

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

# La dosimétrie du rayonnement cosmique : *spécificités et enjeux*

Jean-François BOTTOLLIER-DEPOIS

IRSN

Journée SFRP

9-10 mars 2023

MEMBRE DE

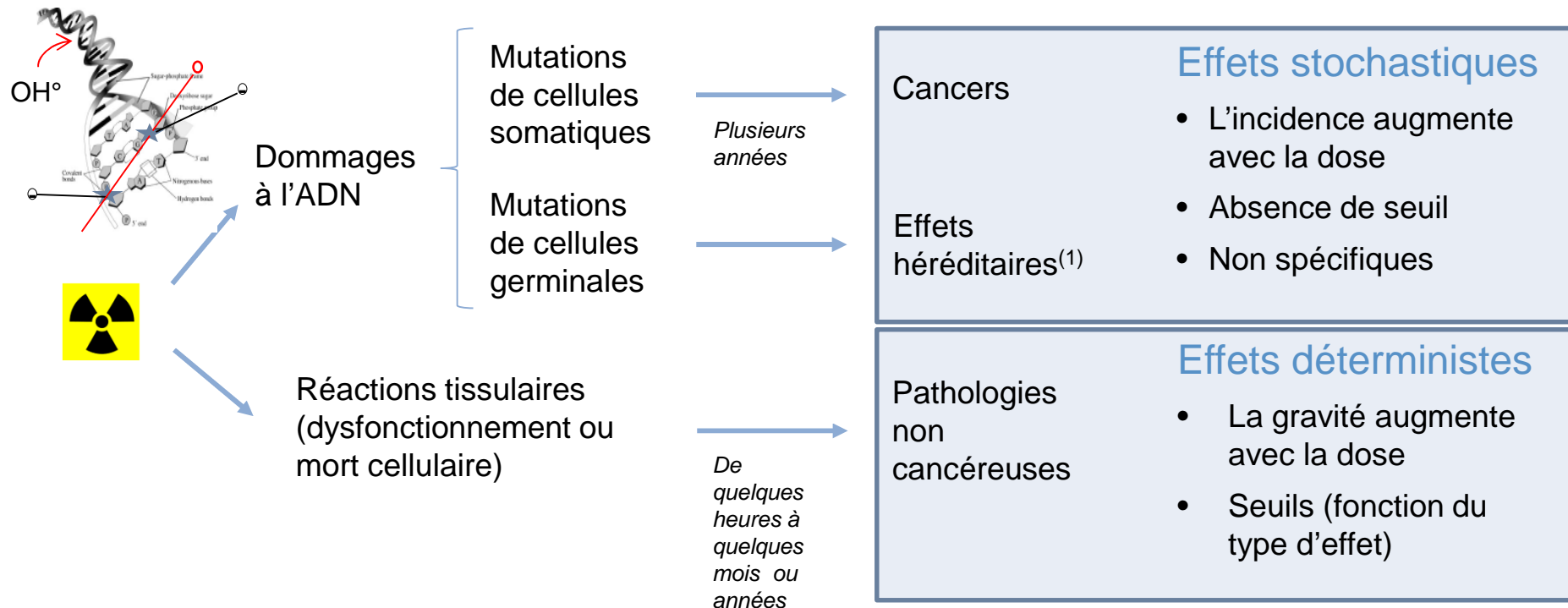
**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK

# Les situations d'exposition

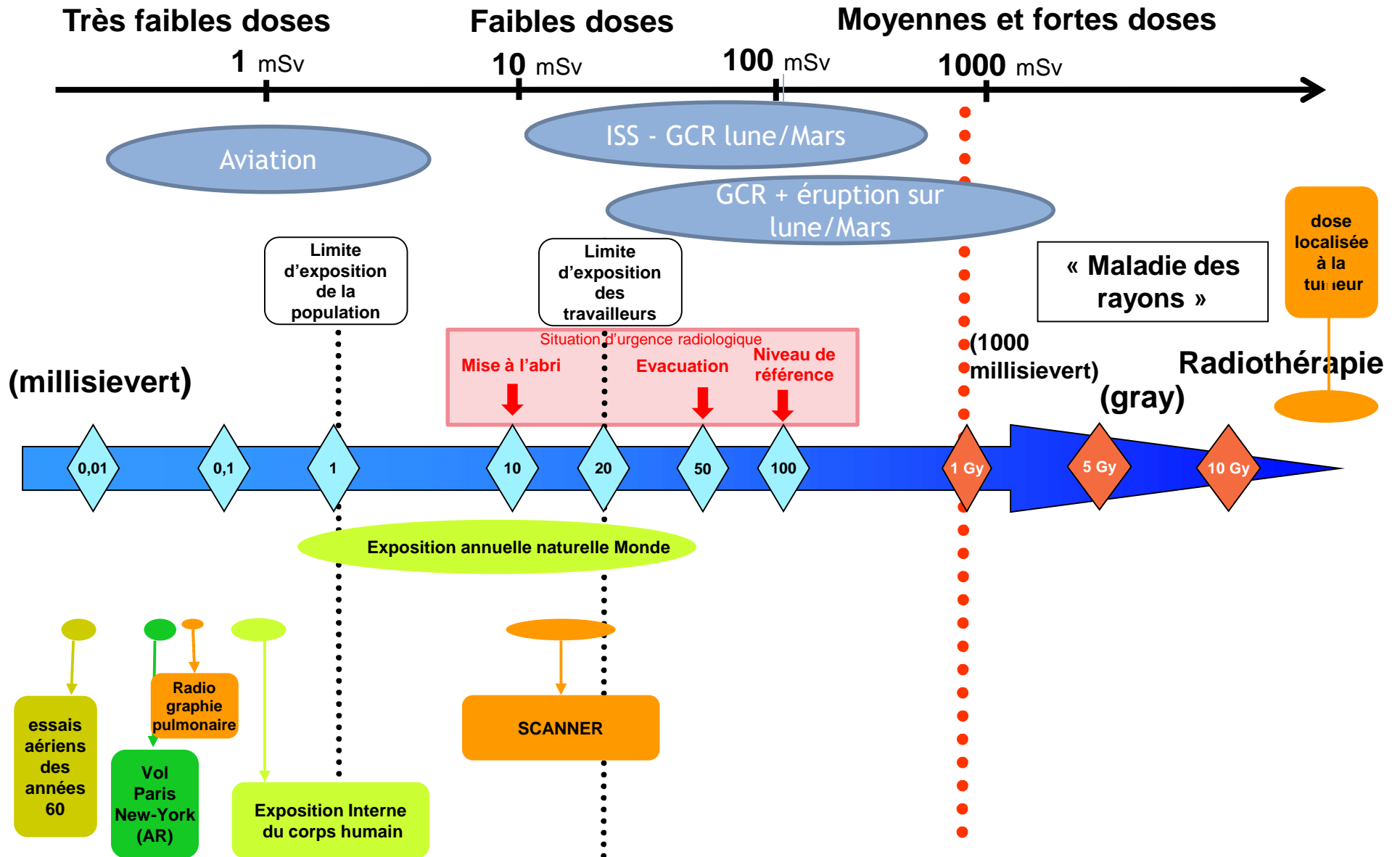


# Effets des rayonnements ionisants

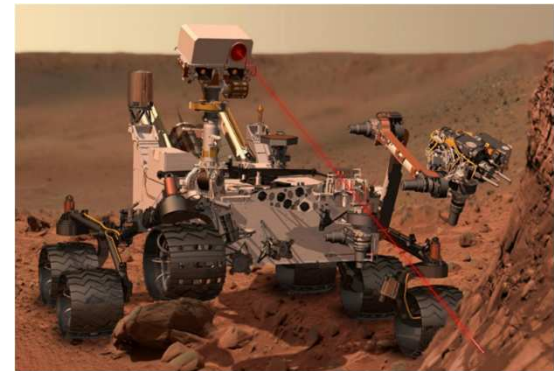


(1) Chez l'homme, les études épidémiologiques n'ont pas démontré d'effets héréditaires après exposition d'un ou des deux parents aux radiations. Cependant, ce risque est pris en compte, sur la base des données obtenues chez l'animal, pour l'évaluation du détriment radiologique défini pour quantifier le risque lié à l'exposition aux RI

