

RADIOPROTECTION DANS L'ESPACE.

RISQUE, SUIVI DES PERSONNELS ET PERSPECTIVES DE MISSIONS SPATIALES HABITÉES

Françoise BEZERRA

Experte Senior Radiations - CNES

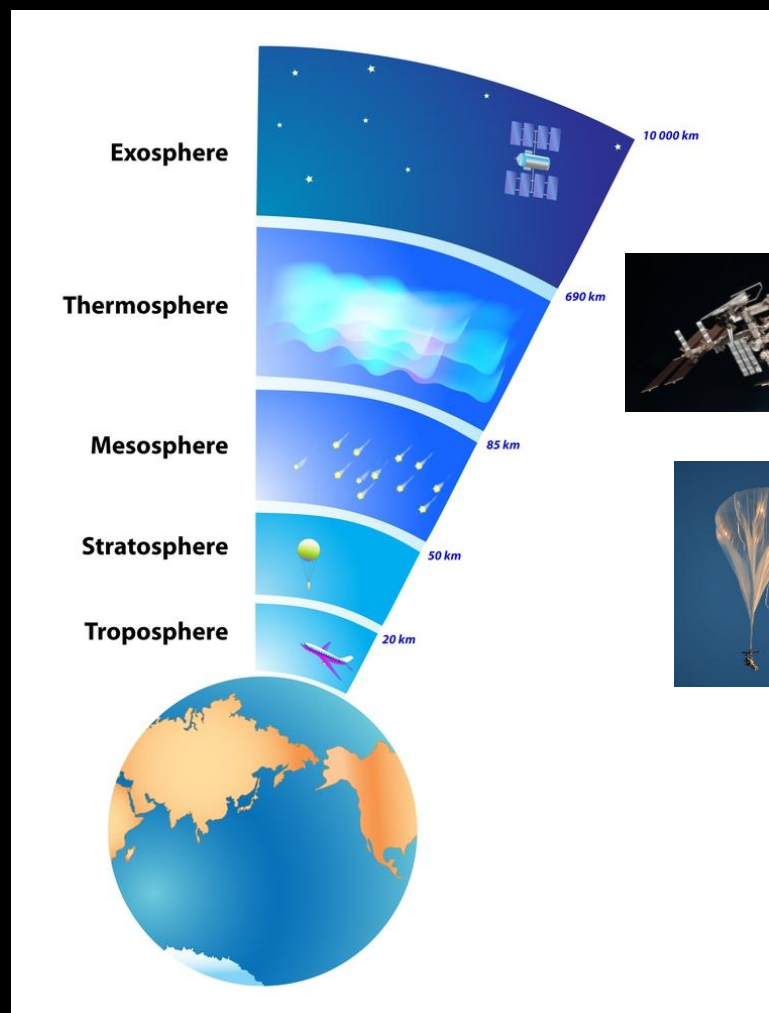
LA BAULE – CONGRÈS SFRP
17 JUIN 2025



01

L'ESPACE MILIEU HOSTILE

QUELS SONT LES RISQUES?



A partir de 100km d'altitude



LES DIFFÉRENTS RISQUES (MATÉRIEL & ÉQUIPAGES)

