

Introduction

Les missions habitées vers Mars exposent les astronautes à une dose annuelle de **~230 mSv/an**, soit **≈100 fois** celle reçue sur Terre. Les blindages actuels (plomb, aluminium, polyéthylène) sont efficaces mais **lourds, coûteux et non régénérables**.

Découvert dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, *Cladosporium sphaerospermum* est un champignon **radiotrophe** : il utilise les **radiations ionisantes comme source d'énergie** grâce à sa forte teneur en **mélanine**. Ses propriétés physiques et biologiques en font un candidat prometteur pour des **matériaux radioprotecteurs légers**, potentiellement intégrables à une **combinaison spatiale hybride "vivante"**, capable de se régénérer et d'être produite directement sur Mars.



Le *Cladosporium sphaerospermum* peut-il être intégré dans un matériau composite pour offrir une protection radiative efficace et durable sur Mars ?

I – Les propriétés du *Cladosporium sphaerospermum*

1. Radiotrophisme : "photosynthèse noire"

- La mélanine absorbe les rayons ionisants
- Conversion partielle de ces radiations ionisantes en énergie chimique
- Observé dans les zones hautement irradiées (Tchernobyl).

2. Radiotropie

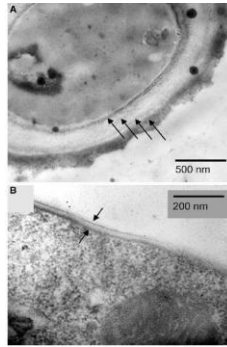
- Croissance dirigée vers la source de radiation
- Confirmé par des études récentes sur la micro-orientation mycélienne.

3. Résistance extrême

- Viable sous fortes doses γ , UV-C, électrons, protons.
- Capable de croître en microgravité et sous rayonnements spatiaux
- Forte stabilité de la mélanine, compatible avec des conditions martiennes.

4. Données clés actuelles

- **1,7 mm** sur ISS \rightarrow **2,17 \pm 0,35 %** d'atténuation mesurée
- Modèle Mars \rightarrow Modélisations suggérant des épaisseurs de l'ordre de **20cm** pour une réduction significative des doses martiennes
- Mélanine dopée / ingénierie chimique \rightarrow efficacité jusqu'à **$\times 2-3$**



Comparaison des parois cellulaires mélanisées et non mélanisées

II – Vers une combinaison spatiale hybride à base de mélanine fongique

Principe de la solution hybride :

Développer un composite multicouches composé de mélanine extraite de *Cladosporium S.*, de biomasse fongique pour augmenter la densité de la mélanine, de polymères souples compatibles avec les textiles et de régolithe martien micronisé, riche en silicium, afin d'augmenter le coefficient d'atténuation.

\rightarrow **Ce système permet un blindage léger, flexible, fonctionnel et potentiellement autoréparable si la couche biologique vivante est maintenue dans un état contrôlé.**

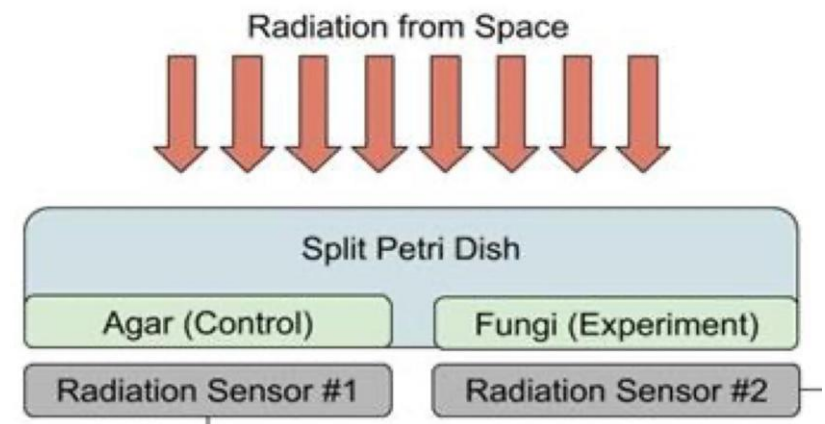
Ses atouts :

- Masse surfacique plus faible à protection équivalente que les blindages métalliques
- Une forte adaptabilité et une régénération possible
- Moins de déchets
- Meilleure résistance aux UV et aux rayons gamma

III – Résultats expérimentaux et modélisation

1. Données expérimentales

- ISS : 1,7mm pour une atténuation d'environ 2% (rayons ionisants)
- Mesures pigmentaires : la mélanine exhibe un coefficient d'absorption élevé entre 0,1 et 10 MeV
- Tests de stabilité : mélanine stable après irradiation aux rayons gamma prolongée (jusqu'à 5 kGy)



Block-chart of the experimental flight hardware setup. Image credit : Aversch 2022

