



RayXpert[®]: Radioprotection des astronautes et de leurs habitats sur la Lune

Yulia Akisheva
ISAE-SUPAERO

Cédric Dossat (TRAD), Steven Robin-Chabanne (TRAD), Athina Varotsou (TRAD),
Yves Gourinat (ISAE-SUPAERO), Susanna Guatelli (UoW),
Aidan Cowley (ESA), Advenit Makaya (ESA)
IRSN, Paris, France, 9-10 mars, 2023

PLAN DE PRESENTATION

1. Contexte & Régolite
2. Modélisation
3. Etude de l'enrichissement du régolite
4. Exemple d'exposition du corps entier
aux radiations sur la Lune
5. Conclusions

RAYONS COSMIQUES GALACTIQUES (GCR)

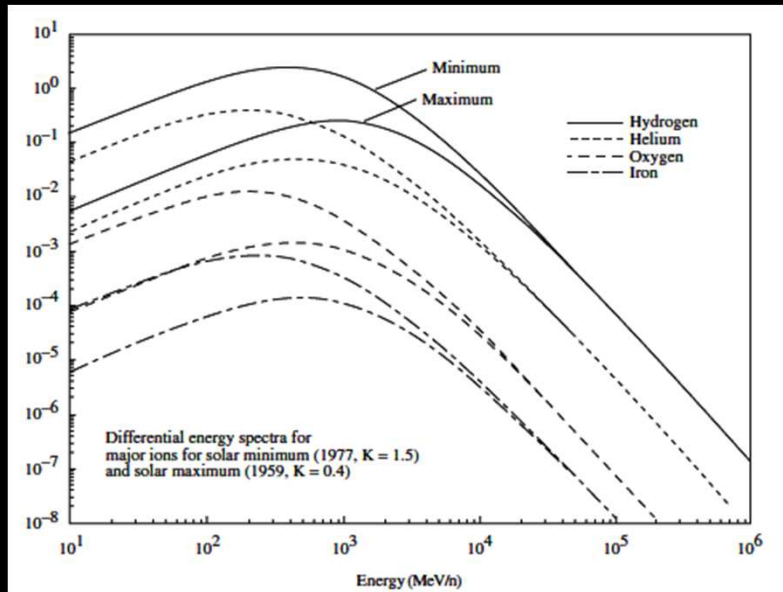


FIG. 6. GCR particle spectra (H, He, O, and Fe) and their modification by solar activity at 1 AU (Badhwar and O'Neill, 1992; Badhwar, Cucinotta, and O'Neill, 1993) and reproduced in NCRP (2000).

From Badhwar and O'Neill, 1992; and NCRP, 2000

RAYONS COSMIQUES GALACTIQUES (GCR)

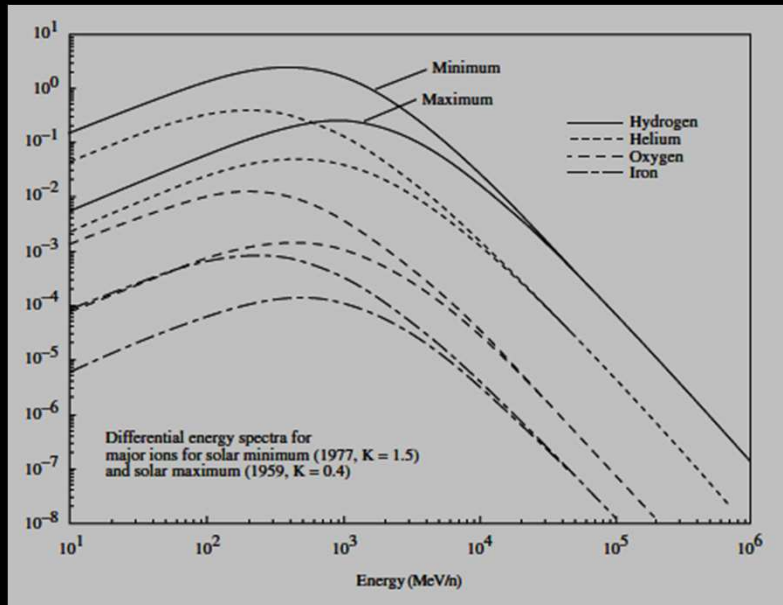


FIG. 6. GCR particle spectra (H, He, O, and Fe) and their modification by solar activity at 1 AU (Badhwar and O'Neill, 1992; Badhwar, Cucinotta, and O'Neill, 1993) and reproduced in NCRP (2000).

From Badhwar and O'Neill, 1992; and NCRP, 2000

D.K. Bond, et al.

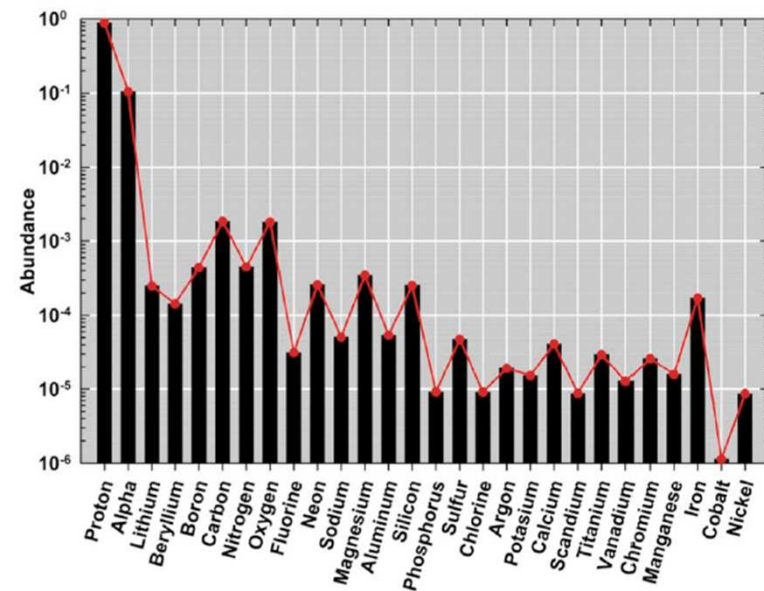


Fig. 1. The most abundant 28 elements in the GCRs [13,14].

