



**HAL**  
open science

## Des hommes et des plantes dans l'espace

Eugénie Carnero Diaz, Isabel Le Disquet, Valérie Legué, Veronica Pereda-Loth

► **To cite this version:**

Eugénie Carnero Diaz, Isabel Le Disquet, Valérie Legué, Veronica Pereda-Loth. Des hommes et des plantes dans l'espace. L'humain et l'Espace - Ses adaptations physiologiques -, 2020, 978-2-3222-7062-0. hal-04045477

**HAL Id: hal-04045477**

**<https://hal.science/hal-04045477v1>**

Submitted on 24 Mar 2023

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

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

## Chapitre 11

### **TITRE :**

Des hommes et des plantes dans l'espace

### **AUTEURS :**

#### **Eugénie Carnero Diaz**

Sorbonne Université - Muséum National d'Histoire Naturelle  
Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité

#### **Isabel Le Disquet**

Sorbonne Université - Muséum National d'Histoire Naturelle  
Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité

#### **Valérie Legué**

Université Clermont Auvergne  
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)

#### **Veronica Pereda-Loth**

Université Paul Sabatier Toulouse III  
Groupement Scientifique de Biologie et de Médecine Spatiale

## **Sommaire**

<b>Introduction</b> .....	2
<b>1. Histoire de la conquête spatiale par les plantes</b> .....	2
<b>2. La place des plantes dans les supports de vie</b> .....	4
<b>3. Les plantes dans l'environnement spatial</b> .....	4
<b>a. La gravité contrôle la posture et le développement des plantes</b> .....	5
<b>b. Les radiations cosmiques : risque majeur de létalité et de mutations</b> .....	7
<b>c. Le champ magnétique</b> .....	8
<b>4. Les outils expérimentaux</b> .....	9
<b>a. Les modules de culture dans l'espace</b> .....	9
<b>b. Les simulateurs des conditions spatiales de culture sur Terre</b> .....	10
<b>Conclusions et perspectives</b> .....	10
<b>Focus 1 : Le changement de position des capteurs de la gravité induit une réponse de signalisation : expérience spatiale GRAVI-2</b> .....	11

## **Focus 2 : Impact du milieu spatial confiné sur le protéome membranaire des plantes : expérience spatiale GENARA-A..... 12**

### **Introduction**

#### **Les plantes sont associées à l'Homme depuis le début de la conquête spatiale.**

Cette collaboration perdure et ne cesse de se renforcer puisqu'actuellement elles sont activement impliquées dans les projets de missions de longue durée vers Mars. En effet, une telle mission, estimée à trois ans n'est pas concevable sans la collaboration des plantes et des microorganismes. Ce n'est pas tant la durée du séjour dans l'espace qui soit limitant, mais c'est l'absence de ravitaillement qui rend, pour l'instant, la mission impossible. Le record actuel de séjours dans les stations spatiales qui est d'environ 12 mois comprend de fréquents ravitaillements qui assurent un approvisionnement régulier en éléments vitaux tels que l'oxygène, l'eau et la nourriture ainsi que l'évacuation des déchets organiques (urines, fèces...). Ces consommables représentent une masse annuelle de 12 tonnes par personne (Barta et Henninger, 1994). Par conséquent, rien que la charge nécessaire pour les besoins vitaux d'un équipage de 6 personnes rend inenvisageable les missions martiennes dans de telles conditions. En raison de leurs aptitudes physiologies, les plantes sont destinées à occuper une place centrale dans les supports de vie.

Le voyage spatial implique de traverser des zones aux contraintes variables auxquelles les plantes devront s'acclimater. Si la microgravité est la contrainte la plus évidente, les radiations et divers champs magnétiques sont également des facteurs susceptibles d'affecter la physiologie des plantes. De plus, celles-ci devront se développer dans des conditions difficiles où les ressources en eau, en éléments minéraux et en lumière seront limitées et où le renouvellement de l'oxygène et du dioxyde de carbone sera restreint.

A long terme, l'ensemble de ces contraintes exercera un fort impact sur le développement de la plante et donc sur son rendement. Il est par conséquent essentiel de mieux appréhender les effets de ces facteurs sur le développement des plantes lors de leur culture en conditions spatiales, notamment dans le cadre de la conception des supports de vie.

Des programmes de recherche, réalisés en conditions spatiales réelles combinés à des expérimentations au sol, ont permis de préciser l'impact de telles conditions sur le développement des plantes.

### **1. Histoire de la conquête spatiale par les plantes**

Les graines sont les pionnières de la conquête spatiale puisqu'avec un métabolisme pratiquement inactif, elles sont peu sensibles aux conditions environnementales. C'est ainsi que dès les années 50, des graines de lis, de moutarde (Beal, 1951) et d'orge (Eugster et Simons, 1960) ont été transportées à bord de ballons, à des altitudes pouvant atteindre 30 km où elles ont été exposées aux rayonnements cosmiques. De retour sur Terre, les graines ont germé pour donner des individus aux phénotypes non altérés. Ces observations ont par la suite été confirmées et complétées par des expériences menées sur des graines d'Arabidopsis et de tabac exposées, environ 20 mois, au vide spatial à 400 km d'altitude (Tepfer et Leach, 2017). Toujours à l'état de graines, les arbres ont participé à la mission Apollo 14 en 1971. Après un séjour de 2 semaines, autour de la Lune dans un environnement spatial confiné, les graines de sapin

Douglas, de pin, de séquoia, de liquidambar et de platane ne présentaient pas d'anomalies. Les arbres obtenus sur Terre, après la germination des graines, appelés Moon Trees, ont été plantés dans différents Etats américains à l'occasion du bicentenaire de la déclaration d'indépendance.

