

I – Introduction

L'exploration de Mars impose de comprendre avec précision son environnement radiatif, un facteur clé pour la sûreté des missions robotiques et humaines. Depuis l'atterrissage de Curiosity le 6 août 2012, l'instrument MSL/RAD (Mars Science Laboratory / Radiation Assessment Detector) fournit les premières mesures directes et continues du rayonnement à la surface martienne. Cependant, il faut d'abord poser les bases des connaissances que l'on a sur Mars. En effet, la planète rouge n'a pas les mêmes défenses que la terre face au rayonnement cosmique pour deux principales raisons : son atmosphère moins dense et l'absence d'un champ magnétique. De part ses caractéristiques, l'ambiance radiologique à la surface de Mars est différente de la celle sur Terre. On peut alors se demander :

L'ambiance radiologique à la surface de Mars est-elle une contrainte majeure dans la planification des missions habitées ?

II – ETAT DES CONNAISSANCES

La principale menace, c'est le rayonnement cosmique, un flux de particules très énergétiques provenant de l'espace qui se compose principalement de protons et de noyaux atomiques issus de phénomènes dans la galaxie ou bien du soleil.

Les travaux de Matthiä et al. (2016) ont comparés ces mesures aux principaux modèles de rayonnement, révélant leurs forces et leurs limites. Par la suite, Zhang et al. (2022) ont montrés comment le rayonnement varie selon l'altitude, la topographie et la pression à la surface. Enfin, Ehresmann et al. (2023) ont caractérisés l'environnement radiatif lors du minimum solaire, période où les flux de rayons cosmiques atteignent leur maximum.

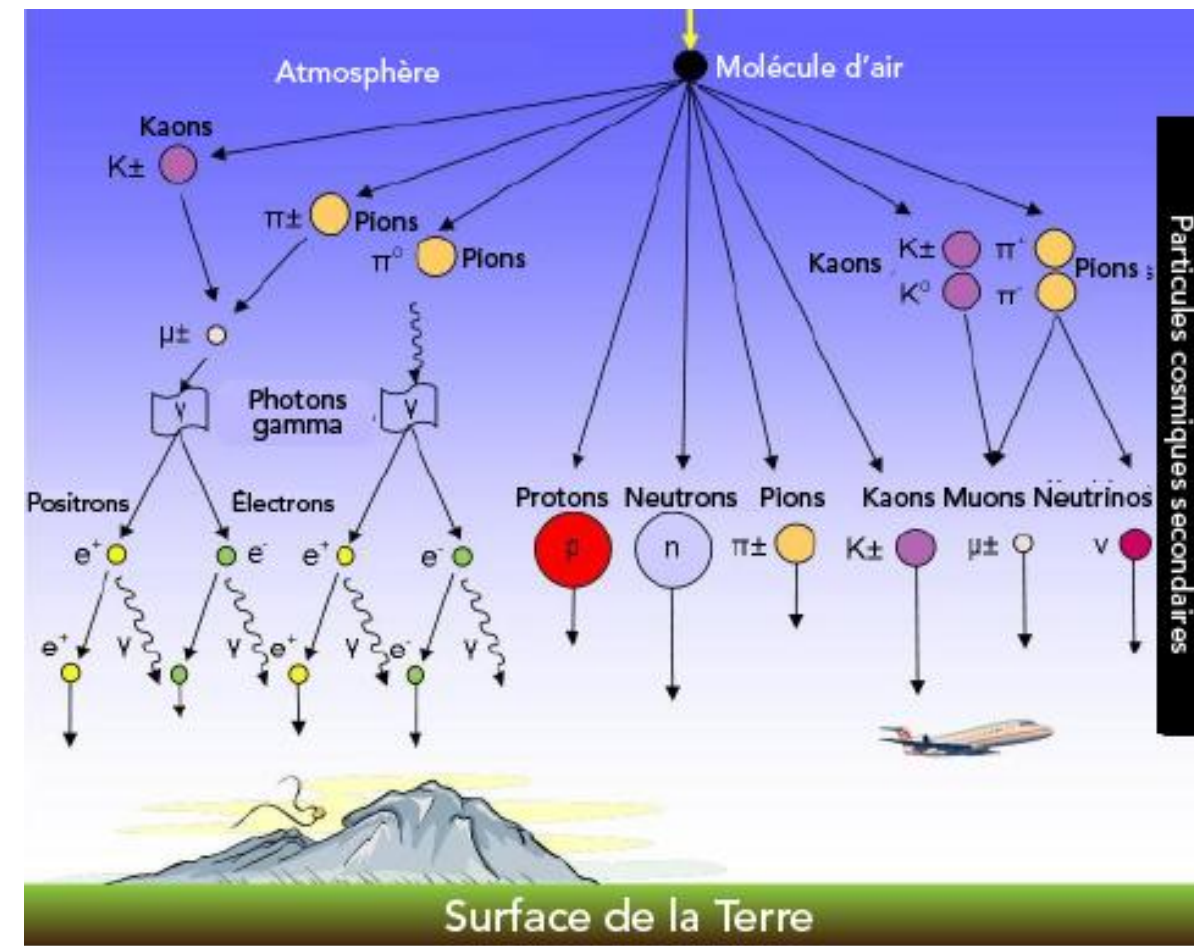


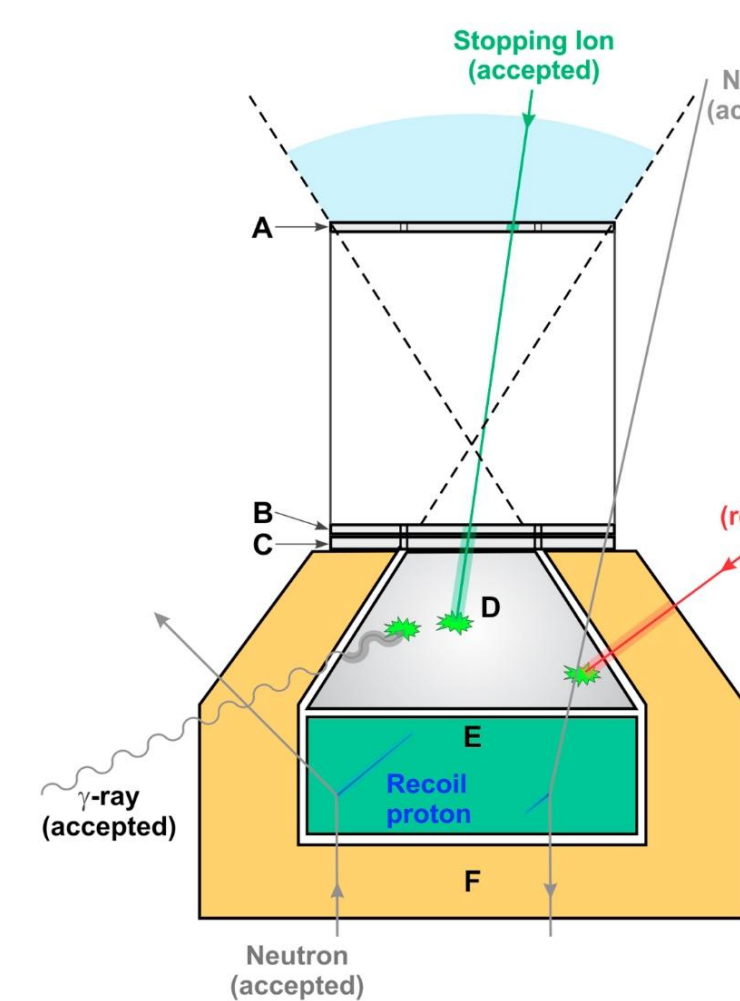
Schéma des rayons cosmiques qui frappent la Terre.

III – MATERIELS ET METHODES

La mission d'exploration MSL à l'aide du rover Curiosity a permis d'acquérir des données sur les rayons cosmiques à l'aide de la sonde RAD. Ces mesures ont été comparées aux résultats calculés avec les modèles GEANT4, PHITS, OLTARIS2013 et HZETRN afin de connaître leur justesse et leur précision par rapport à la réalité (Matthiä et al. 2016).