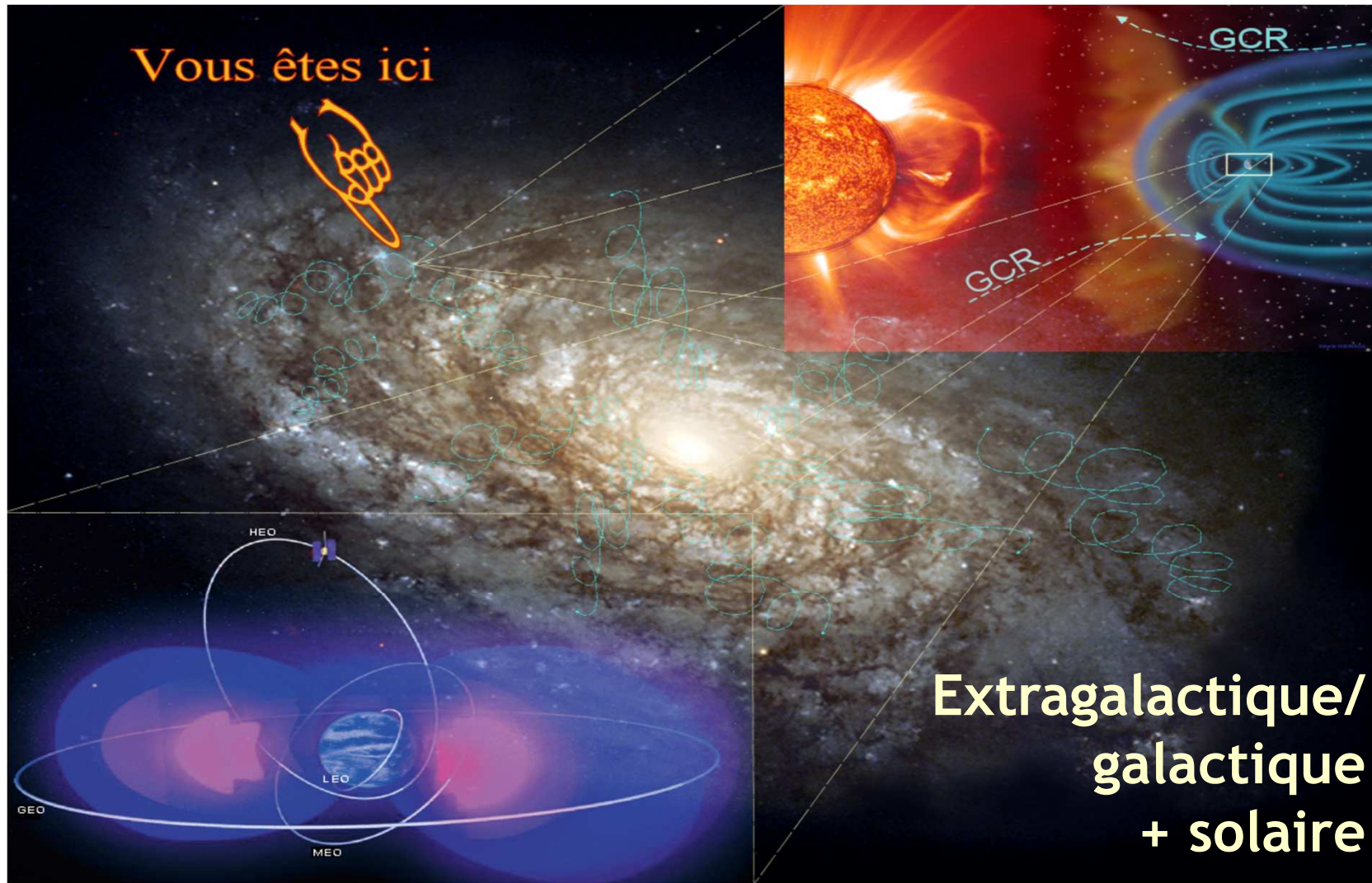
# Situations d'exposition



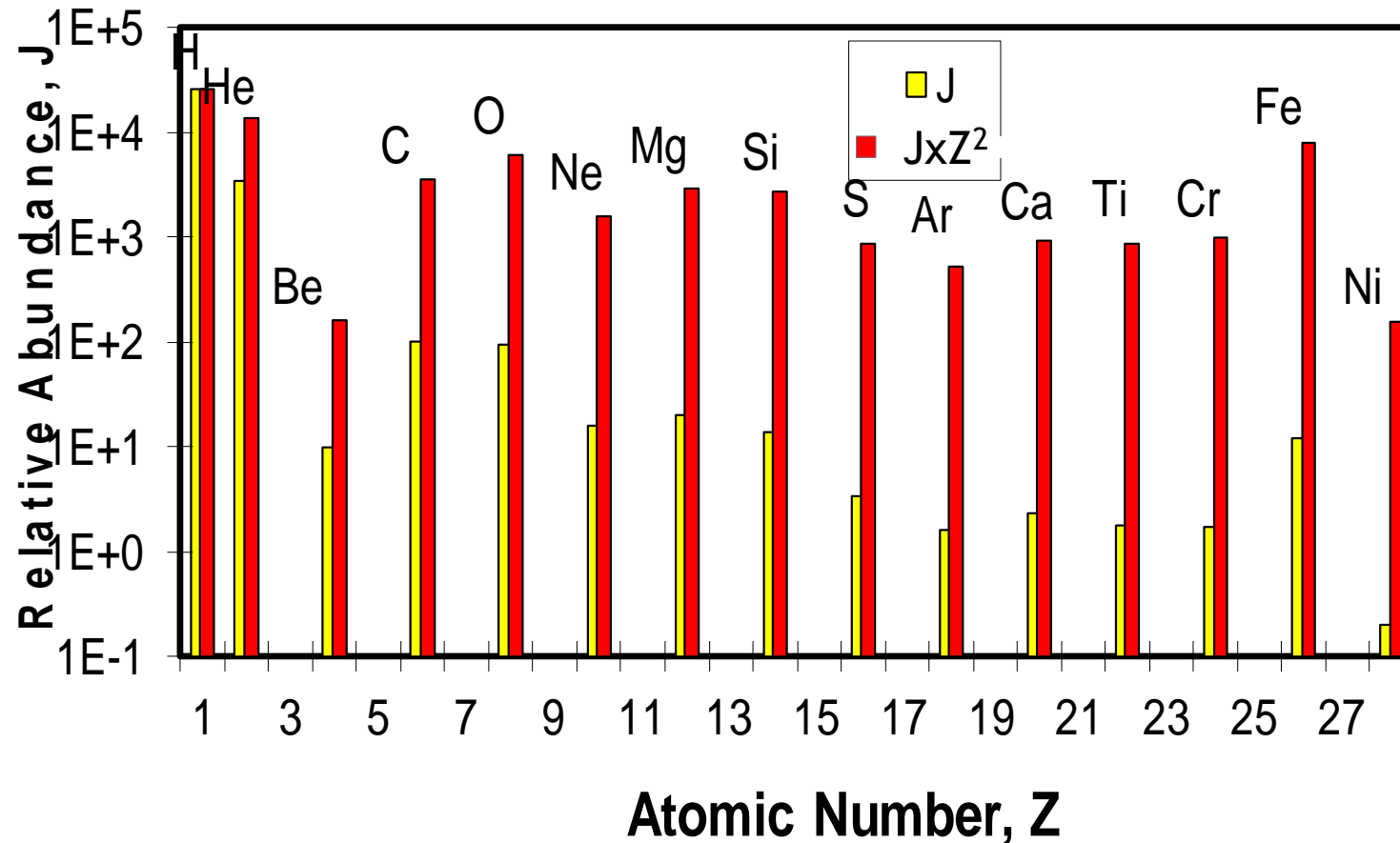
# Le rayonnement cosmique de l'environnement terrestre à Mars



# Origine du rayonnement cosmique



# Composition du rayonnement cosmique galactique

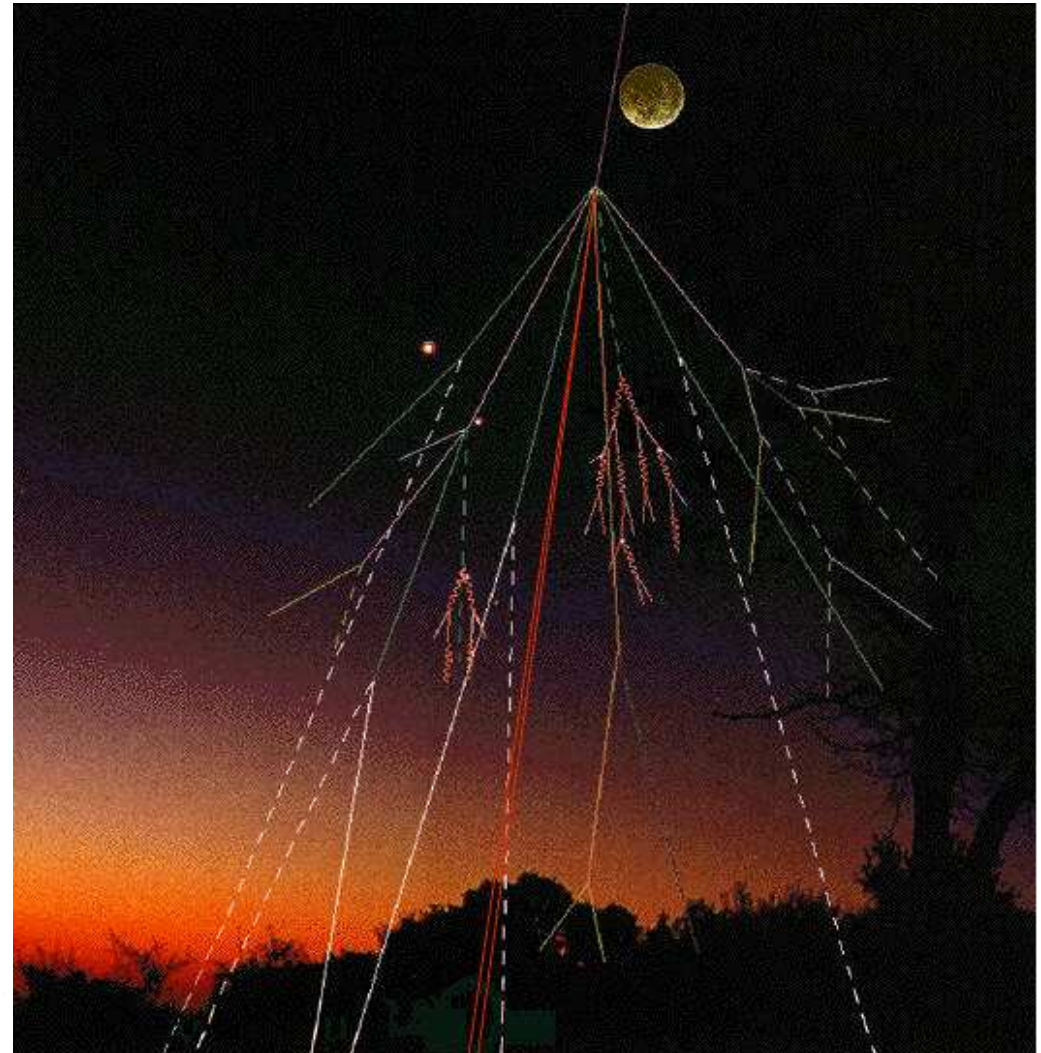
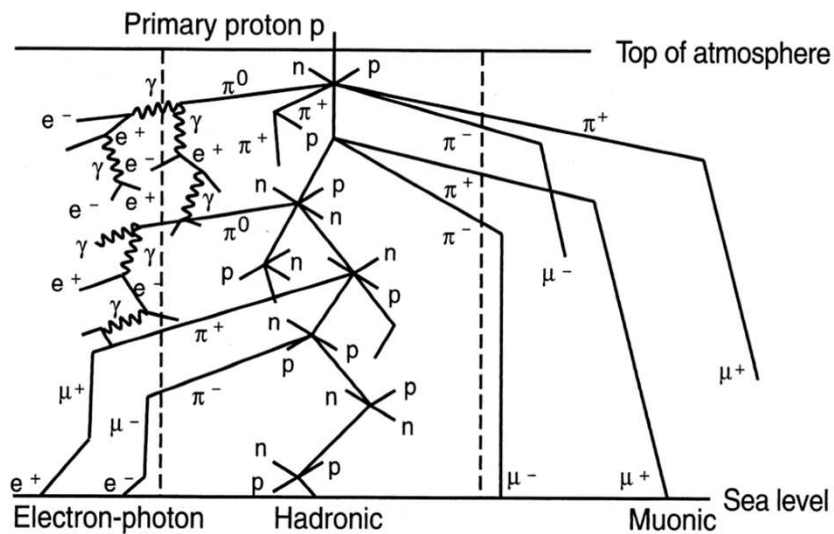


$e^+/e^-$  : 2%, p : 85%, He : 12%, ions lourds : 1%

# Interaction avec l'atmosphère

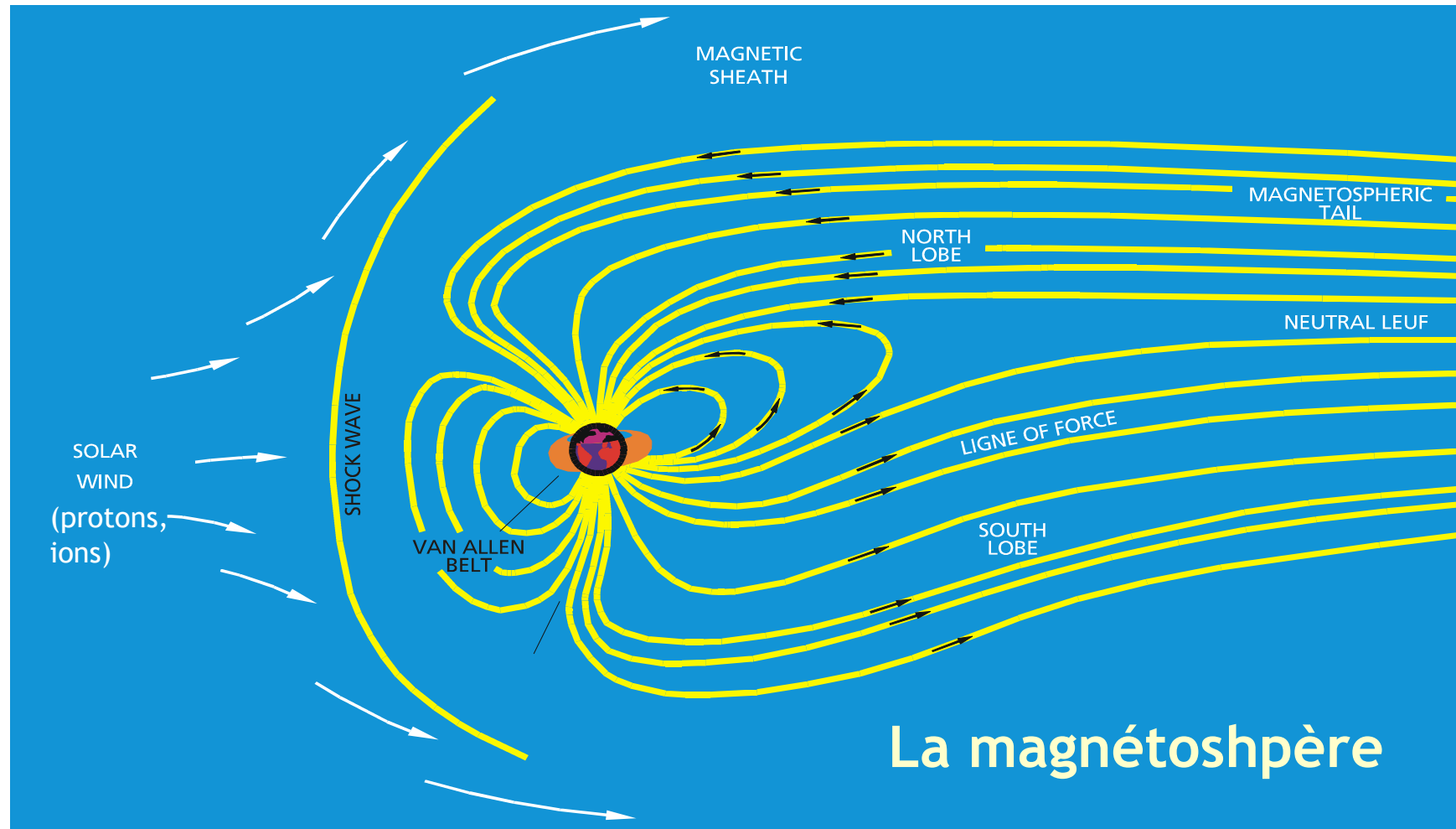
## Composition du RC au sommet de l'atmosphère

