

Réponse des plantes à l'environnement spatial : Un guide pour les futurs jardiniers de l'espace

Lucie Poulet¹ (chercheuse) et la classe de Terminale de l'Institution Sévigné de Mme Dugat²

Article original/Original article: L. Poulet, J.-P. Fontaine & C.-G. Dussap (2016) Plant's response to space environment: a comprehensive review including mechanistic modelling for future space gardeners, *Botany Letters*, 163:3, 337-347, DOI: [10.1080/23818107.2016.1194228](https://doi.org/10.1080/23818107.2016.1194228)

Institution : ¹NASA Kennedy Space Center, Florida, USA
²Institution Sévigné St Louis, 63500 Issoire, France

Résumé

L'étude de la croissance des plantes dans l'espace a commencé par l'étude de la faisabilité de leur croissance hors de la Terre et des différences existantes entre les plantes ayant grandi sur Terre et celles ayant grandi en orbite terrestre. Petit à petit, les systèmes de croissance se sont améliorés et on a ainsi pu différencier les effets directs et indirects de l'impesanteur. En revanche, jusqu'à présent, seules des expériences à petite échelle ont été réalisées, ce qui n'a pas permis l'acquisition de données suffisantes pour prédire avec précisions les rendements des plantes en environnements de gravité réduite. Pourtant, pour développer des systèmes support-vie qui permettront de maintenir les astronautes en vie sur les missions longue durée, il faudra envisager de la culture à plus grande échelle. De nombreux challenges restent à relever pour cultiver des plantes

dans l'espace, en ce qui concerne l'éclairage, l'arrosage, le choix des espèces, etc. et un effort important doit être développé sur la modélisation de leur croissance. Cela permettra d'apporter une compréhension plus vaste des phénomènes en jeu et un meilleur contrôle de leur croissance.

Mots clés

Contrôle environnemental et système support-vie ; modèle mécanistique ; impesanteur ; plantes ; espace

1. Introduction - ou pourquoi faire pousser des plantes dans l'espace ?

La croissance des plantes dans l'espace demande une excellente compréhension de leurs mécanismes de croissance et un savoir-faire pointu en matière d'agriculture en environnement contrôlé. Des plantes

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

poussent en orbite terrestre depuis des décennies (Porterfield 2003), mais les effets à long terme de l'environnement spatial ne sont encore pas complètement compris.

1.1. Les systèmes support-vie : Késako ?

La survie des astronautes dans l'espace dépend des systèmes support-vie (LSS¹), qui ont pour fonction de subvenir aux besoins élémentaires des astronautes : recycler l'air et l'eau, traiter les déchets et produire de la nourriture. Sur la station spatiale internationale (ISS²), seules les deux premières fonctions sont partiellement assurées par le LSS, grâce à des méthodes physico-chimiques : un réacteur de Sabatier³ et l'électrolyse de l'eau pour l'air, et des membranes de filtration pour l'urine et le condensat de l'air. Les déchets sont brûlés dans l'atmosphère terrestre et la nourriture est réapprovisionnée régulièrement par des vaisseaux cargos depuis la Terre. En effet, seuls des processus biologiques sont en mesure d'assurer la fonction de production de nourriture. On parle alors de systèmes support-vie biorégénératifs, qui nécessitent

un contrôle extrêmement précis pour être fiables et efficaces.

La recherche sur les LSS biorégénératifs a commencé dans les années 50. En ex-URSS entre 1965 et 1985, le système BIOS incluait des êtres humains, l'algue *Chlorella vulgaris* et des plantes (blé, chufa, betterave, carotte), leur fournissant la partie végétarienne de leur alimentation, qui était complétée par de la viande sèche. L'urine et les fèces n'étaient pas recyclés mais simplement stockés (Gitelson et al. 1989).

Dans les années 80, du côté américain, le programme Controlled Ecological Life-Support Systems⁴ (CELSS) de la NASA investiguait la production et la transformation de nourriture, la nutrition, l'écologie des systèmes fermés et le traitement des déchets, notamment grâce à la Biomass Production Chamber⁵ (BPC) du centre de la NASA Kennedy Space Center (KSC), une chambre de culture entièrement étanche avec une surface arable de 20 m² (Wheeler et al. 1996). Du côté européen, le principal projet sur les LSS régénératifs depuis 30 ans est le projet de l'agence spatiale européenne (ESA⁶) MELiSSA pour Micro-Ecological Life-Support System Alternative⁷.

