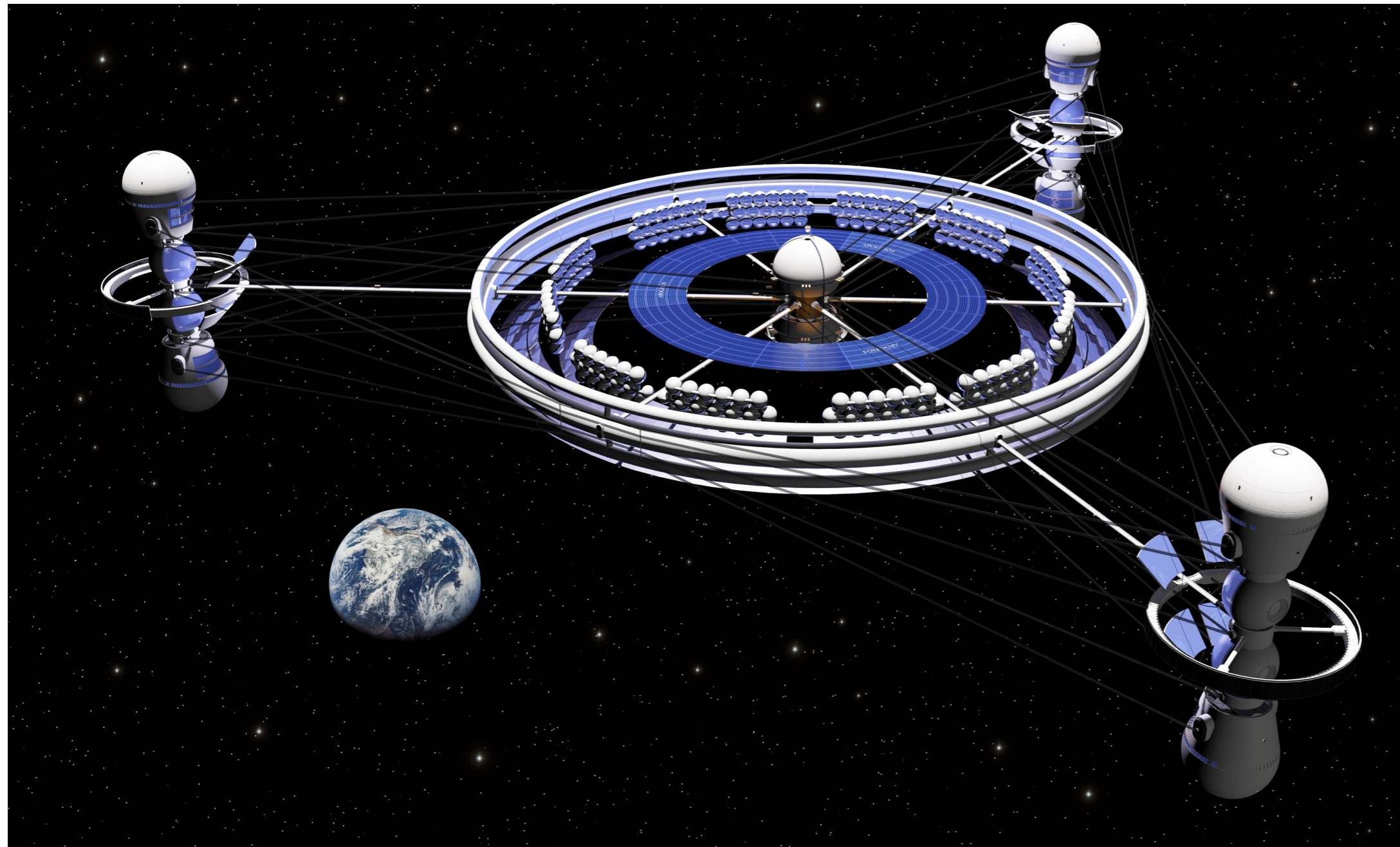


# APOGEIOS

UN CONCEPT DE VILLE SPATIALE



## Sommaire :

### Introduction

#### 1. Principes généraux

Construire une ville  
au point de Lagrange L5  
avec des matériaux extraterrestres  
des processus...terrestres  
de l'énergie solaire  
et beaucoup de robots

#### 2. Description d'ensemble

Les habitats  
La zone industrielle  
Les serres  
L'eau  
La centrale solaire  
Les radiateurs  
Les câbles

#### 3. Autres sujets

La sécurité  
Le bilan masse  
Les moyens de transport  
La construction  
Le potentiel de croissance

Pour finir ...

*"On ne peut prédire l'avenir, mais on peut imaginer des futurs"*

*Dennis Gabor, prix Nobel 1971.*

Intitulé du projet : APOGEIOS, un concept de ville spatiale

Nom de l'auteur ou des auteurs : Olivier Boisard et Pierre Marx

FONDATION  
JACQUES ROUGERIE  
GÉNÉRATION ESPACE MER  
INSTITUT DE FRANCE

PRIX DE LA FONDATION JACQUES ROUGERIE - GÉNÉRATION ESPACE MER - INSTITUT DE FRANCE "ARCHITECTURE, DESIGN ET TECHNOLOGIE DE L'ESPACE"

## Introduction

Notre projet concerne la construction d'une première cité dans l'Espace, une sorte "d'île spatiale" au sens où l'entendait l'ingénieur et chercheur américain Richard O'Neill [1]. Parce qu'elle n'est pas très proche de la Terre, nous l'appelons "Apogaios", mot grec qui signifie "loin de la Terre"<sup>1</sup>. Toutefois, elle n'en est pas trop éloignée pour ne pas couper prématurément le cordon ombilical.

Nous n'avons pas, bien entendu, la prétention de décrire de façon complète et réaliste une ville spatiale sous tous ses aspects, mais plus modestement d'identifier les fondamentaux ouvrant des pistes de réflexion pour des recherches ultérieures. Quelques ordres de grandeur, soulignés dans le texte, ont fait l'objet de calculs préliminaires ("margés" si nécessaire). *A contrario*, certains points importants n'ont été qu'abordés. D'autres, pas encore. Toutefois, aucun d'entre eux ne conditionne la faisabilité du projet. Ils sont listés et commentés à la fin de cette notice.