- *électrons/positons* : 2 %
- *protons* : 85 %
- *noyau hélium* : 12 %
- *ions plus lourds* : 1 %

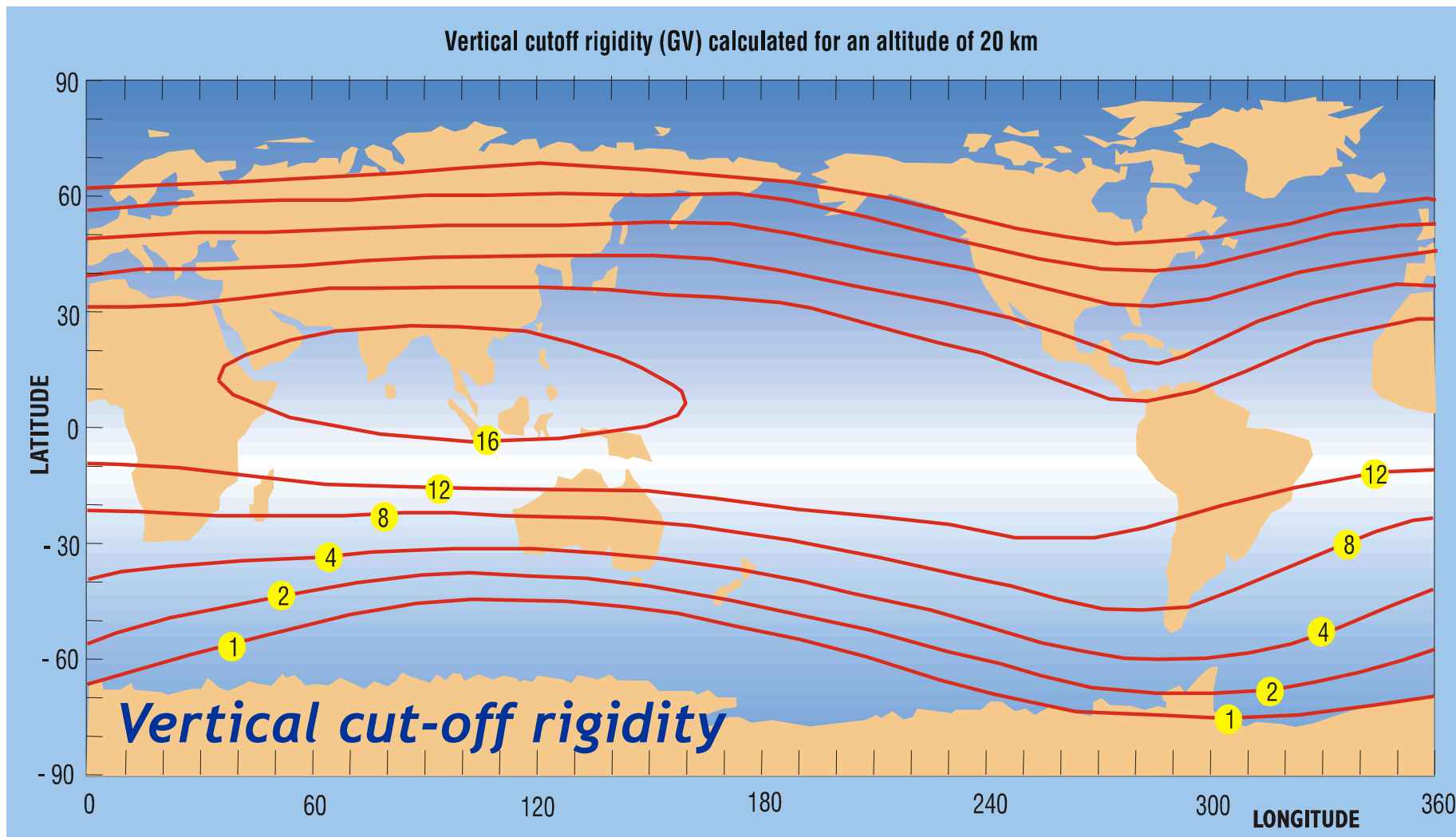




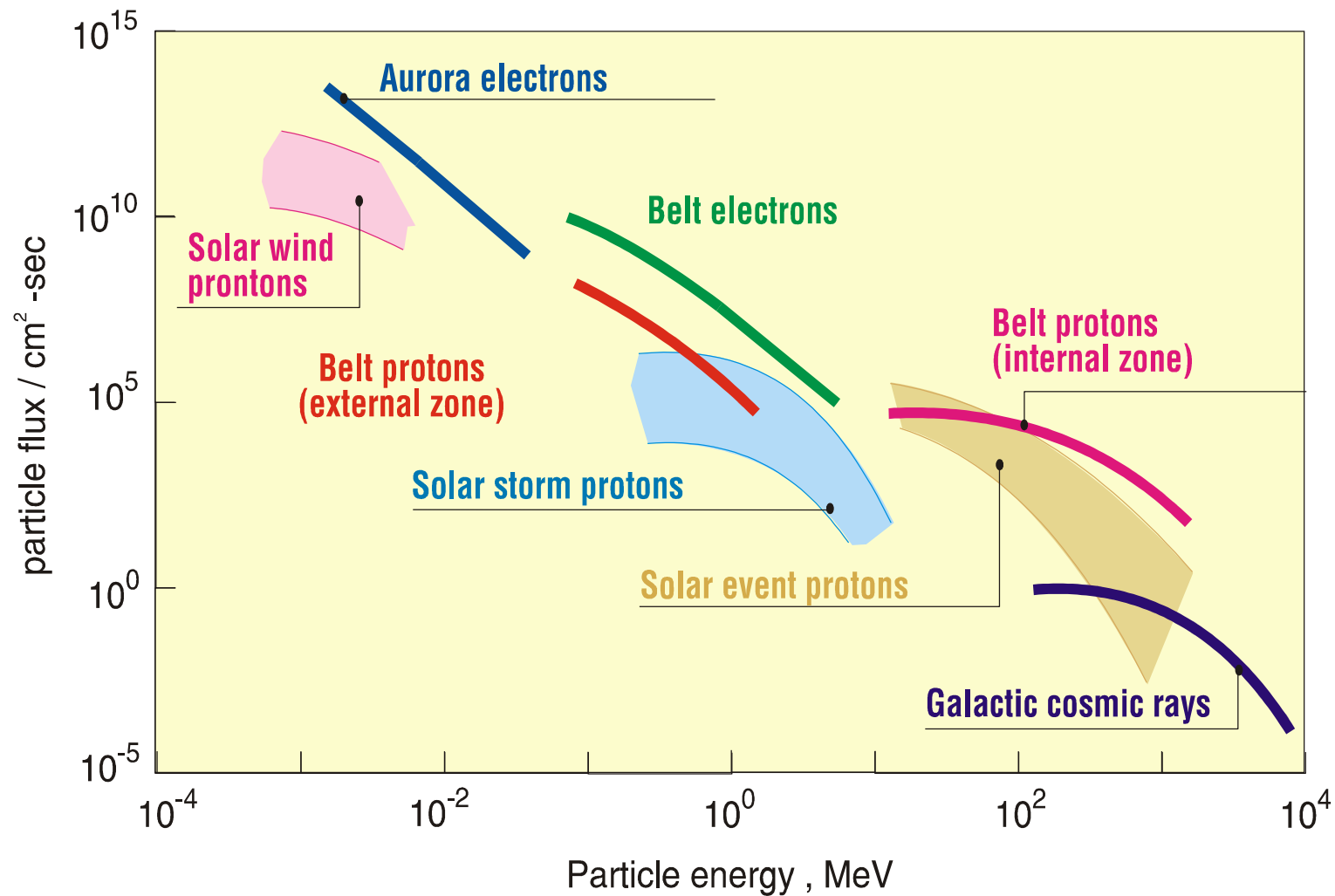
# Interaction avec le champ magnétique terrestre