¹ Abrégé LSS pour Life-Support System en anglais

² Abrégé ISS pour International Space Station en anglais

³ Dans une réaction de Sabatier le CO₂ et le dihydrogène réagissent ensemble pour créer de l'eau et du méthane

⁴ Systèmes support-vie contrôlés écologiquement

⁵ Chambre de production de biomasse

⁶ Abrégé ESA pour European Space Agency en anglais

⁷ Système support-vie micro-écologique alternatif

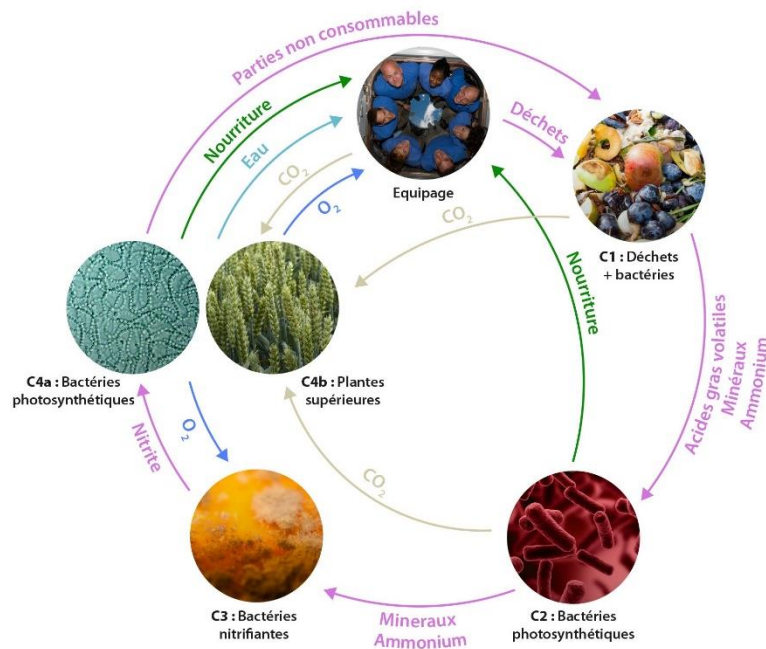


Figure 1: Schéma de principe de la boucle MELiSSA. Credits: ESA/MELiSSA

La boucle fermée MELiSSA est un écosystème artificiel qui s'inspire d'un écosystème naturel lacustre, reproduisant les différentes étapes de dégradation et transformation des déchets sous forme de cinq compartiments indépendants basés sur des bactéries, des micro-algues et des plantes (Lasseur et al. 2010) (Figure 1). Dans un environnement confiné, contrairement aux écosystèmes terrestres qui bénéficient des effets tampon des sols, de l'atmosphère ou des océans sur Terre, une petite variation de paramètres environnementaux peut avoir des répercussions dramatiques sur l'équilibre et le fonctionnement de la boucle dans son ensemble. Il est donc nécessaire de

développer des modèles mécanistiques des processus biologiques (dont la croissance des plantes) pour les comprendre en profondeur et ainsi pouvoir développer un LSS fiable.

1.2. Une croissance dans l'espace pour une croissance mieux comprise

Depuis les années 60, l'objectif de nombreuses expériences spatiales en biologie fondamentale a été d'étudier la croissance et le développement des plantes en orbite terrestre (Porterfield 2003). En effet cela permet d'étudier certains phénomènes en s'affranchissant de l'influence de la gravité.

3

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.

Au départ les chercheurs pensaient qu'un effet de l'impesanteur était une taille de plantes plus petite et que leur reproduction était affectée. Mais avec les progrès faits dans les systèmes de croissance, ces effets ont eu tendance à disparaître et il a depuis été démontré que les plantes ont une croissance quasi normale en impesanteur, si tant est que leur environnement est bien ventilé.

Après un résumé des différents effets de l'environnement spatial sur la croissance des plantes, une vue d'ensemble des systèmes de croissance est donnée et les challenges restants pour l'agriculture spatiale sont discutés.

2. Être une plante dans l'espace, qu'est-ce-que cela implique ?