La capacité des graines à germer dans un environnement spatial ayant été vérifiée, l'étude s'est ensuite portée sur les plantes adultes. Il s'agissait là d'une étape décisive puisque ces organismes en phase de vie active sont sensibles aux conditions environnementales. La mise en place des stations spatiales a rendu possible l'étude du développement des plantes dans un environnement confiné, en raison de leur capacité d'accueil et du temps de séjour accrus par rapport à ceux qu'offraient les fusées.

En 1973, c'est à bord de la station américaine Skylab que les premières études sur les effets de la gravité et de la lumière sur les plants de riz ont été réalisées au cours du programme "SP-401 Skylab, Classroom in Space" mené par des étudiants. L'astronaute E. Gibson qui avait ensemencé les plantes dans la station est ainsi devenu le "premier paysan de l'espace". Peu de temps après, le cycle biologique complet de graine à graine d'*Arabidopsis thaliana* a été bouclé pour la première fois à bord de la station soviétique Salyut-7 (Merkys *et al.*, 1984).

De nombreuses expériences scientifiques se sont ensuite succédées à bord de la station russe MIR, puis de la Station Spatiale Internationale (ISS). Cette recherche fondamentale a apporté de grandes avancées dans la compréhension de la perception et de la signalisation des facteurs environnementaux ainsi que sur leur action sur le développement des plantes.

Une fois que la culture des plantes en milieu spatial confiné a été maîtrisée, le partenariat Hommes – Plantes pour la conquête spatiale a pu franchir une nouvelle étape. Il est maintenant envisageable de mettre à contribution les plantes afin d'assurer l'alimentation et la survie des Hommes dans l'espace. C'est dans ce but que les serres spatiales ont été développées. La première serre spatiale, SVET-2, a été installée à bord de la station MIR en 1997. Elle a permis l'étude de la germination des graines et le développement des plantes en apesanteur. Quant au système de culture VEGGIE (Vegetable Production System), installé par la NASA à bord de l'ISS, il a produit en 2015, **les premiers plants de laitue consommés dans l'espace** (figure 16.1). Cette serre a également abrité la floraison de Zinnia un an plus tard.

En 2019, les scientifiques chinois ont conçu sur la Lune, un système de culture auto-alimenté, basé sur le modèle d'un écosystème. Il réunissait les conditions physico-chimiques de température, de luminosité, d'humidité et de substrat favorables à la culture et au développement du coton, de la pomme de terre, du colza, et d'*Arabidopsis*, mais aussi de la levure et de la drosophile. Dans cet écosystème, les plantes enrichissent l'atmosphère en oxygène tout en consommant le dioxyde de carbone pour leur photosynthèse. Elles représentent également une source de nourriture pour les mouches et les levures. Ces dernières sont chargées du recyclage des déchets organiques.

L'expérience, qui a débuté par la germination des graines de coton, s'est arrêtée faute d'énergie suffisante fournie par des panneaux solaires. Bien qu'elle ne se soit pas déroulée au-delà de 9 jours, elle est pionnière dans la conception d'une base lunaire.

## 2. La place des plantes dans les supports de vie

**Les supports de vie sont des écosystèmes artificiels simplifiés et auto-entretenus, dans lesquels l'homme, les plantes et les microorganismes interagissent en circuit fermé.**

Le rôle qu'occupent les plantes dans de tels systèmes est essentiel puisqu'elles constituent non seulement un apport nutritionnel indispensable pour l'Homme mais elles contribuent aussi au maintien de l'écosystème spatial. En effet, en procédant à la photosynthèse, elles assurent le renouvellement de l'atmosphère en captant le dioxyde de carbone et en produisant de l'oxygène. Les plantes favorisent également le recyclage des eaux usées et le maintien de l'humidité atmosphérique étant donné que l'eau qu'elles absorbent par leurs racines est rejetée dans l'atmosphère, par l'évapo-transpiration foliaire. De plus, elles ont un impact psychologique non négligeable sur l'équipage (figure 16.2), sans oublier les propriétés des plantes médicinales.

Différents supports de vie sont actuellement expérimentés. Parmi eux, le système européen MELISSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative) et le système américain CyBLISS (Cyanobacterium-Based Life Support Systems) semblent les plus représentatifs.

Le système MELISSA, initié par l'Agence Européenne Spatiale (ESA), s'inspirant d'un écosystème lacustre, comporte cinq compartiments interconnectés (figure 16.3) (Lasseur *et al.*, 2010). Les compartiments I, II et III contenant des microorganismes, sont chargés de la dégradation et de la transformation des déchets organiques en éléments minéraux assimilables par les plantes et les cyanobactéries du compartiment IV. Celles-ci fournissent de la nourriture, de l'oxygène et de l'eau potable au cinquième compartiment, occupé par l'équipage et elles en absorbent le dioxyde de carbone.