# Protection = f(position géomagnétique)



# Spectre en énergie du rayonnement cosmique



# Cycle solaire

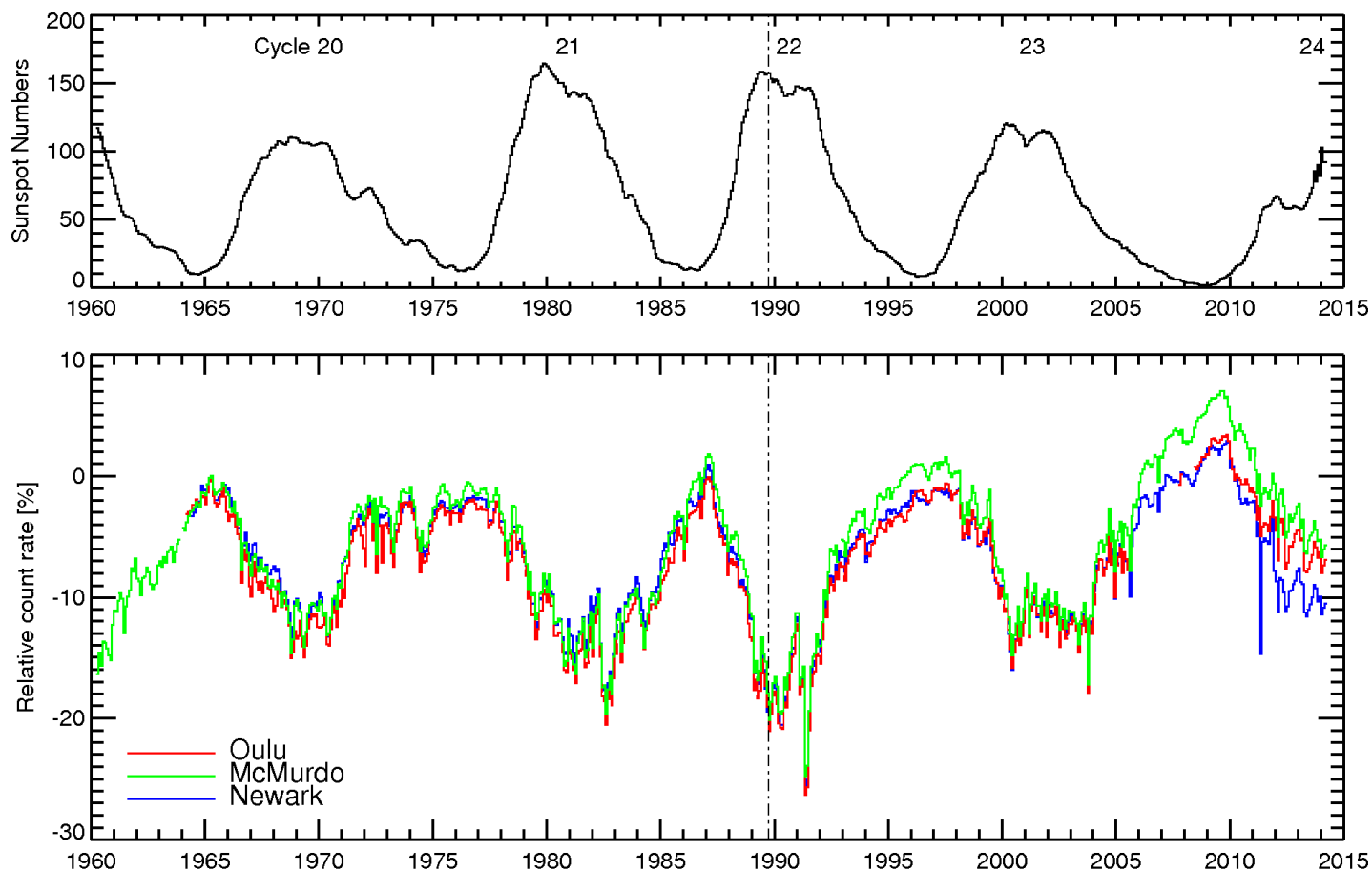
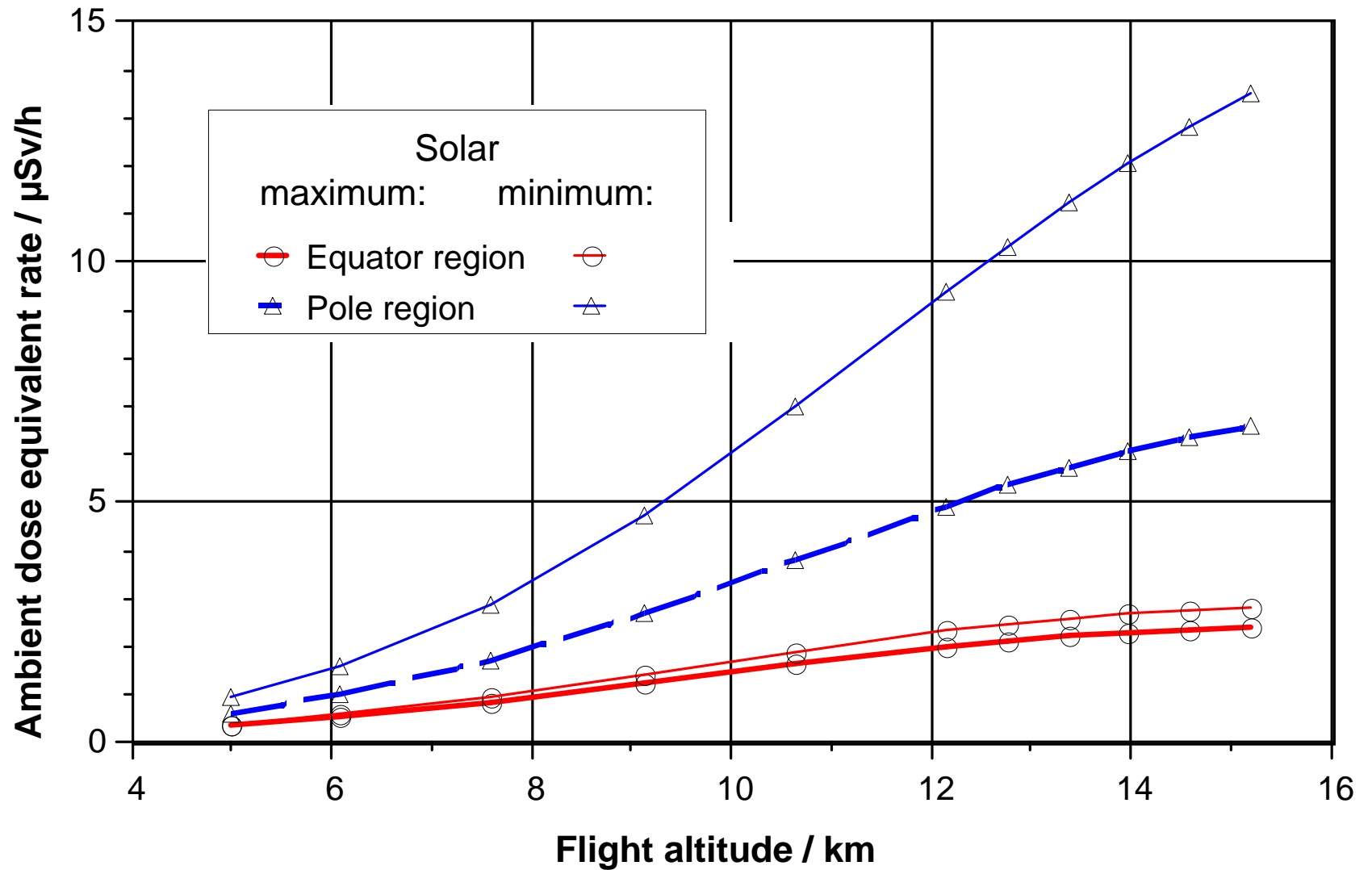


Figure 15: Smoothed sunspot number (top panel), pressure corrected monthly counting rates of the neutron monitor stations Oulu, McMurdo, and Newark (bottom panel) for the years 1960-2014. The neutron monitor count rates are expressed in relative units with respect to May 1965. The dashed-dotted line indicates the time of the GLE on 29 September 1989.

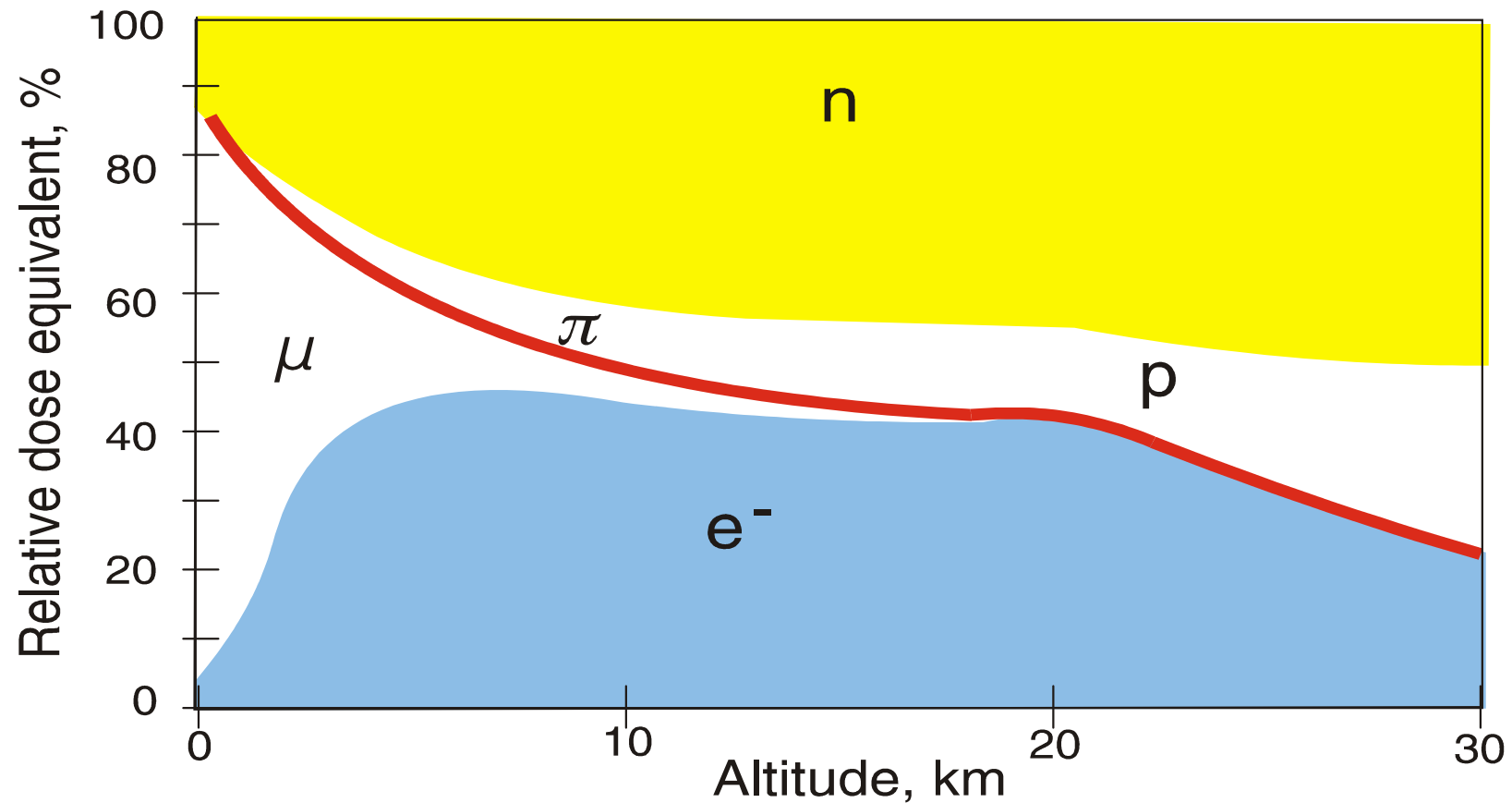
# Evaluation de la dose à bord des avions