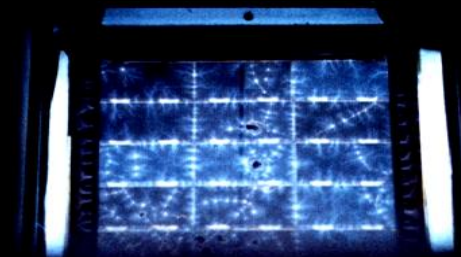
L'ESPACE MILIEU
HOSTILE



Vide



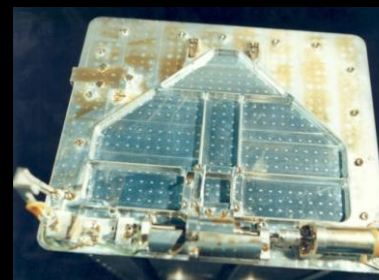
Environnement radiatif



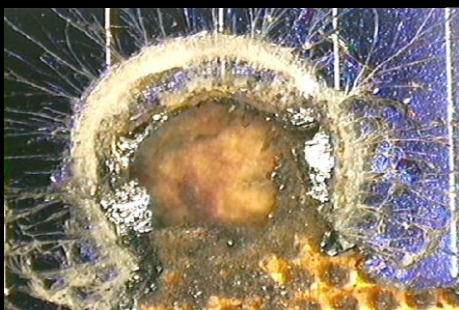
Décharges électrostatiques



Microgravité

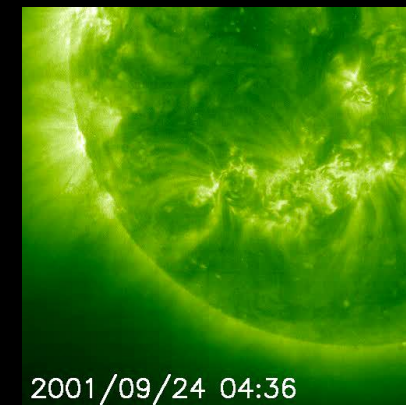


Ultra Violets



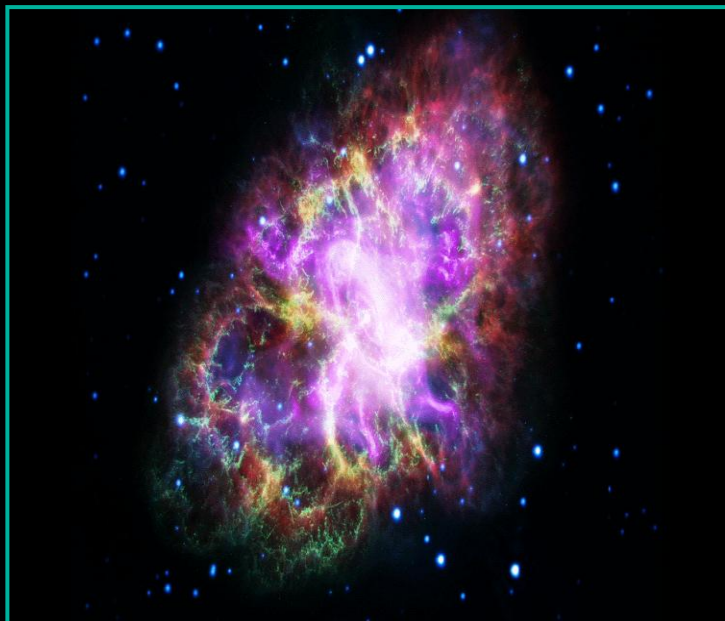
**Micrométéorites
& débris**

Rayonnements ionisants



LES SOURCES DE RAYONNEMENTS IONISANTS DANS L'ESPACE

L'ESPACE MILIEU
HOSTILE

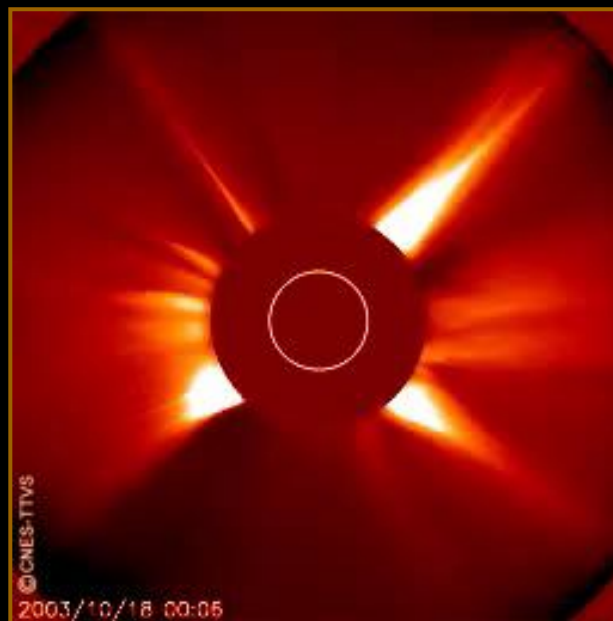


**Rayons Cosmiques
(GCR)**

Protons

Ions

Abondance max ~300 MeV/n
Energie max ~ 10 GeV/n

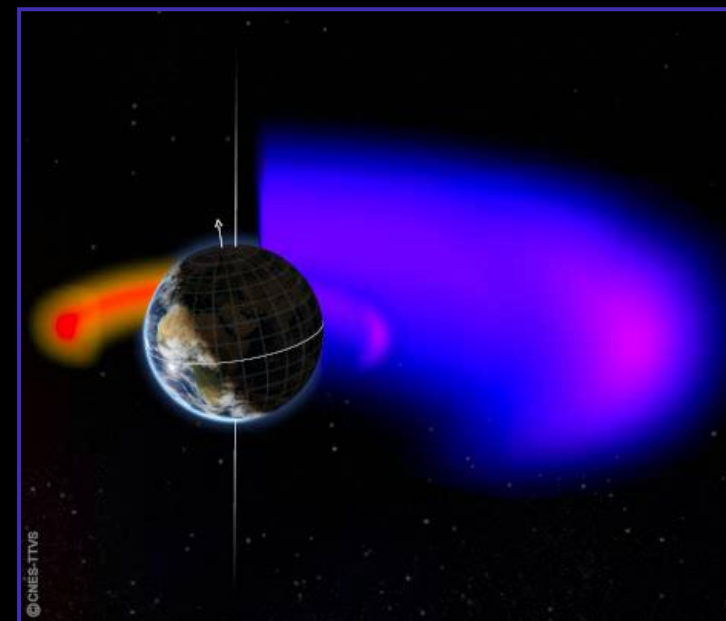


Soleil & éruptions

Protons

Ions

keV- 500 MeV qq 1-10 MeV/n



Ceintures de Van Allen

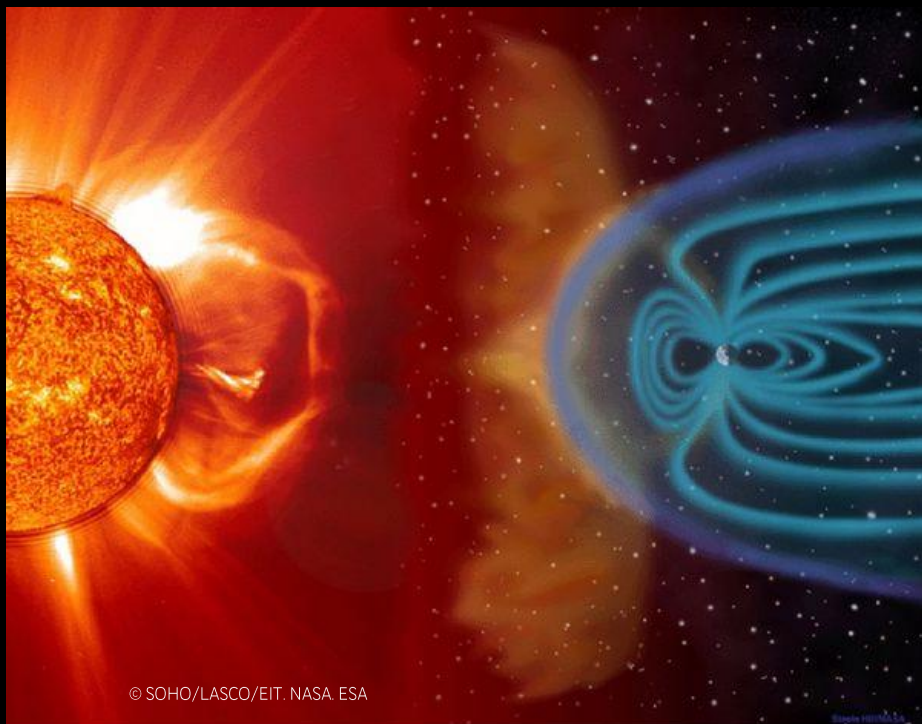
Protons

Electrons

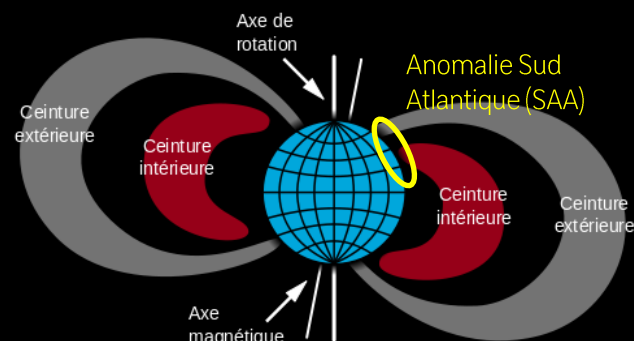
keV- 500 MeV eV - ~ 10 MeV

UN ENVIRONNEMENT RADIATIF VARIABLE

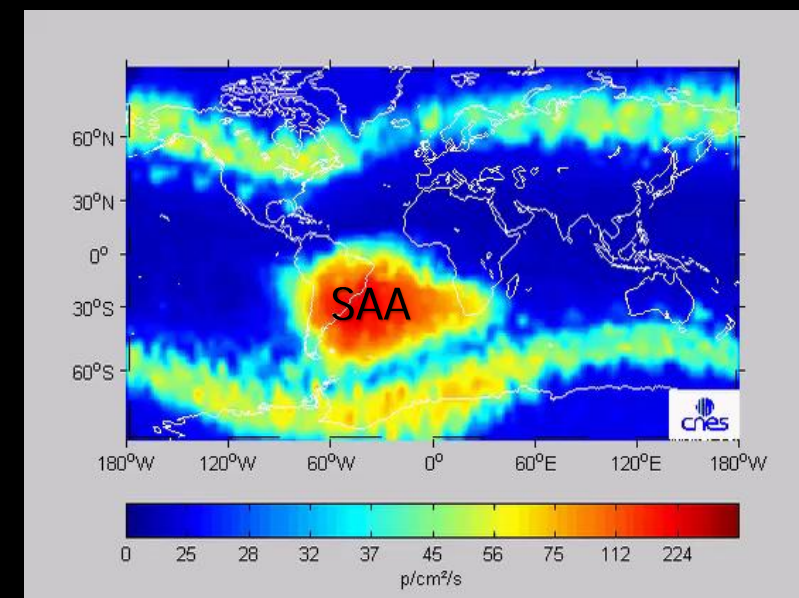
L'ESPACE MILIEU
HOSTILE



Suivant la localisation



ICARE/SAC-C 15 March – 15 Avril 2001 - 1 image/j



Orbite basse (705km, 98°)

Suivant l'activité solaire

FORT IMPACT DU BLINDAGE

L'ESPACE MILIEU
HOSTILE

Ions

Protons

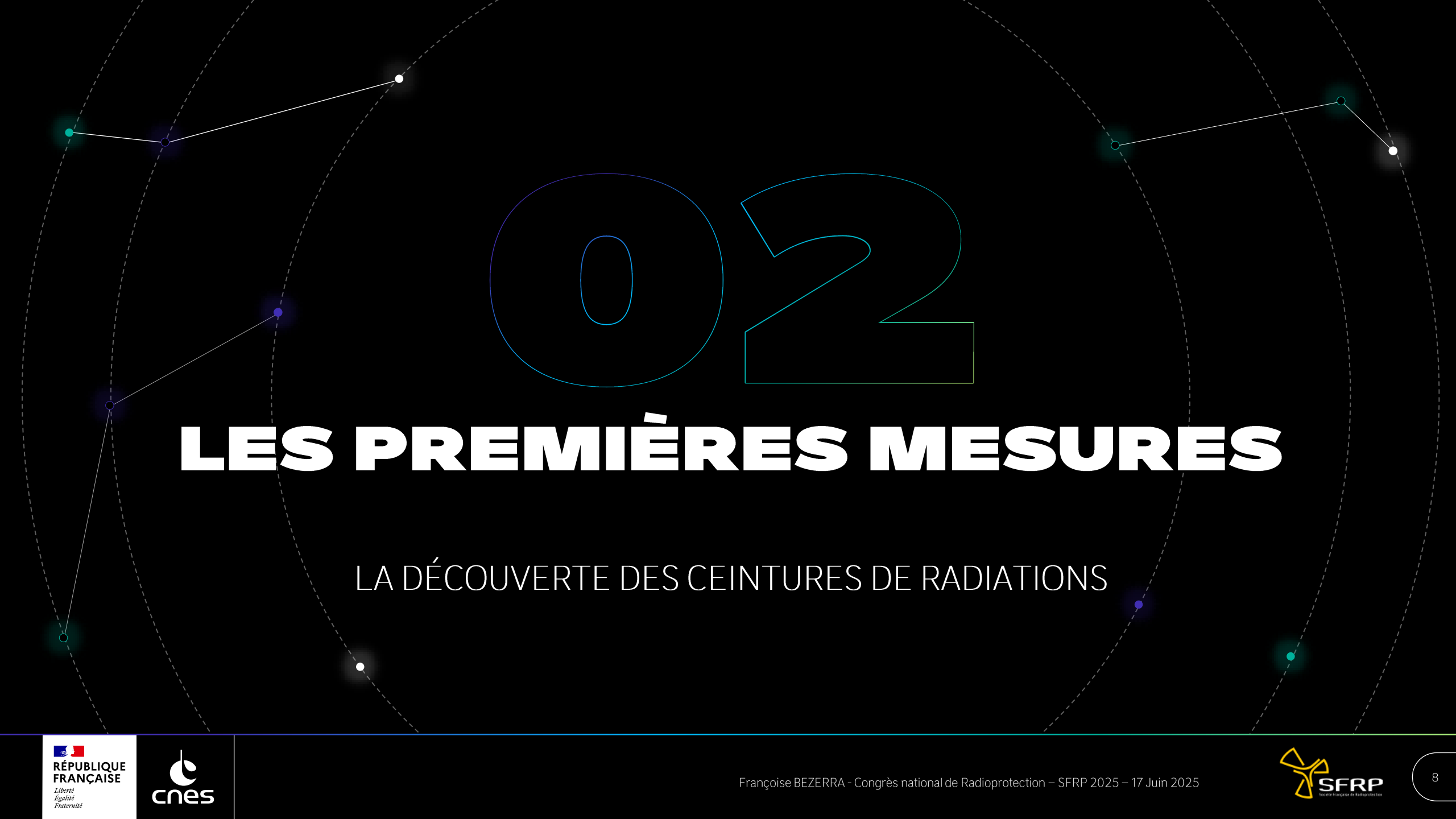
Electrons

**Ions, protons, électrons,
neutrons, photons X et γ**

Neutrons d'Albedo



➔ Nécessité de mesurer/calculer cet environnement au cas par cas



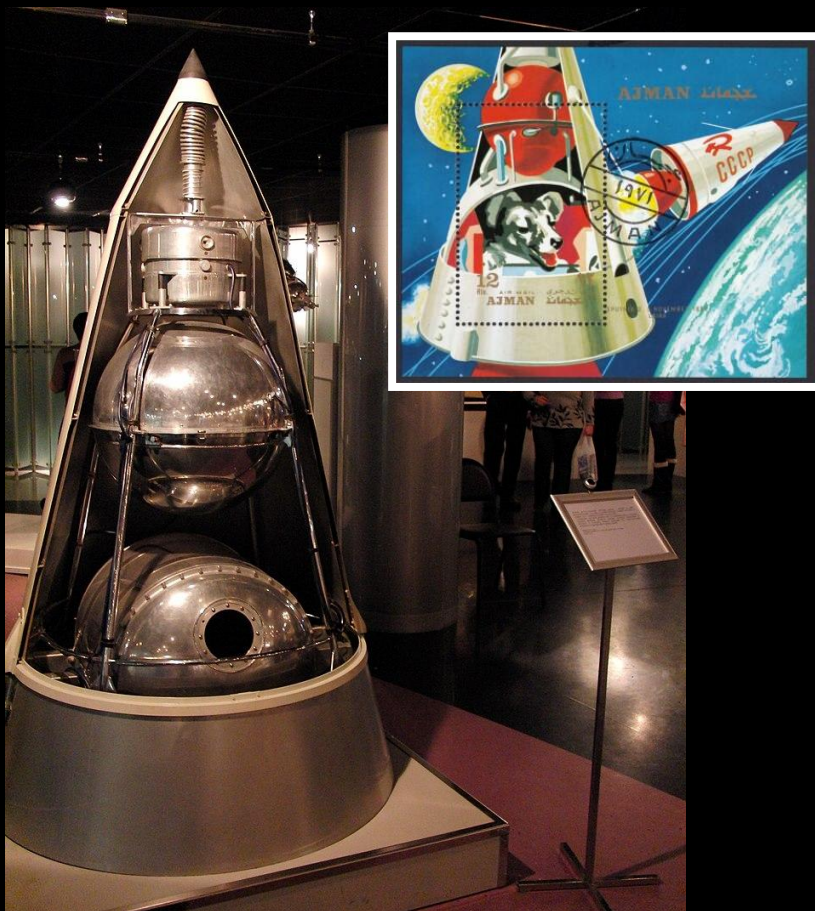
02

LES PREMIÈRES MESURES

LA DÉCOUVERTE DES CEINTURES DE RADIATIONS

LES PREMIÈRES MESURES EMBARQUÉES

LES PREMIÈRES
MESURES



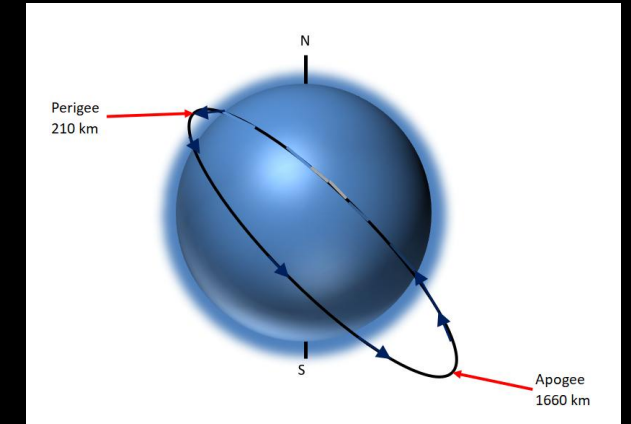
Crédit photo: Mikhail (Vokabre) Shcherbakov from Moscow, Russia
Memorial Museum of Space Exploration

SPOUTNIK 2

3 novembre 1957 – 14 avril 1958

212-1660 km, 66°

- Un compteur Geiger
- 2 spectrophotomètres (UV + Rayons X)



Crédit S. Hurley – explainingscience.org

Pas d'enregistreur – transmission des données par radio

Radiations détectées au dessus de l'URSS seulement pour latitude 60° et plus.