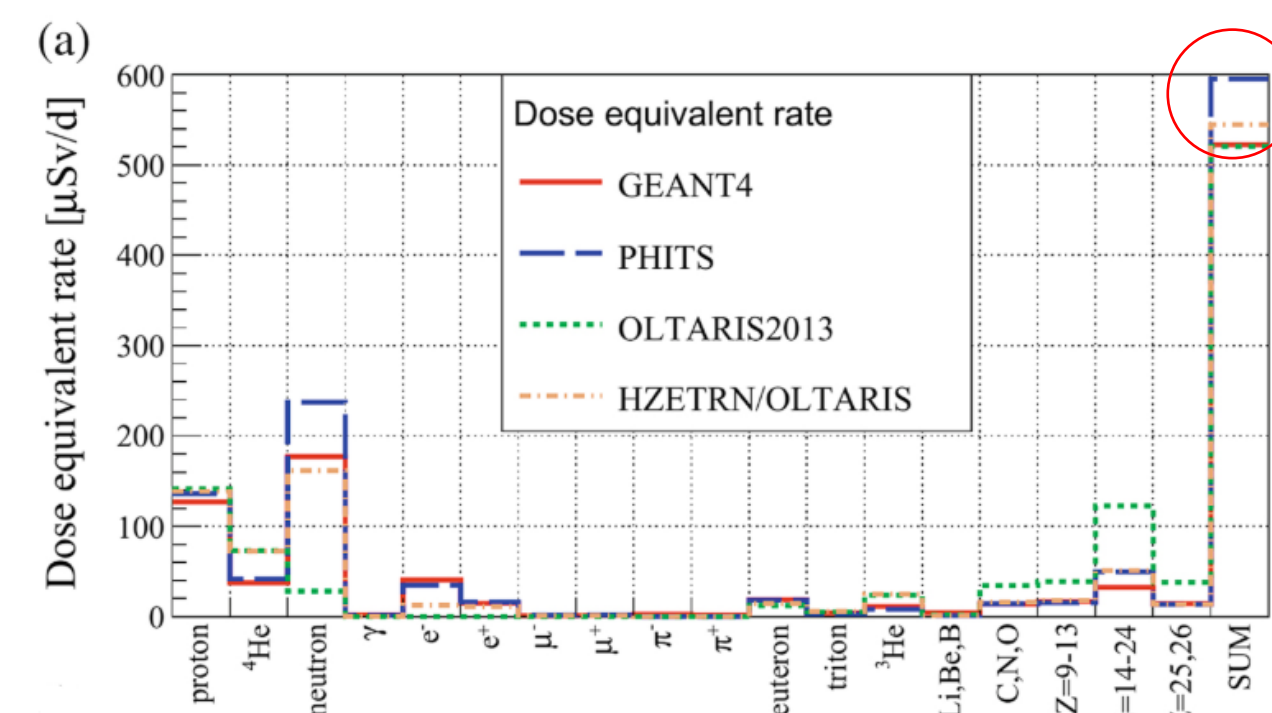
Les différentes pressions atmosphériques à la surface ont été mesurées grâce à la sonde REMS (Rover Environmental Monitoring Station) (Zhang et al. 2022).

Les radiations lors du minimum solaire ont été étudiées sur un cycle durant lequel l'activité du soleil a été plus faible avec son champ magnétique protégeant moins le système solaire (Ehresmann et al. 2023).



La tête de détection de RAD contient un empilement de détecteurs pour les mesures de particules chargées et neutres : trois détecteurs au silicium (nommés A, B et C), un scintillateur en Csl (D) et deux scintillateurs plastiques (E et F) (Matthiä et al. 2016).

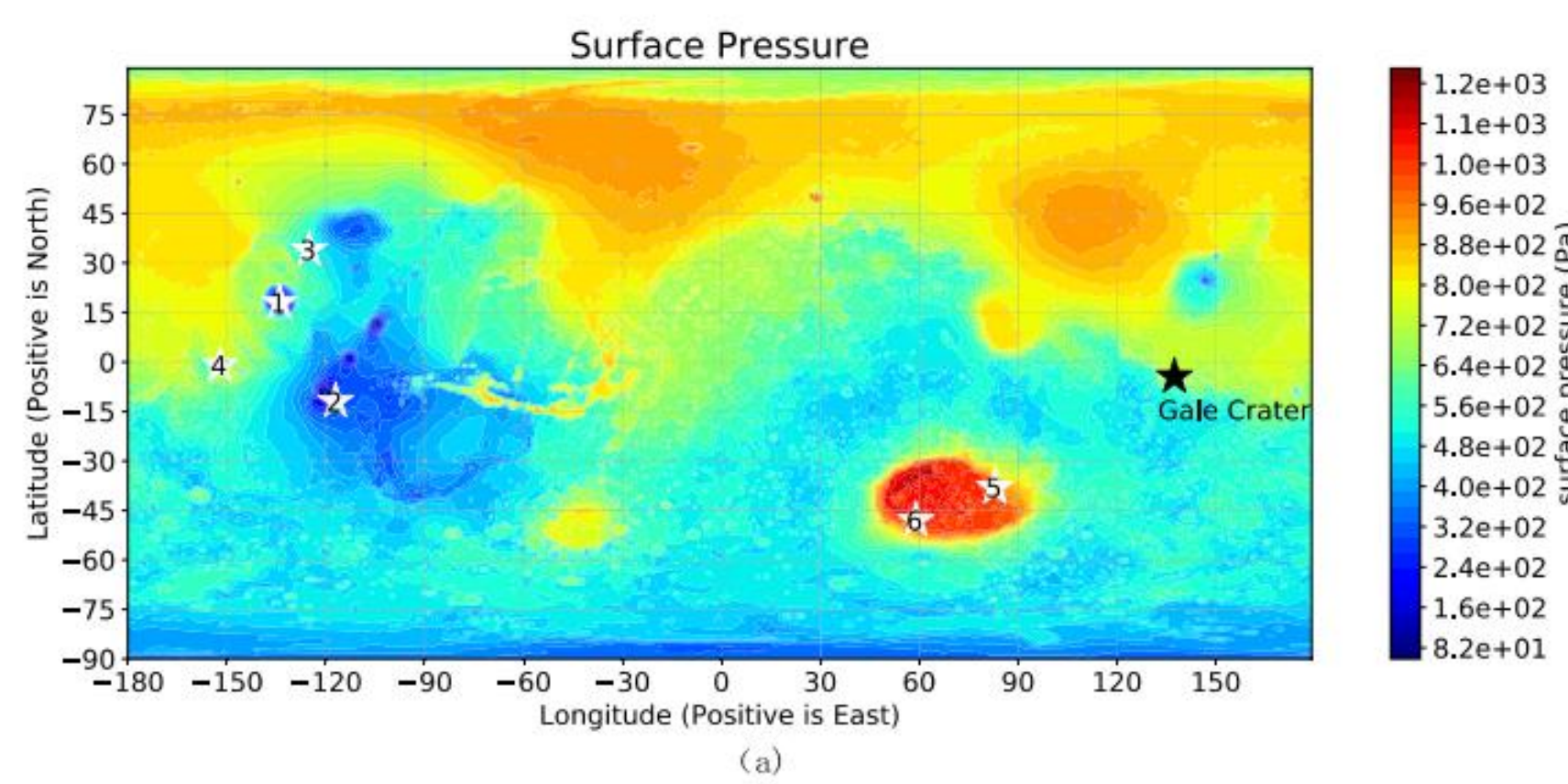
IV – RESULTATS



Modélisation des débits de doses

Contribution des différents types de particules au débit de dose équivalent dans les tissus, calculée à l'aide de différents modèles de calculs. (Matthiä et al. 2016).