# Dose en fonction de l'altitude



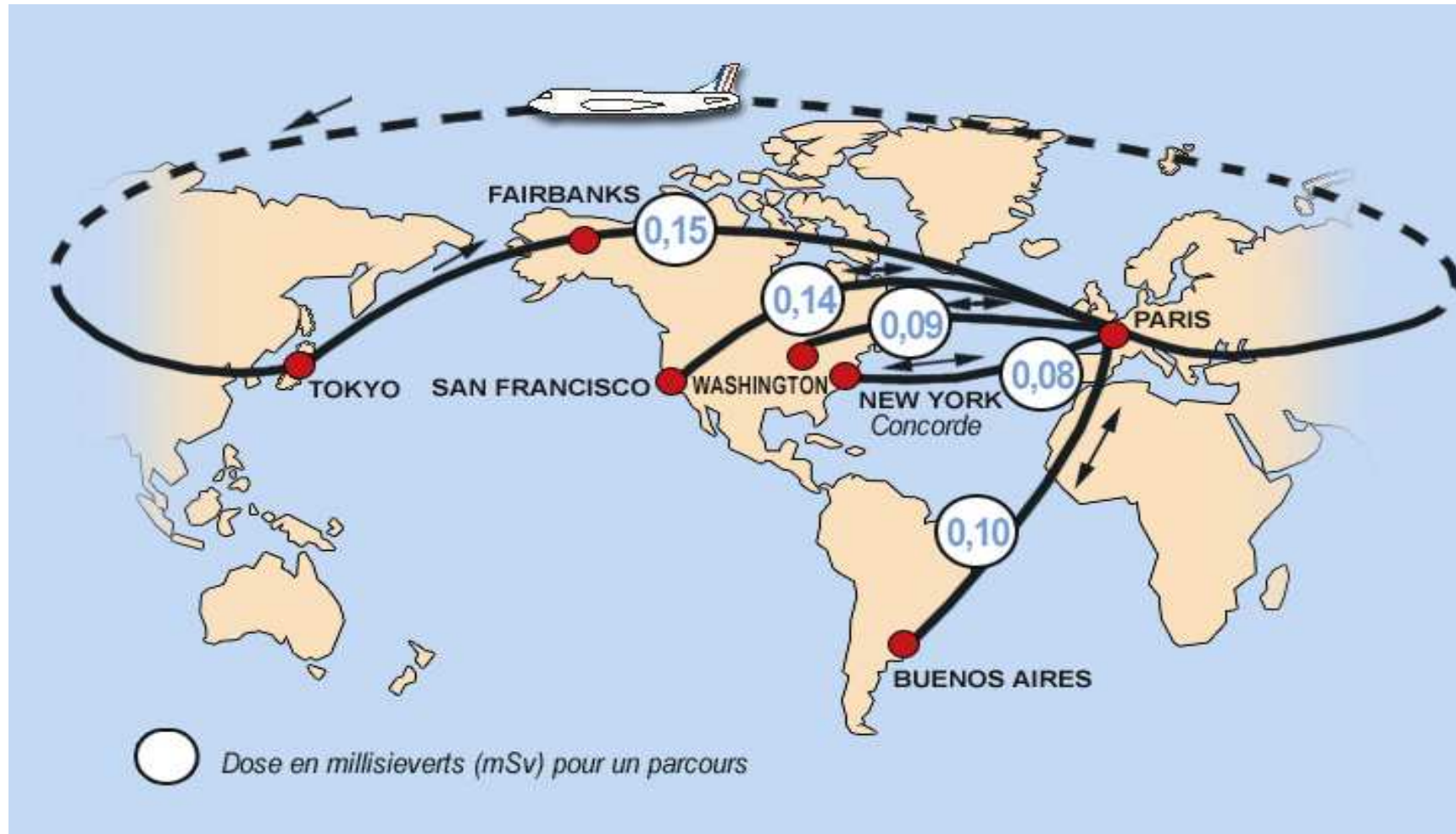
# Des particules de nature variées



EURADOS report 1996-01

***Distribution de la dose***

# Les doses reçues en vol



**Mesures 1996 - 1998**



# Le site : [www.sievert-system.org](http://www.sievert-system.org)

**IRSIN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

Accueil Comprendre le rayonnement cosmique Calcul de la dose

**SIEVERTPN**  
Vous prenez l'avion : ce site vous permet de calculer la dose de rayonnement reçue lors d'un vol et d'approfondir vos connaissances sur le rayonnement cosmique.

**FOIRE AUX QUESTIONS**  
➤ **Peut-on prévoir les éruptions solaires ?**  
Non. Les éruptions solaires restent encore imprévisibles. Pendant les périodes d'activité solaire maximale, le champ magnétique du Soleil est particulièrement perturbé, ce qui se traduit par l'apparition de nombreuses taches à sa surface. Les grandes  
[Lire la suite](#)  
➤ **Y a-t-il des zones géographiques davantage exposées aux rayons cosmiques ?**  
Oui. A grande latitude, à proximité des pôles, vers lesquels le rayonnement cosmique est dévié par le champ magnétique terrestre. Et en altitude, où la couche protectrice de l'atmosphère est moins épaisse et dense.  
➤ **Voyager de nuit réduit-il la dose de rayonnement que l'on peut recevoir ?**  
Non. Le rayonnement cosmique provient de toute notre Galaxie. Il est constant et isotrope (identique dans toutes les directions), donc indépendant de la rotation de la Terre.  
Bien que les particules issues des éruptions solaires proviennent à  
[Lire la suite](#)  
➤ **La dose reçue est-elle la même si on est sur Terre ou dans l'avion ?**  
Non. Au fur et à mesure que l'altitude augmente, la couche protectrice de l'atmosphère diminue en épaisseur et en densité.  
Dans la plupart des avions de ligne, qui volent à 10 000 ou 12 000 mètres, le rayonnement cosmique est 100 à 300 fois p  
[Lire la suite](#)  
➤ **Peut-on comparer les rayonnements d'origine cosmique ou les rayonnements médicaux ?**  
La dose moyenne des français liée aux actes de radiologie médicale (1,3 mSv/an) est comparable à celle due aux rayonnements cosmiques (0,3 mSv/an au niveau du sol et 1,9 mSv/an en moyenne pour les personnels navigants).  
➤ **Qu'est-ce que le sievert ?**  
Afin d'exprimer dans une même unité le risque de survenue des effets tardifs associés à

**LIENS ET INFOS UTILES**  
**Les rayonnements cosmiques**  
[Les rayonnements cosmiques](#)  
Conformément aux dispositions du code du travail, des mesures de surveillance individuelle des travailleurs sont mises en œuvre dès lors que ceux-ci sont susceptibles d'être exposés à des rayonnements ionisants dans le cadre de leur activité.  
Dans le cadre de la mission de veille permanente en matière de radioprotection qui lui est confiée au plan national, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) centralise, vérifie et conserve via le système d'information SIBERI l'ensemble des résultats des mesures individuelles obtenus tout au long de la vie professionnelle du travailleur. Un registre national du suivi de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants est ainsi constitué et exploité à des fins

**IRSIN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLEAIRE

En partenariat avec :  
dgac  
IPREV  
Observatoire  
Helmholtz Zentrum münchen  
German Research Center for Environmental Health

Version : 2.0.9

Accès Professionnels

Mentions légales | Plan du site | Contact

FR 16:55 11/07/2014

**Calcul de dose  
pour le public**

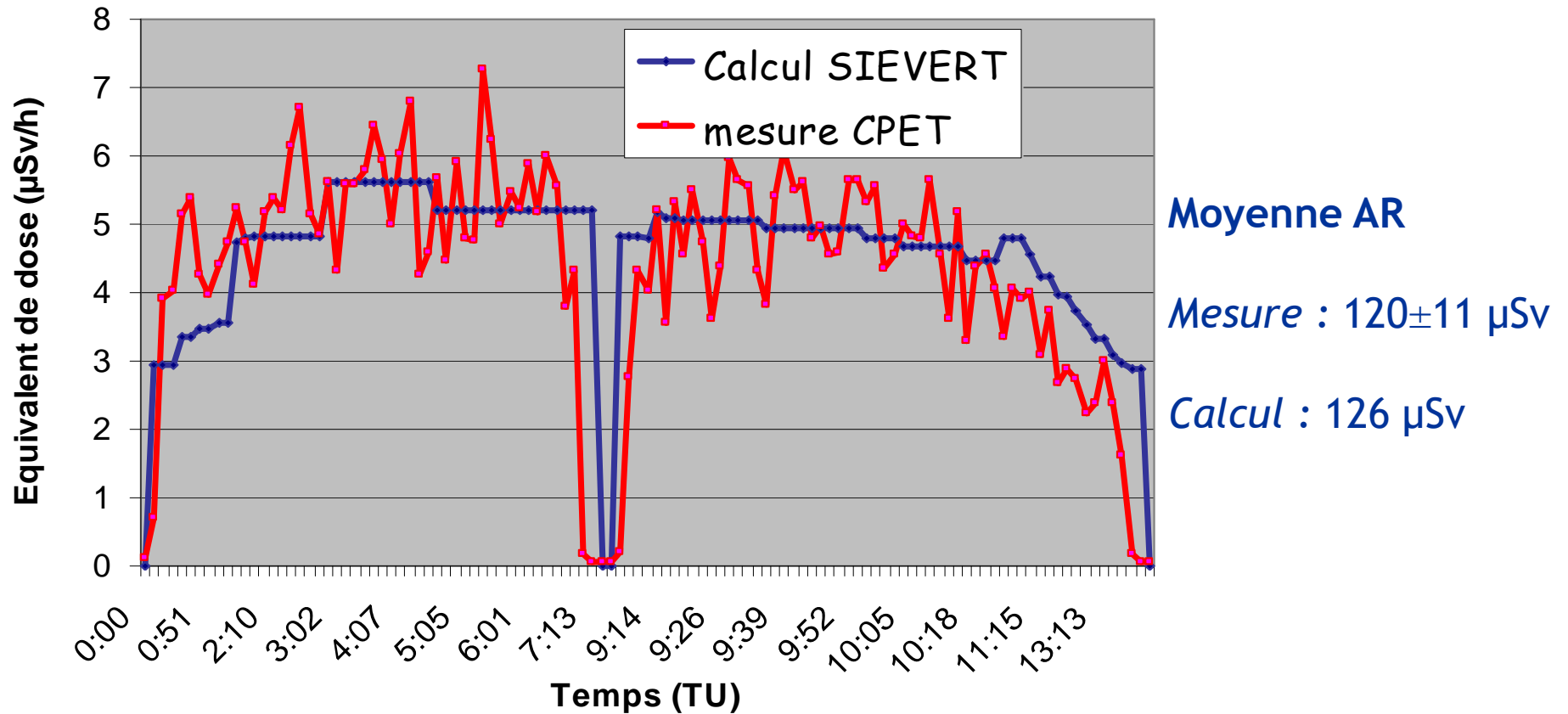
DÉPART :	ARRIVÉE :
Pays : Sélectionnez un pays	Pays : Sélectionnez un pays
Ville : Aucun pays sélectionné	Ville : Aucun pays sélectionné
Date : 11/07/2014	Date : 11/07/2014
Heure : 00:00	Heure : 00:00
Type d'avion : Subsonique	

Calculer la dose de rayonnements cosmiques reçue lors de ce vol [Calculer](#)

"Sous réserve des modifications de la réglementation locale, les dates et heures du vol prennent en compte le décalage horaire et éventuellement l'heure d'été. Vérifier la durée du vol."