From D. K. Bond, B. Goddard, R. C. Singleterry, and S. Bilbao y León, —Evaluating the effectiveness of common aerospace materials at lowering the whole body effective dose equivalent in deep space, *Acta Astronautica*, vol. 165, pp. 68–95, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.actaastro.2019.07.022.



- REGOLITE LUNAIRE -

EAC-1A

50-80 cm

1,45 g/cm³



- REGOLITE LUNAIRE -

EAC-1A

50-80 cm

1,45 g/cm³

Composition chimique (wt%)

Compound	EAC-1A
-----------------	---------------

Al ₂ O ₃	12,6
--------------------------------	------

CaO	10,8
-----	------

FeO	12
-----	----

K ₂ O	1,3
------------------	-----

MgO	11,9
-----	------

MnO	0,2
-----	-----

Na ₂ O	2,9
-------------------	-----

P ₂ O ₅	0,6
-------------------------------	-----

SiO ₂	43,7
------------------	------

TiO ₂	2,4
------------------	-----

- REGOLITE LUNAIRE -

Composition chimique (wt%)

Compound	EAC-1A
Al ₂ O ₃	10,6
CaO	10,8
FeO	12
K ₂ O	1,3
MgO	11,9
MnO	0,2
Na ₂ O	2,9
P ₂ O ₅	0,6
SiO ₂	43,7
TiO ₂	2,4

EAC-1A

50-80%

1,45 g/cm³

- NOUS L'AMÉLIORONS ?
- Matériaux riches en hydrogène !

- **Méthode** : outil Monte Carlo 3D
- **Physique** : librairies GEANT4 (p.ex. QBBC)
- **Objectif** : calculs de débit de dose
- **Options** : multithreading ; cartographie

MODELE

- **l'Environnement** : spectre GCR (H) à 1 AU, minimum solaire (1986-87), le modèle standard *ISO-15390* de SPENVIS v. 4.6.10.3443

MODELE

- **l'Environnement** : spectre GCR (H) à 1 AU, minimum solaire (1986-87), le modèle standard *ISO-15390* de SPENVIS v. 4.6.10.3443
- **Volumes sensibles** :
 - Sphère ICRU (diamètre 30 cm) ou slabs représentatifs
 - Fantôme humain MIRD male

MODELE

- **l'Environnement** : spectre GCR (H) à 1 AU, minimum solaire (1986-87), le modèle standard *ISO-15390* de SPENVIS v. 4.6.10.3443
- **Volumes sensibles** :
 - Sphère ICRU (diamètre 30 cm) ou slabs représentatifs
 - Fantôme humain MIRD male
- **Blindages** :
 - Slab de régolithe (épaisseur 50 cm) avec un pourcentage croissant de polyéthylène
 - Dôme hémisphérique de régolithe et sol lunaire (15 x 15 x 5 m)

MODELE

- **l'Environnement** : spectre GCR (H) à 1 AU, minimum solaire (1986-87), le modèle standard *ISO-15390* de SPENVIS v. 4.6.10.3443
- **Volumes sensibles** :
 - Sphère ICRU (diamètre 30 cm) ou slabs représentatifs
 - Fantôme humain MIRD male
- **Blindages** :
 - Slab de régolithe (épaisseur 50 cm) avec un pourcentage croissant de polyéthylène
 - Dôme hémisphérique de régolithe et sol lunaire (15 x 15 x 5 m)
- **Dose équivalente** : $H=Q(LET)D$, où D est la dose absorbée et $Q(LET)$ sont des facteurs de qualité

MODELE

Source: protons < 100 GeV

1e4 particules

Sphère ICRU

1e6 particules

30 slabs

RÉSULTATS - SPHERE

Observations

- (1) Au moins 20% de polyethylene est nécessaire pour réduire significativement la dose eq. totale**
- (2) La dose eq. due aux neutrons (re)augmente à 50%**

Une petite quantité de polyéthylène ajouté (1 et 2 %) augmente les doses équivalentes totales!