Le système CyBLISS qui a été développé par les agences américaine (NASA), allemande (DLR) et italienne (ASI) est plus spécifiquement ciblé sur la colonisation de Mars. Il est basé sur le même principe de celui de MELISSA avec comme producteurs primaires des cyanobactéries et des végétaux supérieurs qui consomment le dioxyde de carbone et l'azote atmosphériques. Ils produisent aussi de l'oxygène et de la biomasse assimilable par l'Homme. Mais, l'originalité de cet écosystème artificiel réside dans sa connexion avec le biotope martien. En effet, les cyanobactéries transforment la matière minérale présente dans le sol martien afin de produire des biocarburants et des éléments nutritifs assimilables par les plantes.

Ainsi, la conception d'un support de vie doit intégrer les différentes fonctions assurées par les plantes. **Il n'y aura donc pas un seul type de plantes embarquées mais des équipes de plantes performantes dans la nutrition, la photosynthèse, la tolérance aux polluants, à la sécheresse...**

## 3. Les plantes dans l'environnement spatial

Bien qu'il soit possible de contrôler les conditions de culture, certains facteurs tels que la gravité, les radiations et les champs magnétiques, qui affectent le développement des plantes ne peuvent pas être supprimés. Les études menées dans l'espace et sur Terre permettent aux scientifiques de recueillir des données essentielles sur l'impact de ces facteurs dans le développement et la physiologie des plantes.

### a. La gravité contrôle la posture et le développement des plantes

La microgravité est la contrainte dont les effets ont le plus été étudiés. Ces recherches ont permis de mieux comprendre, d'un point de vue fondamental, la détection de la gravité par les plantes et l'impact qu'exerce la microgravité sur leur physiologie.

**Les plantes se servent de la gravité pour orienter leur croissance de façon à maintenir un port dressé quelques soient les perturbations du biotope** (glissement de terrain, falaise...) (Bastien *et al.*, 2013). C'est par exemple ce phénomène qui permet à un arbre dont le tronc s'est couché à la suite d'un glissement de terrain, de modifier le sens de sa croissance de façon à reprendre une croissance verticale. Ce phénomène, appelé gravitropisme, offre l'avantage unique aux racines de pénétrer et de s'ancrer dans le sol et aux organes aériens de croître verticalement. Des expériences réalisées en laboratoire en utilisant des simulateurs de microgravité ou réalisées dans l'ISS en microgravité réelle, ont permis de comprendre les mécanismes moléculaires, cellulaires et physiques impliqués dans la détection de la gravité.

*A l'origine : la détection de la gravité...l'hypothèse nouvelle d'un senseur de position*

À l'origine de la perception de la force gravitationnelle par les plantes, se trouvent des cellules, appelées statocytes. Elles sont situées dans l'endoderme des jeunes tiges, dans le phloème secondaire des organes plus âgés et au centre de la coiffe des racines (Gerttula *et al.*, 2015). Ces cellules ont la particularité de posséder de volumineux amyloplast (organites cellulaires riches en amidon), appelés statolithes dont la densité est supérieure à celle du cytoplasme environnant, ce qui leur permet de sédimenter dans la cellule en direction de la gravité (figure 16.4 A et B). C'est la pression qu'exercent les statolithes sur la partie basale de la cellule qui crée le signal de perception de la gravité. Il s'en suit une perturbation du transport de l'auxine dans la plante à l'origine d'une courbure de la tige ou de la racine (Baldwin *et al.*, 2013). Il est généralement admis que les statolithes agissent comme des capteurs de position et non comme des capteurs de force (Chauvet *et al.*, 2019). Des expériences spatiales ont mis en évidence la forte sensibilité du système de perception de la gravité des plantes puisque les racines de lentilles perçoivent jusqu'à  $1,4 \cdot 10^{-4}g$  (Driss-Ecole *et al.* 2008). De même qu'un faible déplacement des statolithes est suffisant aux racines de Colza (Bizet *et al.*, 2018) et de Lentille (voir Focus) pour percevoir la gravité et que ces plantes n'ont pas besoin de percevoir la gravité en continu pour y répondre. Ainsi, il suffit aux racines de lentilles de percevoir une dose de 1g pendant une seconde, pour répondre à la gravité.

La sédimentation des statolithes s'accompagne de certaines modifications physiologiques dont une variation du pH de l'apoplaste, une augmentation de la concentration intracellulaire des espèces réactives oxygénées réactives (ROS) et des changements de la concentration en calcium cytosolique (Baldwin *et al.*, 2013). A la fin de la voie de signalisation, la croissance différentielle conduisant à la courbure de l'organe est déclenchée par un flux d'auxine redirigé vers la partie inférieure de l'organe de la plante (figure 16.4 C). De nombreuses études ont montré que le flux d'auxine est contrôlé par la relocalisation de transporteurs de l'auxine, en particulier les protéines PIN-FORMED (PIN).