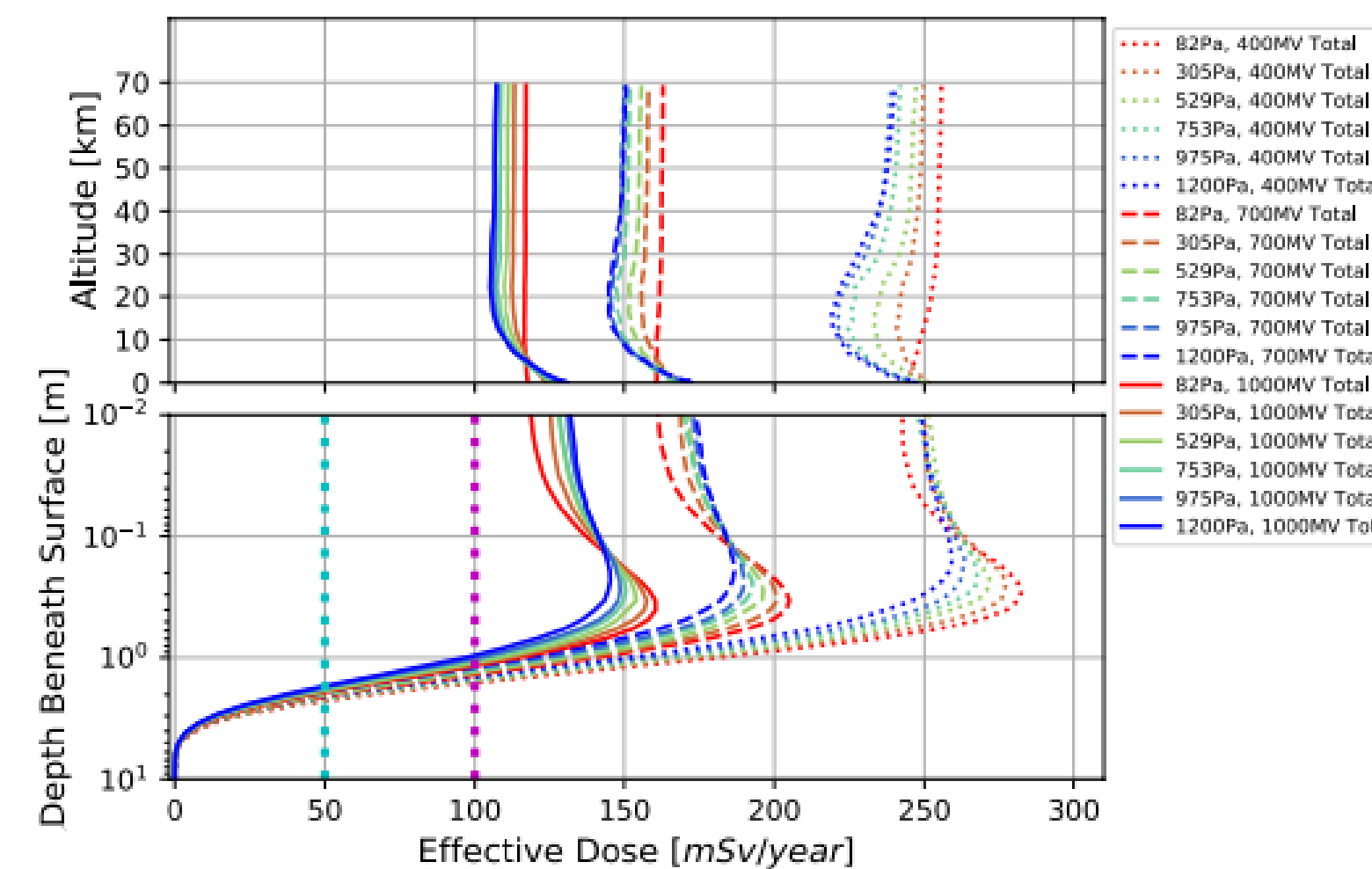
→ La valeur entourée en rouge correspond à la somme totale du spectre.



Différentes pressions à la surface

La carte globale de la pression de la zone cartographiée de Mars à une longitude solaire nulle. Les étoiles blanches indiquent les 6 emplacements choisis dans cette étude (Zhang et al. 2022).

→ Caractérisation des points de mesures



Débits de doses en fonction de la pression

Le débit d'équivalent de dose en fonction de l'altitude atmosphérique et de la profondeur souterraine (☆). L'intensité solaire est incluse dans la modélisation (400, 700 et 1000 MV) (Zhang et al. 2022).

→ Impact de la pression atmosphérique et de l'activité solaire sur les radiations sur Mars

Quantity	Solar minimum of Cycle 24/5 (measured from 28 Nov 2019 to 3 October 2020)	Near solar maximum of Cycle 24 (measured from 7 August 2012 to 1 June 2013)	Ratio of solar minimum / near solar maximum of Cycle 24
Absorbed dose rate	0.314 mGy/d	0.21 mGy/d (a)	1.49
Average quality factor <Q>	2.3	3.05 (a)	0.75
Dose equivalent rate	0.72 mSv/d	0.64 mSv/d (a)	1.13
500 days of Mars surface mission	0.36 Sv	0.32 Sv (a)	1.13
2 x 180 days of transit Earth – Mars	0.64 – 0.80 Sv	0.57 Sv (b)	1.13 – 1.40
Total mission dose equivalent (excluding SEP contributions)	1 – 1.2 Sv	0.9 Sv (a), (b)	1.13 – 1.30
(a) from Hassler et al. (2014)			
(b) based on updated analysis from Zeitlin et al. (2019a)			

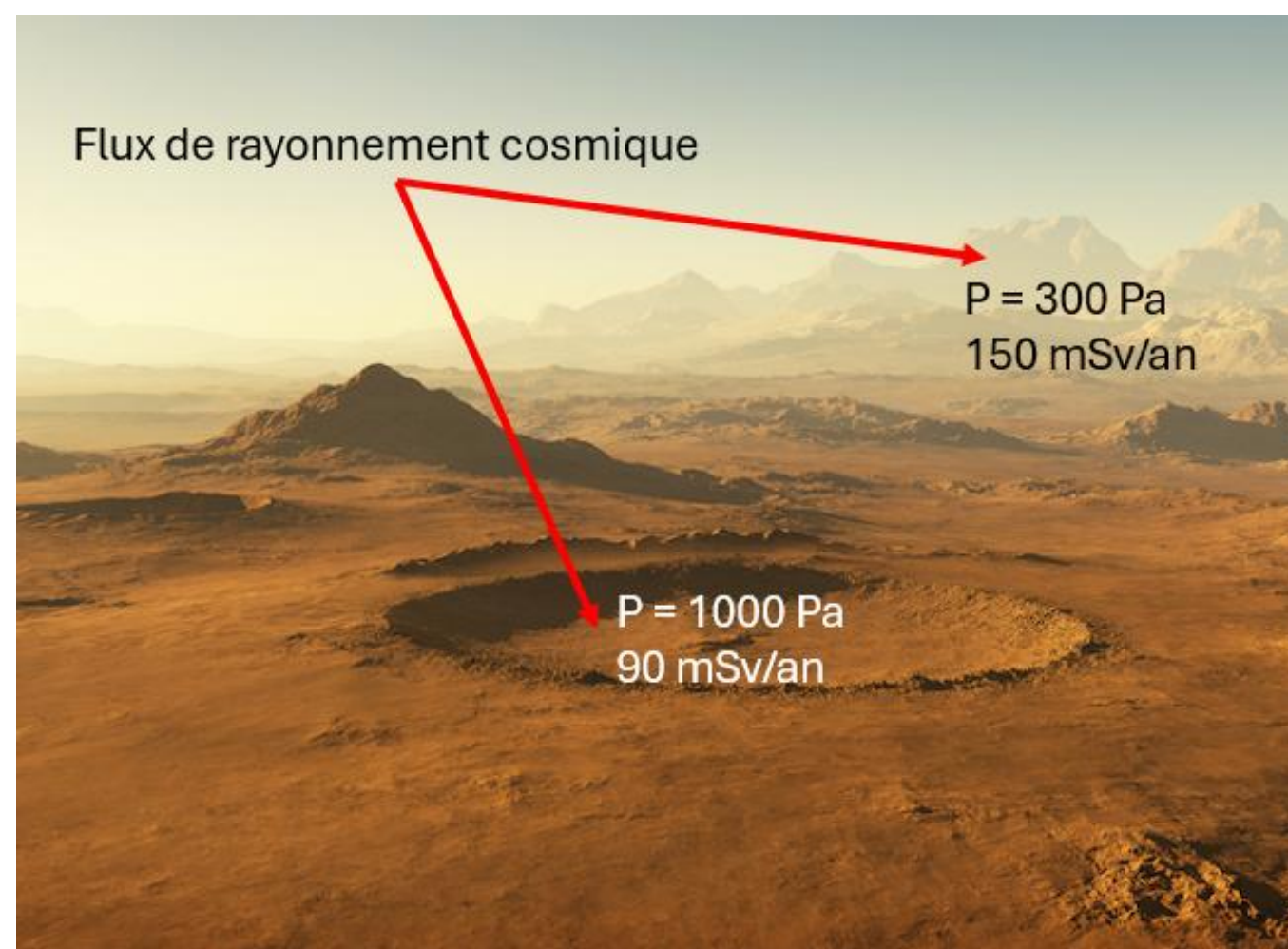
Débits de doses en fonction du minimum solaire

Le tableau regroupant les valeurs de débits de doses absorbés et équivalents ainsi que les doses sur la durée d'un voyage habité sur Mars selon le minimum et le maximum solaire (Ehresmann et al. 2023).