RÉSULTATS - SLABS

Observations

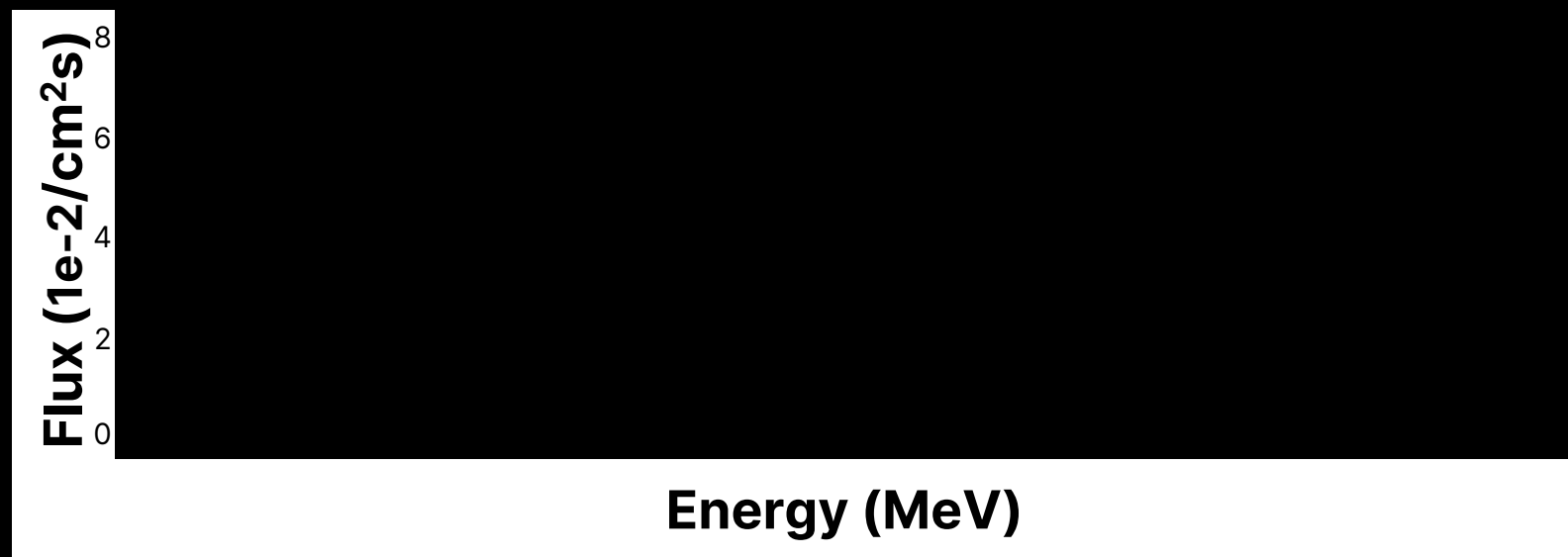
L'ajout de polyéthylène augmente la dose équivalente totale due aux neutrons dans les slabs

RÉSULTATS - SLABS

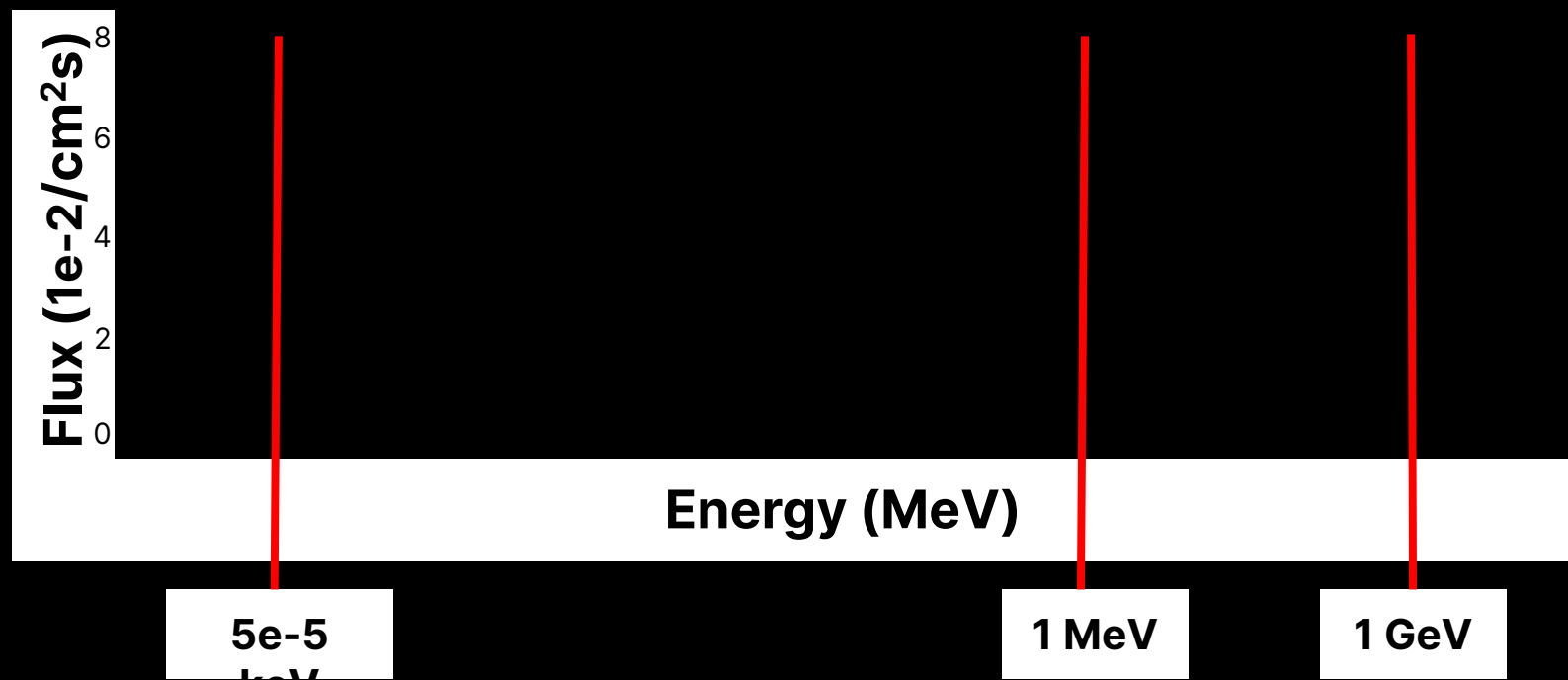
Observations

L'ajout de polyéthylène augmente la dose équivalente totale due aux neutrons dans les slabs