Ce n'est pas la destinée d'Apogaios de n'être qu'un astéroïde creux, sorte de caverne artificielle, perdu dans l'immensité du vide interplanétaire. Elle est, au contraire, le prélude à l'expansion progressive de l'Humanité dans tout le système solaire même si, à ce stade, elle ne concerne que quelques milliers d'individus. Ce sont eux qui construiront les cités suivantes.

Apogaios peut accueillir dix mille habitants dans un premier temps<sup>2</sup> et, si nécessaire, augmenter cette capacité par la suite.

Pour ambitieux qu'il puisse paraître, ce projet est réalisable sur une base internationale et à l'échelle d'une ou deux générations.

La construction, bien que fille de la technologie spatiale actuelle, doit, pour des raisons économiques évidentes, exploiter les ressources extraterrestres tant pour les matériaux que pour l'énergie et la production agricole. C'est pourquoi, il faudra d'abord "industrialiser" l'Espace pour y produire à des coûts similaires à ceux de l'industrie terrestre, soit 3 à 4 ordres de grandeur en dessous de ceux des matériels spatiaux actuels. C'est là le véritable challenge technico-économique du projet.

L'autre challenge est humain: notre projet ne se réduit pas à un réaliser un hôtel-club ou un paquebot de croisière qui sous-entendraient des séjours courts dont le coût serait d'ailleurs insupportable<sup>3</sup>. Nous voulons, au contraire, que les premiers occupants aient envie de rester et de s'approprier ce nouveau lieu. Notre projet est de leur offrir, autant que possible, un cadre de vie agréable, un espace socioculturel inédit et la liberté d'adapter et de développer leur habitat comme ils l'entendent. Mais cela suppose l'acceptation par ces pionniers d'un « nouveau paradigme » dans lequel la Terre n'occupe plus la place centrale – paradigme qui reste à inventer, et qui dépasse le cadre de la présente réflexion dont l'objet ne concerne que le cadre de vie, et non le mode de vie.

## 1. Principes généraux

### Construire une ville

La taille d'Apogaios est relativement modeste, comparée au premier habitat (Island 1) décrit par O'Neill (dérivé de la sphère de Bernal<sup>4</sup>), lequel est pourtant très

<sup>1</sup> Terme à l'origine du mot "apogée" ou point le plus éloigné d'une orbite terrestre, sens quelque peu différent.

<sup>2</sup> Effectif initial d'Island 1, selon la proposition d'O'Neill.

<sup>3</sup> Il est illusoire de croire que le coût des lancements depuis la Terre peut beaucoup diminuer dans l'avenir, surtout pour les vols habités. Le prix du billet pour l'orbite basse est actuellement de 35 M\$!

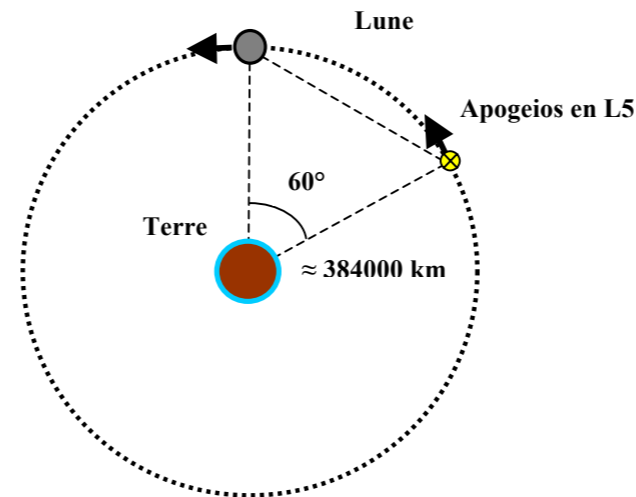
<sup>4</sup> Une sphère de Bernal est un habitat sphérique de 1,6 km de diamètre, proposé en 1929 par John Desmond Bernal pour la colonisation spatiale.

petit par rapport aux cylindres d'Island 3. Il s'agit d'une ville et non d'une sorte de Center Park recréant un environnement terrestre "naturel". C'est pourquoi l'espace vital est plus réduit. Ce choix est en ligne avec le vaste mouvement d'urbanisation que connaît l'humanité. Il a l'avantage d'éviter le gigantisme qui amplifierait les difficultés de la construction, déjà considérables, s'agissant d'une première.

Enfin, seule la configuration initiale constitue un projet défini. Son potentiel d'évolution doit permettre par la suite à ses habitants de l'aménager, de la transformer, voire de l'agrandir comme ils l'entendent.

### au point de Lagrange L5

La proposition d'O'Neill de placer la cité aux alentours du point de Lagrange L5 du système Terre-Lune nous paraît judicieuse<sup>5</sup>.



Vu de la Terre, Apogaios suit la Lune à quelques jours près et se trouve donc à 384.000 km de la Terre en moyenne. Vu de la Lune, Apogaios est à la même distance et apparaît quasiment fixe du fait que la Lune tourne sur elle-même dans le même temps qu'elle tourne autour de la Terre. Cette circonstance facilite le transport des minerais.

Dans la mesure où il s'agit de la première réalisation d'une "île spatiale", ce choix semble un compromis acceptable sur la base des critères suivants:

- exploiter le régolite lunaire pour produire différents métaux (essentiellement l'aluminium et le fer), du silicium et de l'oxygène.
- permettre des liaisons régulières avec la Terre, notamment pendant la construction de la cité qui nécessitera le transport de personnes, d'équipements, de matériaux et de matières premières introuvables ou en quantités insuffisantes ailleurs.
- disposer d'un flux solaire permanent suffisant (en l'occurrence  $\approx 1,4 \text{ kW/m}^2$ ) pour l'éclairage et la production d'électricité et de chaleur.

<sup>5</sup> Entre deux corps célestes massifs tournant l'un autour de l'autre (la Terre et la Lune, par exemple), il existe cinq points, appelés "points de Lagrange" où un petit corps "accompagne" les deux gros. Seuls L4 et L5 sont stables. Dans le cas du système Terre-Lune, ce n'est plus tout-à-fait vrai du fait de l'action du Soleil. Toutefois, il existe des sortes d'orbites stables autour de ces points.