→ Débit d'équivalent de dose 1,13 fois plus fortes lors du minimum solaire

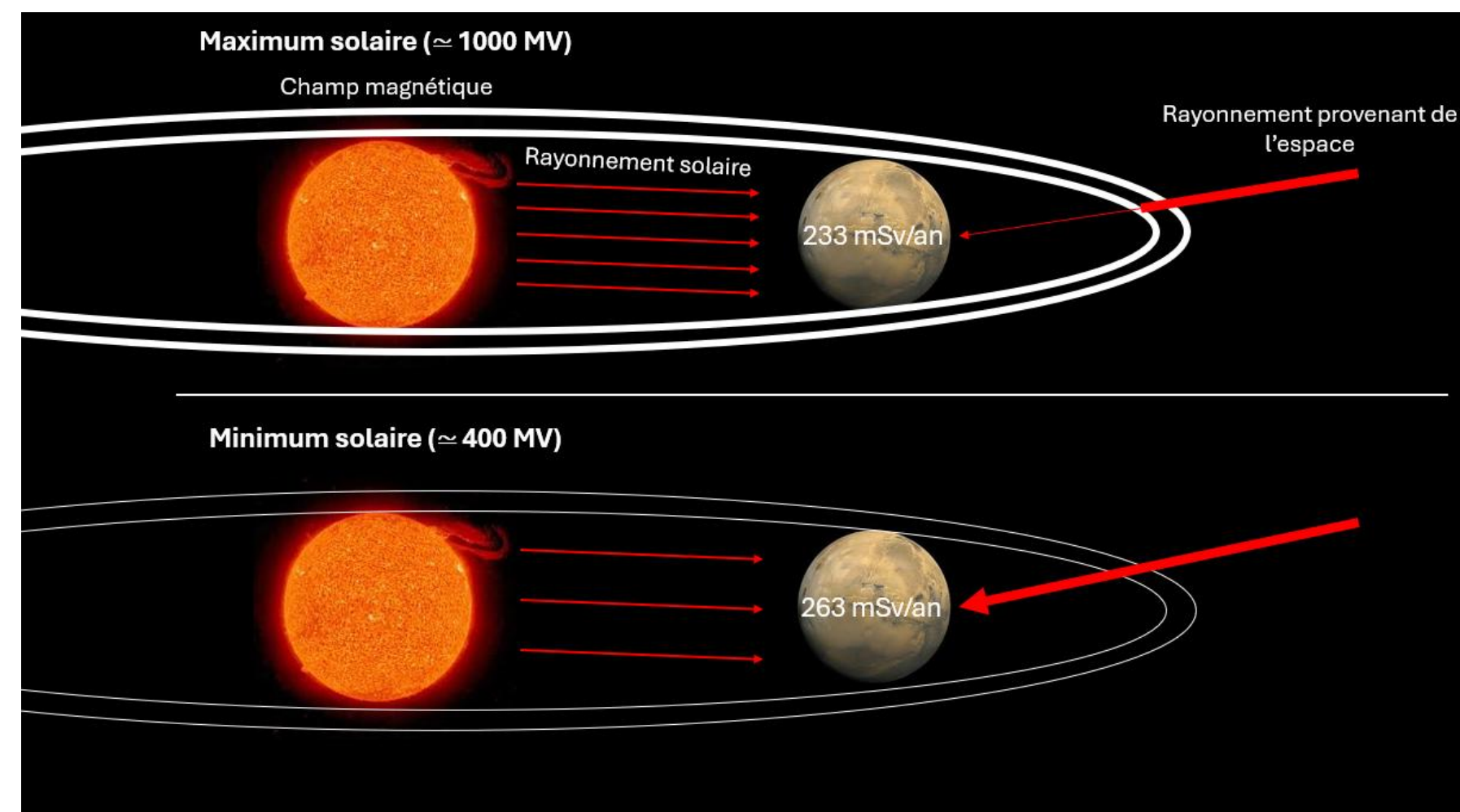
V – INTERPRETATIONS

Débits de doses en fonction de la pression



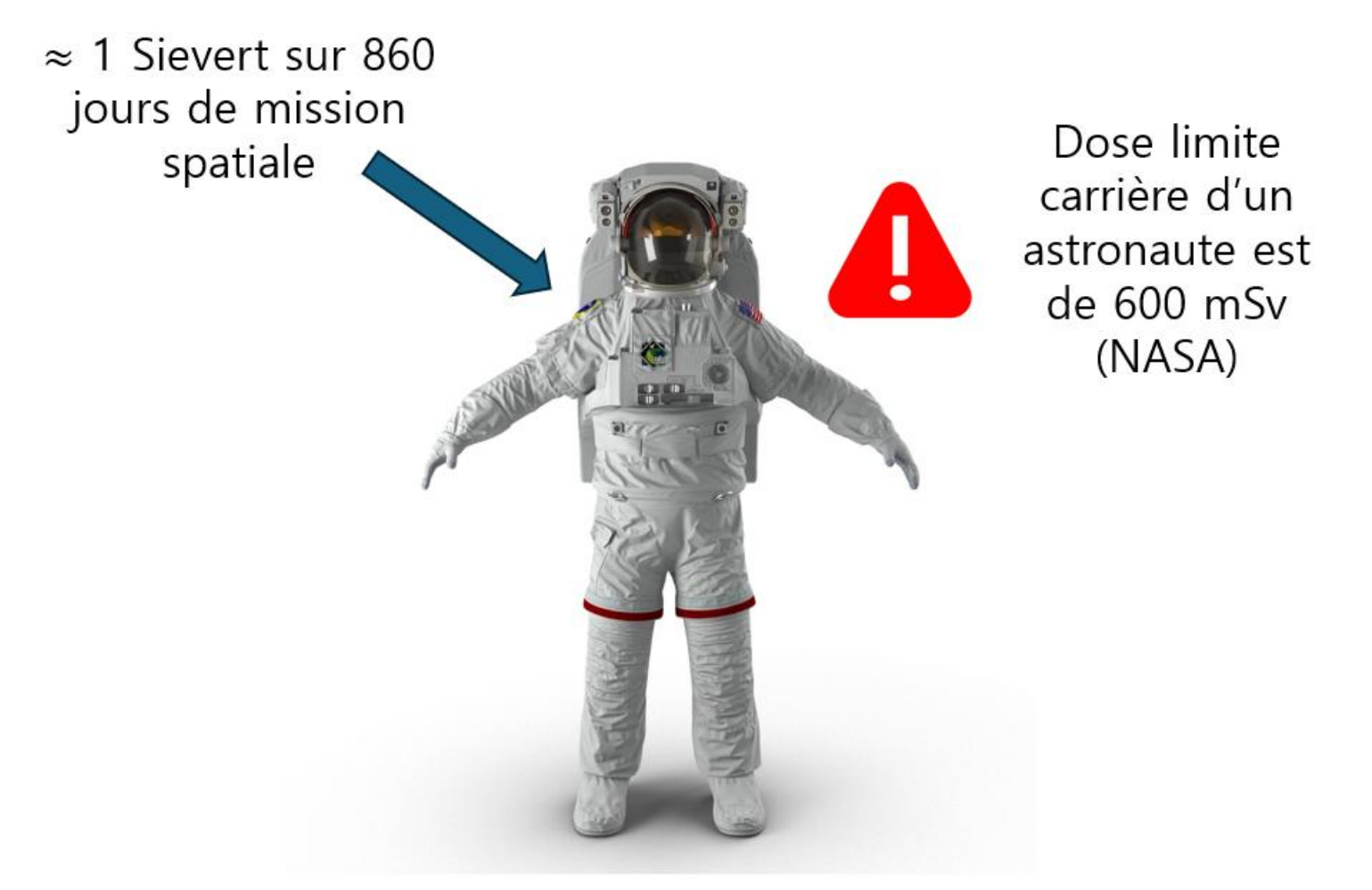
(Zhang et al. 2022)

Débits de doses en fonction du minimum solaire



(Zhang et al. 2022 / Ehresmann et al. 2023)

Dose totale reçue sur une mission



(Ehresmann et al. 2023)

Conclusion

Ces études mettent en évidence que le rayonnement à la surface de Mars constitue une contrainte majeure pour les missions habitées. Le débit de dose varie significativement selon la pression atmosphérique locale et est également modulé par l'activité solaire, avec des niveaux jusqu'à 1,13 fois plus élevés au minimum solaire. Sur une mission de 500 jours sur Mars et en tenant compte du trajet aller-retour, les astronautes pourraient ainsi recevoir une dose qui représente une exposition pour la santé humaine pouvant entraîner de nombreux effets stochastiques (cancer, tumeur, etc). Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les contraintes radiatives dans la planification des missions d'habitation sur Mars avec le choix des sites d'atterrissage (pression atmosphérique), la période (activité solaire), la durée des séjours et la conception des habitats et protections afin de limiter les risques biologiques liés aux rayonnements cosmiques.

