MELiSSA : des solutions spatiales pour les défis terrestres

Le projet MELiSSA, de l'Agence Spatiale Européenne et de la fondation associée, se penche sur une question cruciale pour l'avenir de l'exploration spatiale : comment rendre la vie humaine autonome en milieu fermé ? En s'inspirant des écosystèmes naturels, ce programme développe des systèmes physico-chimiques et biologiques capables de recycler l'air, l'eau et les déchets. Au-delà de l'espace, ces recherches ouvrent des perspectives concrètes pour une gestion plus durable des ressources sur Terre.

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) est une organisation intergouvernementale chargée de coordonner et de développer les activités spatiales civiles en Europe. Elle rassemble plusieurs États membres, ainsi que des pays associés. Si son siège est à Paris, l'ESA s'appuie sur un réseau de centres spécialisés répartis à travers l'Europe.

Vers des écosystèmes spatiaux autonomes

L'envoi d'astronautes pour des missions habitées de longue durée, comme un voyage vers Mars estimé à près de 1 000 jours, soulève d'importants défis logistiques. Chaque membre d'équipage nécessite en effet plusieurs kilogrammes d'eau, d'oxygène et de nourriture par jour. Ainsi, pour des missions réunissant jusqu'à six astronautes, les quantités à embarquer deviennent considérables, rendant leur transport particulièrement complexe pour des destinations lointaines.

C'est dans ce contexte qu'est né, en 1989, le projet MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), initié par Claude Chipaux et Daniel Kaplan au sein de Matra Espace et Max Mergeay au sein du SCK (i.e. le CEA Belge), avant d'être repris par l'ESA. Son ambition est de concevoir un système de support de vie en boucle fermé, capable de recycler les déchets produits par l'équipage – urine, dioxyde de carbone, matières fécales ou encore résidus organiques – en nouvelles ressources vitales.

Ce programme de recherche d'envergure repose sur une vaste collaboration européenne, mobilisant une cinquantaine d'équipes réparties dans quatorze pays. Sa gouvernance s'articule autour de quinze partenaires stratégiques signataires de l'accord de collaboration et membres du comité de pilotage. Parmi eux figurent notamment l'ESA et la Fondation MELiSSA, qui définissent les grandes orientations du projet, tandis que les partenaires académiques apportent leur expertise scientifique et technologique.

Au cœur de la boucle « déchets-ressources »

Le cœur du système MELiSSA réside dans sa capacité à transformer les déchets en ressources utilisables. Cette transformation s'effectue grâce à une succession de procédés (i.e. bioréacteurs, membranes, serres, etc.), dans lesquels interviennent différentes communautés microbiennes. Les déchets, initialement très complexes et hétérogènes, sont d'abord dégradés en molécules plus simples sous l'action d'enzymes bactériennes. Cette première étape s'opère à une température thermophile de 55°C pour prévenir la prolifération de pathogènes.

En sortie de cette première étape, les principaux produits obtenus sont des acides gras et de l'ammonium. Ceux-ci sont ensuite pris en charge par d'autres compartiments biologiques spécialisés : les acides gras sont convertis en dioxyde de carbone, tandis que l'ammonium est transformé en nitrates. Le système génère ainsi les éléments indispensables à la photosynthèse, qui peuvent alors être utilisées pour cultiver des plantes supérieures (tomate, laitue ou blé) destinées à l'alimentation de l'équipage, ou pour produire des protéines à partir de micro-organismes.

Si MELiSSA est souvent présenté comme un système en boucle fermée, son fonctionnement s'apparente davantage à un réseau complexe de procédés interconnectés. Bien que chaque étape affiche des performances élevées, avec des rendements proches de 80%, ces pertes successives demandent un important travail d'optimisation et de contrôle pour garantir la stabilité, la robustesse et la continuité du système sur des périodes prolongées.

De l'Espace à la Terre

Les technologies développées dans le cadre du projet MELiSSA suivent un processus de validation rigoureux, en trois étapes complémentaires.

La première consiste à tester certaines briques technologiques directement en conditions spatiales. Ces démonstrateurs sont envoyés dans l'espace afin d'évaluer leur comportement en microgravité et sous l'effet des rayonnements, des contraintes indispensables à maîtriser avant toute intégration dans un système destiné aux astronautes.