### avec des matériaux extraterrestres

Les matériaux entrant dans la construction d'Apogaios doivent être approvisionnés à des conditions technico-économiques acceptables. C'est pourquoi, il faut exclure de faire venir de la Terre les pondéreux et les volumineux. Cela implique qu'avant même le début de la construction, les matières premières nécessaires soient extraites de minerais provenant exclusivement de corps célestes à faible niveau de gravité et situés sur des orbites "proches"<sup>6</sup> comme la Lune (1/6 de g) où à gravité quasi nulle: les astéroïdes.

Le régolite lunaire contient principalement de l'alumine (aluminium pour la construction), de la silice (verre et silicium pour les cellules photovoltaïques), de l'oxyde de fer (pour l'acier), du rutile et de la magnésie (titane et magnésium pour les alliages). L'oxygène, sous-produit, sert à l'atmosphère, aux processus industriels (aciéries, soudure, etc.) et comme ergol (comburant). Par contre, on ne trouve ni carbone ni azote sur la Lune, peut-être de l'hydrogène mais ce n'est pas prouvé<sup>7</sup>.

Quant aux astéroïdes, leur nombre et leur diversité en font des ressources inépuisables de fer et de nickel mais aussi, avec les comètes et les chondrites carbonées, d'eau (et donc d'hydrogène), d'azote, de carbone, etc. Mais si le sol lunaire est relativement bien connu, ce n'est pas le cas pour les astéroïdes. Ce n'est que depuis peu que les astronomes s'y intéressent d'où des connaissances encore inégales et fragmentaires. Les géocroiseurs<sup>8</sup> constituent une catégorie intéressante, ceux du moins dont l'orbite est relativement voisine de celle de la Terre.

Il faudra extraire les minerais et les envoyer rejoindre le chantier de la cité. La première étape sera donc d'installer les unités d'extraction (en surface ou en profondeur), les moyens associés (base vie, production d'énergie, transport, stockage et conditionnement) ainsi que les systèmes de transfert (mass drivers, vraquiers...). A titre indicatif, il faut 10 T de régolite lunaire pour produire 1 T d'aluminium.

### des processus...terrestres

Apogaios abrite ses habitants dans de grandes structures pressurisées recouvertes d'une épaisse couche de protection contre les rayonnements ionisants<sup>9</sup>. C'est dire que les parois sont dignes d'un cuirassé. Il ne s'agit plus de technique aérospatiale d'autant que si l'on veut fabriquer et construire aux coûts "terrestres", la "chasse au kilo" et la miniaturisation, aujourd'hui impératives, ne peuvent plus servir de "design drivers". Apogaios devra être construite comme les grands navires [4] et les ouvrages d'art du BTP où l'économie de matière n'est pas le premier impératif<sup>10</sup>.

Le problème essentiel est donc de "spatialiser" les moyens de production et de construction pour les adapter aux conditions très particulières d'un chantier dans

<sup>6</sup> Ce qui ne signifie pas qu'ils sont toujours à proximité. Il s'agit plutôt d'accès à faible coût énergétique.

<sup>7</sup> Il est possible que les pôles (surtout sud) recèlent de la glace d'eau au fond de cratères ne voyant jamais le soleil.

<sup>8</sup> Comme leur nom l'indique, leur orbite croise celle de la Terre. On les classe en trois groupes principaux: Les Amors (comme 433 Eros), les Atens et les Apollos. Seuls les Atens et les Apollos croisent en fait l'orbite de la Terre et l'intérêt grandissant qu'on leur porte est lié à la crainte de les voir entrer en collision avec celle-ci. Ces croiseurs sont appelés ECA pour "Earth-Crossing Asteroids" ou NEO pour "Near Earth Objects" en anglais.

<sup>9</sup> Au moins 50 cm de régolite.

<sup>10</sup> L'ingénierie proprement spatiale ne peut être oubliée pour autant, d'où l'importance de l'expérience acquise avec l'ISS.



l'Espace. Nous pensons qu'architectes et entrepreneurs sauront réaliser cette métamorphose, certains ayant déjà quelques compétences (béton lunaire, par exemple).

La construction nécessitera toutes sortes de matériaux, de composants, d'ingrédients, d'outillages et d'équipements en grandes quantités. S'il est exclu de tout amener de la Terre, ce sera quand même le cas au début et cela continuera pour nombre de produits manufacturés. Il faudra également envoyer le personnel sur place et assurer l'approvisionnement et les rotations. Par la suite, il subsistera des échanges fréquents entre la Terre et la cité. Si on peut admettre que le voyage retour sera peu coûteux, il n'en est pas de même du lancement depuis la Terre: le transport spatial depuis le sol terrestre est 1000 fois plus coûteux que le transport aérien et il est illusoire de croire que, dans un avenir prévisible, on réduira significativement le coût des lancements, même si l'on utilise des lanceurs géants tels que Saturn 5 ou Energia.

## de l'énergie solaire

Dans l'espace, les deux seules sources pérennes d'énergie sont le soleil (à condition de ne pas en être trop loin) et la fission nucléaire (en attendant la fusion). Etant donné la situation de la cité, le choix de l'énergie solaire paraît judicieux.

D'abord, pour éclairer les serres agricoles destinées à l'alimentation de la cité et à la régénération de l'atmosphère (recyclage biologique du CO<sub>2</sub> par photosynthèse). Mais le soleil, c'est aussi de la chaleur directement utilisable par les installations industrielles, les serres agricoles et la climatisation des habitats. Enfin, on peut reprendre, au moins en partie, l'idée d'O'Neill "d'ouvrir" les habitats sur l'Espace au moyen de larges baies vitrées laissant pénétrer les rayons de l'astre du jour, convenablement filtrés.

Pour ce qui concerne l'énergie électrique, la conversion photovoltaïque est préférable à la centrale thermo-solaire. Depuis l'origine, les satellites n'utilisent qu'elle. Il en est de même de la plupart des projets de centrales solaires en orbite (Solar Power Satellite ou SPS) destinées à alimenter la Terre<sup>11</sup>.