Bien que l'implication de ces acteurs dans la voie de signalisation soit correctement argumentée, la relation entre eux n'est pas complètement élucidée.

*La microgravité affecte-t-elle le rendement et la performance des plantes ?*

Dès les années 70, l'aptitude des plantes à croître en microgravité réelle a été vérifiée étant donné que dans l'espace les plantes produisent des phénotypes comparables à ceux observés sur Terre. La seule

différence visible réside dans le fait qu'en absence de gravité, les plantes ne peuvent pas orienter leur croissance qui se fait alors de façon aléatoire. En revanche, en terme de vitesse de croissance et donc de rendement, les observations divergent puisque certains auteurs n'observent aucun effet (De Micco *et al.*, 2014) alors que d'autres constatent une inhibition (Paul *et al.*, 2012) ou au contraire une stimulation de la croissance (Matia *et al.*, 2010). Il semblerait que la croissance et le développement des plantes soient non seulement dépendants de l'espèce et du stade de développement considérés mais aussi des conditions de culture en milieu spatial confiné. Par exemple, l'absence de convection des gaz, inhérente à la microgravité, génère au contact des feuilles, des conditions de culture défavorables aboutissant à une diminution de la photosynthèse et de l'évapotranspiration des feuilles, ainsi qu'une augmentation de la photorespiration (Stutte *et al.*, 2005). De plus, les plantes produisent des substances toxiques volatiles, qui ne sont pas dispersées dans l'air et finissent par les intoxiquer (Kiss *et al.*, 1999). A l'instar de ce qui se produit dans les parties aériennes, la rhizosphère (zone d'échange de la racine avec son substrat) s'appauvrit en oxygène ce qui crée une zone d'hypoxie autour des racines. La combinaison des racines asphyxiées avec l'absence de transpiration foliaire induit une diminution de l'absorption hydrominérale des racines et du transport des nutriments dans la plante (Porterfield, 2002).

Outre le fait de générer des conditions de culture défavorables, la microgravité agit directement sur la croissance et le développement des plantes comme le montre les recherches menées sur le fonctionnement des méristèmes (territoires cellulaires contenant les cellules souches des plantes). Des études menées dans l'ISS et sur Terre avec des simulateurs de microgravité, ont montré que les cellules méristématiques racinaires d'*Arabidopsis thaliana* cultivé en microgravité, ont un fonctionnement perturbé puisqu'elles ont un taux de prolifération élevé et une taille plus petite (Boucheron-Dubuisson *et al.*, 2018). Des modifications dans la régulation du cycle cellulaire ont également été observées chez *Arabidopsis thaliana* et chez la lentille (Yu *et al.*, 1999). A l'échelle moléculaire, le niveau d'expression de certains gènes est modifié. Ces gènes sont impliqués dans le transport et la perception de l'auxine, le flux calcique, l'organisation cytosquelette, la formation des parois cellulaires ainsi que dans les réactions de défense et de stress (Correll *et al.*, 2013). L'étude protéomique menée chez *Arabidopsis thaliana* au cours de l'expérience GENARA-A (voir Focus,) a révélé une accumulation des protéines liées aux voies métaboliques de la glycolyse et du cycle de Krebs (Mazars *et al.*, 2014). Les analyses effectuées à l'échelle moléculaire et cellulaire indiquent donc la mise en place de réponses de stress démontrant que les plantes perçoivent l'absence de gravité comme un facteur de stress.

Si la microgravité et les conditions de culture des plantes dans l'ISS ont un impact sur la physiologie des plantes, **l'absence d'effets importants de la microgravité sur la croissance des plantes suggère leur capacité à s'acclimater à un nouvel environnement.** Cependant, cette adaptation suppose aussi un coût énergétique important pouvant, à plus ou moins long terme, conduire à une baisse de rendement et des performances des plantes (nutritives, photosynthèse...), risquant ainsi de compromettre leur efficacité dans les supports de vie.

#### *Définir les bonnes conditions de culture*

Une meilleure connaissance des métabolismes sollicités et de leurs interactions, permettrait de définir des besoins spécifiques des plantes cultivées dans l'espace. Des apports ciblés et adaptés assureraient alors une production végétale satisfaisante qui permettrait aux plantes d'occuper leur place dans les supports de vie.

La mise en place d'une ventilation est par exemple suffisante pour améliorer les échanges gazeux et la nutrition minérale, de même que des dispositifs de capture des substances volatiles toxiques évitent l'auto-intoxication des plantes. L'apport d'une lumière rouge restaurerait quant à lui le fonctionnement des méristèmes (Valbuena *et al.*, 2018).

La sélection des plantes est déterminante lors de la conception des supports de vie. C'est ainsi que les idéotypes, c'est à dire des plantes capables de répondre rapidement à des changements de situations gravitaires, seront de préférence recherchés.

