

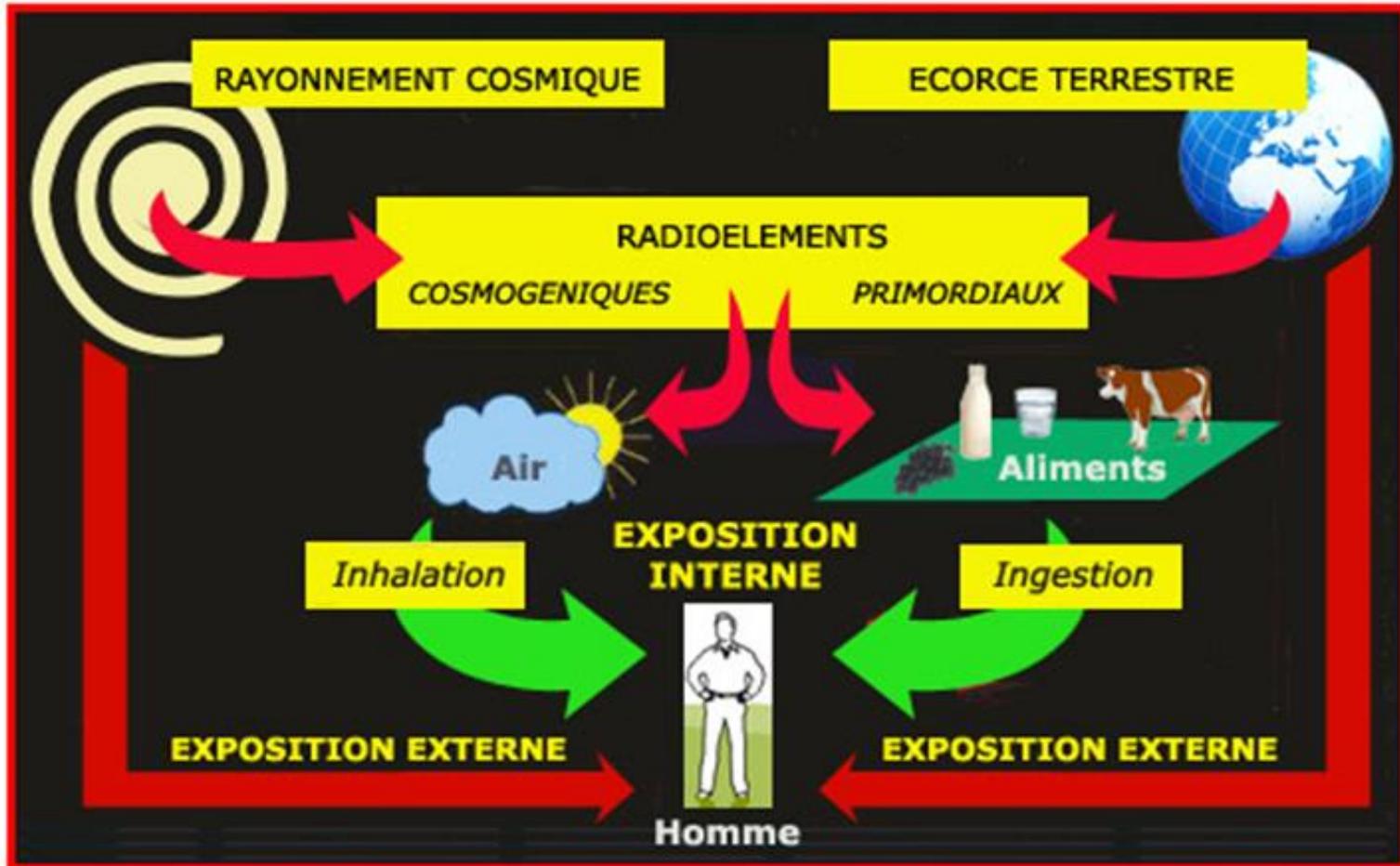
Les origines naturelles de la radioactivité dans l'atmosphère.