Bibliographie

- Zhang, J., Guo, J., Dobynde, M. I., Wang, Y., & Wimmer-Schweingruber, R. F. (2022). From the top of Martian Olympus to deep craters and beneath: Mars radiation environment under different atmospheric and regolith depths.
- B. Ehresmann, C. Zeitlin, D.M. Hassler, J. Guo, R.F. Wimmer-Schweingruber, T. Berger, D. Matthiä, G. Reitz (2023). The Martian surface radiation environment at solar minimum measured with MSL/RAD.
- Matthiä, Daniel & Ehresmann, Bent & Lohf, Henning & Köhler, Jan & Zeitlin, Cary & Appel, Jan & Sato, Tatsuhiko & Slaba, Tony & Martin, Cesar & Berger, Thomas & Boehm, Eckart & Boettcher, Stephan & Brinza, David & Burmeister, Soenke & Guo, Jingnan & Hassler, Donald & Posner, Arik & Rafkin, Scot & Reitz, Guenther & Wimmer-Schweingruber, R.. (2016). The Martian surface radiation environment – a comparison of models and MSL/RAD measurements.
- Lisa C. Simonsen, John E. Nealy, Lawrence W. Townsend, and John W. Wilson (1990). Radiation Exposure for Manned Mars Surface Missions.

I – Introduction

The exploration of Mars requires a precise understanding of its radiation environment, a key factor for the safety of both robotic and human missions. Since the landing of Curiosity on August 6, 2012, the MSL/RAD instrument (Mars Science Laboratory / Radiation Assessment Detector) has been providing the first direct and continuous measurements of radiation at the Martian surface. However, it is first necessary to establish the fundamentals of what we know about Mars. Indeed, the Red Planet does not have the same defenses as Earth against cosmic radiation for two main reasons: its atmosphere is much less dense, and it lacks a magnetic field. Because of these characteristics, the radiological environment at the surface of Mars is very different from that on Earth. This leads us to the following question:

Is the radiological environment at the surface of Mars a major constraint in planning crewed missions?

II – State of Knowledge

The main threat is cosmic radiation, a flux of highly energetic particles coming from space, composed primarily of protons and atomic nuclei produced by phenomena occurring either in the galaxy or from the Sun.

The work of Matthiä et al. (2016) compared these measurements with the main radiation models, revealing their strengths and limitations. Subsequently, Zhang et al. (2022) showed how radiation varies with altitude, topography, and surface pressure. Finally, Ehresmann et al. (2023) characterized the radiation environment during the solar minimum, a period when cosmic ray fluxes reach their maximum.