### **b. Les radiations cosmiques : risque majeur de létalité et de mutations**

Le cosmos est parcouru par des radiations, appelées aussi rayonnement cosmique ionisant, composées de particules (protons, électrons, neutrons et des noyaux lourds) et d'ondes (rayons alpha, beta, gamma et X) provenant du soleil, de la ceinture de Van Allen et des rayons cosmiques galactiques générés par les supernovas, les trous noirs, etc... Sur Terre, elles sont majoritairement arrêtées par la magnétosphère et l'atmosphère et ne représentent que 14% des 3 mSv/an (0,008 mSv/jour) présents en moyenne à la surface de la Terre. En quittant notre planète, les plantes seront exposées à des niveaux de radiations élevés et variables et ce malgré les blindages de protection des vaisseaux. Il a été estimé qu'au cours d'une mission spatiale de trois ans sur Mars, les organismes vivants seront exposés de façon constante à de faibles taux de radiations estimés à un total cumulé de 1,2 Sv. Les éruptions solaires ou autres phénomènes énergétiques intergalactiques provoquent ponctuellement des pics pouvant augmenter jusqu'à 50 000 fois le niveau des radiations.

#### *Interactions radiations et ADN végétal*

Il existe très peu de données sur l'effet des radiations cosmiques sur les cellules végétales. De plus les résultats sont souvent difficiles à interpréter car la réponse des plantes aux radiations dépend des espèces et de leur stade de développement, ainsi que de la nature du rayonnement et de la dose reçue (Biermans *et al.*, 2014). Toutefois, les données recueillies, rassemblées dans la figure 16.5, montrent que lorsqu'il pénètre les cellules, **le rayonnement ionisant interagit directement avec les molécules intracellulaires, dont l'ADN où il induit des cassures DSB** (Double Strand Break) sur les deux brins de la double hélice. Le rayonnement ionisant provoque aussi la radiolyse de l'eau cellulaire, qui libère des espèces réactives de l'oxygène (ROS) telles que l'hydroxyle ( $^{\circ}\text{OH}$ ), le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) et le superoxyde ( $\text{O}_2^{\circ-}$ ). Le stress oxydatif qui s'en suit, provoque des cassures SSB (Single Strand Break) sur un seul brin de l'ADN.

#### *Les systèmes de réparation de l'ADN*

Les cellules possèdent différents systèmes de perception et de réparation qu'elles mettent en place selon la nature des dommages subis par l'ADN. Les DSB sont préférentiellement détectées par la voie ATM/ATR (Ataxia Telangiectasia Mutated/Ataxia Telangiectasia Related) et réparées par les voies HR (Homologous Recombination) et NHEJ (Non-Homologous End-Joining), alors que les SSB sont détectées par les PARP [Poly(ADP-Ribosyl)-polymerases] et réparées par les mécanismes BER (Base Excision Repair) et NER (Nucleotide Excision Repair (Chen *et al.*, 1994 ; Britt, 1996). La réparation HR consiste en une réparation conservatrice qui recombine la région endommagée avec une séquence identique de la cellule, tandis que la réparation NHEJ joint les extrémités des doubles brins cassés de façon aléatoire, induisant ainsi un remaniement de l'info génétique. Les deux voies de réparation des DSB de l'ADN sont

présentes dans les cellules végétales, toutefois, leur efficacité relative varie en fonction de l'âge de la plante comme le démontrent les travaux de Waterworth *et al.* (2011). Ils ont montré que la voie HR est prédominante chez les plantes jeunes, alors que c'est NHEJ qui est majoritaire chez les plantes âgées. Il est à noter que la détection des lésions de l'ADN induit l'arrêt du cycle cellulaire ce qui permet la mise en œuvre des processus de réparation avant l'entrée en mitose des cellules affectées par les radiations (De Veylder *et al.*, 2007).

Lorsque la réparation de l'ADN est fidèle, elle permet la conservation du phénotype de la plante. Par contre, si les systèmes de réparation sont saturés ou défaillants, la mutation n'est alors pas, ou mal, corrigée.

**Selon l'endroit de l'ADN où elle se situe, elle peut provoquer des modifications phénotypiques, des pertes fonctionnelles, voire la mort cellulaire.**

De plus, les modifications non létales produites auront des impacts différents selon les cellules touchées. Ainsi, si un organe de la plante perd ses fonctions suite à une mutation, de nouveaux organes prennent la relève étant donné que les végétaux ont la particularité de produire de nouveaux organes tout au long de leur vie grâce à leurs cellules méristématiques. Or, ce sont les cellules méristématiques qui sont les plus sensibles aux radiations. Ainsi, dans le cas où une mutation touche le méristème végétatif, les organes néoformés sont susceptibles d'être modifiés avec pour conséquence une plante défailante. Mais, cette atteinte se limite à la plante concernée et la mutation disparaît avec la mort de la plante. Par contre, si ce sont les méristèmes reproducteurs qui sont touchés, alors la mutation a de fortes probabilités de se transmettre à la génération suivante.

#### *Effet des radiations sur l'expression du génome*

En dehors de toute mutation, les radiations altèrent le taux d'expression de certains gènes. La nature des gènes concernés dépend de la quantité de radioéléments reçue. En 1999, Mevzgodina montre que l'expression du génome de plantes soumises à de faibles doses de radiations est davantage modifiée que celle de plantes exposées à une forte dose appliquée ponctuellement. Il s'est avéré qu'au cours d'une irradiation aiguë, le groupe de gènes le plus exprimé est celui du stress oxydatif, alors qu'un rayonnement chronique plus faible régule l'expression des gènes liés au stress et au métabolisme des acides nucléiques, à la photosynthèse et au métabolisme des glucides (Kovalchuk *et al.*, 2007).