Prof. D.L. Boulès
CEREGE

OSU « Institut Pythéas »

Aix-Marseille Université/CNRS/IRD/Collège de France/INRA

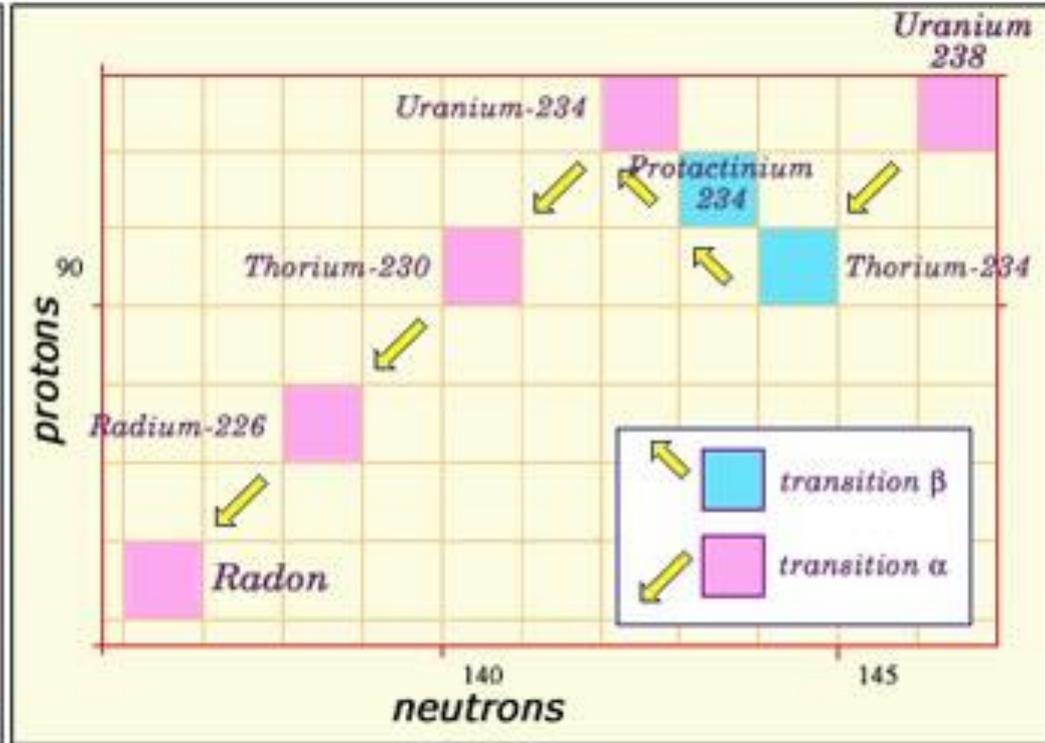
Radioactivité naturelle.



Nucléides primordiaux atmosphériques.