Nombreux messages radio captés en Amérique du sud et en Australie mais pas interprétés (Guerre froide).

LES PREMIÈRES MESURES EMBARQUÉES

LES PREMIÈRES
MESURES

1^{er} février – 23 mai 1958

358-2550km, 33°

Pas d'enregistreur



Crédit photo: NASA

EXPLORER 1



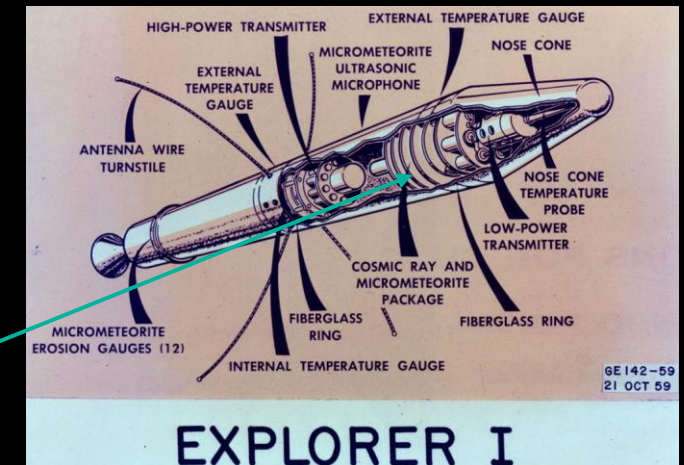
Compteur Geiger Müller Anton 314

- Eseuil (protons) = 30MeV
- Eseuil (électrons) = 3MeV

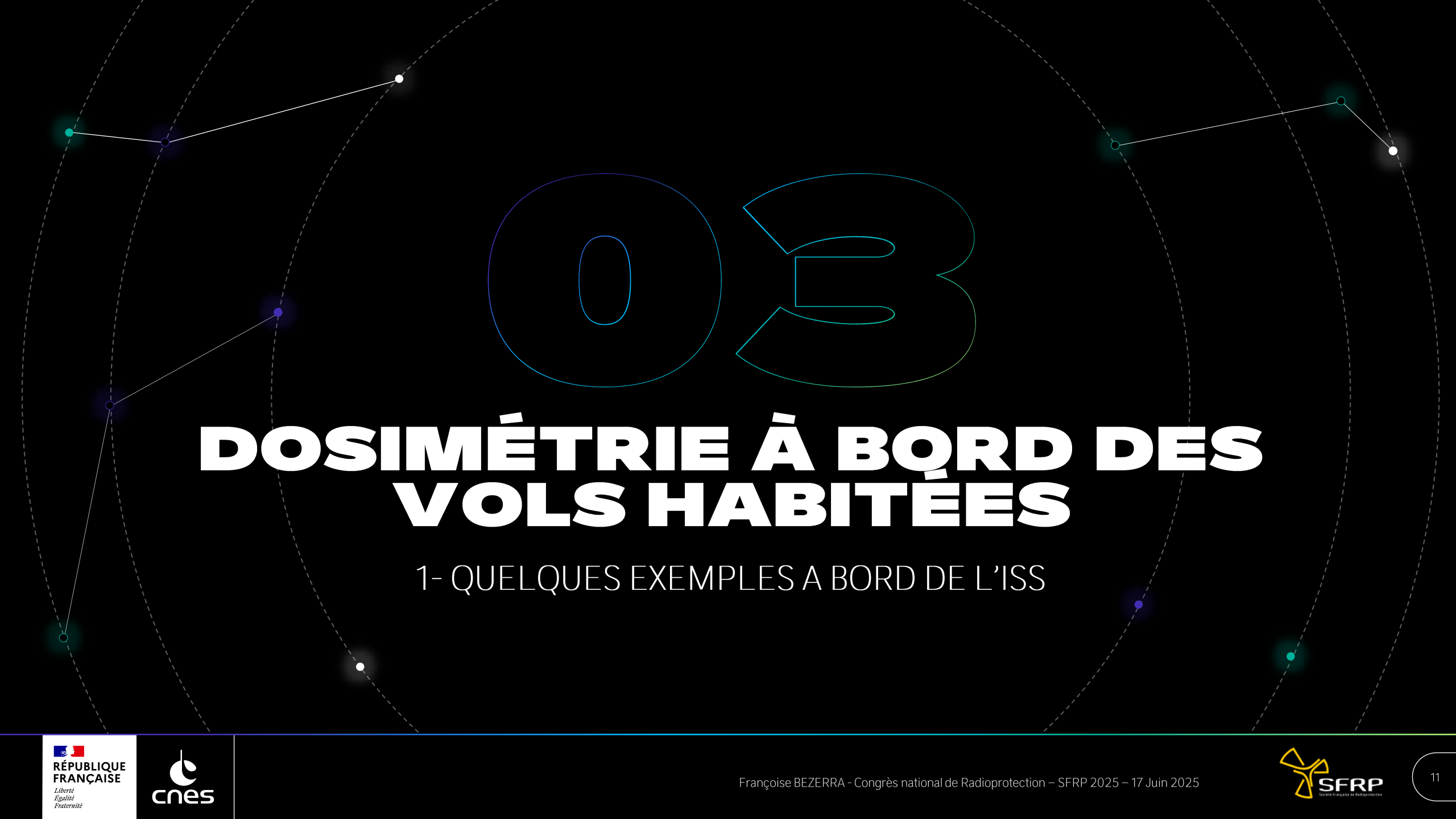
Données transmises jusqu'au 16 Mars 1958 via 17 stations sol



Découverte des ceintures de Van Allen



Crédit photo: NASA/ Marshall Space Flight Center Collection



03

DOSIMÉTRIE À BORD DES VOLS HABITÉES

1- QUELQUES EXEMPLES A BORD DE L'ISS

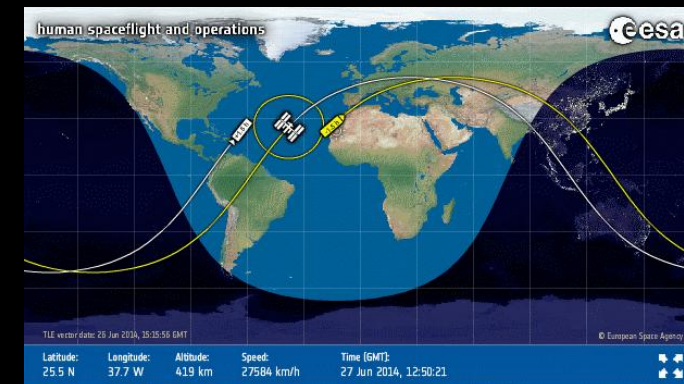
L'ISS : INTERNATIONAL SPACE STATION

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS



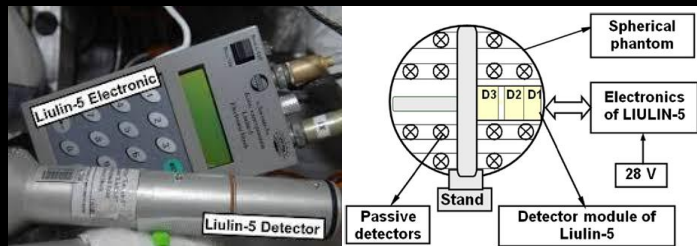
Le plus gros satellite artificiel

- 100 m
- 400 tonnes
- 120 000 W

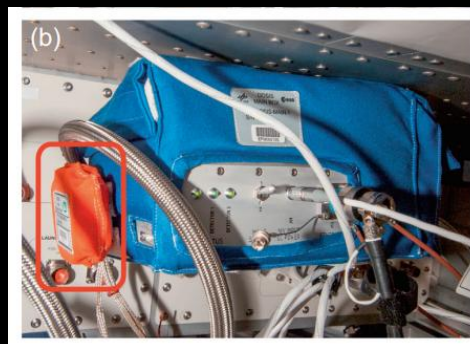


UN LABORATOIRE DE DOSIMÉTRIE INTERNATIONAL

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS



Russie: DB-8 & LIULIN-5



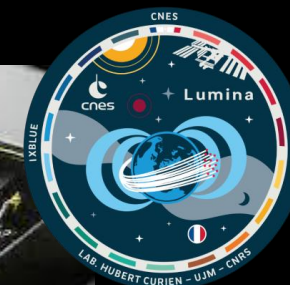
ESA: DOSIS & EAD



USA: DOSMAP, ALTEA & NASA-TEPS (NASA Tissue Equivalent Proportional Counter)



Japon: PADLES & SOFPADS



France: LUMINA

DE NOMBREUX RÉSULTATS

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS

Débit de dose journalier dans l'ISS selon les instruments: ~15-30 mrad/j soit 150 à 300µGy/j