**Ces différences sont révélatrices d'une réponse adaptative ajustée à la dose reçue.**

Jusqu'à présent, les études de radiobiologie ont été menées sur Terre. Il reste encore à déterminer la radiosensibilité des plantes dans les conditions spatiales de culture, lorsqu'elles sont en cours d'adaptation aux modifications des forces gravitationnelles et du champ magnétique. Même si les blindages des vaisseaux confèrent une certaine protection contre les radiations cosmiques et qu'il a été préconisé l'enfouissement des modules de culture sur Mars, il est indispensable de tenir compte de la sensibilité des plantes aux différentes radiations ainsi que des performances de leurs systèmes de réparation de l'ADN, lors de la conception des supports de vie.

### **c. Le champ magnétique**

La terre possède un champ magnétique global moyen de 47  $\mu$ T qui, en piégeant les particules cosmiques chargées, constitue un véritable bouclier de protection. La Lune et Mars, sont dépourvues de

ce champ magnétique protecteur. Elles possèdent uniquement différents champs magnétiques localisés à leur surface avec des forces et des directions variables.

**Les plantes sont sensibles au champ magnétique** même si elles y répondent différemment au niveau de leur croissance, leur développement et leur métabolisme. Un faible champ magnétique produit une stimulation de la croissance chez certaines plantes alors que chez d'autres, il aura des effets inhibiteurs (Karoliussen *et al.*, 2013). Un champ magnétique 10 fois supérieur à celui de la Terre provoque une inhibition de la croissance hypocotylaire chez *Arabidopsis* (Ahmad *et al.*, 2007).

Peu de données existent sur le mécanisme de magnéto-réception des plantes, si ce n'est qu'il est étroitement lié à l'action du cryptochrome (Pooam *et al.*, 2019).

Les voyages interplanétaires placeront les organismes vivants dans un environnement au champ magnétique faible voisin de 1 nT ( $=10^{-3}$   $\mu$ T).

Bien que cela soit incontournable, l'effet d'un faible champ magnétique spatial sur la croissance et le développement des plantes n'a pas encore été étudié dans l'espace.

#### 4. Les outils expérimentaux

Plusieurs dispositifs, dans l'espace et sur Terre, permettent d'étudier la croissance et le développement des plantes dans les conditions spatiales.

##### a. Les modules de culture dans l'espace

**L'ISS abrite des incubateurs autonomes permettant de cultiver les plantes en conditions spatiales.** Parmi eux, le module européen EMCS (European Module Cultivation System) a hébergé avec succès de nombreuses expériences scientifiques végétales (Kittang *et al.*, 2014), telles que les expériences françaises de graviperception (Gravi-1 & 2) et de développement (Genara-A). Les expériences internationales de croissance (Multigen I), de phototropisme (Tropi-1 & 2) et du cycle cellulaire et de phototropisme (Seedling Growth 1, 2 & 3) s'y sont également déroulées. Le contrôle de nombreux facteurs environnementaux (température, luminosité, photopériode, humidité et composition de l'atmosphère) que permet ce module de culture lui assure ses hautes performances. De plus, ses plateaux tournants permettent d'obtenir différents niveaux de pesanteur. Et enfin, la dimension de ses boîtes de culture autorise le déroulement complet du cycle de développement d'*Arabidopsis thaliana* sur 2 mois de culture après germination.

Les expériences de courte durée sont, quant à elles, réalisées dans le module européen automatisé Kubik, dont les cassettes de taille réduite ne tolèrent que des expériences de quelques heures. C'est dans ce module de culture que s'est déroulée l'expérience française PolCa portant sur l'étude de la perception de la pesanteur chez le Colza. Tous ces incubateurs qui fonctionnent de façon autonome sont particulièrement adaptés aux expériences de recherche fondamentale. En revanche, ils ne permettent pas la production à plus grande échelle de plantes plus volumineuses en vue de leur utilisation en tant que support de vie (alimentation, purification de l'atmosphère ...). Pour répondre à cet objectif, l'ISS accueille maintenant une nouvelle génération de modules basés sur le fonctionnement des serres de cultures terrestres. En 2014, la NASA a mis au point la serre VEGGIE (Vegetable Production System) permettant la culture de plantes comestibles dans l'espace.

Comme pour les modules de culture précédents, VEGGIE fournit un éclairage, un apport en éléments nutritifs et un contrôle thermique aux cultures végétales. C'est un système ouvert qui utilise l'atmosphère de la cabine et les plantes sont directement accessibles à tout moment de leur culture. En 2015, le fonctionnement de la serre VEGGIE a été couronné de succès puisque, pour la première fois et après 33 jours de culture exclusivement spatiale, une laitue romaine rouge a été consommée par l'équipage.