L'absence de convection naturelle⁸ et le confinement des environnements spatiaux ont été à l'origine de nombreux effets sur le développement des plantes, attribués en premier lieu à une réaction à l'impesanteur. Ces effets de l'environnement spatial, dits indirects, ont été peu à peu effacés avec le développement de systèmes de croissance plus adaptés. Mais il semblerait que la

⁸ La convection naturelle est le résultat de l'ascension des masses d'air moins denses (air chaud) qui provoque un brassage de l'air naturellement sur Terre

réponse des plantes à l'impesanteur dépend de l'espèce et de la variété des plantes, ce qui complique la mise en évidence de schémas généraux. D'autres effets de l'environnement spatial qui ne sont pas discutés ici sont le champ magnétique et les fortes doses de radiations.

2.1. Echelle de la plante

De nombreuses expériences ont montré que la partie aérienne des plantes se développe de manière normale avec une ventilation adéquate. En revanche, les racines ne se développent pas de la même façon en impesanteur et en gravité terrestre. Sur Terre, les racines poussent en direction de la gravité (vers le bas), alors qu'en impesanteur, elles ne poussent pas en suivant une direction privilégiée, mais de manière aléatoire dans toutes les directions.

2.2. Echelle de l'organe

Les changements observés à l'échelle de l'organe sont principalement liés à des effets secondaires de l'impesanteur, dus à des changements de comportement des fluides autour des plantes.

2.2.1. *Prédominance des forces de tension*

Comme la force de capillarité est dominante en orbite terrestre, l'eau a tendance à rester collée autour des racines, ce qui les étouffe et empêche les plantes de pousser. Il a donc fallu développer des systèmes d'arrosage spécifiques pour les conditions d'impesanteur (aussi abrégée en 0g)⁹.

2.2.2. *Manque de convection naturelle*

L'absence de convection naturelle en impesanteur résulte en la formation d'épaisses couches d'air stagnant à la surface des feuilles des plantes, augmentant ainsi la résistance diffusive¹⁰ au transport des molécules de gaz dans l'air, ce qui réduit considérablement les échanges gazeux à la surface des feuilles. Cela entraîne une diminution du taux de photosynthèse¹¹ et donc du taux de transpiration, résultant en une augmentation de la température de surface des feuilles, comme cela a été observé pendant des expériences en vol parabolique (+1°C sur des phases de 20 secondes d'impesanteur) (Kitaya et al. 2003).

⁹ Voir paragraphe 3.1 *Arroser en 0g ?*

¹⁰ La résistance diffusive caractérise la résistance au processus de diffusion, c'est-à-dire au passage de certaines molécules dans un matériau, ici les couches d'air stagnant à la surface des feuilles

¹¹ Le processus de photosynthèse apparaît en présence de lumière et consiste en l'absorption de dioxyde de

L'absence de convection naturelle entraîne aussi l'accumulation de composés organiques volatiles, comme l'éthylène, qui nuit au bon développement des plantes.

2.3. *Echelle cellulaire et biochimique*

2.3.1. *Le métabolisme secondaire*

De nombreuses études ont montré que dans des graines produites en orbite ou sur des clinostats¹², la production de métabolites secondaires, qui sont notamment responsables du goût, et les réserves en amidon des graines (quantité et répartition) étaient changées. Les scientifiques pensent que cela est une réponse au stress induit par les conditions d'impesanteur sur les plantes. Cela pourrait avoir un impact fort sur les missions longue durée, où le régime alimentaire des astronautes sera basé sur des plantes.

2.3.2. *Croissance et division des cellules*

Lorsqu'un organisme croît, il y a d'abord division cellulaire puis croissance de ces cellules. Plusieurs études ont montré qu'en

carbone par les plantes, au rejet de dioxygène et de vapeur d'eau et en la production de glucose au sein de la plante, constituant sa biomasse (et notre nourriture)

¹² Machines qui simulent l'impesanteur par rotation lente sur un axe ou deux axes

impesanteur, ces deux processus seraient découplés chez les plantes et que la division cellulaire serait plus importante que la croissance cellulaire. Cela entraînerait donc des plantes avec des cellules plus nombreuses et plus petites. L'hypothèse émise pour expliquer ces changements est que cette réponse des plantes est un mécanisme de résistance à l'impesanteur.