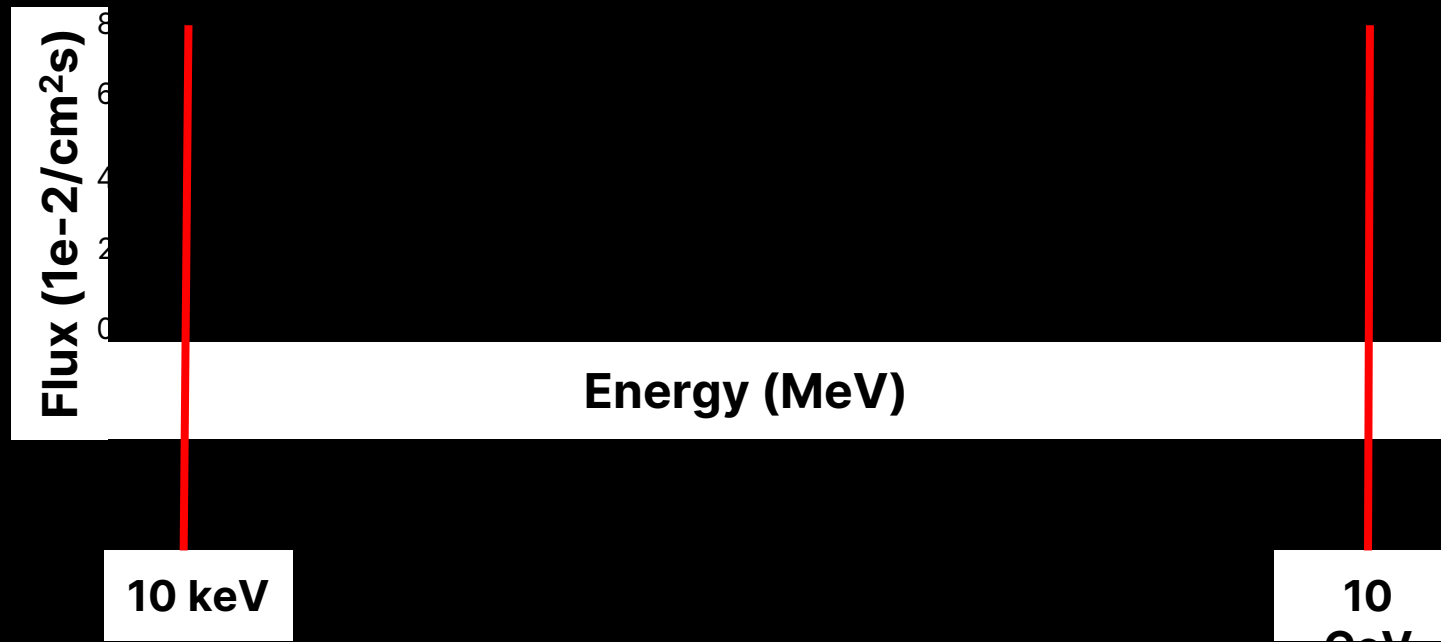
RÉSULTATS - FLUX DE NEUTRONS (SLABS)



RÉSULTATS - FLUX DE NEUTRONS (SLABS)



RÉSULTATS - FLUX DE NEUTRONS (SLABS)