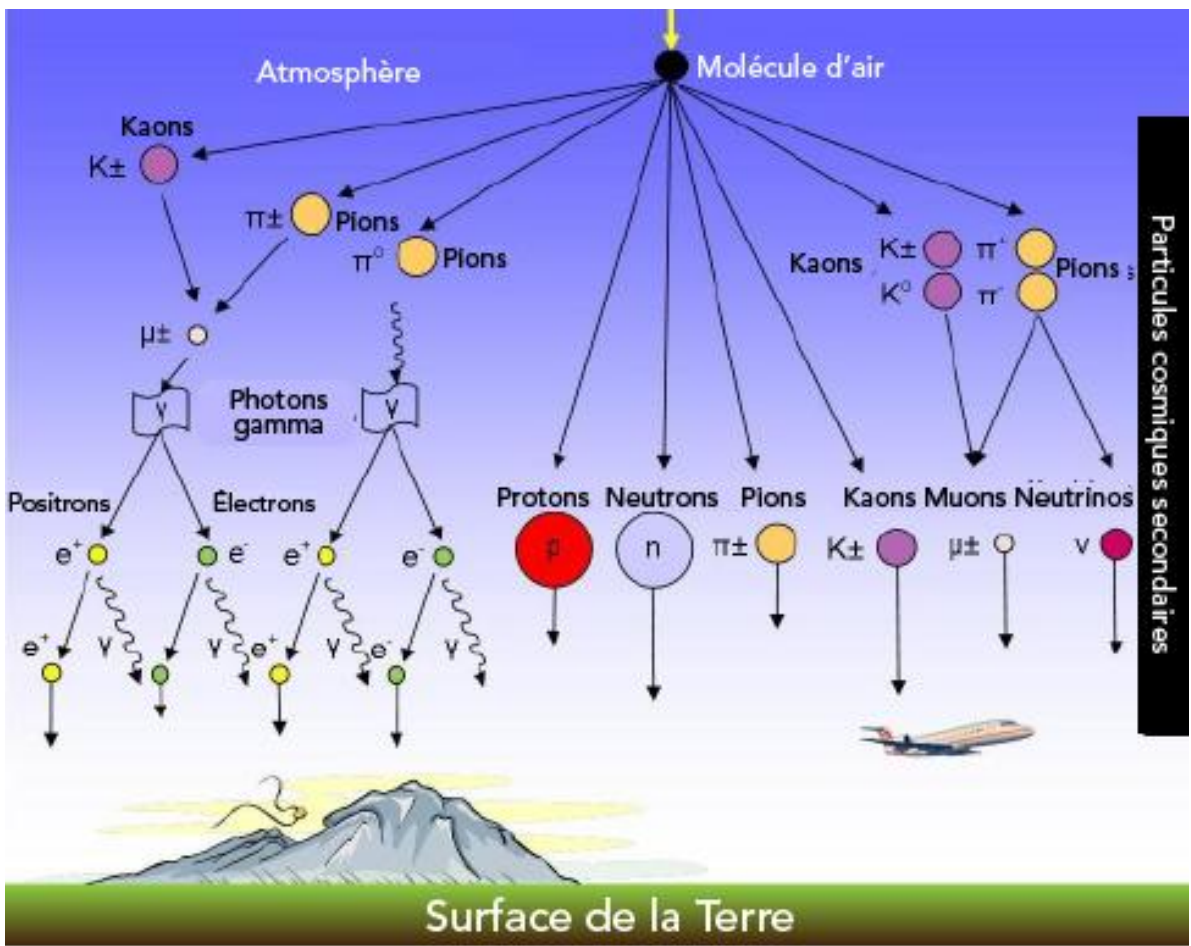


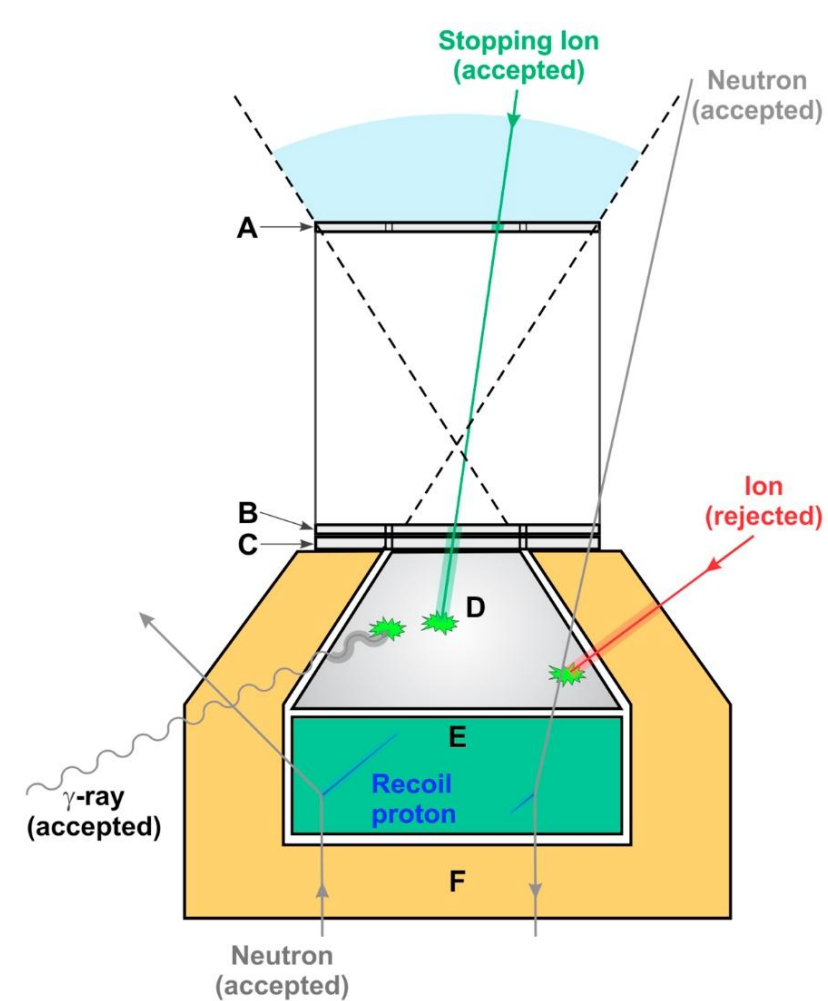
Diagram of cosmic rays striking the Earth.

III – Materials and Methods

The MSL exploration mission, using the Curiosity rover, made it possible to collect data on cosmic rays with the RAD detector. These measurements were compared with results calculated using the GEANT4, PHITS, OLTARIS2013, and HZETRN models in order to evaluate their accuracy and precision relative to real conditions (Matthiä et al., 2016).

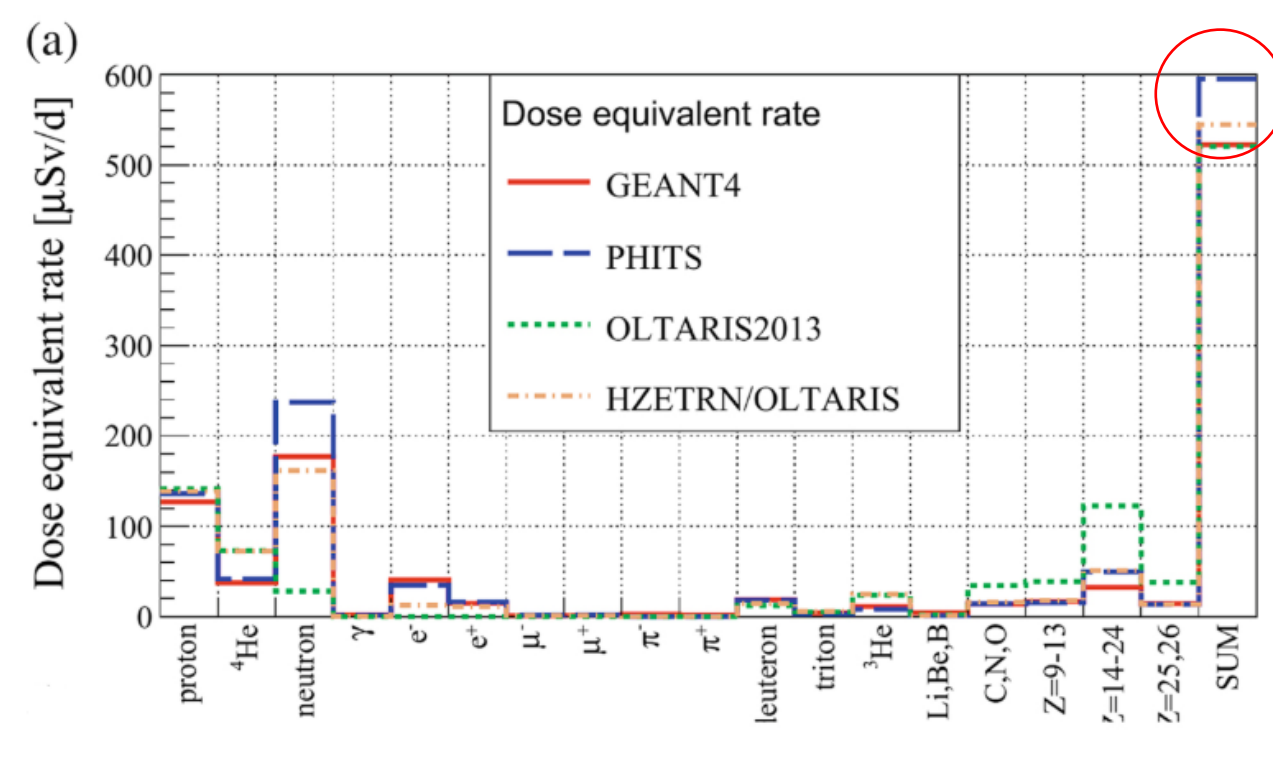
The different atmospheric pressures at the surface were measured using the REMS instrument (Rover Environmental Monitoring Station) (Zhang et al., 2022).

Radiation levels during the solar minimum were studied over a cycle during which solar activity was lower, resulting in a weaker magnetic field and therefore reduced protection of the solar system (Ehresmann et al., 2023).



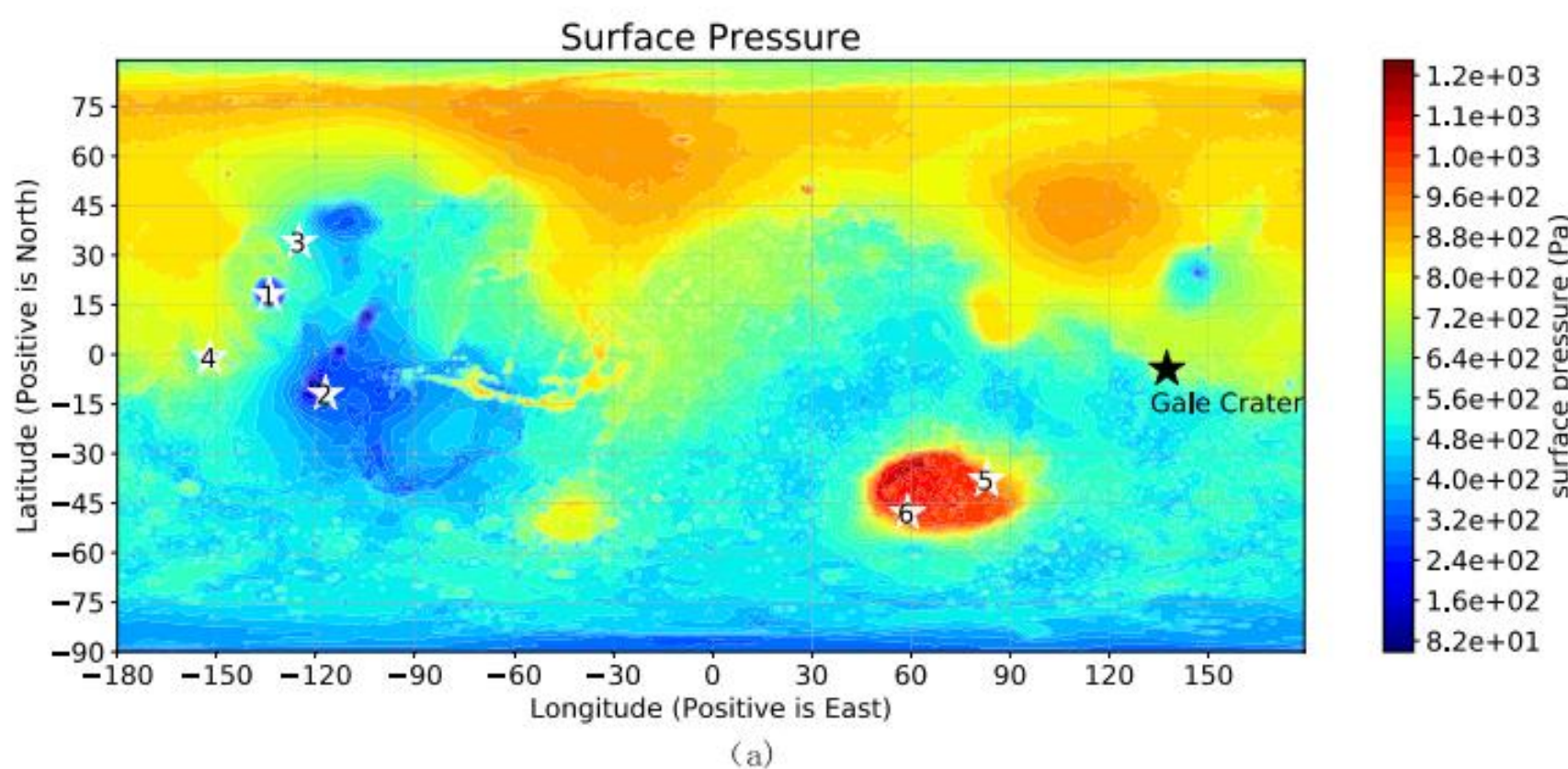
The RAD detector head contains a stack of sensors for measuring charged and neutral particles: three silicon detectors (named A, B, and C), a CsI scintillator (D), and two plastic scintillators (E and F) (Matthiä et al., 2016).