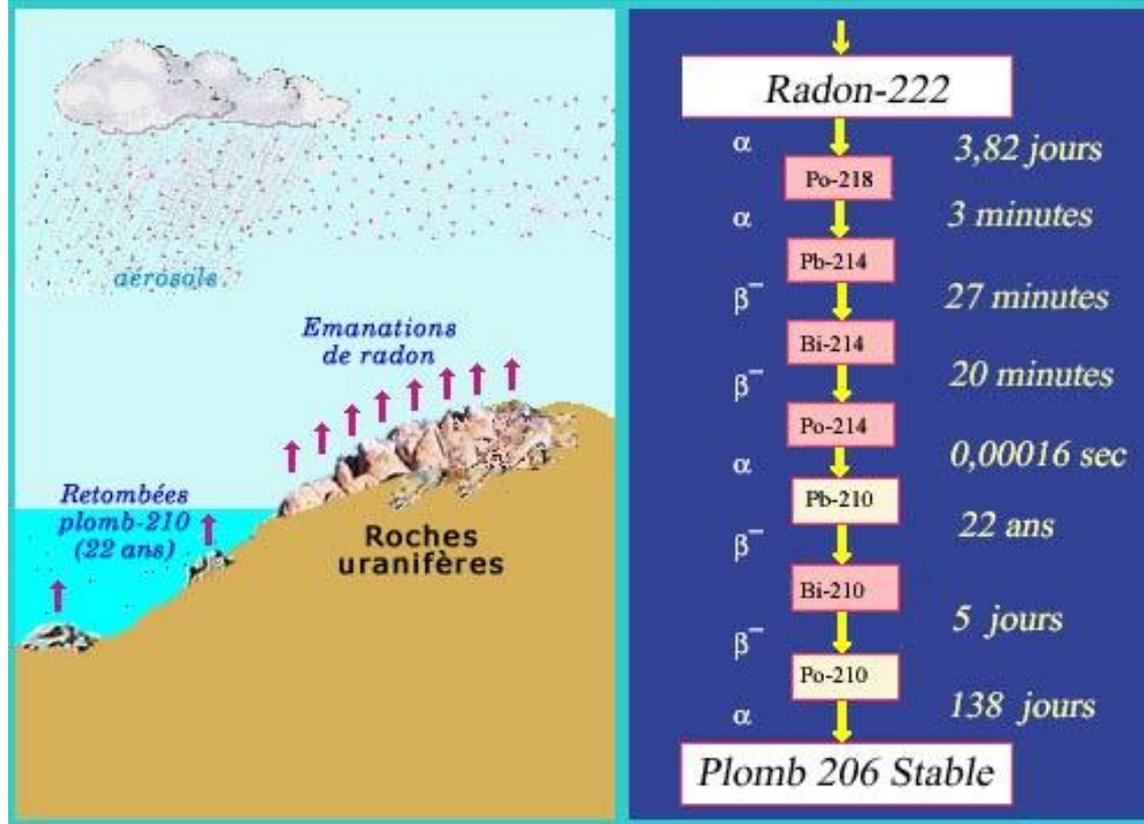


@IN₂P₃



Les descendants de l'uranium-238, présents à l'état de traces dans ces minerais, émettent des rayons alpha et bêta qui restent prisonniers des roches, alors que les rayons gamma s'en échappent. Le sixième descendant de l'uranium, le radon, est un gaz. Une partie s'échappe du sol, relâchant de la radioactivité dans l'atmosphère.

Nucléides primordiaux atmosphériques.



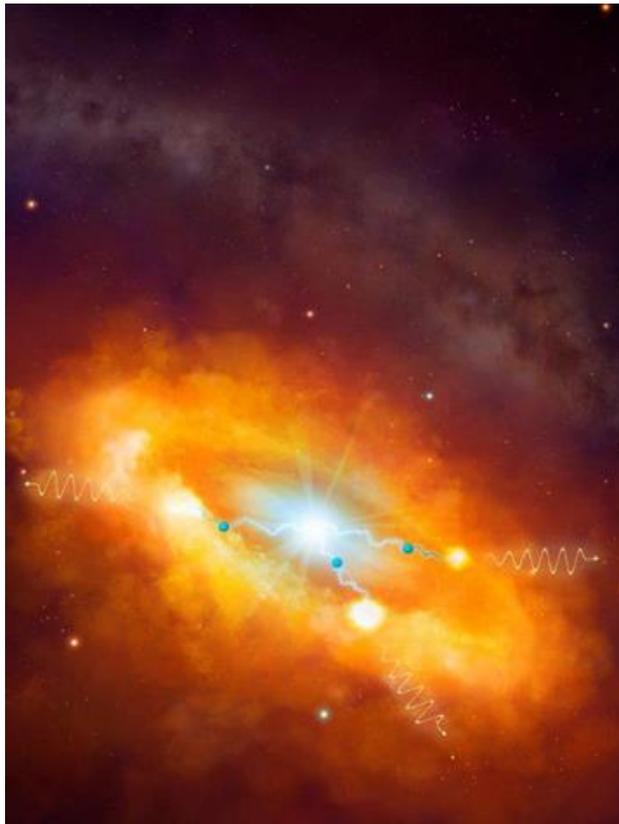
@IN₂P₃

Si la roche est profonde, le radon n'a pas le temps de gagner l'atmosphère et la radioactivité reste dans le sol. Si la roche est proche de la surface, les descendant du radon relâchés dans l'atmosphère sont fixés par des aérosols et peuvent se déposer dans les poumons.