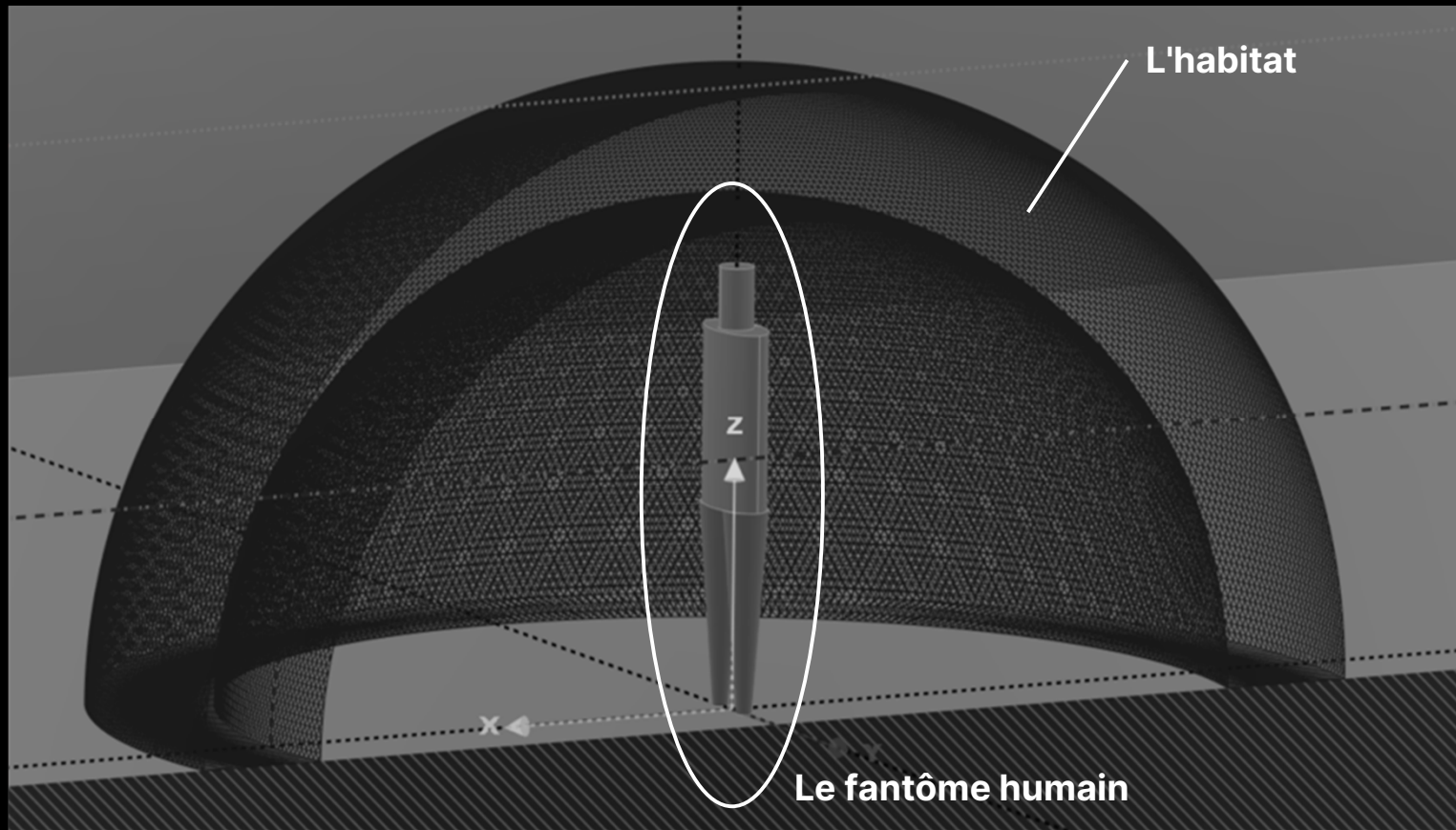


Observations

Production des "pires" types de neutrons à la fois dans le matériau cible et dans le corps humain

Version RayXpert en dev. & révision

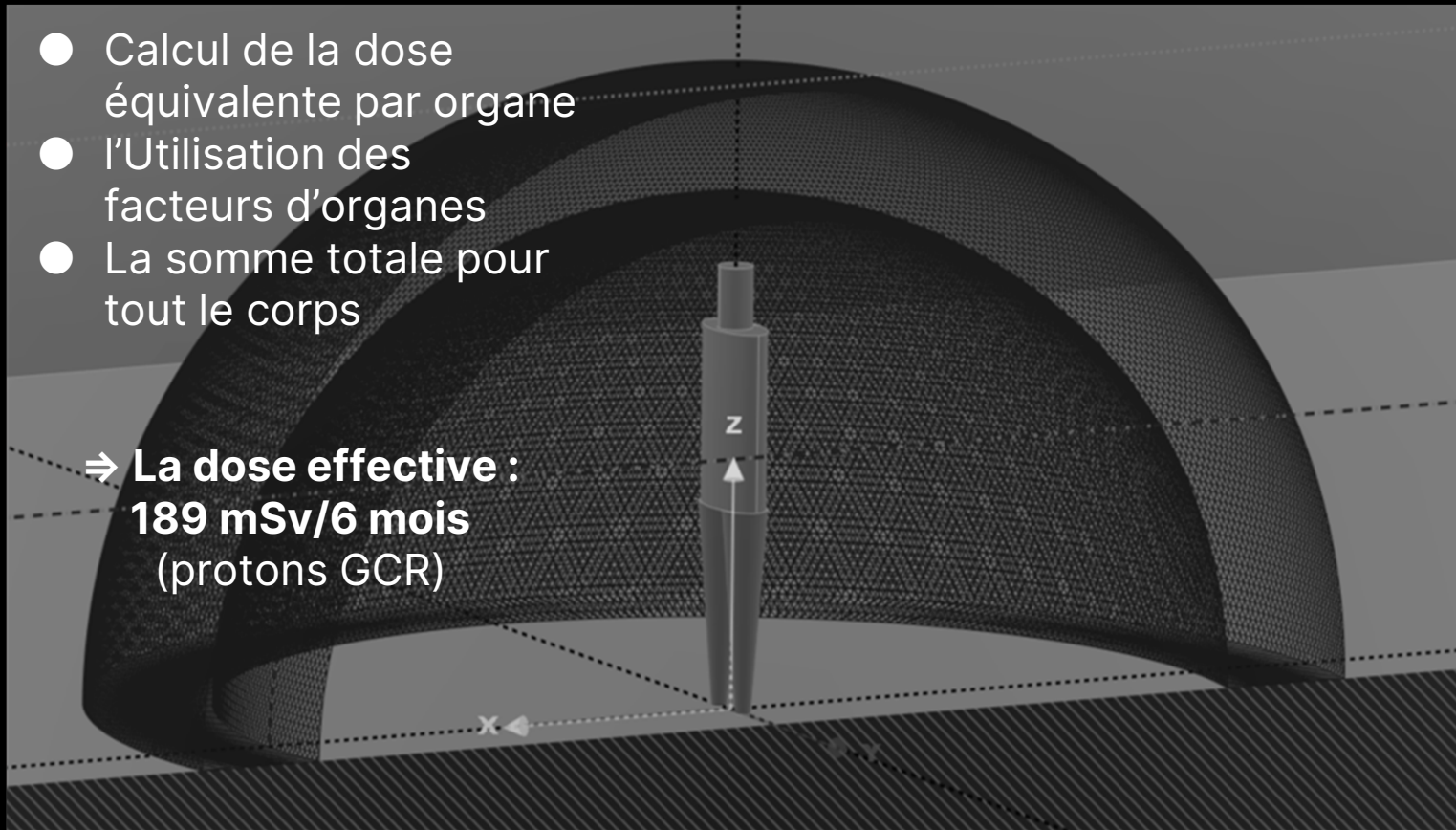
MODELE COMPLET



MODELE COMPLET

- Calcul de la dose équivalente par organe
- l'Utilisation des facteurs d'organes
- La somme totale pour tout le corps