IV – RESULTS



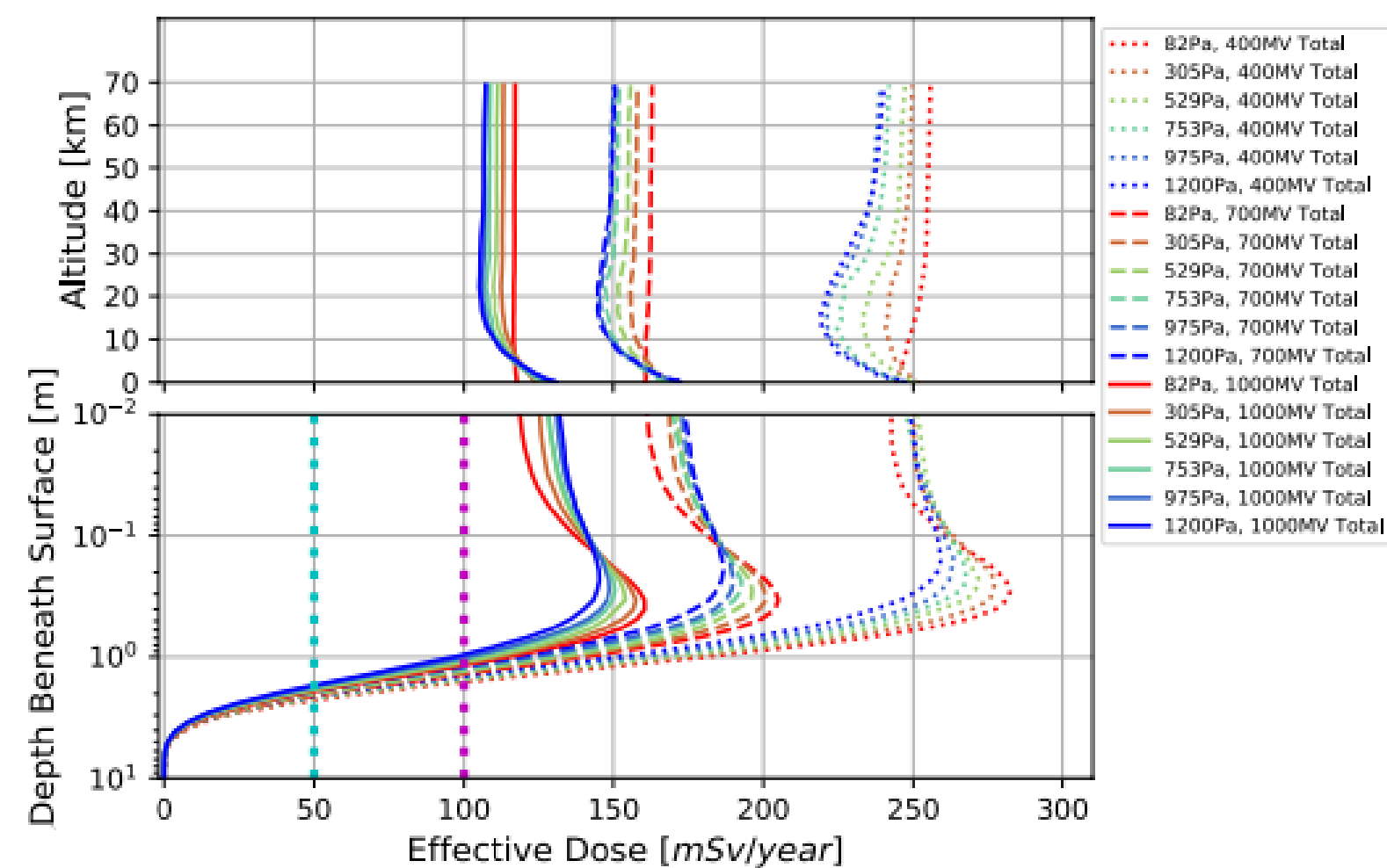
Dose rate modeling

Contribution of the different types of particles to the equivalent dose rate in tissues, calculated using various computational models (Matthiä et al., 2016). → The value circled in red corresponds to the total sum of the spectrum.



Different surface pressures

The global pressure map of the surveyed region of Mars at zero solar longitude. The white stars indicate the six locations selected in this study (Zhang et al., 2022). → Characterization of the measurement points



Dose rates as a function of pressure

The equivalent dose rate as a function of atmospheric altitude and subsurface depth (☆). Solar intensity is included in the modeling (400, 700, and 1000 MV) (Zhang et al., 2022). → Impact of atmospheric pressure and solar activity on radiation levels on Mars