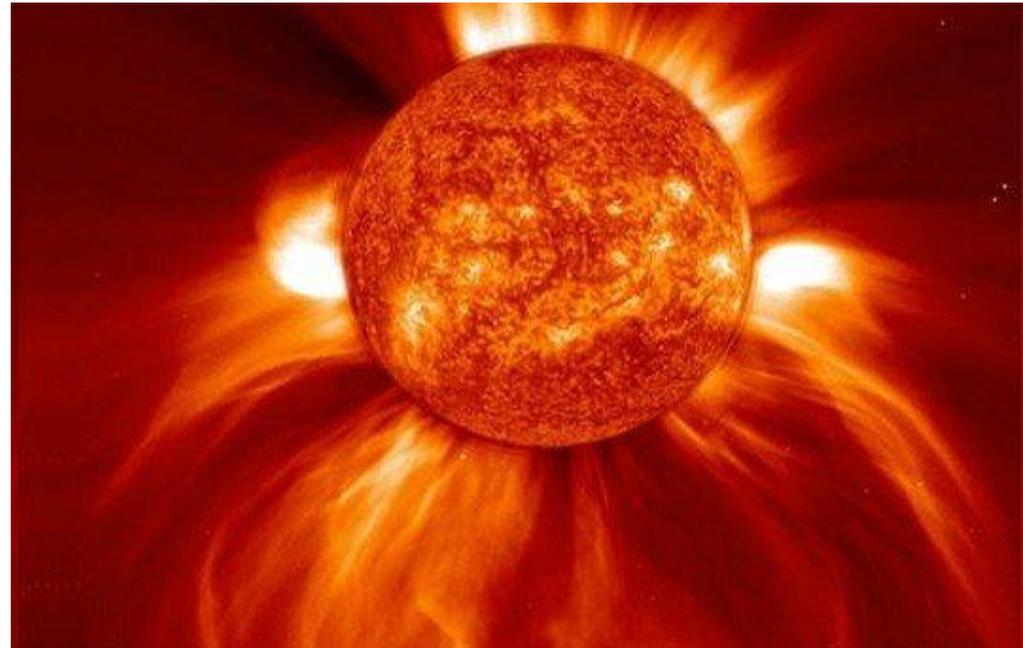
Nucléides cosmogéniques atmosphériques.

Le rayonnement cosmique primaire : 2 composantes.

Le rayonnement cosmique galactique.



Le rayonnement cosmique solaire.



Le rayonnement cosmique primaire.