⇒ La dose effective :
189 mSv/6 mois
(protons GCR)



MODELE COMPLET

- Calcul de la dose équivalente par organe
- l'Utilisation des facteurs d'organes
- La somme totale pour tout le corps

⇒ **La dose effective :**
189 mSv/6 mois
(protons GCR)

Scénario	Dose totale (mSv)
Limite d'exposition sur l' ISS	250 / 6 mois
Étude ESA HUMEX GCR sur la Lune (blindage 1 g/cm ²)	195 / 6 mois
Moyennes des missions Apollo	0.7-3 / jour

CONCLUSIONS

- L'ajout de polyéthylène dans le cible de régolite n'a pas d'effet *satisfaisant* sur les doses (totales, protons, neutrons) dans la sphère ICRU
 - l'effet négatif en faibles %
 - besoin de 20% de polyéthylène pour réduire la dose eq. totale de 7%
- L'utilisation de RayXpert® est adaptée aux applications de radioprotection spatiale (version en dev.)

Habitat multi couches



- Regolith
- Aluminium
- CHO-rich material
- Thermal insulation

MERCI

Cédric Dossat, *TRAD Tests & Radiations*

Yves Gourinat, *ISAE-SUPAERO, ICA*

Steven Robin-Chabanne, *TRAD Tests & Radiations*

Athina Varotsou, *TRAD Tests & Radiations*

Susanna Guatelli, *University of Wollongong*

Aidan Cowley, *ESA EAC*

Advenit Makaya, *ESA ESTEC*

Open Space Innovation Platform (OSIP)

REFERENCES

- D. K. Bond, B. Goddard, R. C. Singleterry, and S. Bilbao y León, —Evaluating the effectiveness of common aerospace materials at lowering the whole body effective dose equivalent in deep space,|| *Acta Astronautica*, vol. 165, pp. 68–95, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.actaastro.2019.07.022.
- G. Reitz, T. Berger, and D. Matthiae, “Radiation exposure in the moon environment,” *Planetary and Space Science*, vol. 74, no. 1, pp. 78–83, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.pss.2012.07.014
- ICRP, “Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123,” 42(4), 2013.
- M. Durante and F. A. Cucinotta, “Physical basis of radiation protection in space travel,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 83, no. 4, pp. 1245–1281, Nov. 2011, doi: 10.1103/RevModPhys.83.1245.
- “RayXpert 3D modeling and dose calculation software using a Monte Carlo,” *RayXpert*. <https://www.rayxpert.com/en/> (accessed Sep. 02, 2022).
- S. Derreumaux, S. Vecchiola, T. Geoffray, and C. Etard, “Evaluation of RayXpert® for shielding design of medical facilities,” in *13th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-13) & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of the American Nuclear Society -2016 (RPSD-2016)*, Paris, France, Oct. 2016, vol. 153, p. 06024. doi: 10.1051/epjconf/201715306024.
- P. M. O’Neill, “Badhwar–O’Neill galactic cosmic ray model update based on advanced composition explorer (ACE) energy spectra from 1997 to present,” *Advances in Space Research*, vol. 37, no. 9, pp. 1727–1733, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.asr.2005.02.001.
- Mesick et al, Benchmarking Geant4 for simulating galactic cosmic ray interactions within planetary bodies. *Earth and Space Science*, 5(7), pp. 324-338
- “Report No. 132 – Radiation Protection Guidance for Activities in Low-Earth Orbit (2000) - NCRP | Bethesda, MD,” Jul. 18,2018.
- W.S. Snyder, et al, "MIRD Pamphlet No. 5 Revised, Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom", *J. Nucl. Med. Suppl.*, no. 3, pp. 5-52, 1969.
- ESA, 2003, HUMEX: Study on the Survivability and Adaptation of Humans to Long-Duration Interplanetary and Planetary Environments, Report No. ESA-ESTEC SP-1264

À VOUS!

**QUESTIONS &
REMARQUES**

BACKUP SLIDES

QUESTIONS & FEEDBACK

Connect over

- Regolith
- Simulants
- Radiation tests
- Particle accelerators
- Student internships
 - Habitat construction
 - Mars exploration

yulia.akisheva@isae.fr

RÉSULTATS - SLABS

Observations

Le lieu du dépôt d'énergie par les protons parmi les slabs n'est en grande partie pas affecté par l'ajout d'un faible % de polyéthylène

Erreurs de ~3%

RÉSULTATS - SLABS

Observations

Erreurs de ~3%

RÉSULTATS - SLABS

Observations

**L'ajout de
polyéthylène
augmente la dose
totale absorbée
due aux neutrons**

RÉSULTATS - SLABS

Observations

L'ajout de polyéthylène augmente la dose équivalente totale due aux neutrons dans les slabs

