355000&source=images&cd=vfe&ved=0CBMQjhxqFwoTCPj_1JC4mv8CFQAAAAdAAAAABAH)

#### **Usage du Regolith:**

- Technology development for human exploration of Mars (google scholar)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576510002225>
- NASA – the Lunar Lab & regolith testbed: <https://www.nasa.gov/ames/lunarlab-regolithtestbeds>
- Using 3D Printing to Conquer Outer Space (Janvier 2021 – technical University of Braunschweig) :  
<https://www.3dnatives.com/en/using-3d-printing-to-conquer-outer-space-210420226/#!>
- NASA to explore 3D printed Lunar structure possibilities with RedWire Regolith print Launch:  
<https://3dprintingindustry.com/news/nasa-to-explore-3d-printed-lunar-structure-possibilities-with-redwire-regolith-print-launch-193859/>
- Radiation protection for Human missions to the Moon and Mars: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19910008686>
- Optic.org News Moonrise Project tests 3D printing on lunar rover prototype MIRA3D: <https://optics.org/news/12/1/14>

#### **Architecture en milieux extrême :**

- 2<sup>nd</sup> Edition HOW TO BECOME A SPACE ARCHITECT – SATC 2014

#### **Extrême Environnement:**

- Carleton EDUCATION:  
<https://serc.carleton.edu/microbelife/extreme/environments.html>
- Universals Junior:  
<https://junior.universalis.fr/encyclopedie/vie-dans-les-milieux-extremes/>