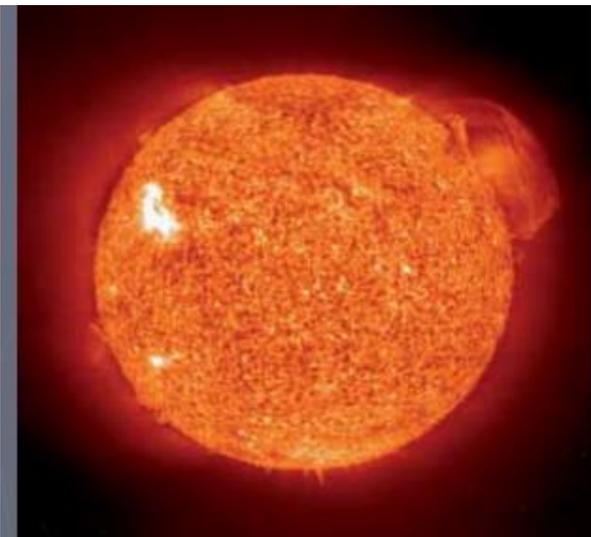
Origine : Hors système solaire

Energie : 10^3 eV à plus de 10^{20} eV

Composition : Relativement constante

Intensité : Relativement constante

G
A
L
A
C
T
I
Q
U
E



Origine : Libération de particules à la surface du soleil - Eruption solaire

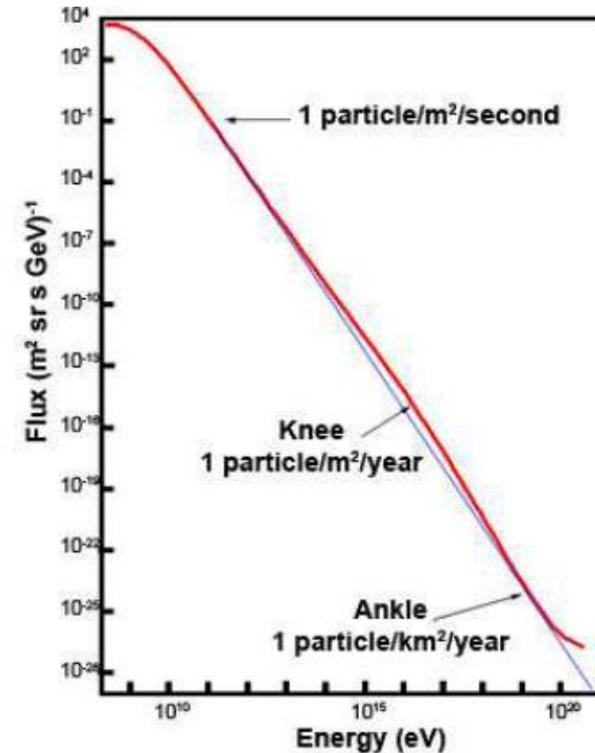
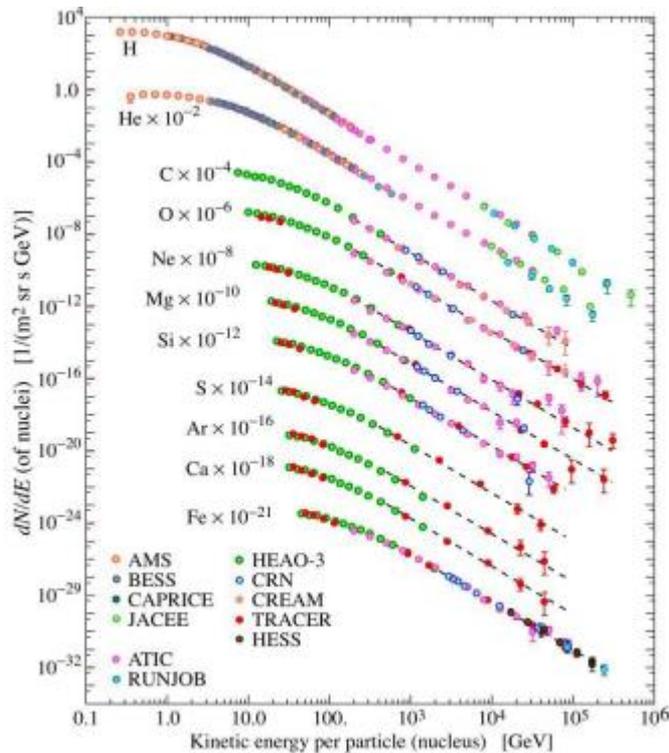
Energie : Dépasse rarement quelques MeV