RÉSULTATS - SLABS

Observations

**L'ajout de
polyéthylène
augmente la dose
totale absorbée
due aux neutrons**

RÉSULTATS - SLABS

Observations

L'ajout de polyéthylène n'affecte pas significativement la dose totale absorbée

RÉSULTATS - SLABS

Observations

Seul l'ajout d'une grande proportion de polyéthylène (50%) réduit significativement (<10%) la dose totale due aux protons

- Protons ralentis à travers de régolite
- Dépos d'énergie dans le corps humain plus que dans le régolite

RÉSULTATS - SLABS

Observations

LUNAR REGOLITH COMPOSITION

Chemical composition (wt%)								
Compound	Mare high Ti (A-17)	Mare low Ti (A-15)	Highlands (A-16)	EAC-1	NU-LHT	JSC-1A	LHS-1	LMS-1
Al ₂ O ₃	10,97	10,32	27,18	12,6	21,55	13,9	25,8	14
CaO	10,62	9,74	15,79	10,8	12,6	10,5	18,4	9,8
Cr ₂ O ₃	0,46	0,53	0,107		0,12			0,3
FeO	17,53	19,75	5,18	12	5,08	12,1	3,7	13,9
K ₂ O	0,076	0,1	0,11	1,3	0,12	1,17	0,7	0,6
MgO	9,62	11,29	5,84	11,9	9,5	5,6	0,3	12
MnO	0,24	0,25	0,065	0,2	0,09	0,21	0,1	0,3
Na ₂ O	0,35	0,31	0,47	2,9	0,965	3,89		
P ₂ O ₅	0,07	0,11	0,12	0,6	0,07	1,04	1	1
SiO ₂	39,87	46,2	45,09	43,7	46,6	46,8	48,1	40,2
TiO ₂	9,42	2,16	0,56	2,4	0,115	2,44	1,1	7,3
tot	99,226	100,76	100,512	98,4	96,81	97,65	99,2	99,4

RADIATION ENVIRONMENT

Primary sources

Galactic Cosmic Rays

MeV to TeV p^+ & heavy ions

Omnipresent, isotropic

Image: NASA

RADIATION ENVIRONMENT

Primary sources

Galactic Cosmic Rays

MeV to TeV p^+ & heavy ions
Omnipresent, isotropic

Image: NASA

Solar Particle Events

MeV to GeV p^+
Unpredictable

Image: NASA

RADIATION ENVIRONMENT

Primary sources

Galactic Cosmic Rays

MeV to TeV p+ & heavy ions
Omnipresent, isotropic

Image: NASA

Solar Particle Events

MeV to GeV p+
Unpredictable

Image: NASA

Secondary emissions

Image: ESA

Lunar albedo

Generated in habitat walls

Other

LUNAR NEUTRON ALBEDO

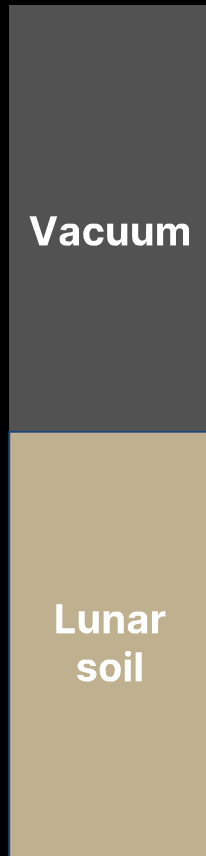
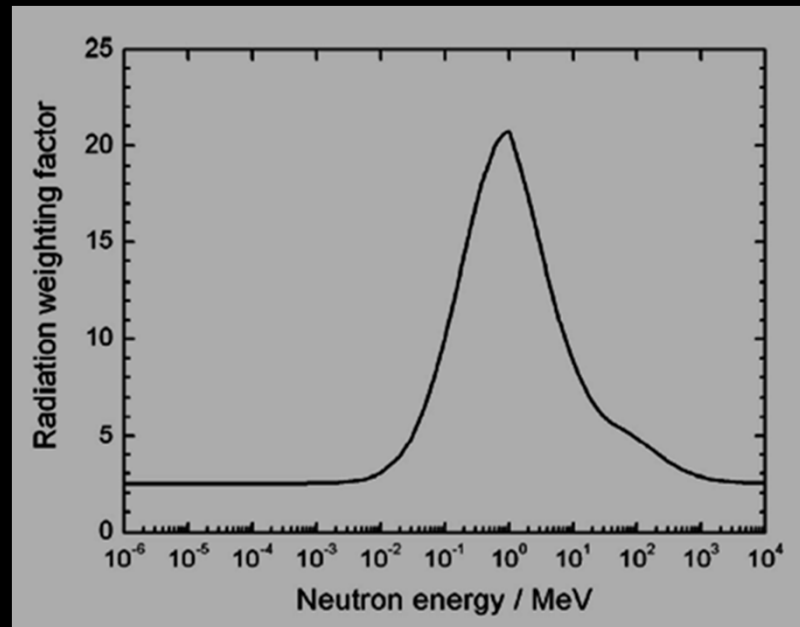


Image from Mesick et al, Benchmarking Geant4 for simulating galactic cosmic ray interactions within planetary bodies. *Earth and Space Science*, 5(7), pp. 324-338