55 à 110mGy/an

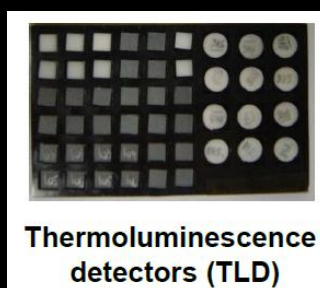
Exp	ISS Location	Date	Dosimetry Type	Measurement	Dose Rate (µGy/h)	Dose Rate (mrad/h)	Dose Rate (mrad/d)
DOSMAP	US Lab	2001	TLDs	Mean	6.0	0.6	14.4
DOSMAP	US Lab	2001	DOSTEL	Minimum at the Equator	1.0	0.1	2.4
DOSMAP	US Lab	2001	DOSTEL	Maximum at highest latitudes	8.0	0.8	19.2
DOSMAP	US Lab	2001	DOSTEL	Maximum during SAA Crossing	100.0	10.0	240.0
DOSMAP	US Lab	2001	DOSTEL	Mean	8.1	0.8	19.4
DOSMAP	US Lab	2001	DOSTEL	Mean ("GCR")	3.3	0.3	7.9
DOSMAP	US Lab	2001	DOSTEL	Mean ("SAA")	4.8	0.5	11.5
LIULIN-5	MIM1 module	2011-2013	Silicon Detectors	Mean	9.2	0.9	22.0
LIULIN-5	MIM1 module	2011-2013	Silicon Detectors	Mean ("GCR")	5.8	0.6	14.0
LIULIN-5	MIM1 module	2011-2013	Silicon Detectors	Mean ("SAA")	3.3	0.3	8.0
ALTEA	US Lab / Columbus	2010-2012	Silicon Detectors	Mean	1.6	0.2	3.9
DOSIS	Columbus	2009/2011	DOSTEL	Mean	10.0	1.0	24.0
DOSIS	Columbus	2009/2011	DOSTEL	Mean ("SAA")	3.3	0.3	8.0
DOSIS	Columbus	2009/2011	DOSTEL	Mean ("GCR")	6.3	0.6	15.0
DOSIS 3D	Columbus	2012-xx	DOSTEL	Mean	11.7	1.2	28.0
DOSIS 3D	Columbus	2012-xx	DOSTEL	Mean ("SAA")	5.0	0.5	12.0
DOSIS 3D	Columbus	2012-xx	DOSTEL	Mean ("GCR")	5.8	0.6	14.0

DOSIS: DOSIMÈTRE EUROPÉEN DANS L'ISS

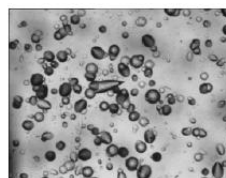
DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS

Développé par le DLR pour l'ESA

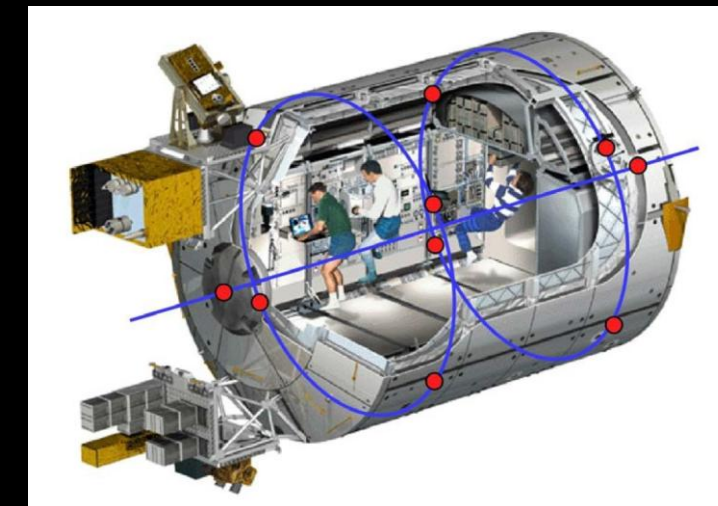
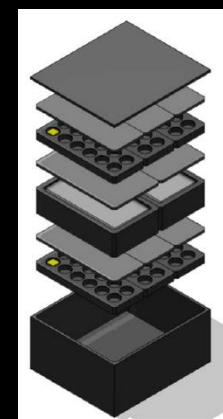
- DOSIS (Dose Distribution within the ISS) 2009-2011
- DOSIS-3D (depuis 2012)
- 11 Dosimètres à lecture différée (PDP – Passive Detector Package)
 - Répartis dans module COLUMBUS depuis mai 2012
 - Remplacés tous les 6 mois



Thermoluminescence
detectors (TLD)



Nuclear Track Etch
Detectors (CR-39)



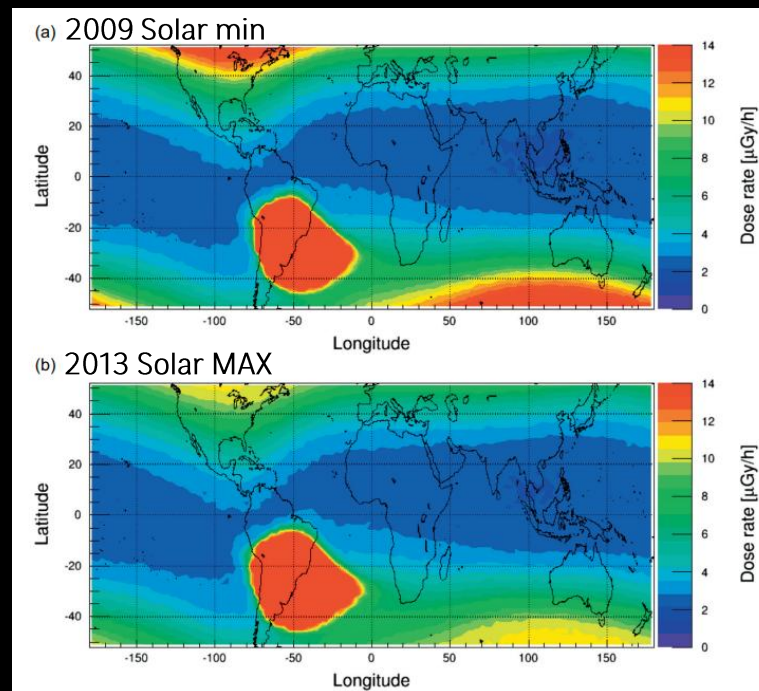
- 2 Dosimètres opérationnels DOSTEL (DOSimetry TElescope)
 - Mesure des fluctuations dans le temps
 - Détecteurs PIPS de Camberra (315µm) montés en coïncidence
 - Données téléchargées tous les mois au CNES/CADMOS à Toulouse



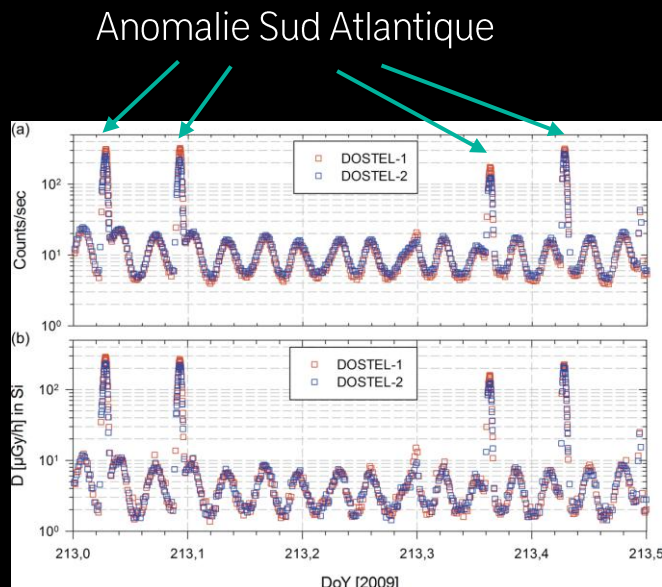
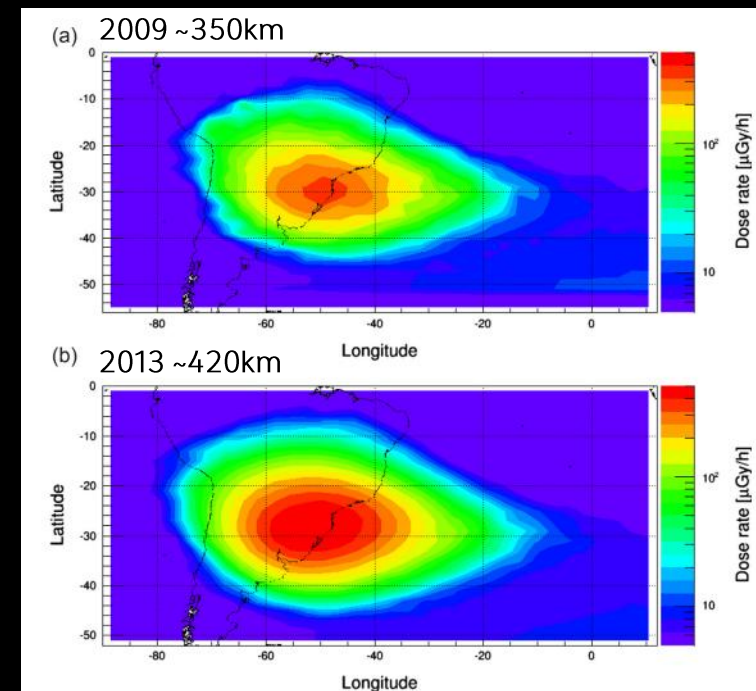
RELEVES DOSIMETRIQUES DOSIS

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS

Impact de l'activité solaire



Impact de l'altitude



Moyenne: 286 $\mu\text{Gy/j}$ (65% GCR + 35% SAA)



647 $\mu\text{Sv/j}$ (492 $\mu\text{Sv/j}$ GCR + 154 $\mu\text{Sv/j}$ SAA)

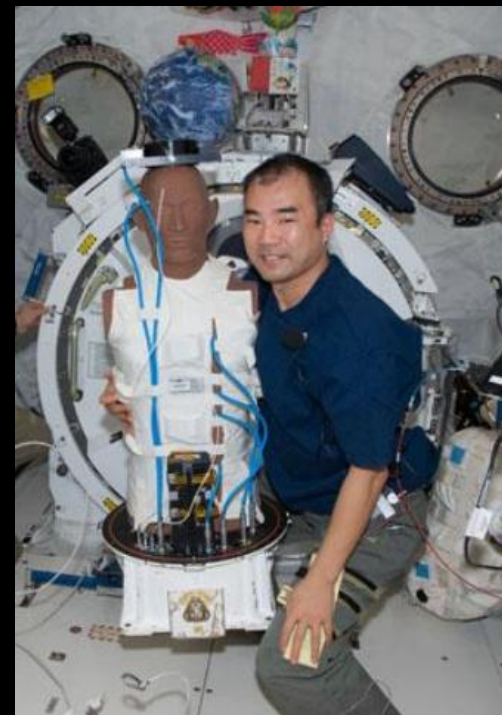
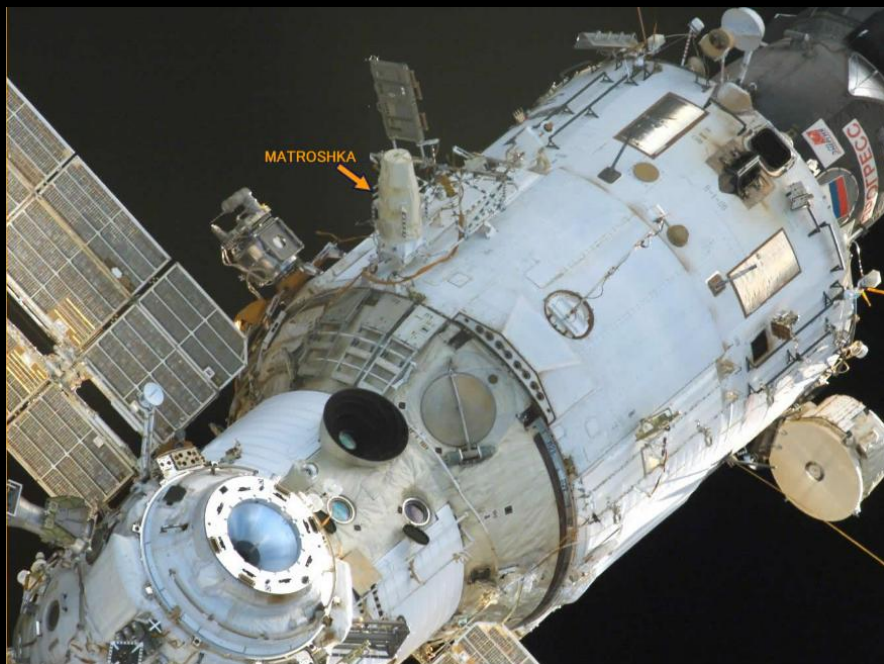
240mSv/an