Composition : Très variable p/ α varie de 1 à 30

Intensité : Fonction de l'éruption

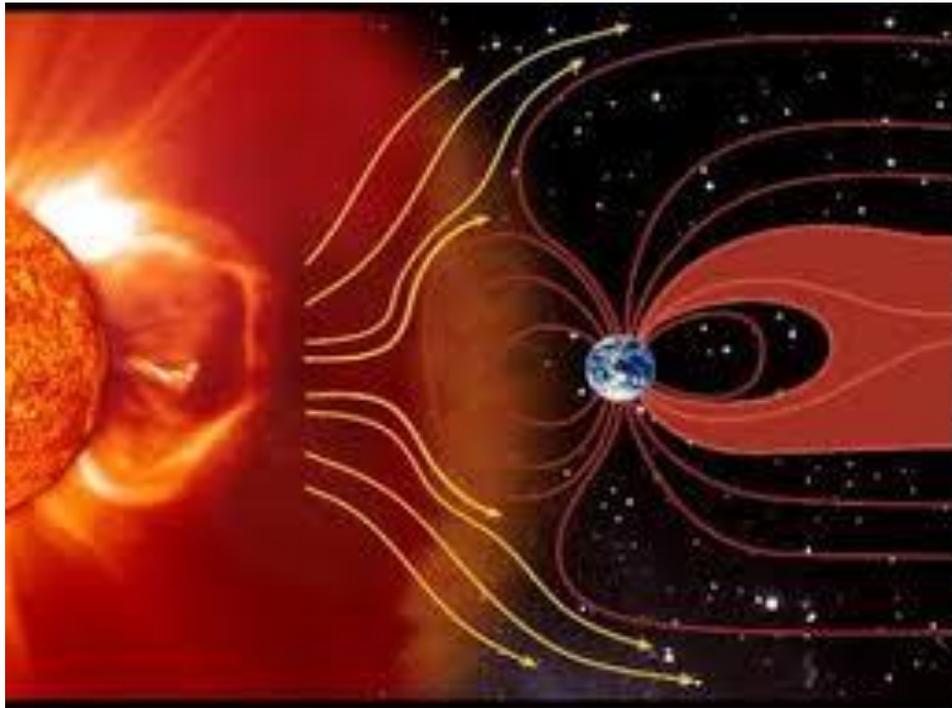
S
O
L
A
I
R
E

Le rayonnement cosmique primaire.



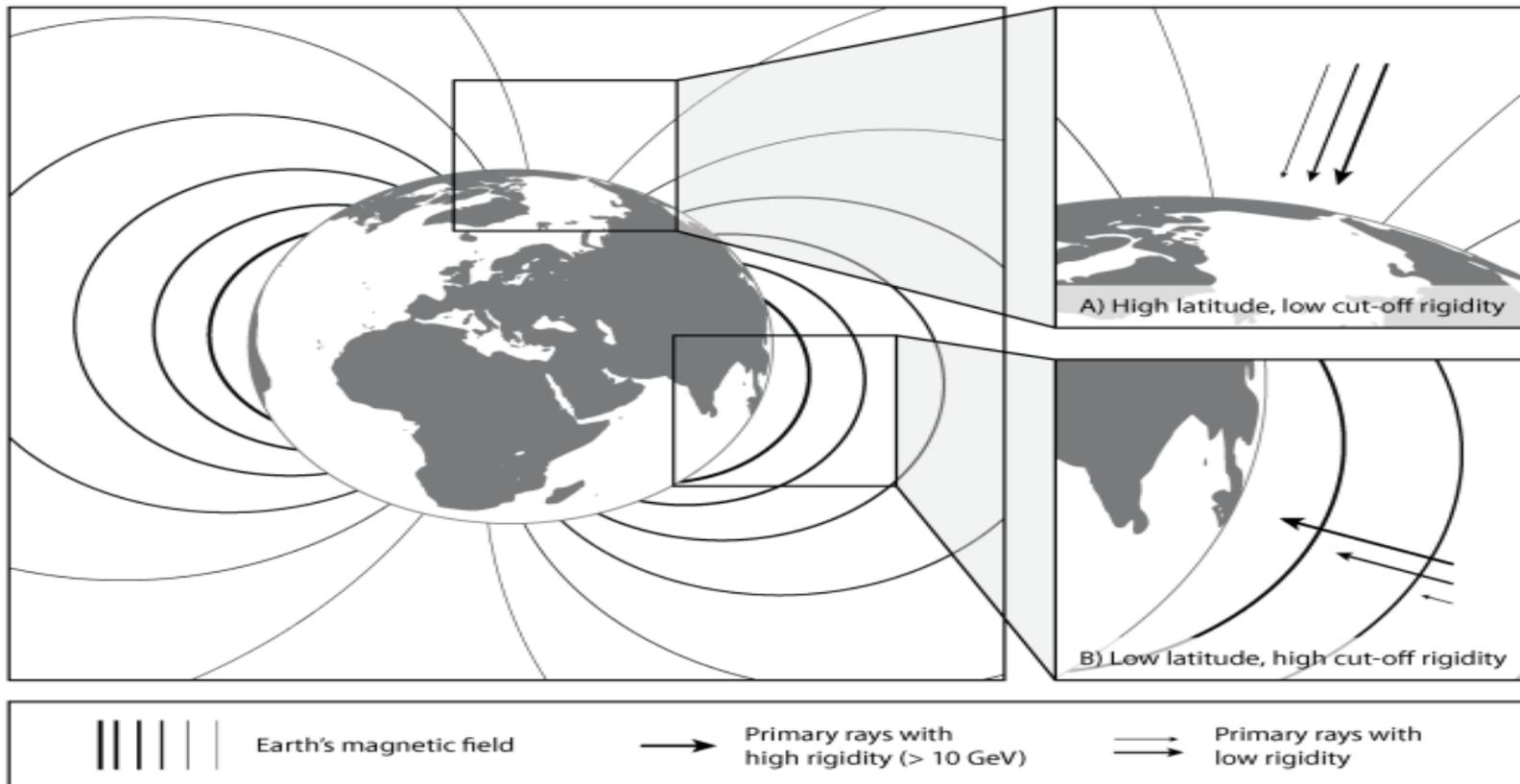
Flux total de rayons cosmiques primaires en haut de l'atmosphère