2.3.3. Expression des gènes

Chez les plantes, la situation d'impesanteur résulte en une surexpression de certains gènes et une sous-expression d'autres gènes, dans des domaines différents et sans lien apparent entre eux. L'hypothèse avancée est que le transcriptome¹³ des plantes perçoit l'impesanteur comme un nouvel environnement stressant mais qu'il manque au génome les gènes adéquats pour répondre en conséquence. Comprendre ces mécanismes d'expression génétique en impesanteur permettra de sélectionner des plantes capables de s'adapter à des environnements de gravité réduite et de

modifier génétiquement des plantes pour qu'elles s'y adaptent.

3. Et concrètement, comment je fais pousser mes plantes dans l'espace, moi ?

Jusqu'à présent, les expériences avec des plantes en orbite terrestre avaient principalement pour objectif de démontrer la possibilité de leur croissance et d'en étudier les mécanismes, mais pas de produire de la nourriture à grande échelle.

3.1. Arroser en 0g ?

Un bon système de distribution d'eau et de nutriments doit permettre une bonne aération de la zone racinaire, tout en gardant une humidité et une concentration en nutriments adéquates. Pour des raisons de faisabilité, les systèmes à base de substrat¹⁴ ont été utilisés en orbite terrestre, plutôt que des systèmes d'hydroponie¹⁵ ou d'aéroponie¹⁶.

¹³ Résultat de la lecture des gènes ; il s'agit des molécules d'ARN (Acide RiboNucléique) faisant le lien entre l'ADN et la synthèse des protéines

¹⁴ Un substrat permet aux racines de se fixer et apportent les éléments nutritifs nécessaires à la plante. Communément il s'agit de la terre, mais on trouve aussi de la laine de roche ou du sable en hydroponie.

¹⁵ L'hydroponie, également appelée agriculture hors-sol, consiste à cultiver des plantes dans une solution

nutritive avec ou sans un substrat neutre et inerte (i.e. qui n'apporte pas de nutriments). Les racines puisent alors les éléments directement dans cette solution.

¹⁶ L'aéroponie est aussi un type de culture hors-sol mais les racines ne baignent pas dans la solution nutritive. Celle-ci est aspergée sur les racines à intervalles réguliers.

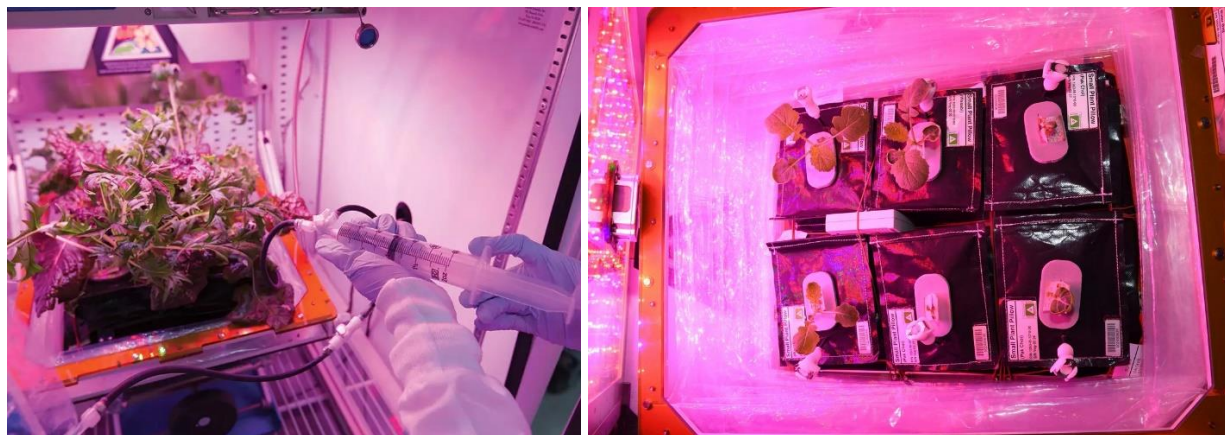


Figure 2: A gauche démonstration de la technique d'arrosage dans le système Veggie au sol dans une chambre de culture. Crédits : NASA. A droite, visualisation des poches remplies de substrat dans le système Veggie sur l'ISS. Crédits : NASA/Koch

Un substrat avec des grains de petite taille permet une bonne distribution de l'eau mais a une mauvaise aération, alors qu'un substrat avec des grains plus gros permet une meilleure aération, mais l'hydratation y est sous-optimale.