## et beaucoup de robots

Transposer dans l'Espace les processus terrestres de production, de fabrication et de construction, ne va pas de soi. Les sorties extravéhiculaires actuelles montrent les grandes difficultés qu'éprouvent les astronautes à effectuer la plus simple opération de montage / démontage, les risques encourus et la fatigue qui en résulte<sup>12</sup>. Difficile d'imaginer la construction d'Apogaios dans de telles conditions! C'est pourquoi cette transposition passe obligatoirement par la robotisation quasi-totale des opérations, depuis l'extraction des minerais<sup>13</sup> et la production des matériaux et des fluides jusqu'à l'assemblage final et la mise en route, en passant par l'élaboration des produits semi-finis nécessaires, la fabrication des éléments constitutifs de la structure et la batterie des contrôles associés. On peut ainsi imaginer un processus totalement automatique de collecte du régolite lunaire et son transport vers l'usine sidérurgique qui en extraira différents métaux et l'oxygène qu'il contient.

<sup>11</sup> L'énergie lumineuse est captée par de gigantesques panneaux couverts de cellules photovoltaïques (des km<sup>2</sup>). L'énergie électrique est transmise à terre par faisceaux de microonde où les antennes de réception la transforment en courant électrique.

<sup>12</sup> Aujourd'hui, une EVA (Extra Vehicular Activity) atteint couramment 6 à 7h.

<sup>13</sup> D'autant que les matériaux extraterrestres ne sont pas exempts de danger. Ainsi le régolite lunaire est très agressif car constitué de microcristaux de silicates, véritables microlames de rasoir du fait de l'absence d'érosion. De même, certains astéroïdes ne sont que des agrégats de poussière que le moindre contact disperse.

L'assemblage serait l'œuvre d'une armée de robots suffisamment polyvalents et autonomes pour couvrir l'éventail des opérations requises. Dans un premier temps, ils viendraient de la Terre mais, par la suite, le développement des cités aidant, ils se répliqueraient sur place.

## 2. Description d'ensemble

La cité comporte trois types d'infrastructures:

- les habitats, au nombre de trois, protégés des radiations cosmiques et des particules émises par le soleil et où sont recréées les conditions terrestres: atmosphère tempérée et gravitation.
- la zone industrielle et logistique, fortement robotisée (simple surveillance humaine) et fonctionnant, en partie, dans l'environnement spatial: vide, froid, 0-g, radiations. On y trouve les ports d'accès à la cité.
- les serres agricoles éclairées et chauffées par le soleil (atmosphère et éclairage optimisés selon le type de culture).

S'y ajoutent:

- la centrale solaire qui alimente la cité en énergie électrique,
- les panneaux radiatifs évacuant les calories que produit la cité,
- les câbles reliant ces différents éléments.

L'ensemble est desservi par des ascenseurs, des monte-charges et des couloirs de circulation. Chaque zone dispose d'accès adaptés à ses fonctions (sas).

Les trois habitats, situés aux sommets d'un triangle équilatéral, sont reliés par des câbles à la zone industrielle centrale (cf. plan masse) et, également, entre eux.

**L'ensemble tourne sur lui-même à raison d'un tour / minute pour recréer la pesanteur terrestre au niveau des habitats**, soit à 900 m de l'axe. Cette option, très contraignante par rapport à l'absence de pesanteur (comme dans la Station internationale ISS) ou à une pesanteur réduite (comme sur la Lune ou sur Mars), nous paraît une condition essentielle pour préserver à long terme la santé d'individus "ordinaires"<sup>14</sup> et la possibilité de leur retour sur terre.

Les serres sont installées dans le plan du triangle, à une distance intermédiaire (une gravité minimale est nécessaire en zone agricole). Il en est de même pour la centrale solaire. Sauf à beaucoup compliquer les choses, cela implique de maintenir l'axe de rotation de la cité "pointé soleil" tout au long de l'année alors que l'effet stabilisateur de la rotation le maintient, au contraire, dans une direction fixe par rapport aux étoiles, entraînant un pivotement complet de 360° par an. Ce pointage est effectué par le "système de contrôle d'attitude" (SCA), nécessaire par ailleurs pour contrer les mouvements naturels de l'axe de cette cité-toupie dont il est impossible de garantir l'absolue symétrie.

Cette architecture n'est pas arbitraire. Elle privilégie trois formes fondamentales - la sphère, le tore, et le triangle - permettant d'optimiser des contraintes structurelles:

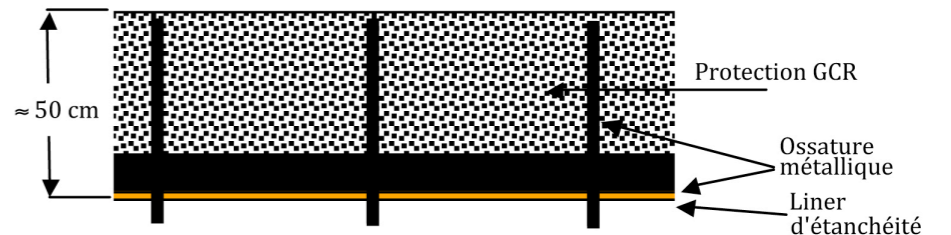
- la sphère (pour les zones de résidence et les serres de culture maraîchère) offrant le meilleur rapport surface/volume et minimisant les contraintes mécaniques structurelles (efforts mécaniques liés au confinement de zones pressurisées, maîtrise des vibrations basse fréquence).
- le tore, qui offre moins d'avantages que la sphère sur le plan mécanique, mais apparaît néanmoins comme la meilleure solution pour abriter des surfaces importantes (20 ha de cultures extensives pour la production agricole) sur une circonférence en gravité intermédiaire.
- le triangle formant des structures isostatiques tendues par des faisceaux de câbles. Les tores des serres agricoles sont au niveau du cercle inscrit dans le triangle qui structure la forme générale de la cité.