Force de Lorentz.



Les particules chargées constituant le rayonnement cosmique primaire sont déviés par les lignes du champ magnétique terrestre et par les lignes des champs magnétiques portés par les nuages de plasma solaire libérés en période d'activité.

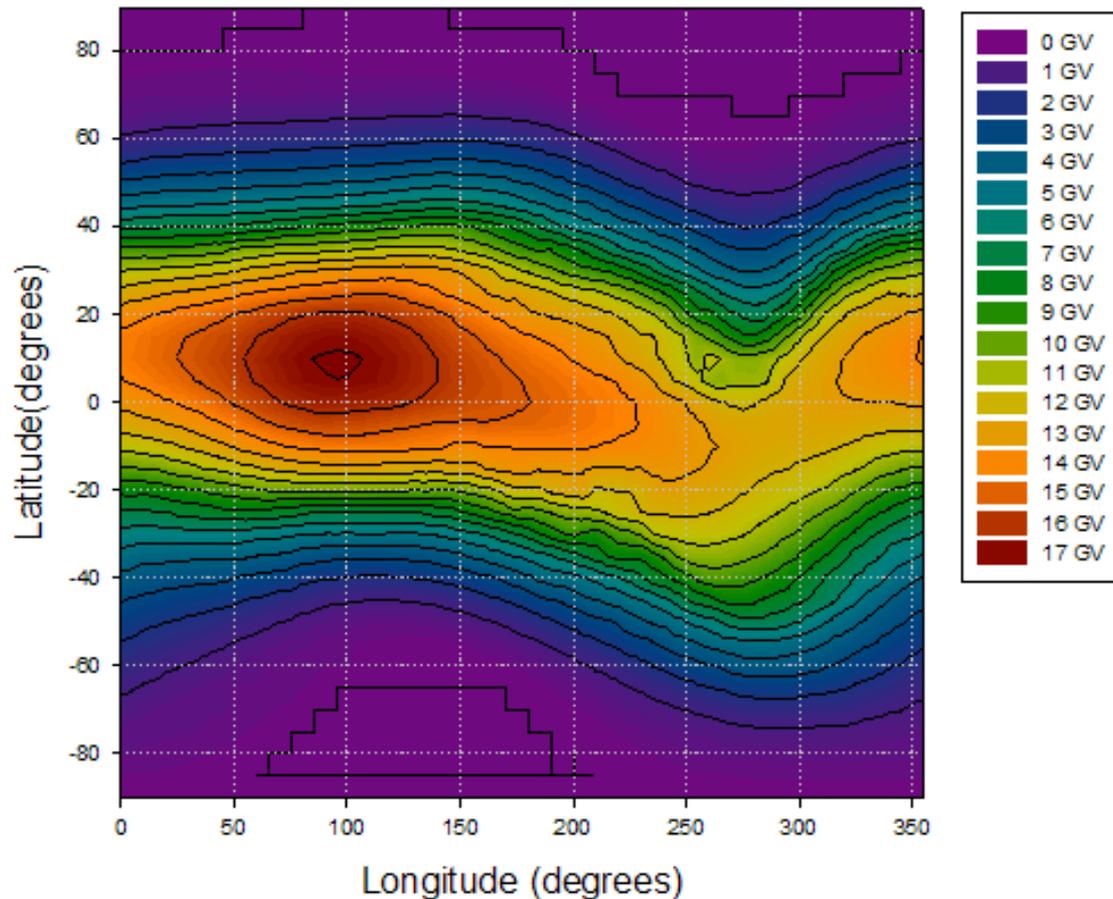
Pour un champ magnétique terrestre assimilé en première approximation à un dipôle magnétique ayant une inclinaison de $11^{\circ}4$ par rapport à l'axe de rotation de la planète :