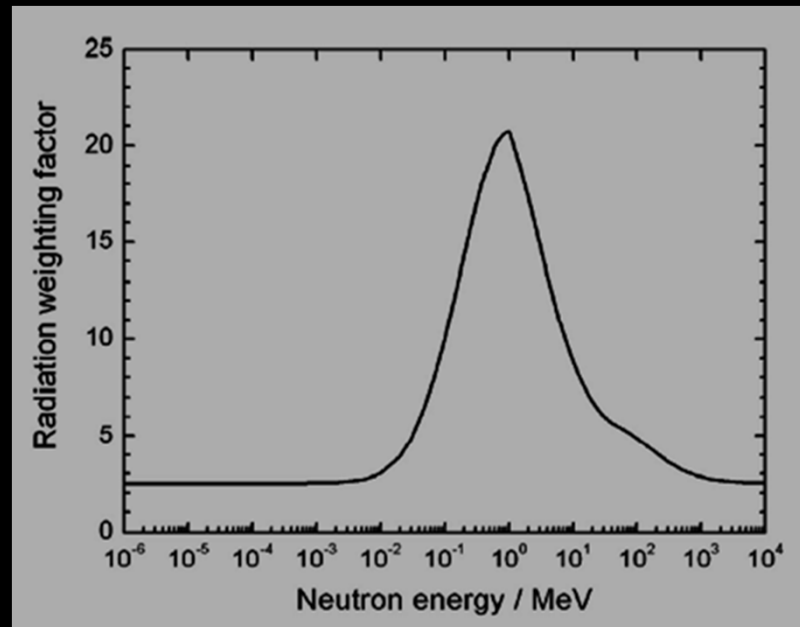
NEUTRON - THE ENEMY?



[1] ICRP. ICRP Publication 123: Assessment of radiation exposure of astronauts in space. Ann. ICRP **2013**, 42, 1–339.

NEUTRON - THE ENEMY?

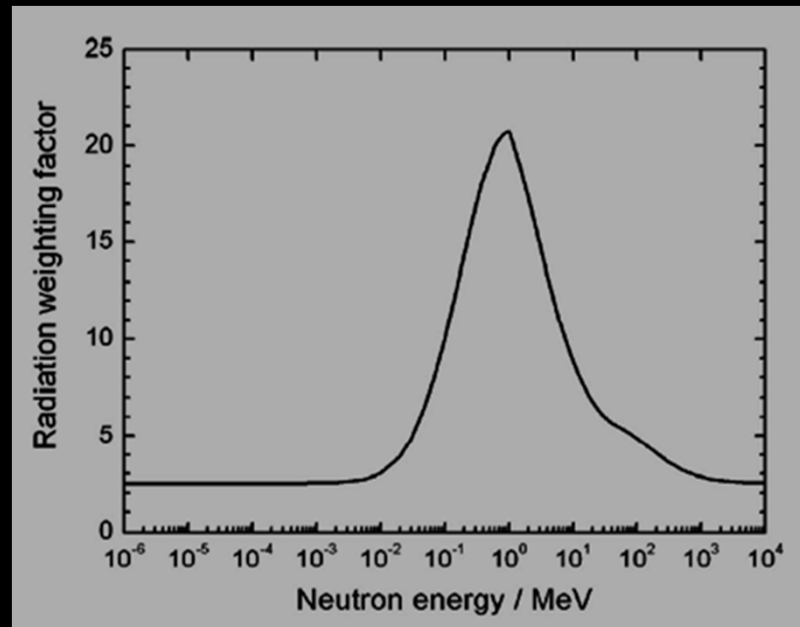
(Heilbronn 2015) showed that the portion of **< 200 MeV** of the neutron energy spectrum accounts for **half biological neutron exposure** in deep space



[1] ICRP. ICRP Publication 123: Assessment of radiation exposure of astronauts in space. Ann. ICRP **2013**, 42, 1–339.

NEUTRON - THE ENEMY?

(Heilbronn 2015) showed that the portion of **< 200 MeV** of the neutron energy spectrum accounts for **half biological neutron exposure** in deep space



In aluminium and regolith, neutrons contribute up to **half the total dose** (BFO dose, calculations for SPE February 1956, (Pham & El-Genk, 2008)).

[1] ICRP. ICRP Publication 123: Assessment of radiation exposure of astronauts in space. Ann. ICRP **2013**, 42, 1–339.

Q(LET)

From M. Durante and F. A. Cucinotta, —Physical basis of radiation protection in space travel, *Rev. Mod. Phys.*,
vol. 83, no. 4, pp. 1245–1281, Nov. 2011, doi: 10.1103/RevModPhys.83.1245.

&&

ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. *Ann. ICRP* 42(4).

ORGAN (TISSUE) WEIGHTING FACTORS

From M. Durante and F. A. Cucinotta, —Physical basis of radiation protection in space travel, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 83, no. 4, pp. 1245–1281, Nov. 2011, doi: 10.1103/RevModPhys.83.1245.

DOSES

From Williams, R. NASA Space Flight Human-System Standard Volume 1, Revision A: Crew Health; NASA: Washington, DC, USA, 2015.

SPEs

MODEL

- **Environment:** GCR spectra (H, He) at 1 AU, solar minimum (1986-87), the ISO-15390 standard model from SPENVIS v. 4.6.10.3443
- **Sensitive volumes:**
 - ICRU sphere (30 cm diameter)
 - Human phantom developed at TRAD Tests & Radiations
- **Shieldings:**
 - Regolith slab with increasing percentage of polyethylene
 - Semi-spherical dome of regolith and lunar soil (15 x 15 x 5 m)
- **Dose equivalent:** $H=Q(LET)D$, where D is the absorbed dose and $Q(LET)$ are quality factors