"DOSIS & DOSIS 3D: radiation measurements with the DOSTEL instruments onboard the Columbus Laboratory of the ISS in the years 2009–2016" T. BERGER et al

LE PROJET MATROSHKA SUR L'ISS

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS

- Fantôme développé par le DLR
- Collaboration ESA/JAXA/ROSCOSMOS
- Mesures à l'extérieur du module SVEZDA pendant 1 an (2004)

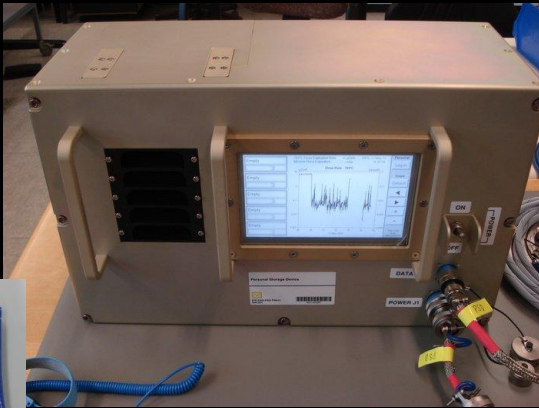


- Mesures à l'intérieur du module Kibo pendant 11 mois (2010)
- Dosimètres de 18 organisations dont 25 PADLES de la JAXA

EAD: DOSIMÈTRE OPÉRATIONNEL DE L'ESA SUR L'ISS

DOSIMÉTRIE A BORD DE L'ISS

European Crew Personal Active Dosimeter
Développé par ASRO (Finlande) pour l'ESA



2 mSv/h
dans la SAA

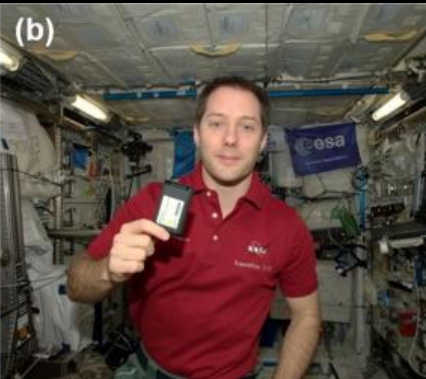
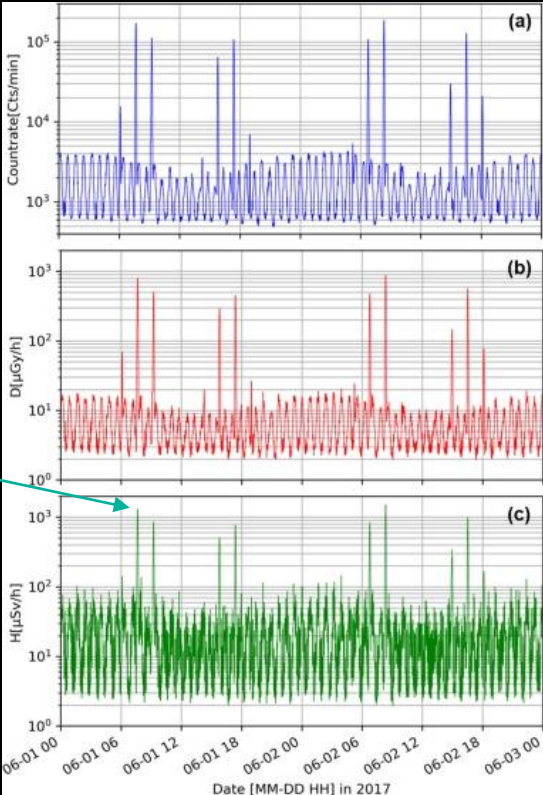


Table 8. The average daily-absorbed dose (D) and dose equivalent (H) values as well as the average quality factor (Q) for the SAA and the GCR contributions together with the totals. Average uncertainty for the TEPC data at around 2%.

	D [$\mu\text{Gy/day}$]	H [$\mu\text{Sv/day}$]	Q_{AVERAGE}
SAA	168 ± 14	300 ± 25	1.78 ± 0.03
GCR	146 ± 2	457 ± 9	3.14 ± 0.04
Total	314 ± 14	758 ± 24	2.41 ± 0.04

280 mSv/an

The ESA Active Dosimeter (EAD) system onboard the International Space Station (ISS) U. Straube et al.

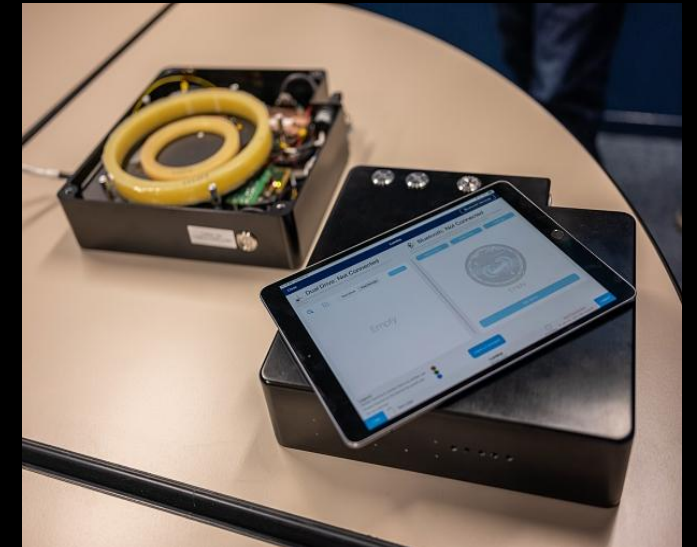
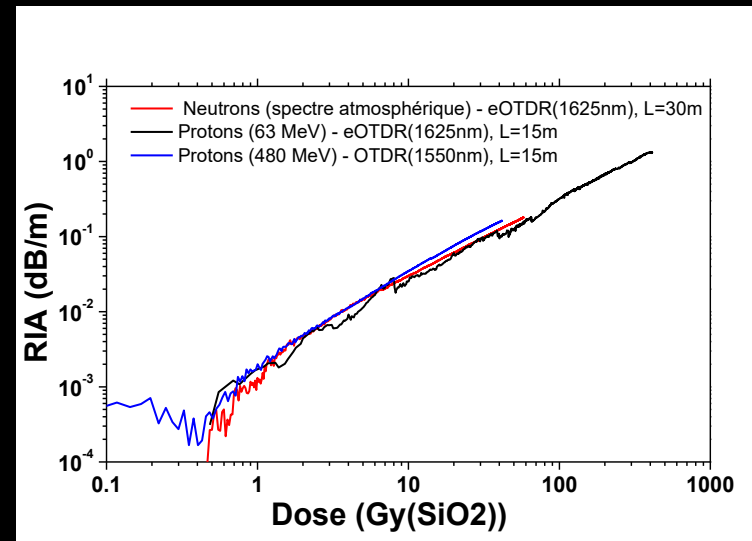
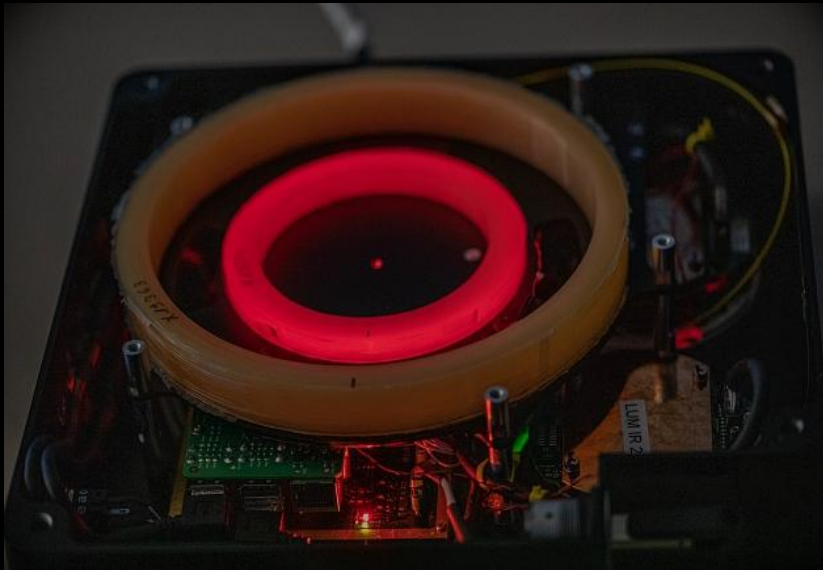
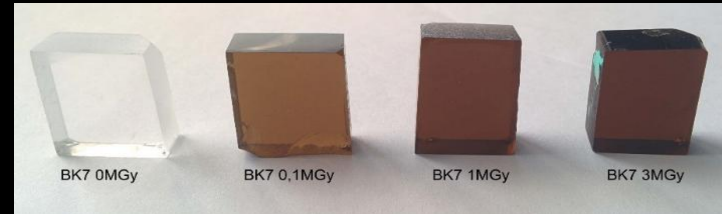
LUMINA: DOSIMÈTRE FRANÇAIS DANS L'ISS