**Accès professionnels :  
Compagnies, PN**

# GCR - Validation par la mesure



# GCR - Comparaison de différents modèles

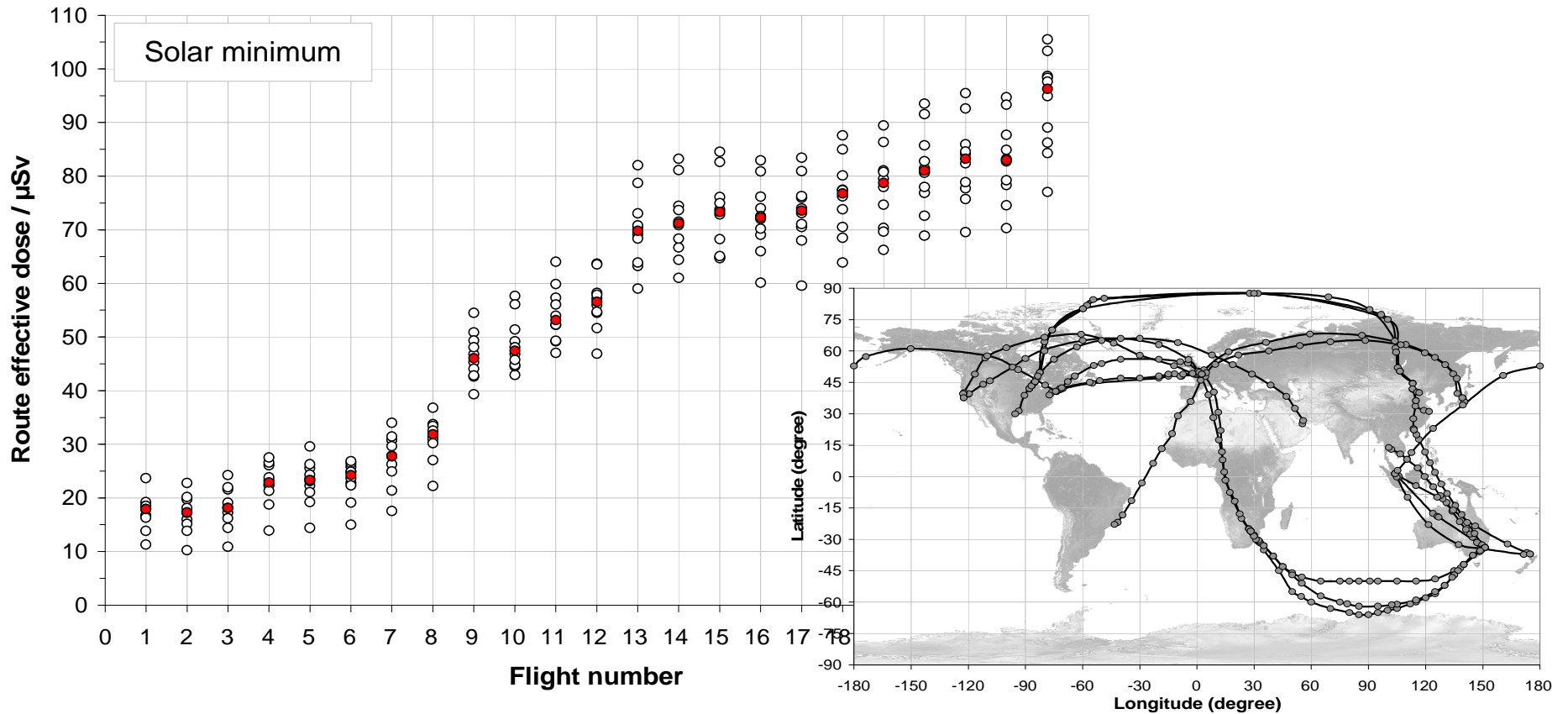
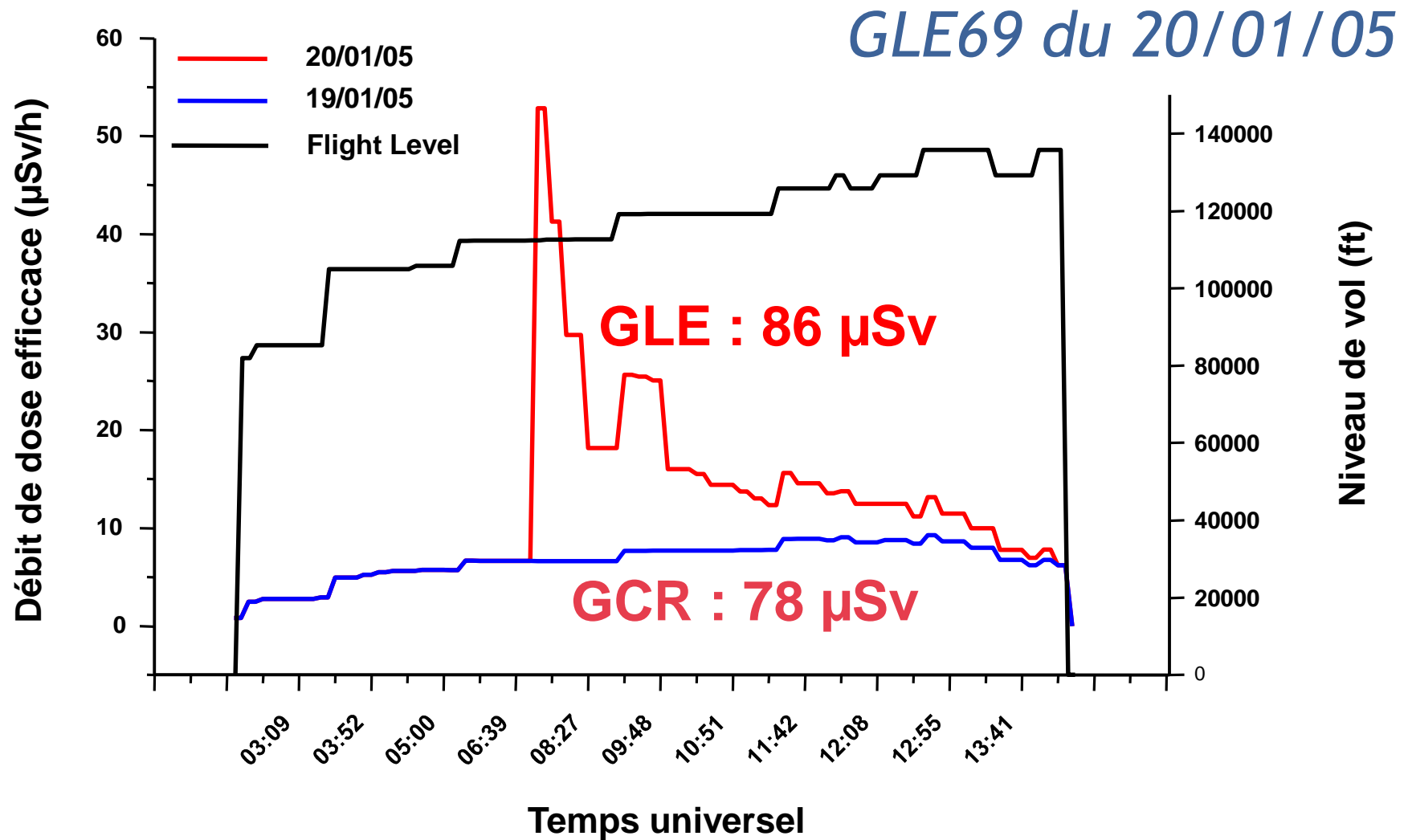


Figure 3.1b Anonymous comparison of the total effective dose  $E$  for different mid- and long-haul flights due to galactic cosmic radiation, during solar minimum conditions. The results are calculated using the AVIDOS 1.0, CARI-6M, EPCARD.Net 5.4.1, IASON-FREE 1.3.0, JISCARD EX, PANDOCA, PCAIRE (scientific version), PLANETOCOSMICS 2.0 (Bern model), QARM 1.0, and SIEVERT 1.0 computer codes. The median is marked with red circles.