<sup>14</sup> L'apesanteur entraîne une décalcification des os et d'autres effets indésirables. L'exercice physique et une pharmacopée adéquate permettent d'y remédier en partie. Cela étant, aucun astronaute n'a passé plus de 15 mois consécutifs en apesanteur (Valeri Polyakov en 1994 à bord de MIR) et personne n'en connaît les effets à long terme.

## Les habitats

Chaque habitat est constitué de quatre grandes sphères (voir plan) reliées entre elles par des viroles cylindriques / tronconiques. La longueur de l'ensemble est d'environ 400 m de long pour un diamètre maximum voisin de 100 m.<sup>15</sup>

La structure résiste à la pression interne, assure une étanchéité suffisante et protège les habitants des rayonnements ionisants<sup>16</sup> et des micrométéorites. Elle comporte une charpente en alliage d'aluminium (membrures, lisses et bordés) enrobée d'un agrégat de régolite lunaire et de résine époxy sur 50 cm d'épaisseur. S'y ajoute un liner interne d'étanchéité en élastomère.



A l'intérieur, une surface de plancher d'environ 350000 m<sup>2</sup>, répartis sur plusieurs niveaux, constitue la cité, réunissant les parties privatives, les locaux professionnels, les commerces, les équipements publics (éducation, santé, sports, loisirs). La densité de population correspond à celle des grandes villes (environ 100 m<sup>2</sup>/habitant).

Les habitats sont pressurisés à 800 mbars<sup>17</sup>. La composition de l'atmosphère est la même que sur Terre. La température moyenne (20°C) et le degré d'hygrométrie (60%) sont ceux d'une région terrestre tempérée.

Contrairement aux îles d'O'Neill qui n'utilisent que le soleil, l'éclairage des habitats est en partie artificiel. Les possibilités d'adaptation aux différentes situations (cycle jour/nuit, variations annuelles, optimisation physiologique, etc.) sont quasiment infinies sans nécessiter la captation directe des rayons du soleil, techniquement compliquée.

Trois sections réunissent les sphères. C'est sur ces structures rigidifiées que sont ancrés les câbles qui relient les habitats entre eux et à la zone centrale. Des baies panoramiques sont aménagées sur les faces intérieures des parties tronconiques, offrant une vue d'ensemble sur le reste de la station.

A ce stade du projet, nous ne proposons pas d'aménagements particuliers des habitats. Faut-il s'inspirer des grands navires de croisières, des villages troglodytes ou des cavernes d'acier d'Asimov? Nous pensons que ce doit être le choix des habitants. Leurs architectes et leurs décorateurs sauront concevoir et construire "leur intérieur" et, par la suite, l'adapter et le modifier tout en respectant les exigences et les normes techniques de base (masses, structures, réseaux, hygiène, sécurité,...). Ils assureront la diversité spatiale et le changement temporel dans l'espace clos de la cité pour compenser, autant que possible, l'absence de grands horizons.

Cela étant, on peut commencer à s'entraîner. Par exemple, les zones résidentielles peuvent être aménagées dans les deux plus grandes sphères de chaque habitat, hébergeant chacune environ 1700 habitants. Au centre de l'habitat, les deux sphères

<sup>15</sup> Ces dimensions sont presque 100 fois plus petites que celles des cylindres d'O'Neill (6 km de diamètre et 30 km de long).

<sup>16</sup> "Galactic Cosmic Rays" (GCR). Pour les SPE (Solar Particle Events), seul le fond des cylindres, côté soleil, nécessite une protection spécifique (par exemple, un réservoir d'eau).

<sup>17</sup> pression moyenne cabine d'un avion gros porteur correspondant à une altitude de 2250 m.

plus petites abritent divers espaces publics, notamment des « espaces naturels » sous des dômes transparents hémisphériques (jardins avec eau et végétation) éclairés par des miroirs disposés à 45° à l'extérieur de l'habitat.

## La zone industrielle

Elle a plusieurs rôles:

- petite industrie: transformation et conditionnement agroalimentaire, production de composants et d'équipements de la cité, notamment ceux de la vie quotidienne: mobilier, habillement,.. (hors art et artisanat.), maintenance et réparation des installations de la cité, laboratoires d'essais et de contrôle, etc.
- entreposage de matériaux et de conteneurs de transport, magasinage de composants et d'équipements, stockage d'ingrédients liquides et gazeux, ensilage et conservation de produits agricoles.
- transports de personnes et de fret: ports d'accès, zones de transit, garages et ateliers d'entretien et de réparation des vaisseaux, stockage et avitaillement en ergols et fluides.
- zone de loisirs zéro-g, équipée en refuge en cas d'accident grave dans un habitat, exigeant l'évacuation de tout ou partie de la population.

La zone industrielle est constituée de deux grandes sphères offrant chacune un volume pressurisé d'environ 100000 m<sup>3</sup>. Hormis la quasi-absence de pesanteur (0,3 m/s<sup>2</sup> à la périphérie), la zone industrielle a les mêmes caractéristiques que les habitats en termes d'atmosphère et de protection. Des plateaux extérieurs permettent l'entreposage de conteneurs et de matériels ne nécessitant ni atmosphère ni protection.

## Les serres

Il est illusoire de vouloir transposer les modes de production alimentaires terrestres, d'une part parce que les écosystèmes de la cité n'y survivraient pas, d'autre part, parce que les rendements de l'élevage et de l'agriculture terrestres sont trop faibles. Les écosystèmes de la cité doivent être les plus simples possibles, isolés les uns des autres, et strictement contrôlés. Au moins dans un premier temps, la base de l'alimentation est purement végétale et produite dans des serres à haut rendement. Compte tenu des progrès actuels en la matière, on peut supposer que les habitants d'Apogeiios sauront en tirer des préparations équilibrées et savoureuses.

Outre la production alimentaire, les serres assurent la régénération de l'atmosphère des habitats (absorption du CO<sub>2</sub> et fourniture d'oxygène par photosynthèse chlorophyllienne). Elles sont de deux types:

- 20 hectares de "champs" pour la culture extensive de céréales (blé, maïs, sorgho) et de divers protéagineux (soja, lin, colza).
- 10 hectares de "jardins" pour la culture maraîchère (fruits et légumes).