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS

Développé sur R&T CNES depuis 2018

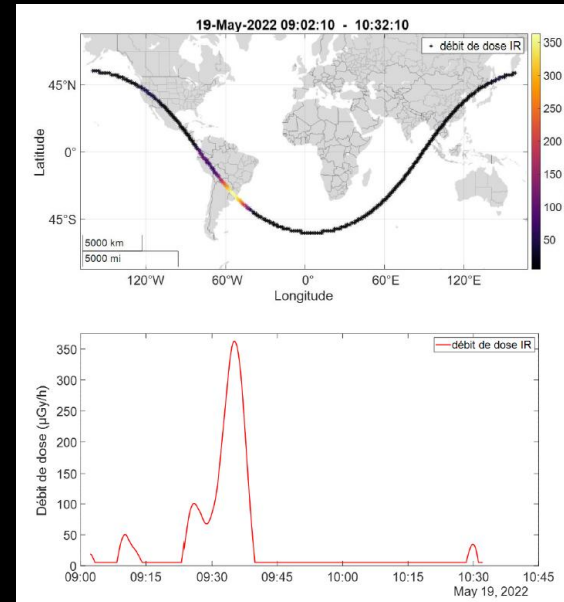
Collaboration CNES/iXBlue/Laboratoire Hubert Curien/CERN

Principe: mesure de la RIA (Radiation Induced Attenuation)



LUMINA: DOSIMÈTRE FRANÇAIS DANS L'ISS

Installé sur ISS en Août 2021



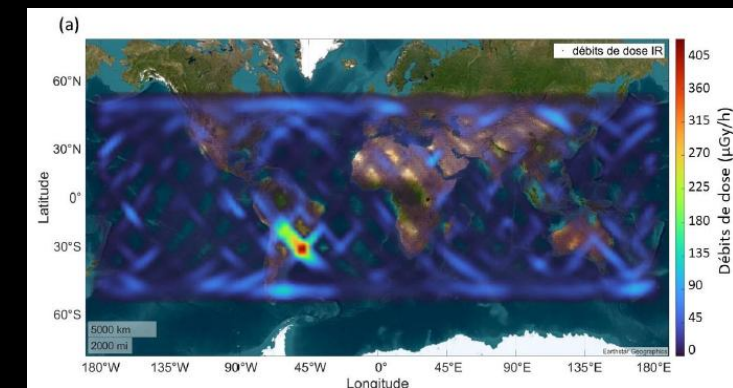
DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS



Excellents résultats en détection des changements de débit même très faibles.

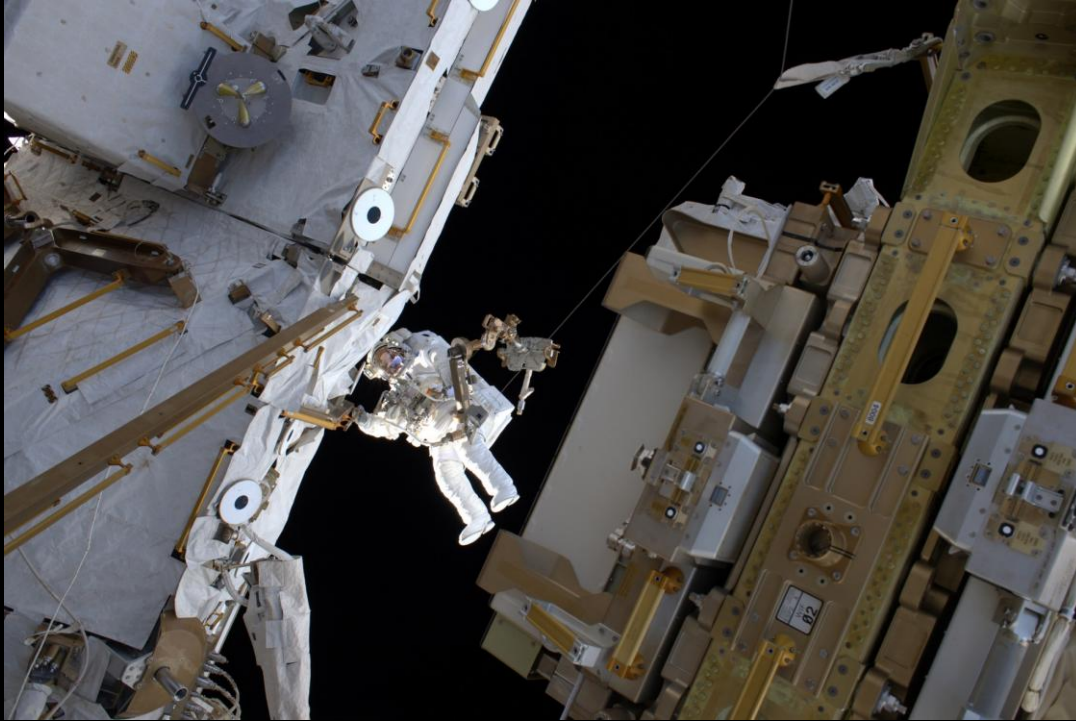
=> **Détection des sursauts précurseurs avant les éruptions solaires SEP.**

Pas adapté au cumul de dose.



ISS: SORTIES EXTRA VÉHICULAIRES

DOSIMÉTRIE A
BORD DE L'ISS



Durée: quelques heures (Record actuel 9h détenu par un chinois)
1 à 2 EVA par astronaute et par mission



Intérêt de la dosimétrie opérationnelle.
Pas d'EVA si éruption solaire

RETOUR D'EXPÉRIENCE

L'ESPACE MILIEU
HOSTILE



Claude Nicollier (Suisse, ESA)

>1000h dans l'espace en 4 missions avec la navette américaine
EVA de plus de 8h en 1999 pour maintenance du télescope Hubble

« Je voyais les ions lourds »



Thomas Pesquet (France, ESA)

2 x 6 mois dans l'espace

5 EVA Pour une total de 35h hors de l'ISS

« En cas d'éruption solaire on se replie dans nos chambres »





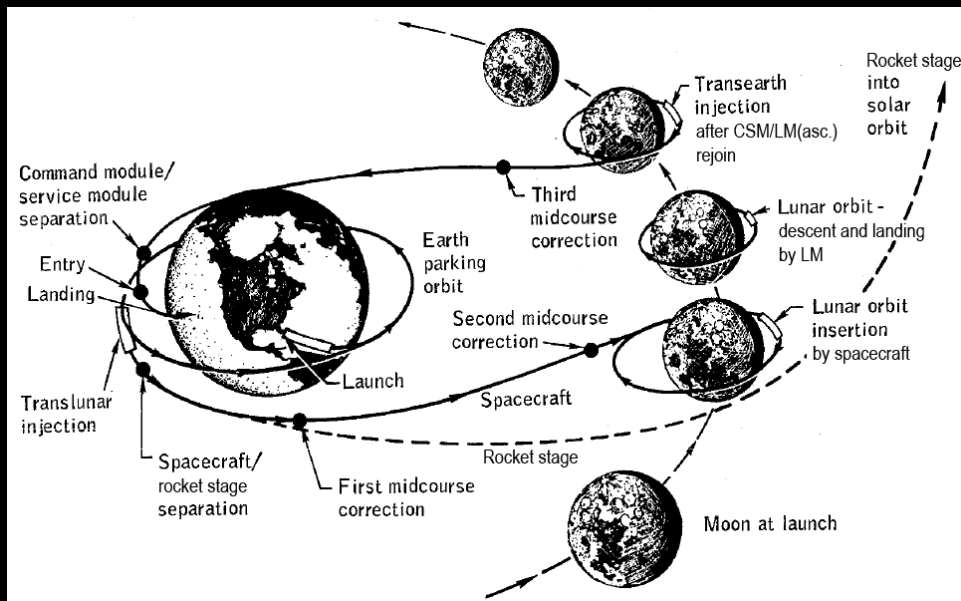
04

DOSIMÉTRIE À BORD DES VOLS HABITÉES

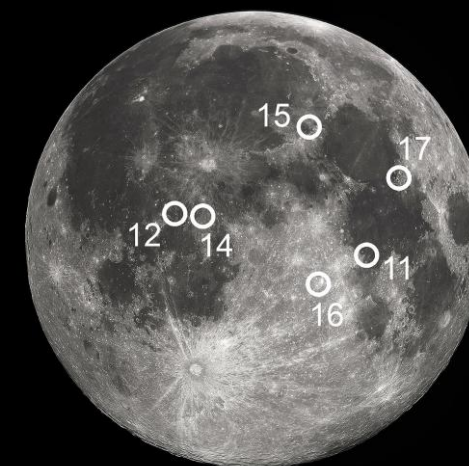
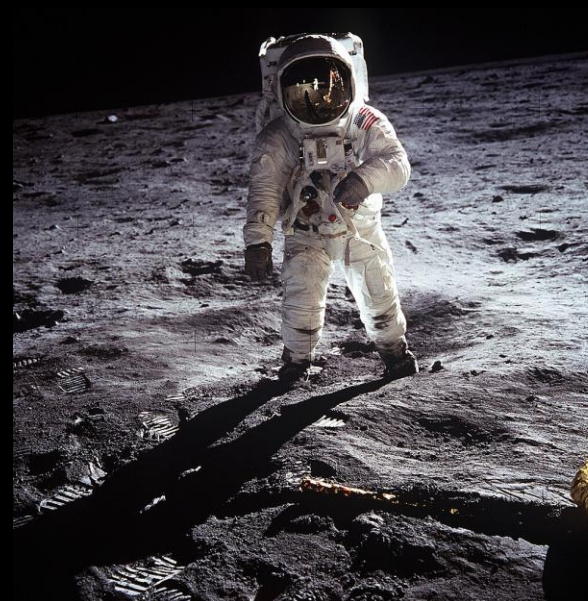
2- CAS DES MISSIONS LUNAIRES