EURADOS report, 2012

# Eruption solaire : calcul SIEVERT



# GCR + GLE - Comparaison de différents modèles

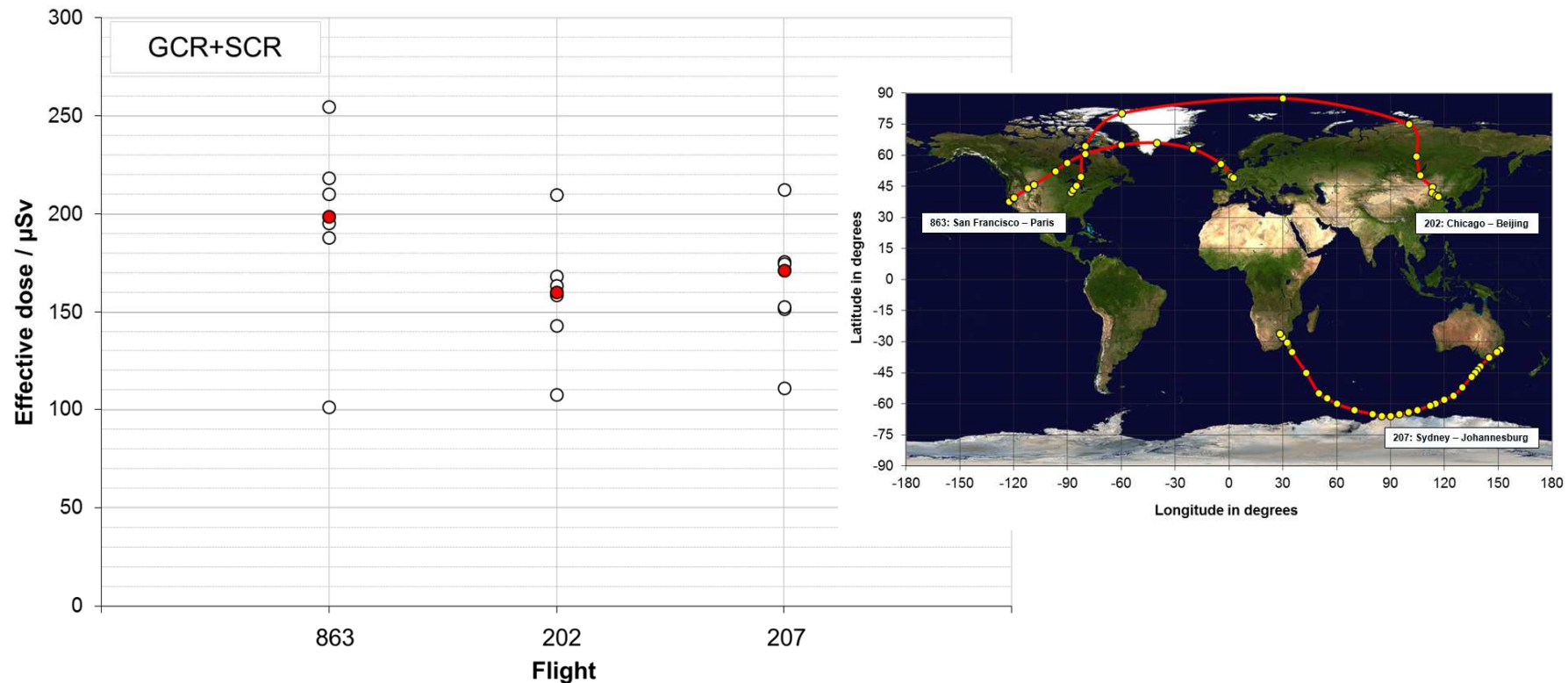


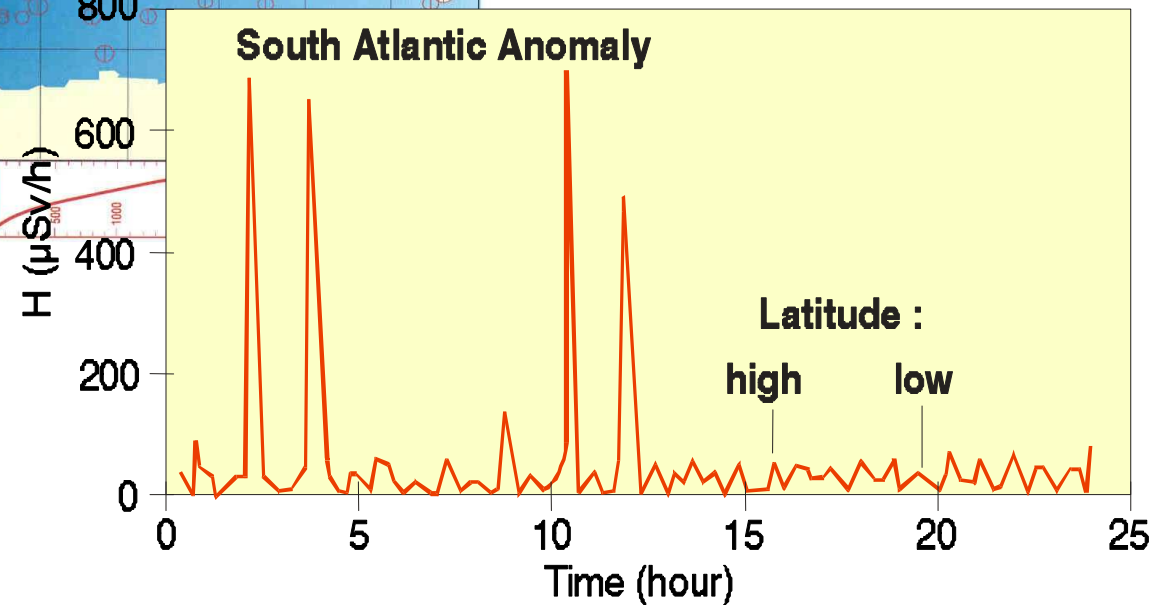
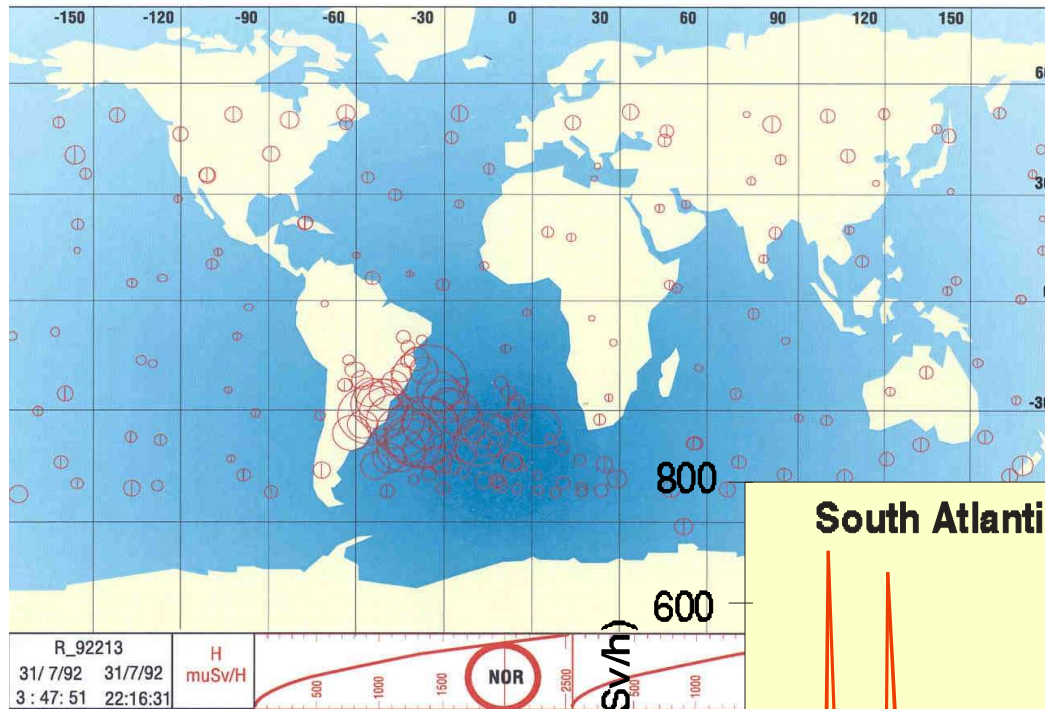
Figure 20: Anonymous comparison of route effective dose of the sum of galactic cosmic radiation (GCR) and “simplified GLE42” event (SCR) calculated for selected flights (white) presented with the median (red).

EURADOS report, 2021-03

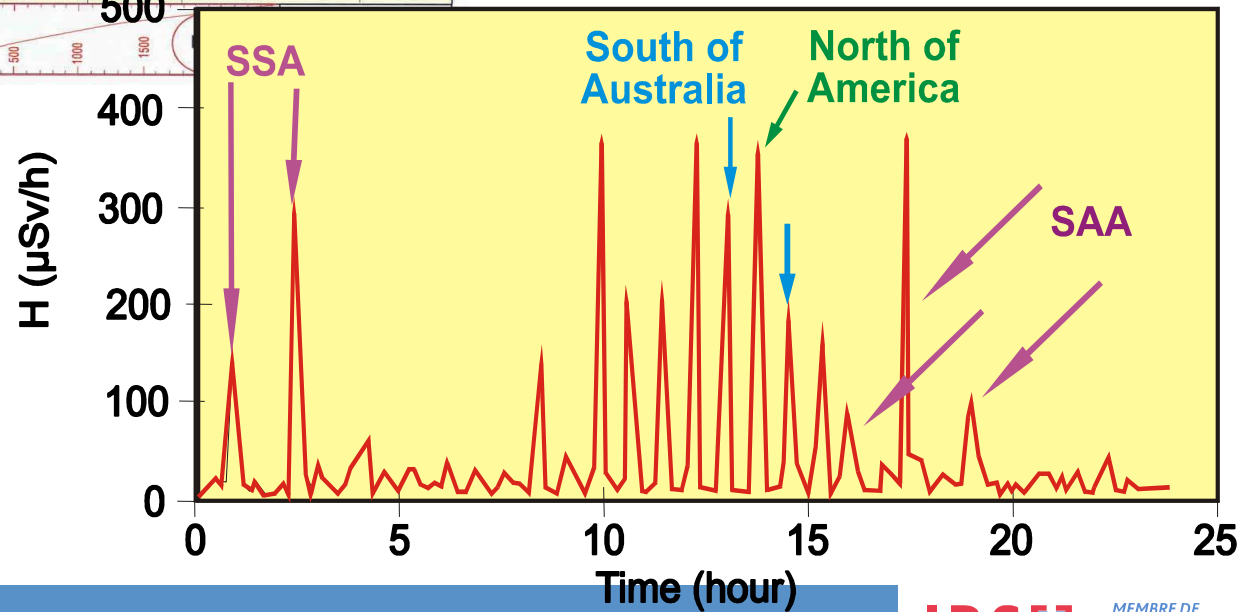
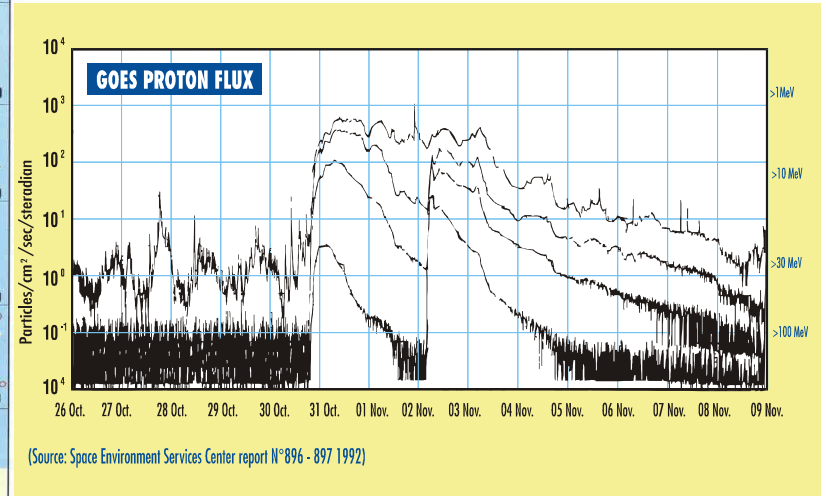
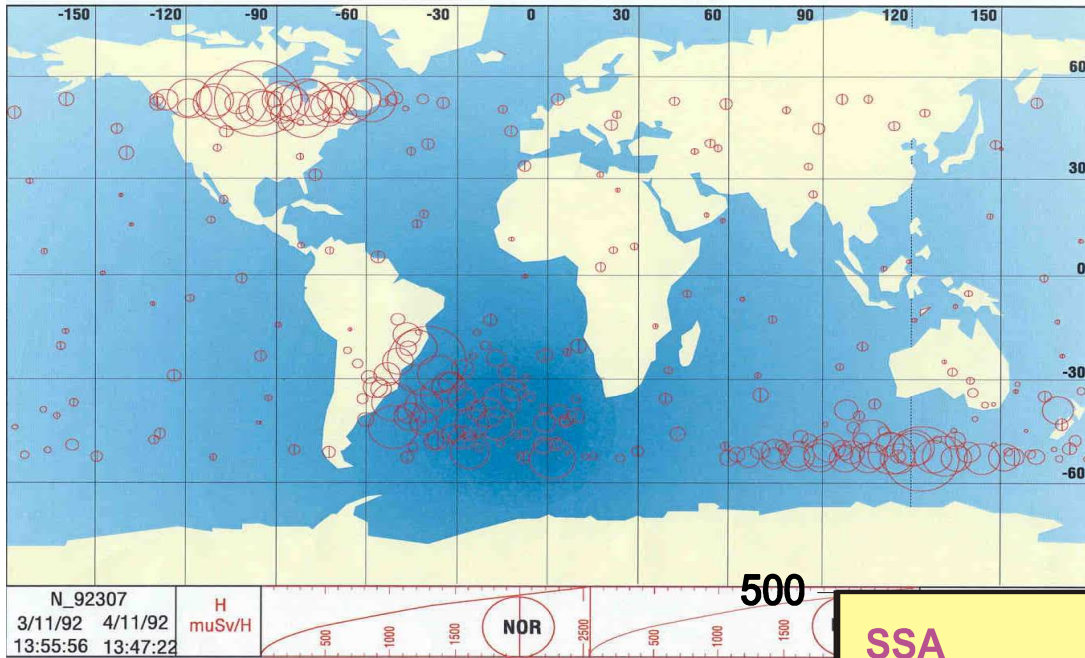
# Evaluation de la dose pour des activités spatiales



# Cartographie de dose à bord de MIR (juillet 92)



# Dose à bord de MIR : Eruption solaire oct-nov 1992





# Environnement lunaire et martien

## Lune

- Pas d'atmosphère
- Pas de champ magnétique
- 1 jour lunaire = 29,5 jours terrestres

## Mars

- Faible atmosphère de CO<sub>2</sub> (20 g.cm<sup>-2</sup>)
- Pas de champ magnétique
- 1 jour martien = 1,02 jour terrestre
- 687 jours terrestres = 1 année martienne

## Spécificité de l'exposition sur la lune et Mars

- **Pas ou faible atténuation du RC par l'atmosphère et absence de champ magnétique.** Ceci entraîne des différences sur la composition du RC (*fluence des différentes particules et leur énergie*) par rapport aux situations connues dans l'environnement terrestre
- **Exposition chronique** due au **rayonnement galactique** à un niveau relativement élevé sans protection supplémentaires
- **Exposition « ponctuelle »** mais pouvant être **significative** en cas d'**éruption solaire importante**, avec une probabilité d'autant plus grande que le séjour sera long. Une éruption solaire est difficile à prévoir pour l'instant, en particulier son intensité et son énergie