Ces surfaces sont à majorer d'environ 10% en raison de l'immobilisation nécessitée par la régénération périodique des serres. Tous les trois ans, une serre devra être entièrement assainie en détruisant son écosystème, en aseptisant ses équipements par mise au vide et exposition aux UV durs du soleil. La serre sera alors remise en culture avec des semences strictement contrôlées. C'est le prix à payer pour assurer la pérennité de ces écosystèmes clos.

Les serres sont conçues pour:

- fournir une grande variété de fruits, légumes et céréales (au moins les 120 plus importantes produites<sup>18</sup>) aujourd'hui sur la base de 0,62 kg de nourriture (dans

l'assiette) par habitant et par jour [2], soit 2300 T / an pour 10000 personnes (6 T par jour).

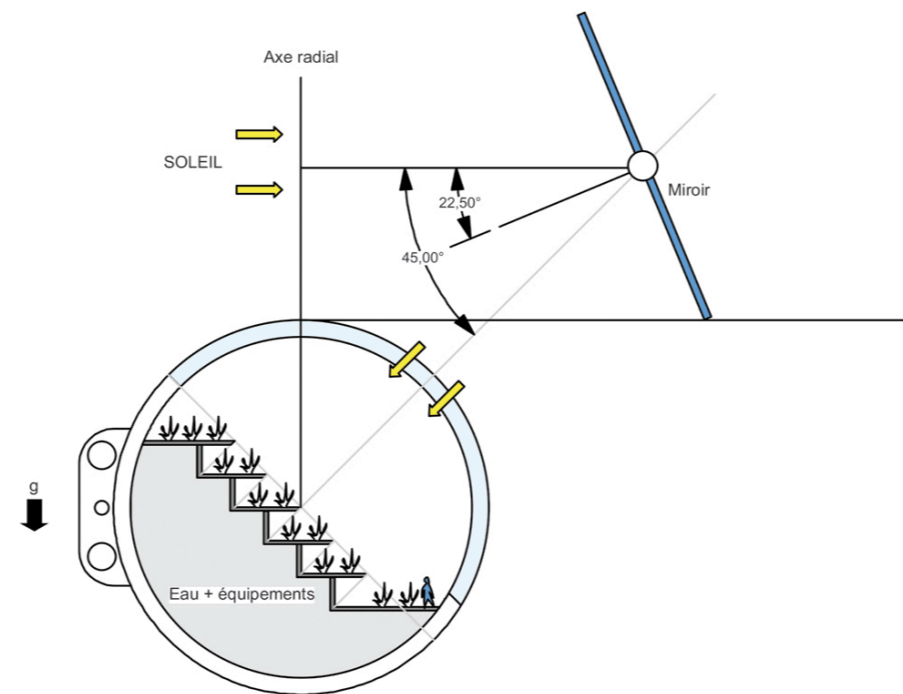
- fournir du lin et du coton pour l'habillement. Quantité à définir.
- fournir la base végétale des produits cosmétiques et pharmaceutiques. Quantité à définir.
- recycler le gaz carbonique sur la base de 1 kg par habitant et par jour [2], soit près de 4000 T / an pour 10000 personnes (10 T par jour).

La culture est essentiellement aéroponique/ultraponique. Les plantes sont fixées sur des grilles métalliques laissant passer les racines. Celles-ci sont plongées en permanence dans un fin brouillard nutritif: eau, engrais, oligoéléments, produits phytosanitaires

- éclairage optimum (intensité, spectre)
- 1/6 g minimum
- atmosphère: T = 32°C, O<sub>2</sub>: 168 mbar, N<sub>2</sub> et taux d'humidité à définir, CO<sub>2</sub>: entre 300 et 1300 ppm.

Ce type de culture permet, dans certains cas, de multiplier le rendement par 8 par rapport à la culture sur substrat (130 habitants/ha). On prend le facteur 2,5, soit 30 m<sup>2</sup> /personne.

De forme torique (culture extensive) ou sphérique (culture maraîchère), les serres sont des structures gonflables en polyéthylène transparent pour recevoir la lumière du soleil. Etant donné le gravitropisme des plantes, les surfaces cultivées doivent être perpendiculaires à la direction de la gravité<sup>19</sup>. Cela nécessite de renvoyer le rayonnement solaire à l'aide de miroirs. Tenant compte que, sous nos latitudes, le soleil est à peu près à 45° au zénith, il est possible, comme le montre le schéma ci-dessous, de gagner de la surface cultivable en l'aménageant en terrasses se superposant partiellement.



"Notre Europe – PLURIAGRI - Farm – "Quel cadre pour les politiques agricoles, demain, en Europe et dans les pays en développement ?" 27-29 novembre 2006, Paris.

Agro.Montpellier – UMR Moisa

<sup>19</sup> Les recherches actuelles pourraient conduire à s'affranchir de cette contrainte.

L'ensemble des serres comporte trois tores de 455 m de rayon moyen pour la culture extensive (deux de 20 m de section, un de 30 m) et 228 sphères de 25 m de diamètre réparties en 12 x 2 grappes de 19 serres. Le niveau de gravitation est d'environ 0,5g, la pression atmosphérique est faible (altitude terrestre correspondante > 4000 m). L'atmosphère est tropicale et le taux de CO<sub>2</sub> élevé. La protection GCR est réduite, les plantes étant plus tolérantes aux particules ionisantes que l'organisme humain. Seuls des robots y travaillent. Si nécessaire, les hommes interviennent à partir d'un sas, en combinaison et masque étanches, légèrement pressurisés pour compenser la faible pression atmosphérique.

## L'eau

Bien qu'importante, la question de l'eau n'a pas été abordée à ce stade du projet. Nous pensons qu'elle ne pose pas de problème majeur, qu'il s'agisse d'approvisionnement, de stockage ou de recyclage. On peut situer la consommation globale, tous besoins confondus (individuels et collectifs, agricoles et industriels) autour de 2000 m<sup>3</sup>/jour. L'eau peut être recyclée assez aisément et en quasi-totalité par des procédés physico-chimiques simples si l'on dispose d'énergie en quantité suffisante (condensation de la vapeur, nano-filtration et osmose inverse des résidus liquides [2]).