LES MISSIONS APOLLO

LES MISSIONS LUNAIRES



Terre-Lune: 384 402km



Durée de transfert Aller 3 jours + 1 jour en orbite lunaire

Durée max sur la Lune: 67h

Durée max en EVA: 18h 36min

Durée trajet retour: 1 orbite lunaire + 2 jours

Durée max mission: < 13j

LA MISSION ARTEMIS: RETOUR DE L'HOMME SUR LA LUNE AVANT MARS

LES MISSIONS LUNAIRES



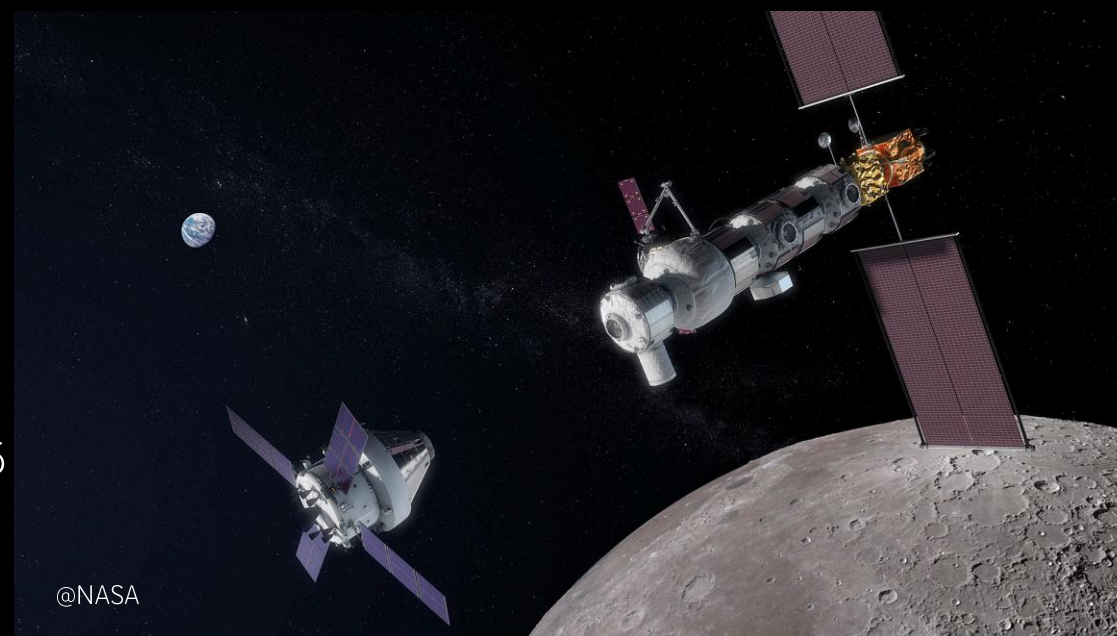
NASA + ESA

Lunar Gateway / Capsule Orion

Artémis I (Vol Orion Inhabité) en 2022

Artemis II équipage en orbite lunaire prévu 2024 reporté en 2026

Artémis III alunissage prévu 2025 reporté en 2027



MESURES DE DOSE SUR LA LUNE

LES MISSIONS LUNAIRES



Apollo

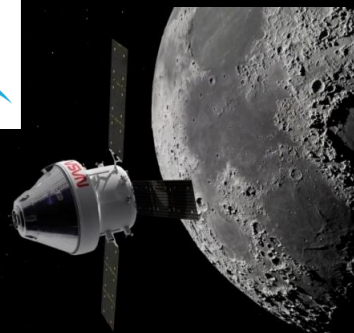
Cumul dose sur place et dose pendant les trajets.

Dose efficace sur la Lune estimée à **110-380 mSv/an**



Artemis 1 / EAD

ASRO, alongside DLR, developed and delivered five EADs for the Artemis 1 mission. These EADs were positioned inside the Orion crew capsule, where they successfully measured the radiation environment during the 25.5-day lunar flight.



© NASA/ESA/ATG Medialab

Artémis

EAD dans la capsule Orion (2022)

2 mannequins dont 1 avec « gilet anti radiations »

Dose **<150mSv** => OK pour Artémis II et III

Blindage, orientation du vaisseau validés.



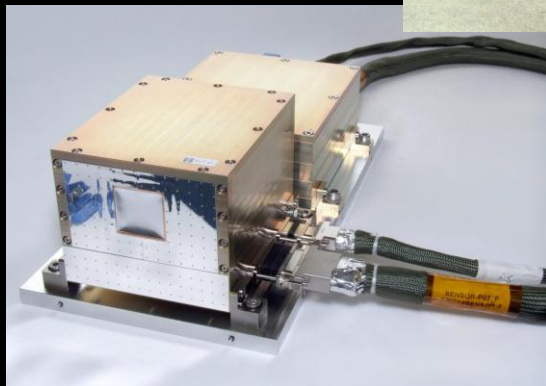
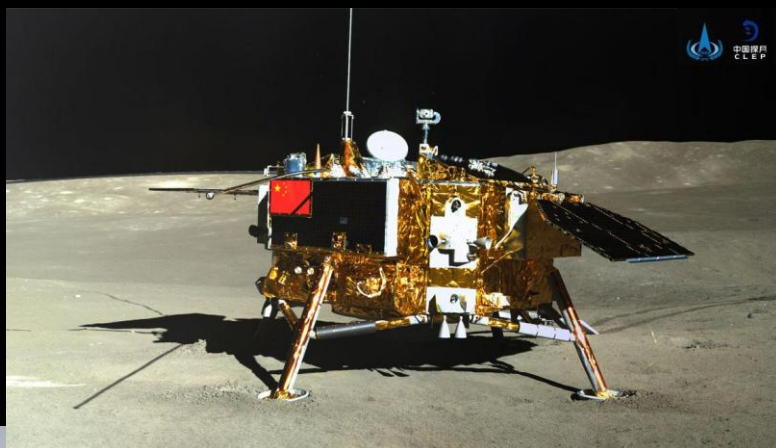
© ESA

MESURES DE DOSE SUR LA LUNE

LES MISSIONS LUNAIRES

Chang'e 4 (Chine) en Janvier 2019

LND Lunar Lander Neutron and Dosimetry (Univ. de Kiel, Allemagne)



Dose efficace
revue à la hausse:

500mSv/an

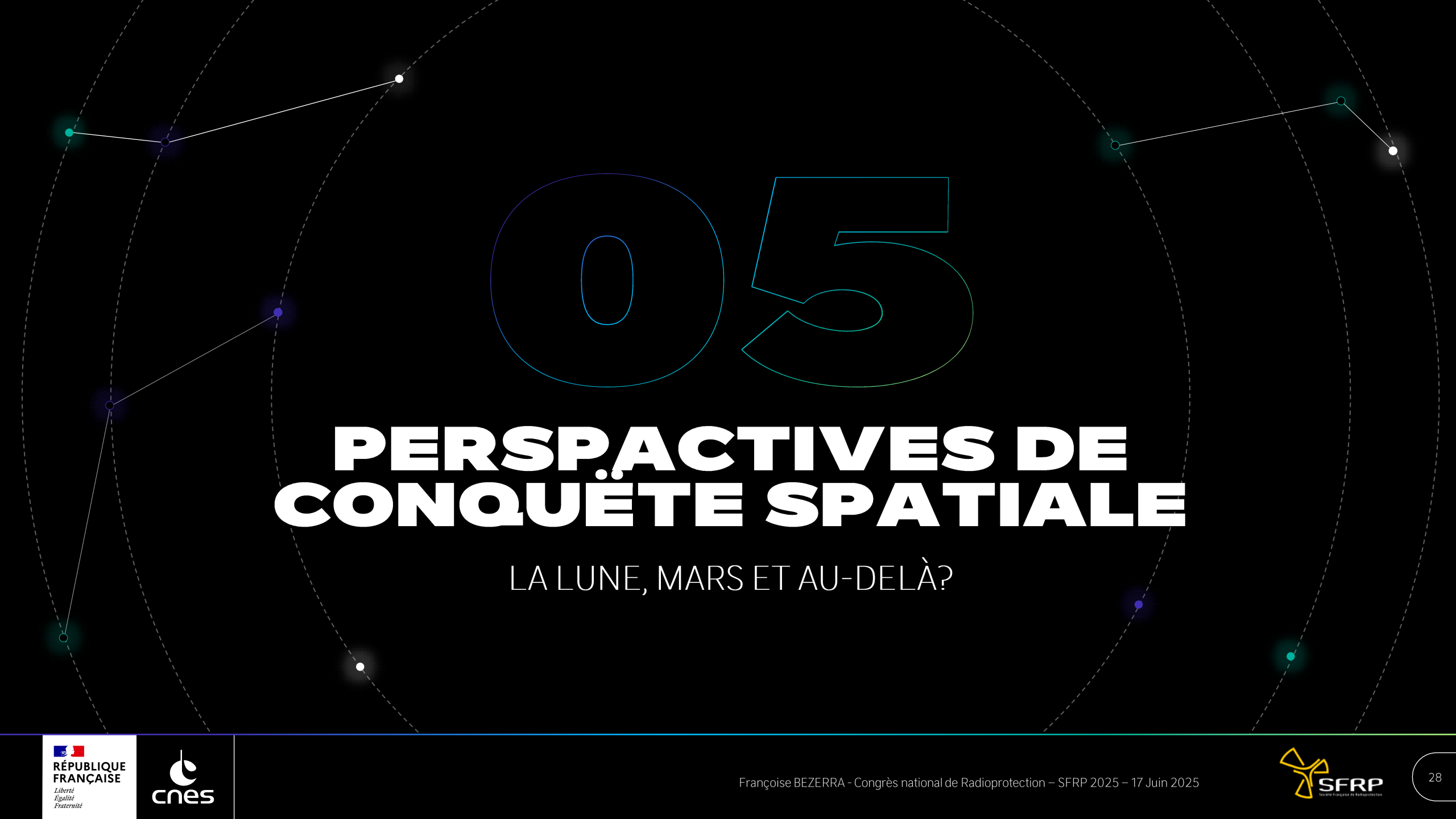
Shenyi Zhang et al., "First measurements of the radiation dose on the lunar surface"

Chang'e 6 (Chine) en Décembre 2023

DORN Mesure de radon à la surface lunaire
(Instrument français (IRAP/CNES))



© CNES/MALIGNE Frédéric, 2023



05

PERSPECTIVES DE CONQUÊTE SPATIALE

LA LUNE, MARS ET AU-DELÀ?

S'INSTALLER SUR LA LUNE POUR PRÉPARER LE VOYAGE VERS MARS

PERSPECTIVES DE
CONQUÊTE SPATIALE

Projet **Moon Village** de l'ESA: ambition réaffirmée au Salon du Bourget



esa Goal 2 – Explore & Discover

- Elevate Europe's global leadership in **Earth and space science** to unravel the mysteries of our planet and the Universe.
- Expand Europe's unique capabilities and roles in the **new space exploration era** in Low Earth Orbit (LEO), around and on the **Moon**, and towards **Mars**.

ELEVATING THE FUTURE OF EUROPE

esa **esa** **esa**



Divers travaux sur l'habitat martien pour réduire l'exposition.