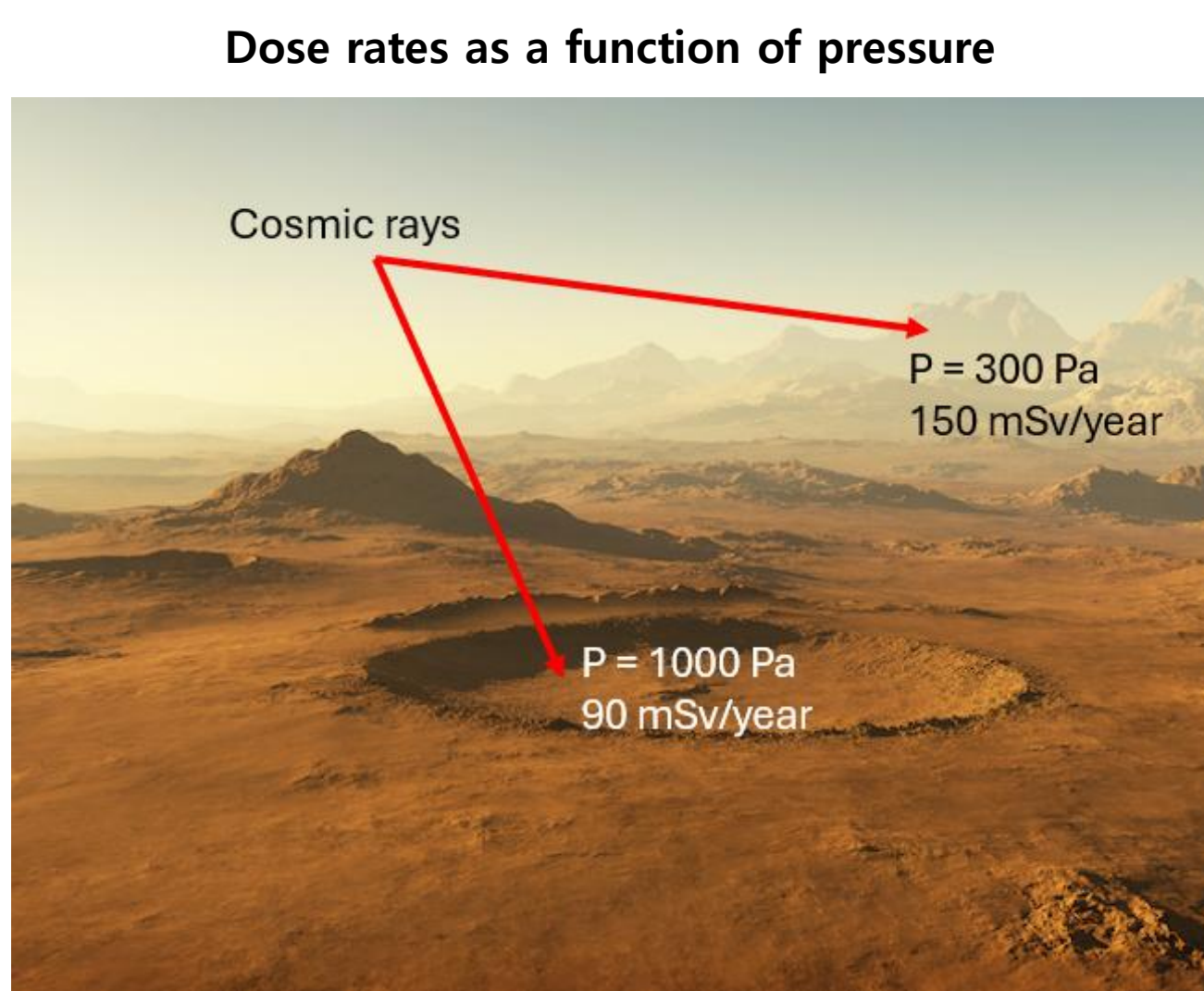
Dose rates according to solar minimum

The table compiles the values of absorbed and equivalent dose rates, as well as the total doses over the duration of a crewed mission to Mars, depending on solar minimum and maximum conditions (Ehresmann et al., 2023). → Equivalent dose rates are 1.13 times higher during solar minimum

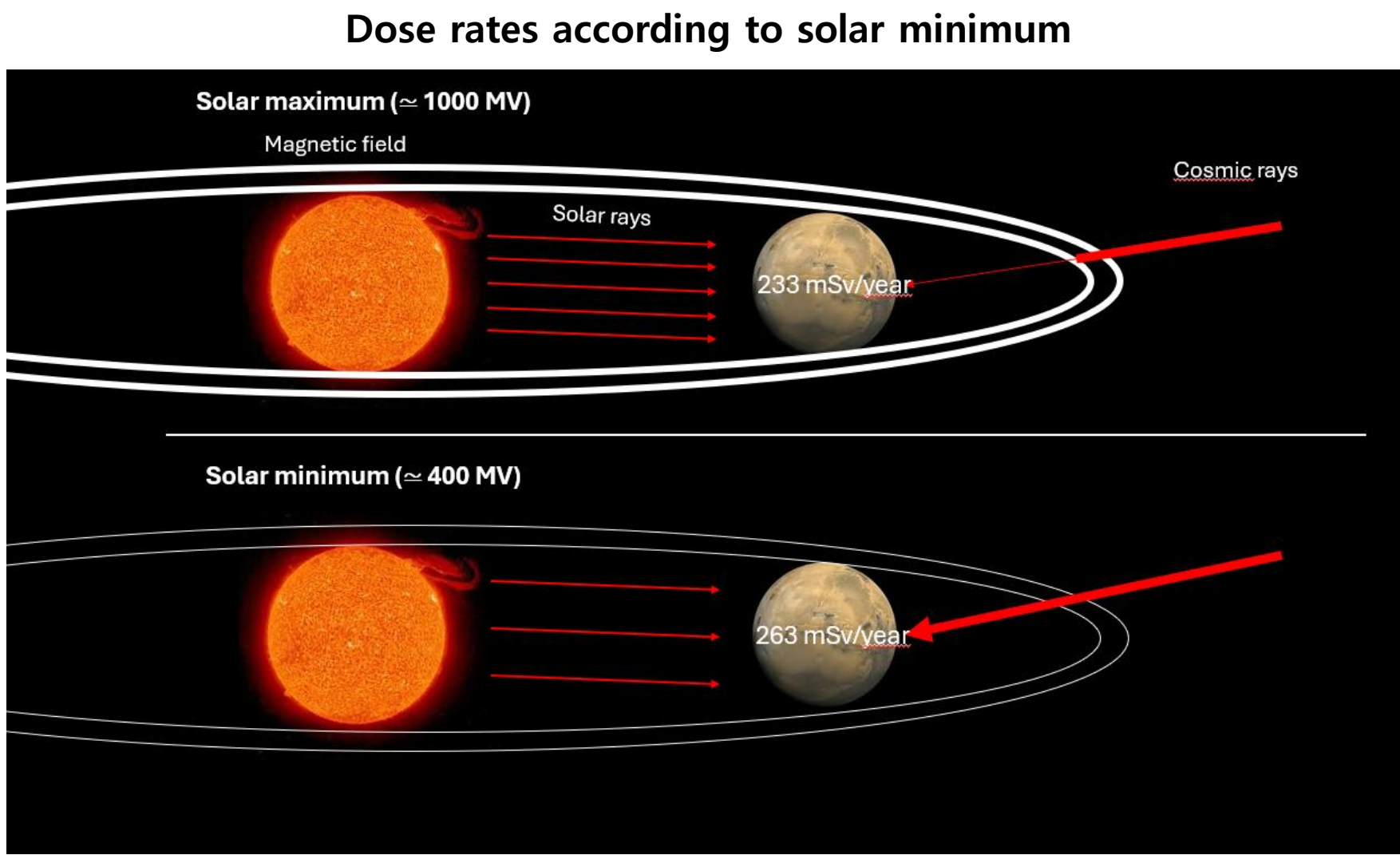
Quantity	Solar minimum of Cycle 24/5 (measured from 28 Nov 2019 to 3 October 2020)	Near solar maximum of Cycle 24 (measured from 7 August 2012 to 1 June 2013)	Ratio of solar minimum / near solar maximum of Cycle 24
Absorbed dose rate	0.314 mGy/d	0.21 mGy/d (a)	1.49
Average quality factor <Q>	2.3	3.05 (a)	0.75
Dose equivalent rate	0.72 mSv/d	0.64 mSv/d (a)	1.13
500 days of Mars surface mission	0.36 Sv	0.32 Sv (a)	1.13
2 x 180 days of transit Earth – Mars	0.64 – 0.80 Sv	0.57 Sv (b)	1.13 – 1.40
Total mission dose equivalent (excluding SEP contributions)	1 – 1.2 Sv	0.9 Sv (a), (b)	1.13 – 1.30
(a) from Hassler et al. (2014)			
(b) based on updated analysis from Zeitlin et al. (2019a)			

V – INTERPRETATIONS

Agreement between the values measured by the RAD probe (0.64 ± 0.12 mSv/day) and the modeled value (≈ 0.6 mSv/day). → Reliability of the calculation models used (Matthiä et al., 2016).



(Zhang et al. 2022)



(Zhang et al. 2022 / Ehresmann et al. 2023)



(Ehresmann et al. 2023)

Conclusion

These studies highlight that radiation on the surface of Mars constitutes a major constraint for crewed missions. Dose rates vary significantly depending on local atmospheric pressure and are also modulated by solar activity, with levels up to 1.13 times higher during solar minimum. Over a 500-day mission on Mars, including the round-trip journey, astronauts could receive a dose representing a level of exposure to human health that may lead to numerous stochastic effects (cancer, tumors, etc.). These results underscore the importance of considering radiation constraints in planning crewed missions to Mars, including the choice of landing sites (atmospheric pressure), timing (solar activity), mission duration, and the design of habitats and shielding to mitigate the biological risks associated with cosmic radiation.

Bibliography

Zhang, J., Guo, J., Dobynde, M. I., Wang, Y., & Wimmer-Schweingruber, R. F. (2022). From the top of Martian Olympus to deep craters and beneath: Mars radiation environment under different atmospheric and regolith depths.

B. Ehresmann, C. Zeitlin, D.M. Hassler, J. Guo, R.F. Wimmer-Schweingruber, T. Berger, D. Matthiä, G. Reitz (2023). The Martian surface radiation environment at solar minimum measured with MSL/RAD.

Matthiä, Daniel & Ehresmann, Bent & Lohf, Henning & Köhler, Jan & Zeitlin, Cary & Appel, Jan & Sato, Tatsuhiro & Slaba, Tony & Martin, Cesar & Berger, Thomas & Boehm, Eckart & Boettcher, Stephan & Brinza, David & Burmeister, Soenke & Guo, Jingnan & Hassler, Donald & Posner, Arik & Rafkin, Scot & Reitz, Guenther & Wimmer-Schweingruber, R.. (2016). The Martian surface radiation environment – a comparison of models and MSL/RAD measurements.

Lisa C. Simonsen, John E. Nealy, Lawrence W. Townsend, and John W. Wilson (1990). Radiation Exposure for Manned Mars Surface Missions.