L'eau constitue une barrière très efficace contre les particules émises par le Soleil (SPE)[3]. C'est pourquoi, on peut envisager de munir la partie des habitats exposée au soleil d'une double paroi enfermant une couche d'eau de quelques cm. Cette protection serait aussi une réserve de quelques milliers de m<sup>3</sup>.

## La centrale solaire

Sur la base de la consommation française en 2010, soit 500 TWh/an dont 60% pour le secteur résidentiel et tertiaire<sup>20</sup>, la puissance moyenne nécessaire à la cité est de l'ordre de 5 MW. En ajoutant les demandes industrielle et agricole et en tenant compte des pics de consommation, la puissance requise est de l'ordre de 7 MW, à mi-chemin (en ordres de grandeur) entre l'ISS (100 kW) et les projets de SPS (1GW au minimum).

Au niveau de L5, la puissance rayonnée par le soleil est la même que celle reçue par la Terre, environ 1400 W/m<sup>2</sup>. Mais la conversion photovoltaïque a encore aujourd'hui un mauvais rendement. Sur la base d'une puissance utile<sup>21</sup> de 65 W/m<sup>2</sup>, il faut plus de 10 ha de panneaux pour fournir les 7 MW nécessaires. Il est probable, toutefois, que le rendement s'améliorera et permettra d'augmenter sa puissance.

De nombreux aménagements sont possibles. Un des plus simple est de disposer les panneaux sous la forme d'un anneau centré sur l'axe de la cité et de faible rayon extérieur pour qu'ils soient très légers.

## Les radiateurs

La cité produit de la chaleur provenant essentiellement de l'énergie électrique qu'elle consomme. La seule manière de la dissiper est de la rayonner dans l'espace. Comme les habitats sont très bien isolés par la protection GCR, il faut prévoir des surfaces radiantes spécifiques alimentées par une boucle fluide diphasique (vaporisation dans des échangeurs placés dans les habitats, liquéfaction dans les

<sup>20</sup> Source: Commissariat général au développement durable.

<sup>21</sup> Avec du silicium monocristallin et compte tenu des différents rendements (conversion photovoltaïque, régulation, distribution), la puissance utile en début de vie (BOL) est à peine d'un MW par hectare au niveau de l'orbite terrestre. Prenant en compte une perte de rendement de 2%/an et une durée de 15 ans, la puissance utile en fin de vie (EOL) chute de 25%.

<sup>18</sup> Pour plus de 30 millions d'espèces comestibles. Cf. "Agriculture et système agroalimentaire dans un modèle prospectif d'urbanisation/tertiarisation" - Jean-Louis Rastoin.

"radiateurs" extérieurs). En utilisant l'ammoniac (NH3) qui se liquéfie à -33°C (sous un bar), il faut environ 4 hectares de radiateurs pour rayonner les 7 MW d'énergie consommée.

Contrairement à la centrale solaire, cette surface est répartie entre les habitats et la zone centrale, ce qui permet de raccourcir les boucles et donc de réduire la puissance des pompes de circulation. Chaque habitat est entouré d'un secteur cylindrique de panneaux radiants à la température de 240°K, de sorte que la direction moyenne du rayonnement soit perpendiculaire à celui du soleil. Pour la zone centrale, la proximité des habitats oblige à aménager les panneaux radiants dans la partie arrière, la plus dégagée et opposée au soleil.

### Les câbles

Chaque habitat est relié à la zone centrale par des câbles métalliques (du type de ceux utilisés pour les ponts suspendus) ou en fibre de carbone. 24 câbles en acier à haute résistance de 60 cm de diamètre et de 900 m de long permettent de tenir le double du poids d'un habitat, estimé à 150000 T. Groupés par quatre, ils sont ancrés au niveau des structures reliant les sphères, ces dernières étant conçues pour diffuser les efforts importants concentrés aux points d'attache. Cette disposition limite les degrés de liberté des habitats par rapport aux axes de référence de l'ensemble.

Ces câbles supportent également les structures légères que sont les tunnels de communication, la centrale solaire et d'autres dispositifs tels que des monte-charges. Par contre, un système spécifique est prévu pour les serres.

Enfin, il est prévu de pouvoir relier les habitats entre eux si cela s'avère nécessaire pour des raisons de stabilité dynamique et/ou de sécurité.

L'assemblage final de la cité nécessitera un ber à trois branches le long desquelles seront disposés les câbles. Une fois les ancrages réalisés, l'ensemble sera mis progressivement en rotation et le ber démonté lorsque les câbles seront suffisamment tendus.

### 3. Autres sujets

De nombreux points importants restent à approfondir. Citons-en quelques uns:

#### La sécurité

Vivre à Apogeios est probablement moins dangereux que de vivre sur Terre. Etant bien protégé des radiations cosmiques et des bouffées de colère du Soleil, le seul risque extérieur est l'impact d'une météorite. Compte tenu de la taille des habitats, un "caillou" n'entraîne qu'une fuite presque négligeable difficile à mesurer sur le moment. Seul un "rocher" pourrait entraîner une dépressurisation rapide mais la probabilité d'un tel événement est extrêmement faible.

Par contre, la cité n'est pas à l'abri d'un accident de type incendie ou explosion, pollution ou épidémie. C'est pourquoi, elle doit être conçue pour confiner le sinistre, quoiqu'il arrive. La solution passe, en particulier, par le cloisonnement des zones à risques comme on l'a déjà évoqué à propos des serres.

Enfin, il est possible d'évacuer la population d'un habitat en l'installant provisoirement en zone industrielle ou vers une cité voisine à l'aide d'une centaine de "chaloupes" amarrées à demeure, comme sur un navire.

#### Le bilan masse

Sur la base de calculs préliminaires et d'estimations, le tableau ci-dessous donne les ordres de grandeur des masses des différents éléments de la cité.