Le système Veggie actuellement sur l'ISS utilise des poches remplies de substrat de culture avec un engrais à diffusion lente et contrôlée, arrosées avec une seringue d'eau par les astronautes (Figure 2). Pour des surfaces planétaires ou lunaires, où il y a de la pesanteur, ces systèmes de distribution d'eau et de nutriments pourront s'inspirer de systèmes terrestres (en particulier de

l'hydroponie avec la technique de culture sur film nutritif¹⁷).

3.2. *N'oubliez pas vos lunettes de soleil !*

La productivité des plantes est directement liée au niveau d'éclairage qu'elles reçoivent. L'enjeu est donc de passer de systèmes d'éclairage gourmands en énergie comme les lampes fluorescentes, à des systèmes plus économiques et efficaces, comme les diodes électroluminescentes (LED¹⁸).

¹⁷ Souvent abrégée en NFT pour Nutrient Film Technique, cette technique particulière d'hydroponie

consiste à faire circuler une fine épaisseur de solution nutritive au niveau des racines.

¹⁸ Abrégé LED pour Light-Emitting Diodes en anglais

Des études scientifiques ont montré que les longueurs d'ondes les mieux absorbées par les plantes sont le rouge et le bleu – le bleu étant moins efficace que le rouge d'un point de vue photosynthétique mais très important pour la photomorphogénèse, c'est-à-dire l'élongation de la tige et l'expansion des feuilles, par exemple. Se concentrer sur ces deux longueurs d'onde pourrait donc être une méthode pour réduire la demande énergétique de l'éclairage des plantes.

Sur des surfaces planétaires et lunaires, utiliser la lumière du Soleil (en complément ou en source principale d'éclairage), par exemple en utilisant des miroirs paraboliques qui concentrent les rayons lumineux et les transmettent aux plantes par fibre optique, permettrait aussi de réduire cette demande.

3.3. *Vive le vent !*

La concentration en éthylène¹⁹ dans l'ISS est maintenue sous les 50 ppb (parties par million), mais il a été montré que même une concentration aussi basse peut affecter la croissance des plantes. Seulement certains petits systèmes de croissance de plantules sur l'ISS bénéficient de filtres à éthylène ; les

autres, comme Veggie, utilisent l'air de la cabine.

3.4. *Boîte à sardines ?*

La place disponible dans un module de culture spatiale sera très limitée, il est donc crucial de sélectionner des espèces de plantes de petites tailles avec une productivité élevée. Ainsi, depuis des décennies, l'Université de l'Utah a sélectionné des graines de blé nain, riz nain, poivron nain, soja nain, etc. Au centre KSC de la NASA, des études ont même été faites sur des pruniers nains!

3.5. *Des modèles avant tout !*

Pour être en mesure de prédire la production de biomasse, d'oxygène et d'eau par les plantes dans un vaisseau spatial, il faut une compréhension approfondie des mécanismes et processus de croissance et de leurs combinaisons complexes d'un point de vue biochimique, physique et morphologique.

¹⁹ L'éthylène est une hormone végétale impliquée dans la floraison et la maturation des fruits. On observe

ainsi que les fruits en milieu confinés mûrissent plus vite que les fruits à l'air libre