MESURE DE DOSE SUR MARS

PERSPECTIVES DE
CONQUÊTE SPATIALE

Terre-Mars: 273,68 millions de km

RAD sur Curiosity:

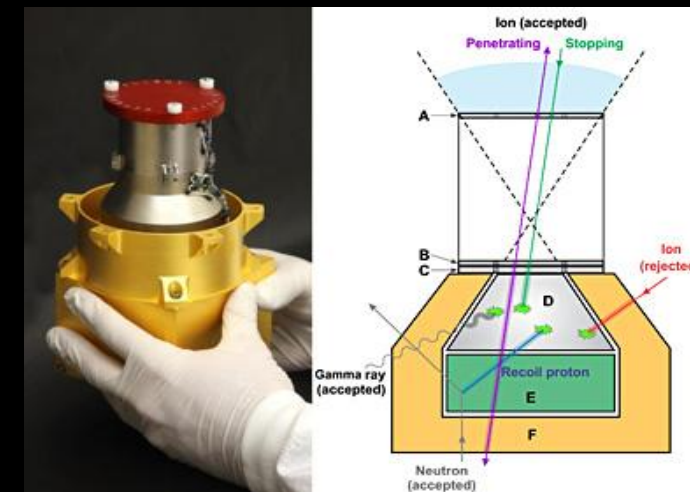
1800 μSv /jour durant le trajet Terre-Mars

En 2012 (Max solaire) = 0,64 mSv/j, dus au GCR + SEP

En 2020 (min Solaire) = 0,72 mSv/j

500 mSv/trajet de 9 mois

232 à 262 mSv/an

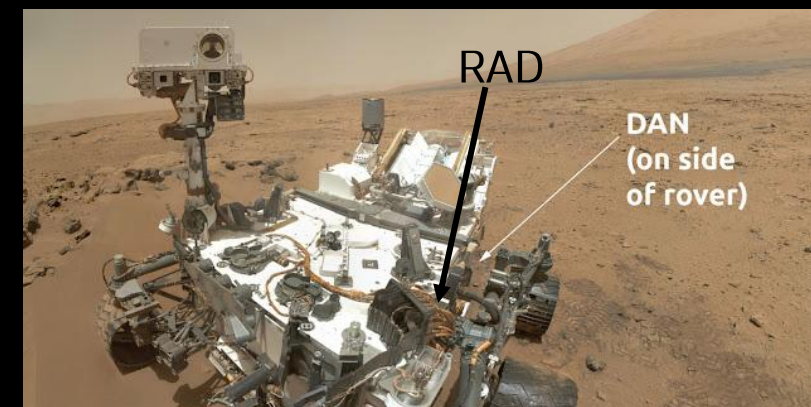
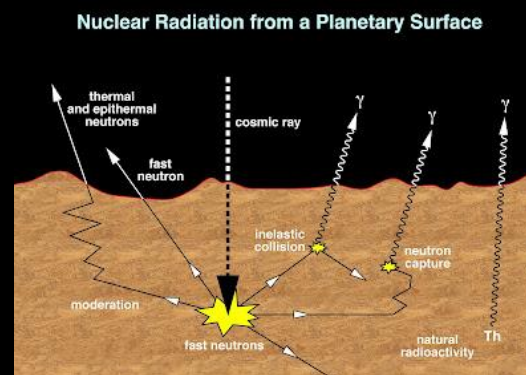


DAN sur Curiosity + HEND sur Mars Odyssey en orbite : +15mSv/an dus aux neutrons

DAN (*Dynamic Albedo of Neutrons*)

HEND (*High Energy Neutron Detector*)

Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey
and DAN/MSL observations Maxim Litvak et al.



EN RÉSUMÉ

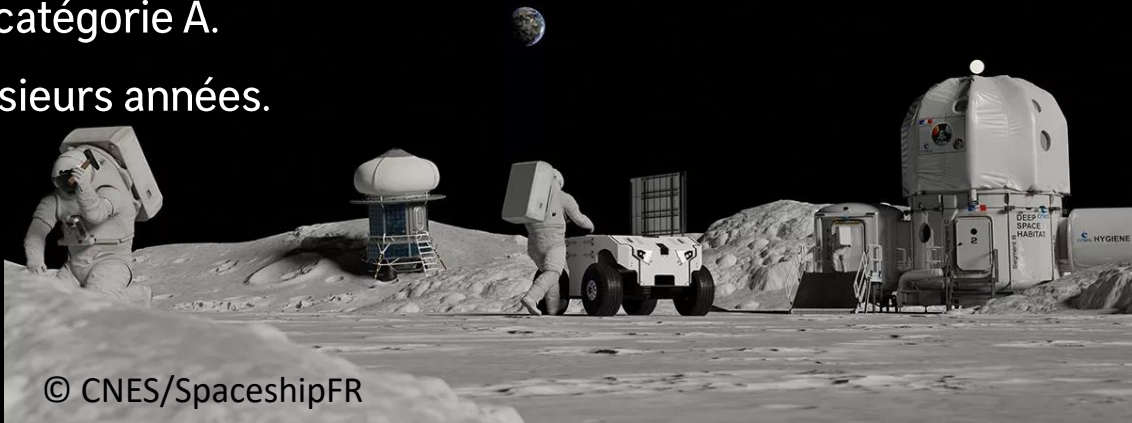
Dose efficace selon les missions:

Mission	Tranfert (mSv)	Dose efficace (mSv/an)
ISS	-	280
Lune	<150	500
Mars	500	250-280

Largement au-delà des niveaux tolérés pour les travailleurs classés catégorie A.
De l'ordre des doses létales pour des missions de colonisation de plusieurs années.



Travaux sur l'habitat et l'optimisation des blindages



MODÉLISATION DE L'ENVIRONNEMENT RADIATIF MARTIEN

PERSPECTIVES DE
CONQUÊTE SPATIALE

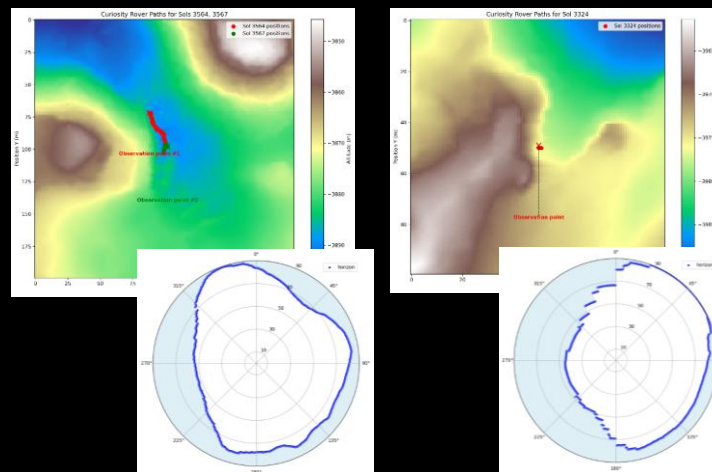
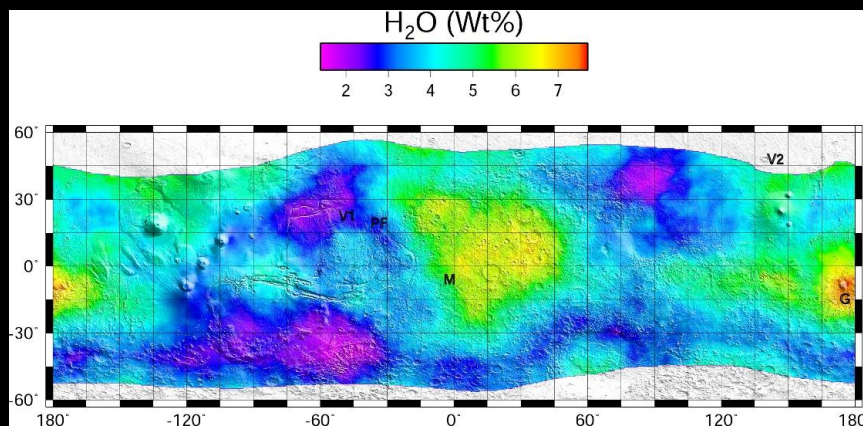
Published – DOI: 10.1051/swsc/2024032

ARAMIS: Atmospheric RAdiation Model for Ionizing spectra on martian Surface Thèse Gabin Charpentier (CNES/TRAD)

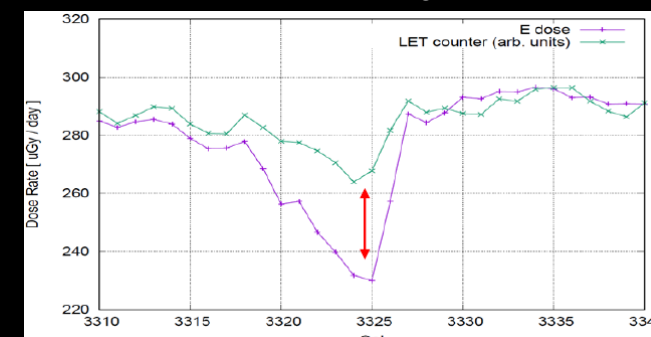
Basé sur mesures de RAD, les cartes de pression atmosphérique et de présence d'eau à la surface de mars

Réalisé grâce au Centre de Calcul du CNES

Simulations Monte-Carlo avec Geant4 (C++) + post traitement en Python



© Bent Ehresmann



Prise en compte de l'ombrage/blindage du relief.

Également en cours: optimisation du blindage pour la construction de l'habitat martien (intérêt pour les faibles Z).

ARAMIS: A martian radiative environment model built from GEANT4 simulations G. Charpentier et al.

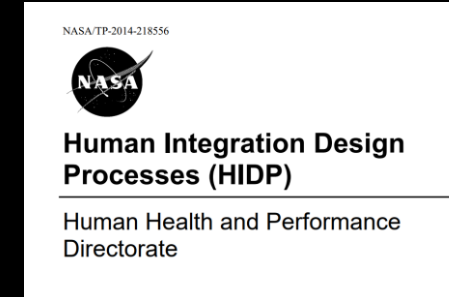
LIMITES DE DOSE TOLÉRÉES

NASA

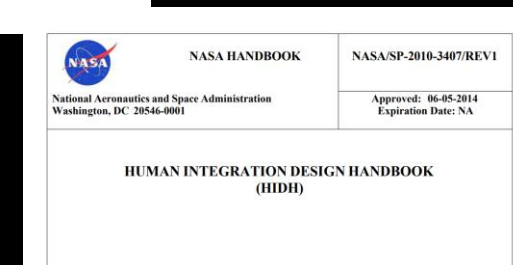
Risque significatif : cancers, effets sur le système nerveux central et maladies dégénératives

Obligation légale de ne pas exposer les astronautes à un risque de mourir d'un cancer supérieur à 3 % de ce qu'il risqueraient sur Terre.

➔ Dose max sur toute la carrière < 3% Dose seuil de cancer fatal.
Minimum 6 dosimètres sur un engin spatial à positionner en fonction de l'analyse radiations



PERSPECTIVES DE
CONQUÊTE SPATIALE



Code du travail en France:

› Article R4451-95

Version en vigueur depuis le 01 juillet 2018

Modifié par Décret n°2018-437 du 4 juin 2018 - art. 1

Il peut être dérogé à la valeur limite de dose efficace et de la dose équivalente pour le cristallin fixées à l'article R. 4451-6 au cours d'un vol spatial sous réserve que l'employeur veille à maintenir ces doses en dessous d'un niveau de référence de 500 millisieverts sur la durée du vol.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Merci également à mes collègues:
Robert ECOFFET, Nourdine KERBOUB et Gabin CHARPENTIER