**Un équipage qui a également bénéficié des bienfaits de l'activité de "jardinage" laquelle a influé favorablement sur son bien être psychologique.**

#### **b. Les simulateurs des conditions spatiales de culture sur Terre**

Même si le milieu spatial reste, en théorie, le milieu idéal pour étudier l'action de ses facteurs environnementaux sur la croissance et le développement des plantes, l'accès à l'ISS est limité. De plus, la mise au point des coûteuses expériences spatiales implique de réaliser de nombreuses études au sol. **C'est ainsi qu'ont été développés des systèmes expérimentaux permettant de reproduire sur Terre l'environnement spatial, tout du moins en partie.** Ces dispositifs, connus sur le nom de Ground Based Facilities (GBF), ont pour but de reproduire essentiellement la micropesanteur et/ou les radiations cosmiques et sont hébergés dans des laboratoires européens soutenus par le CNES et l'ESA (Herranz *et al.*, 2013).

Les tours de chute libre et des vols paraboliques se basent sur le fait que l'état de micropesanteur est atteint au cours de la chute d'un objet. Ces dispositifs présentent l'avantage d'obtenir une micropesanteur réelle sans voyager dans l'espace. Cependant, l'état de micropesanteur ne dure que quelques secondes, ce qui limite leur utilisation à l'étude de phénomènes cellulaires de signalisation rapides et précoces. La pesanteur terrestre ne pouvant pas être modifiée, seule une micropesanteur simulée permet d'obtenir d'un état de micropesanteur sur une longue durée. Il existe plusieurs simulateurs de la microgravité avec des principes de fonctionnement différents. Les clinostats et les Random Positioning Machine (RPM) sont des appareils qui génèrent des changements répétés d'orientation.

Ainsi, lorsque les plantes sont fixées dessus, leur système de graviperception n'a pas le temps de percevoir la pesanteur. La plante ainsi bernée répond à l'absence de gravité. Les lévitateurs magnétiques placent les molécules cellulaires en lévitation sous l'action de champs magnétiques élevés. Ces simulateurs, placés dans des chambres de culture permettent de reconstituer les principaux paramètres de l'environnement spatial confiné. Ils présentent ainsi l'avantage d'obtenir une micropesanteur simulée pendant plusieurs jours, permettant l'étude du cycle complet de la plante.

**Le dispositif appelé MARSimulateur (Microgravity And Radiation Simulator), permet de placer les plantes dans des conditions de culture contrôlées en apesanteur et soumises à un rayonnement gamma.**

Le rayonnement spatial est ici recréé par du nitrate de thorium qui émet un rayonnement continu de faible intensité (0,33 mSv/jour) (Pereda-Loth *et al.* 2018).

### **Conclusions et perspectives**

**Les plantes sont vouées à assumer plusieurs fonctions lors d'une mission spatiale**

Les plantes sont associées à l'Homme depuis le début de la conquête spatiale, d'abord en tant que sujet d'étude, puis comme partenaire. En effet, de nombreuses études montrent la capacité élevée que possèdent les plantes à s'adapter à leur environnement et à ses changements.

**De plus, l'aptitude des plantes à croître et à se développer dans un milieu spatial confiné n'est plus à démontrer.**

La préparation de missions spatiales de longue durée dans le but d'atteindre la planète Mars, a débouché sur la conception de **supports autonomes de vie dans lesquels les plantes occupent une place déterminante en tant que producteurs primaires autotrophes de matière organique**. De ce fait, la relation qui s'établit entre les Hommes et les plantes prend davantage l'apparence d'une symbiose puisque la survie des deux partenaires est étroitement liée.

En raison de leurs aptitudes variées, les plantes sont vouées à assumer plusieurs fonctions dans les supports de vie. C'est ainsi que certaines assureront le renouvellement de l'atmosphère en recyclant le dioxyde de carbone et en produisant l'oxygène, tandis que d'autres seront destinées à l'alimentation humaine, ou seront chargées du recyclage des déchets organiques. De ce fait, il n'y aura pas qu'un seul type de plantes embarqué mais plusieurs catégories de plantes performantes dans les différents domaines définis.

Cependant, il est indispensable de s'assurer de la capacité des plantes à s'acclimater de façon stable et durable à un environnement dont certains paramètres tels que la microgravité, les radiations et les champs magnétiques sont variables. Les études menées jusqu'à présent montrent que les plantes pourraient subir un stress génotoxique et des modifications anatomiques susceptibles d'affecter leurs rendements. Cependant, les plantes ont aussi fait leurs preuves quant à leurs moyens de défense et d'adaptabilité.

Une connaissance approfondie des mécanismes de stress, de défense, de réparation de l'ADN et d'acclimatation mis en place par les plantes permettrait de définir des conditions de cultures optimales assurant la stabilité et la pérennité des cultures. Il est également envisageable de consolider les performances des plantes avec l'assistance des biotechnologies. En aidant ainsi au maintien de son partenaire, l'Homme assure sa propre survie.

**De la poursuite et l'avancée de la recherche en biologie végétale spatiale dépend la progression de la préparation des vols spatiaux de longue durée.**

### **Focus 1 : Le changement de position des capteurs de la gravité induit une réponse de signalisation : expérience spatiale GRAVI-2**

Soutenue par l'ESA et le CNES, l'expérience spatiale Gravi-2 a eu lieu au sein de la Station Spatiale Internationale, en mai 2014. L'objectif de Gravi-2 est de mieux comprendre les processus qui résultent d'un changement de la répartition des statolithes lors d'un changement transitoire du niveau de gravité.