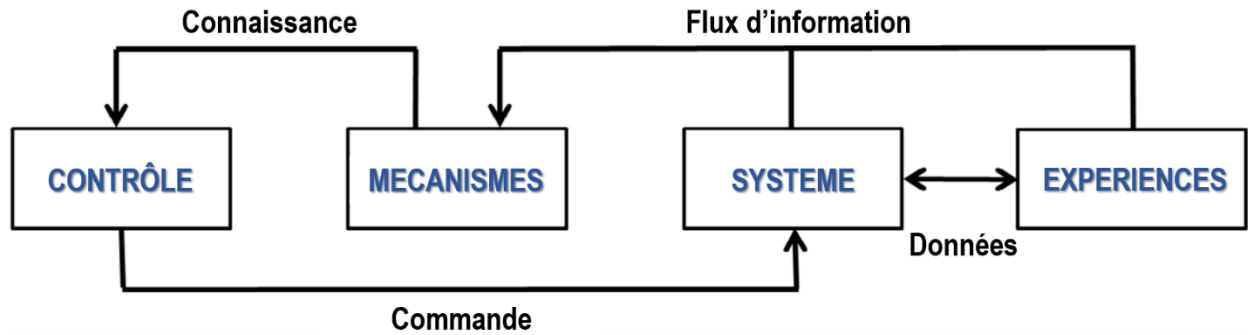


Figure 3: Schéma expliquant les liens entre un système, les expériences faites dessus, ses mécanismes et une boucle de contrôle, qui sont les principes de la modélisation mécaniste.

Le développement de modèles mécanistiques²⁰ et de modèles de connaissance associés à des expériences spécifiques qui mesureraient des paramètres au niveau local (Figure 3), permettraient d'obtenir des bilans massiques et énergétiques précis (Hézar 2012). Le transfert d'eau dans la plante ainsi que le cycle du carbone²¹ sont deux éléments clés dans cette compréhension, tous deux liés au profil aérodynamique autour des feuilles et à la couche limite résultante.

4. Conclusion et perspectives

4.1. Pour résumer...

Les effets du vol spatial sur les plantes ne sont encore pas entièrement compris, mais il

semblerait qu'il n'y ait pas d'obstacles majeurs à leur croissance, tant que le contrôle des paramètres de ventilation, éclairage, température et humidité est assuré.

4.2. ... Il y a encore du travail !

En revanche, des tests à grande échelle de production de nourriture en gravité réduite dans l'espace sont encore à faire. Cela passera par une compréhension précise des processus et phénomènes de croissance, qui nécessite le développement de modèles mécanistiques en environnements de gravité réduite.

Références

Gitelson, I. I., I. A. Terskov, B. G. Kovrov, G. M. Lisovsky, Y. N. Okladnikov, F. Y. Sid'ko, I. N. Trubachev, et al. 1989. "Long-

²⁰ Voir l'article « Une approche physique pour comprendre la croissance des plantes dans l'espace » pour une explication détaillée

²¹ Le carbone dans la biomasse des plantes provient du CO₂ atmosphérique qu'elles ont fixé avec la photosynthèse pour produire des sucres

term experiments on man's stay in biological lifesupport system.” *Advances in Space Research* 9 (8): 6–71.

bioregenerative life support studies.” *Advances in Space Research* 18 (4–5):215–224.

Hezard, P. 2012. Higher Plant Growth Modelling for Life Support Systems: Global Model Design and Simulation of Mass and Energy Transfers at the Plant Level. PhD Thesis, Clermont Ferrand: Doctoral school of Life Sciences, Health, Agronomy, Environment – Université Blaise Pascal, Université d'Auvergne, 2012.

Kitaya, Y., Kawai, M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T., and Kiyota, M. (2003a) The effect of gravity on surface temperatures of plant leaves. *Plant Cell Environ* 26:497–503.

Lasseur, C., J. Brunet, H. De Weever, M. Dixon, C.-G. Dussap, F. Godia, N. Leys, M. Mergeay, and D. Van Der Straeten. 2010. “MELiSSA: The European Project Of Closed Life Support System.” *Gravitational and Space Biology* 23 (2): 3–12.

Porterfield, D. M., G. S. Neichitailo, A. L. Mashinski, and M.E. Musgrave. 2003. “Spaceflight hardware for conducting plant growth experiments in space: the early years 1960–2000.” *Advances in Space Research* 31 (1): 183–193.

Wheeler, R. M., C. L. Mackowiak, G. W. Stutte, J. C. Sager, N. C. Yorio, L. M. Ruffe, R. E. Fortson, T. T. W. Dreschel, W. M. Knott, and K. A. Corey. 1996. “NASA's Biomass Production Chamber: a testbed for

Comment citer cet article : Lucie Poulet et la classe de Terminale du lycée de l'Institution Sévigné St Louis (Issoire (Fr)), *Réponse des plantes à l'environnement spatial : Un guide pour les futurs jardiniers de l'espace*, Journal DECODER, 2019-08-31