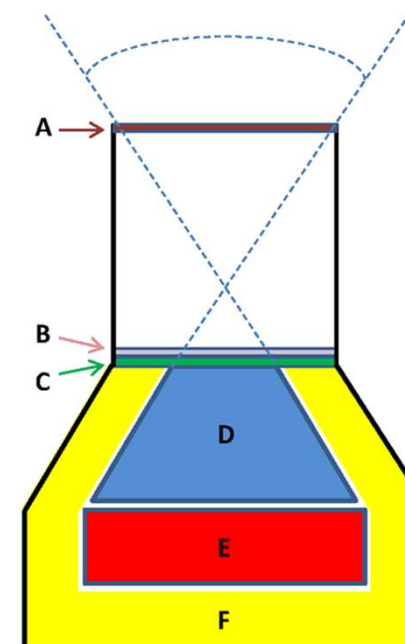
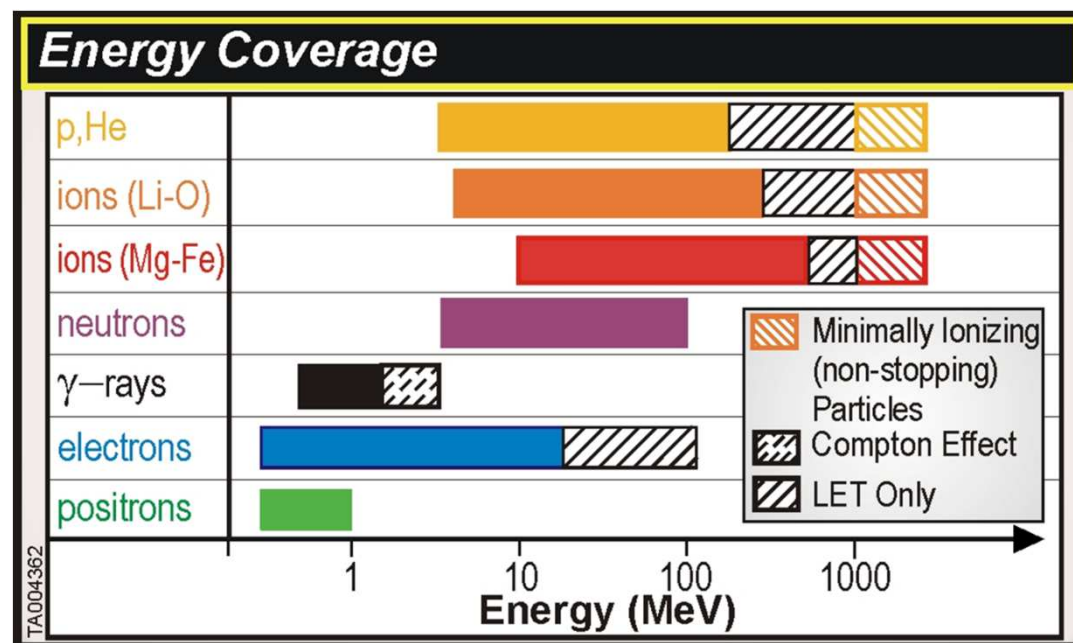


# Mars mission (MSL-RAD; 11/2011 to 08/2012)

## RAD Sensor measurement capabilities

- 3-element silicon particle telescope (A, B, C).
- CsI scintillator (D) for  $\gamma$ -ray detection; stops protons and 4 He up to  $\sim 95$  MeV/nucl
- Plastic scintillators (E, F). F enables neutral particle detection in D ( $\gamma$ 's) and E (neutrons)

*MSL launched  
Nov 26, 2011  
and landed  
Aug 6, 2012  
on Mars*



From G. Reitz





# Radiation Environment Measured by MSL/RAD during cruise and on the Mars surface (GCR only), Hassler et.al, Science 2013

RAD Measurement	Cruise	Mars Surface	Units
Charged Particle Flux (A2*B)	1.43 +/- 0.03	0.64 +/- 0.06	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup>
Fluence Rate (B)	3.87 +/- 0.34	1.84 +/- 0.34	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Dose Rate	0.48 +/- 0.08	0.21 +/- 0.04	mGy/day
Avg. Quality Factor <Q>	3.82 +/- 0.30	3.05 +/- 0.30	(dimensionless)
Dose Equivalent Rate	<b>1.84 +/- 0.30</b>	<b>0.64 +/- 0.12</b>	mSv/day

*MSL launched Nov 26, 2011 and landed Aug 6, 2012 on Mars*



*From G. Reitz*





# SEP Events Contribute to Total Dose During Cruise...

Time Period (2012)	Integrated Dose Equivalent (mSv)
Total Jan 23-29 SEP	4.0
Total March 7-15 SEP	19.5
Total May 17-18 SEP	1.2
<b>SEP Events Total</b>	<b>24.7</b>
GCR average per day	1.84
<b>TOTAL (GCR + SEP) (253 days)</b>	<b>490</b>

*During Cruise, SEP Events contributed ~5% to the Total Integrated Dose Equivalent.*

- However, SEP Fluences & Energy Spectra (“Hardness”) are highly variable...
- ...a very large SEP Event or “Super-Event” (similar to the 1972 SEP event) could potentially contribute substantially more (>order of magnitude) to the total integrated Dose Equivalent.



From G. Reitz



# Preliminary Dose Estimates for NASA “Design Reference” Mission



Mission Phase	Dose Equivalent/ Effective Dose Equivalent (Sv)	Notes
<b>Astronaut Career Limit*</b>	<b>~ 0.6 - 1.2 *</b>	depends on age, gender, etc.
Cruise to Mars (180 days)	~ 0.33 / 0.22	near Solar Max
Mars Surface Mission (600 days)	~ 0.38 / 0.24	Thin habitat shielding
Mars Surface Mission (300 days)	~ 0.19 / 0.12	Thin habitat shielding
Return to Earth (180 days)	~ 0.33 / 0.22	near Solar Max
<b>Total Mission Dose Equivalent (300 days on Mars)</b>	<b>~ 0.85 / 0.56</b>	300 days
<b>Total Mission Dose Equivalent (600 days on Mars)</b>	<b>~ 1.04 / 0.68</b>	600 days

\*Astronaut Career Limits vary by Space Agency. NASA Astronaut Career Limits are based on 3% excess career fatal cancer risk, and vary by age, gender, etc.



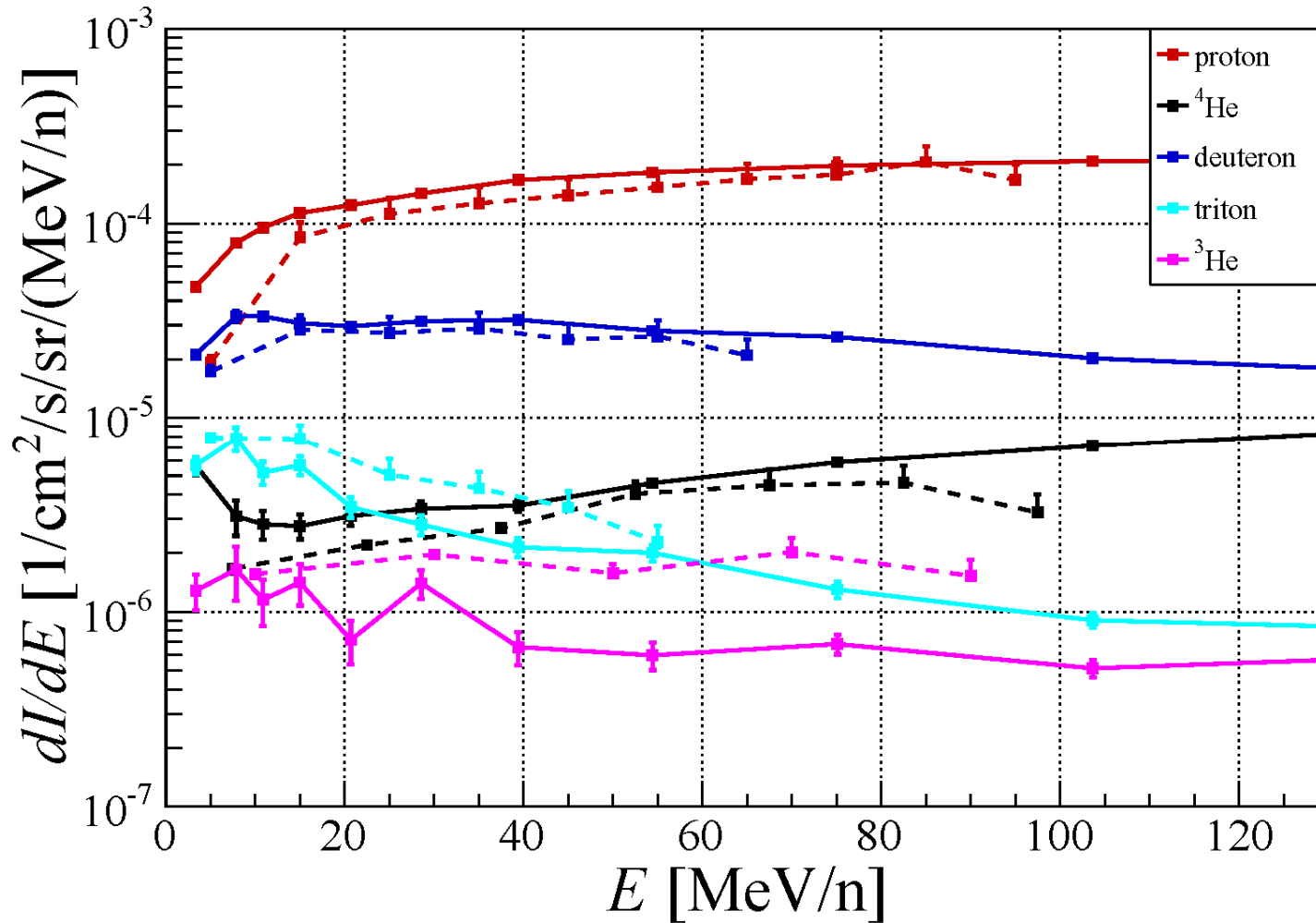
*From G. Reitz*



# MSL-ground, low Z - 20 g/cm<sup>2</sup> (no shielding from Rover included)



**MSL launched  
Nov 26, 2011  
and landed  
Aug 6, 2012  
on Mars**



**solid lines: GEANT4**  
**dashed lines:**  
*Ehresmann et al.,  
JGR Planets 119, 2014*



From G. Reitz



## En résumé

Localisation	Terre <i>(niveau de la mer)</i>	ISS	Véhicule spatial <i>(trajet)</i>	Mars <i>(sol)</i>
Dose * (mSv/jour)	0,001	0,7	1,8	0,6
Blindage (g.cm <sup>-2</sup> )	1000 <i>(air)</i>	15 <i>(Al)</i>	15 <i>(Al)</i>	20 <i>(CO<sub>2</sub>)</i>

*\* Sans éruption solaire qui peut avoir un impact significatif (plusieurs ordres de grandeur) d'autant plus important que le blindage est faible*

➔ **En cas de vie prolongée sur Mars, il est nécessaire de considérer des scénarios d'exposition intégrant des éruptions solaires majeures**



# Etudes relatives à l'évaluation du risque

## ■ Scénarios d'exposition

- Définir des **scénarios d'exposition** (*médian, enveloppe, éruption...*) prenant en compte le mode de vie et les protections radiologiques  
→ Thèse CNES –TRAD (G Charpentier)
- Définir le **profil des équipages** (*âge, sexe...*)

## ■ Evaluation de l'excès de risque

- Définir les **pathologies attendues** en fonction des scénarios d'exposition
- Améliorer/revisiter les **modèles de risque**  
→ CIPR-TG115: *Risk and Dose Assessment for Radiological Protection of Astronauts*  
→ CIPR-TG118: *Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ )*
- Evaluer l'**excès de risque** suivant différents scénarios  
→ Thèse CNES –TRAD (G Charpentier)

## Conclusion

- La **modélisation est largement utilisée** pour l'évaluation de l'exposition au rayonnement cosmique
  - *En routine pour la dosimétrie des PN*
  - *Pour le dimensionnement des missions spatiales et l'évaluation des risques liés au RC*
- La **validation expérimentale des modèles est complexe**, en particulier en cas de GLE, car difficulté d'accès à des données expérimentales
- La définition de **scénarios d'exposition** au RC et l'utilisation de **modèles adaptés** sont nécessaires **pour évaluer le risque** dans le cadre de l'exploration spatiale :
  - ***Exposition chronique*** due au rayonnement galactique à un **niveau relativement élevé** sans protection supplémentaire
  - ***Exposition « ponctuelle »*** mais pouvant être **significative en cas d'éruption solaire importante**, avec une probabilité d'autant plus grande que le séjour sera long.

Merci de votre attention !



**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