<b>Habitats</b>	3 x 150 000 T	dont 3 X 90000 T de protection GCR / SPE
<b>Zone industrielle</b>	40 000 T	dont 30000 T de protection GCR
<b>Serres</b>	60 000 T	3 tores + 228 sphères
<b>Centrale solaire</b>	5000 T	
<b>Câbles habitats</b>	3 X 20 000 T	3 x (6 + 2) groupes de 4 câbles
<b>Divers</b>	10 000 T	radiateurs, ancrages câbles, etc.
	Total	625 000 T dont 300 000 T de protection GCR / SPE
Marge projet 20%	125 000 T	dont 60 000 T de protection GCR / SPE
<b>Total margé</b>	<b>750 000 T</b>	<b>dont 360 000 T de protection GCR / SPE</b>

Soit 75 T / habitant. On peut faire quelques comparaisons:

- avec l'ISS, seul habitat spatial d'aujourd'hui: 67 T / spationaute (6 au maximum pour un ensemble de plus de 400 T).
- avec le célèbre "France": 19 T / personne (paquebot de 57000 T de déplacement, 300 m de long, 34 m de maître-bau, 12 ponts, 2000 passagers et 1000 membres d'équipage).
- avec la tour Montparnasse: 30 T / personne (209 mètres de haut, 150 000 tonnes, 59 étages de 1 700 m², 5 000 personnes y travaillent en moyenne).

### Les moyens de transport

Différents types de véhicules assureront des besoins spécifiques:

- des "vraquiers" et/ou des catapultes pour le transport de minerais et de matières premières en provenance de la Lune et des astéroïdes,
- un parc d'engins de service pour les équipes de surveillance et d'intervention sur le site ainsi que sur la Lune et les astéroïdes.
- des "paquebots" ou "liners" pour les liaisons entre la cité et une orbite basse terrestre desservie par des navettes lancées depuis le sol et capables ensuite de rentrer dans l'atmosphère et d'atterrir.

Les navettes de fret et de transport de passagers peuvent s'arrimer à la station sur deux docks situés au niveau de l'axe de rotation. De là, il est possible de charger / décharger des containers de marchandises stockés à l'extérieur. Des sas permettent de transférer passagers et fret à l'intérieur de la zone industrielle (pressurisée) puis d'être acheminés jusqu'aux habitats via les tunnels de liaison.

### La construction

Une préparation longue et importante doit précéder la construction d'Apogeios. Ce programme initial "d'industrialisation de l'Espace" permettra, en premier lieu, de produire, sur place et en grandes quantités, l'aluminium des structures, l'acier des câbles, le ciment pour la protection GCR, la silice et le silicium pour les verrières et les cellules solaires, l'azote, l'eau et l'oxygène nécessaires aux habitants et aux cultures, les matières plastiques ainsi que l'oxygène et l'hydrogène liquides pour les moyens de transport à propulsion fusée.

A cette industrie de base, s'ajoutera celle de nombreux produits finis: alliages métalliques, fluides et ingrédients divers. Mais les produits très élaborés, comme les médicaments ou les puces électroniques continueront à venir de la Terre.

Même très automatisées, les industries minières et de transformation et surtout la construction de la cité nécessiteront la présence de l'homme *in situ*. Tout ne sera pas contrôlable ou opérable à distance et l'aptitude des robots à s'adapter aux situations imprévues et accidentelles est une perspective lointaine (mais qu'on ne peut exclure).

Plus que des "baraques de chantier", des "bases-vie" seront donc nécessaires. Plus spacieuses et surtout plus autonomes que les stations orbitales actuelles, elles préfigureront la cité à venir. Outre leur rôle dans l'industrialisation puis la construction, elles permettront de qualifier nombre de fonctions essentielles comme la gravité artificielle, la culture en serres, le recyclage de l'air et de l'eau, le contrôle des écosystèmes et la sécurité.

### Le potentiel de croissance

Il est possible d'augmenter la capacité d'accueil de la cité mais mieux vaudra construire une nouvelle ville aux alentours et ainsi de suite (avant d'essaimer plus loin). L'idée d'O'Neill était de créer un archipel au point de Lagrange où vivraient des centaines de milliers, voire des millions d'humains. Les villes se différencieraient comme sur Terre avec des spécialités industrielles, culturelles ou de loisirs. Il faut noter que les transports interurbains ne coûteraient rien ni en énergie ni en temps.

De même pour l'agriculture, les ateliers industriels et l'énergie électrique, des installations supplémentaires peuvent être construites à proximité. Par exemple, une centrale électro solaire, située à distance, pourrait transmettre l'énergie produite par un faisceau de micro-ondes ou un faisceau laser comme proposent de le faire les promoteurs des SPS pour alimenter la Terre. On pourrait également introduire l'élevage de cette manière, sans risque d'interférence avec les écosystèmes de la cité.

### Pour finir ...

Parce que cela résume bien notre vision, nous aimons ce que dit le célèbre astrophysicien Stephen Hawking:

*"Je crois que l'humanité n'a aucun avenir si nous ne nous rendons pas dans l'espace. Nous devons élargir nos horizons au-delà de la planète Terre si nous souhaitons un futur à long terme. Nous ne pouvons plus nous regarder le nombril sur cette petite planète surpeuplée et de plus en plus polluée. Nous devons nous tourner vers l'extérieur, vers le cosmos. Cela nécessitera du temps et des efforts, mais plus notre technologie avancera, plus ce sera facile."*

### Références

Ne sont cités ici que les références directement utilisées pour cette notice. Il y en a évidemment de nombreuses autres.

- [1] Gerard K. O'Neill, *The High Frontier*, Space Studies Institute Press, Princeton, New Jersey (1989)
- [2] Jean Dunglas, *L'Homme et ses écosystèmes dans l'Espace*, note de travail (2007)
- [3] Donald Rapp, *Radiation Effects and Shielding Requirements in Human Missions to the Moon & Mars Comparison of Martian meteorites and Martian Regolith as Shield Materials Galactic Cosmic Rays*, Citation: Mars 2, 46-71, (2006)
- [4] Dominique Presles - Dominique Paulet, *Architecture navale*, éditions de la Villette, Paris (2005)