2. Modélisations numériques GEANT4 (dernières études 2023-2025)

- Composite mélanine + régolithe (10 à 20% masse mélanine)
 \rightarrow **30 à 50% de réduction des GCR pour 15 à 25cm d'épaisseur**
- Composite mélanine + polymère + biomasse
 \rightarrow **Atténuation 2 à 3 fois supérieur au polymère seul**
- Mélanine dopée (Fer + Manganèse)
 \rightarrow **Amélioration de 40 à 80% du rendement d'atténuation**

3. Avantages structurels

- Masse embarquée réduite de 5 à 10 fois par rapport au blindage métallique
- Possibilité de réparations par croissance fongique dans une couche confinée et contrôlée
- Structure patchable : modules interchangeables selon la dose locale

Limite

- La biomasse seule reste insuffisante en couche mince (< 5mm).
 \rightarrow **La solution hybride est la seule réellement intéressante pour une combinaison**

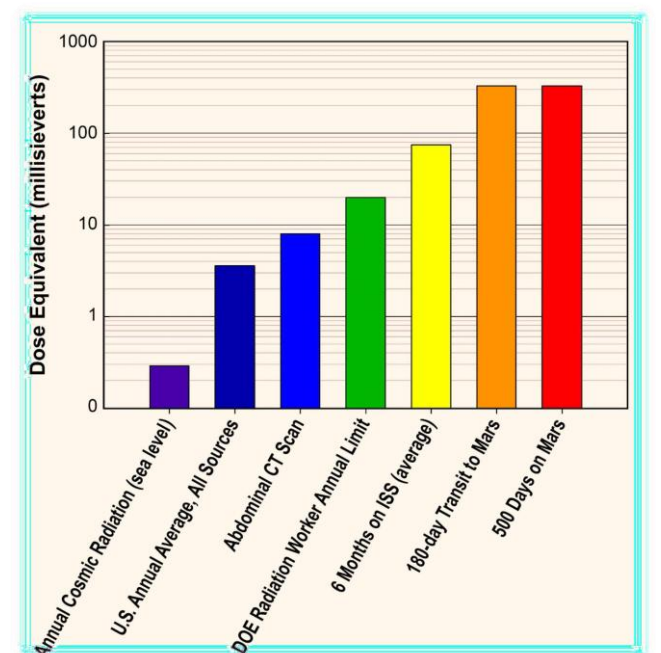
IV – Limites et perspectives

1. Contraintes techniques

- Le champignon vivant nécessite pression, humidité, nutriments
 \rightarrow **Couche vivante complexe à maintenir**
- La production locale de mélanine demande des bioréacteurs dédiés
- Risques biosécurité et de contamination
 \rightarrow **Nécessité d'encapsulation**
- Faible efficacité en couche fine
 \rightarrow **Doit être couplé à d'autres matériaux**

2. Prochaines étapes

- Mesurer
- Tester des **prototypes textiles** intégrant la mélanine et un polymère
- Produire des **plaques composites** combinant fongiques et régolithe afin de les tester avec des **rayons gamma et des ions lourds**
- Expérimentations longues durée sur l'ISS et la **future station Gateway**
- Ingénierie de la mélanine : **dopage métallique, polymérisation orientée et mélanine biosynthétique**



Comparaison des doses équivalentes lors d'un transit martien et d'un séjour sur Mars. Image credit : NASA

Conclusion

Cladosporium sphaerospermum et sa mélanine représentent une voie innovante vers une protection radiative bio-inspirée, légère et potentiellement régénérable. L'intégration dans un composite hybride (mélanine + polymère + régolithe) ouvre la possibilité de combinaisons martiennes protectrices, évolutives et produites localement.

Cette approche se situe au croisement de la sûreté nucléaire, de la biologie extrême et de la technologie spatiale régénérative, et pourrait jouer un rôle clé dans la protection des astronautes lors des futures missions martiennes.

Bibliographie

1. N.J.H. Aversch, G.K. Shunk, C. Kern, Cultivation of *Cladosporium sphaerospermum* aboard the ISS: radiative effects, *Front. Microbiol.*, 2022.
2. E. Dadachova, R.A. Bryan, X. Huang et al., Ionizing radiation alters electronic properties of melanin and enhances growth of melanized fungi, *PLoS ONE*, vol. 2, e457, 2007.
3. A. Casadevall, E. Dadachova, Radioprotective properties of fungal melanin: chemical and structural basis, *Pigment Cell Melanoma Res.*, vol. 21, pp. 539–544, 2008.
4. E. Dadachova, A. Casadevall, Fungal melanin and adaptation to ionizing radiation, *Curr. Opin. Microbiol.*, vol. 11, pp. 525–531, 2008.
5. J. Bland, L. Wang, R.A. Bryan, Growth and pigment response of melanized fungi under ionizing radiation, *Sci. Rep.*, 2022.
6. M. Li, A. Patel, K. Ryan et al., Melanin-based composites for enhanced gamma shielding, *Sci. Rep.*, 2025.
7. L.R. Dartnell, L. Desorgher, J.M. Ward et al., Modelling the Martian surface radiation environment, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, L02207, 2007.