Au cours de l'expérimentation GRAVI-2, des germinations de lentille, âgées de 30 h (figure Focus A), ont été soumises à deux niveaux d'accélération : 0,01g, considérée comme proche du seuil de sensibilité gravitropique et 2g, après une période de croissance en micropesanteur. En combinant des

approches cellulaires et moléculaires, nous avons quantifié et comparé l'importance du déplacement et la position des statolithes avec la compartimentation du calcium ainsi qu'avec l'expression de gènes (figure Focus B).

L'analyse du positionnement des statolithes indique qu'ils sont majoritairement groupés (figure Focus C), formant un complexe statolithique qui subit un très faible déplacement à 0,01g (figure 11.6-D). Au contraire, une accélération de 5 min à 2g entraîne un déplacement important, se stabilisant après une courte période d'accélération (figure Focus D). De manière surprenante, il n'y a aucune modification de la compartimentation du calcium entre les différentes situations. La comparaison de l'accumulation des transcrits par analyse transcriptomique, entre la condition microgravité «  $\mu\text{g}$  » et «  $\mu\text{g}$  suivie de 0.01g » indique que peu de gènes sont régulés avec un niveau de régulation très bas. En revanche, la comparaison entre la condition microgravité «  $\mu\text{g}$  » et «  $\mu\text{g}$  suivie de 5min2g », indique que plus de 5000 gènes sont régulés.

**L'ensemble de ces données indiquent clairement que les réponses de signalisation dépendent du déplacement et de la position des statolithes.**

## **Focus 2 : Impact du milieu spatial confiné sur le protéome membranaire des plantes : expérience spatiale GENARA-A**

L'expérience GENARA-A, soutenue par le CNES (Centre National des Etudes Spatiales) s'est déroulée en 2010, dans le module européen Columbus à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS). Elle avait pour objectif d'évaluation des modifications se produisant dans le protéome membranaire de plantes au cours de leur croissance en milieu spatial confiné. Pour cela, des graines d'*Arabidopsis thaliana* ont été cultivées pendant 12 jours dans le module de culture EMCS (European Modular Cultivation System).

Les effets de la microgravité ont été observés par comparaison du protéome membranaire des plantules avec celui d'un témoin produit à bord de l'ISS, sur une centrifugeuse rétablissant artificiellement une gravité de 1g.

**L'augmentation du taux des protéines liées au stress et aux mécanismes de défense observée en microgravité, révèle que les plantes perçoivent la microgravité comme un facteur de stress** (figure Focus 2 A). Cependant, les biomasses produites dans les deux conditions de culture ne varient pas, les plantes mettent en place une réponse adaptative leur permettant de maintenir leur croissance, tout ou moins pendant 12 jours (Mazars *et al.*, 2014).

Les variations observées dans le taux des protéines impliquées dans des voies métaboliques permettent d'identifier les composantes de la réponse adaptative mise en œuvre par les plantes en microgravité (figure Focus 2 B). Des protéines de la glycolyse, du cycle de Krebs, de la synthèse des acides aminés ainsi que de la transcription sont surreprésentées, ce qui témoigne de l'activation des métabolismes nécessaires au maintien de la croissance des plantes en microgravité. La réponse métabolique adaptative s'accompagne également de la baisse de la respiration et de la synthèse pariétale. Certaines protéines sous-représentées liées à la signalisation auxinique et à la stabilité du cytosquelette (figure Focus 2 C) sont révélatrices de la désorganisation du cytosquelette et de la relocalisation des

transporteurs membranaires de l'auxine. La diminution du transport polarisé de la phytohormone et sa redistribution constituent la composante principale de la signalisation du facteur microgravité.

Au cours de cette expérience, un deuxième témoin 1g a été réalisé dans un laboratoire sur Terre. L'analyse statistique des concordances avec le témoin 1g produit à bord de l'ISS révèle une augmentation des protéines liées au stress oxydatif telles que les peroxydases et l'ascorbate oxydase ne pouvant pas être imputée à la microgravité (figure Focus 2 D). En fait, même en milieu confiné, les rayonnements cosmiques constituent un facteur incontournable de l'environnement spatial puisque certains d'entre eux traversent les boucliers de protection de l'ISS. Le stress oxydatif décelé chez les plantes indique que les radiations présentes dans l'ISS agissent sur la physiologie des plantes. Cependant, la biomasse des deux témoins étant identique, une fois de plus, **les plantes ont montré leur capacité d'adaptation aux conditions spatiales.**

L'expérience GENARA-A a montré que même si l'environnement spatial contrôlé provoque un certain stress chez les plantes, notamment en raison de la microgravité et de la présence des rayonnements cosmiques, grâce à des mécanismes d'adaptation, celles-ci sont capables de maintenir leur croissance à court terme. Cependant, ces changements de signalisation et métaboliques ont un coût énergétique pouvant conduire au vieillissement précoce des plantes.