La deuxième phase se déroule au sol. Les différentes briques technologiques y sont assemblées et exploitées en continu pendant plusieurs mois. Cette étape permet de valider leur intégration, d'optimiser leur fonctionnement et d'identifier les éventuelles difficultés liées à une utilisation prolongée.

Enfin, la troisième phase vise à transférer certaines innovations vers des applications terrestres. En effet, dès les premières années du projet MELiSSA, les scientifiques avaient pressenti que les technologies développées pour l'exploration spatiale pourraient répondre à certains défis terrestres. En novembre 2005, les partenaires du programme ont ainsi officiellement lancé un volet dédié aux applications terrestres.

Aujourd'hui, les retombées du projet concernent plusieurs secteurs, parmi lesquels le traitement de l'eau et des effluents, la sécurité microbiologique, la production alimentaire à partir de micro-organismes et de microalgues, ainsi que les technologies liées à l'économie circulaire. Ces applications créent une dynamique vertueuse, elles permettent à la fois de répondre à des enjeux environnementaux sur Terre et de disposer de plateformes d'expérimentation à long terme pour les technologies spatiales.



Site d' integration des procedes MELiSSA à Barcelone - © MELiSSA Foundation



Les doctorants MELiSSA. Sofia, Bulgarie - © MELiSSA Foundation

Un exemple de collaboration spatial-terrestre

À la fin des années 1990, le projet MELiSSA a dû répondre à des interrogations concernant les risques sanitaires associés à l'utilisation de bactéries pour le traitement des déchets en environnement spatial. Si le fonctionnement du procédé à 55°C permet déjà de limiter fortement la présence d'agents pathogènes, cette approche ne garantit pas une sécurité absolue. Quant à une stérilisation complète des déchets, elle nécessiterait une consommation énergétique trop importante, peu compatible avec les contraintes des missions spatiales.

Les équipes ont alors choisi d'explorer une autre voie en développant, en partenariat avec bioMérieux, un outil capable de détecter et d'identifier rapidement d'éventuels micro-organismes pathogènes. Malgré des cultures de travail très différentes entre le secteur spatial et le monde industriel, cette collaboration s'est révélée particulièrement fructueuse.

Elle a conduit au développement de la technologie BioFire®, une plateforme d'analyse microbiologique capable de fournir des résultats en un temps réduit. Quelques années plus tard, cette innovation a connu une destinée inattendue lors de la pandémie de Covid-19, en devenant l'une des premières solutions de détection déployées à l'échelle mondiale. Cet exemple démontre ainsi comment des technologies développées pour l'exploration spatiale peuvent dépasser leur vocation première et trouver des applications déterminantes dans des domaines comme la santé publique.

Faire naître des vocations

Issu du monde du spatial, le projet MELiSSA s'est construit autour d'une démarche fondée sur la compréhension approfondie des phénomènes, leur maîtrise et leur prédictibilité. Cette approche, ancrée dans la recherche fondamentale, permet de développer des briques technologiques robustes, fiables et réutilisables sur le long terme.

L'une des grandes forces du programme réside également dans sa dimension collaborative européenne. En réunissant des équipes issues de nombreux pays et disciplines, MELiSSA favorise la confrontation d'idées, la complémentarité des expertises et l'émergence de nouvelles perspectives. Les enjeux environnementaux actuels constituent par ailleurs un puissant moteur pour le projet, suscitant un intérêt croissant et une forte mobilisation, notamment auprès des jeunes générations.

Enfin, au-delà de ses avancées scientifiques et technologiques, MELiSSA joue un rôle important dans l'éducation. Par sa nature même, le projet mobilise un large éventail de disciplines, des sciences du vivant à la physique, la chimie ou les mathématiques, tout en ouvrant la réflexion à des questions plus larges liées à l'histoire, à l'éthique ou à la philosophie. Cette approche transversale en fait un remarquable support pédagogique. Des actions de médiation et d'enseignement sont ainsi menées auprès de publics variés, de l'école primaire aux établissements d'enseignement supérieur, contribuant à la diffusion des connaissances, à l'ouverture interculturelle et à l'émergence de nouvelles vocations scientifiques.

Pour en savoir plus :

Projet MELiSSA
Fondation MELiSSA
Christophe Lasseur
christophe.lasseur@outlook.fr
urlr.me/mjs8GM

J S. Lopes

© La Gazette du Laboratoire