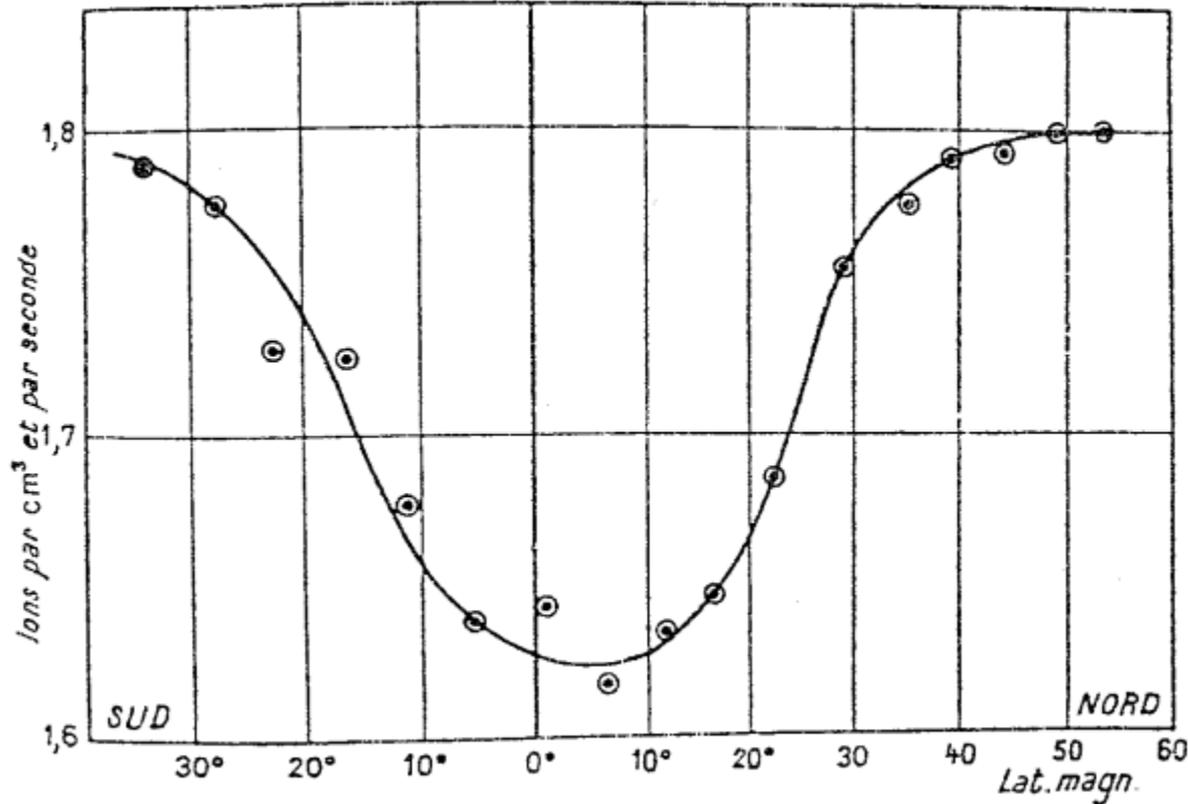


An illustration of the Earth's geomagnetic field and the effect it has on incoming primary cosmic rays. All rays must exceed the cut-off rigidity at a particular latitude (A and B), which is higher towards the equator (B) and lower towards the poles (A). Only rays with higher cut-off rigidities are permitted to enter the atmosphere at the equator, whilst at the poles the convergence of magnetic field lines means that most rays can enter.

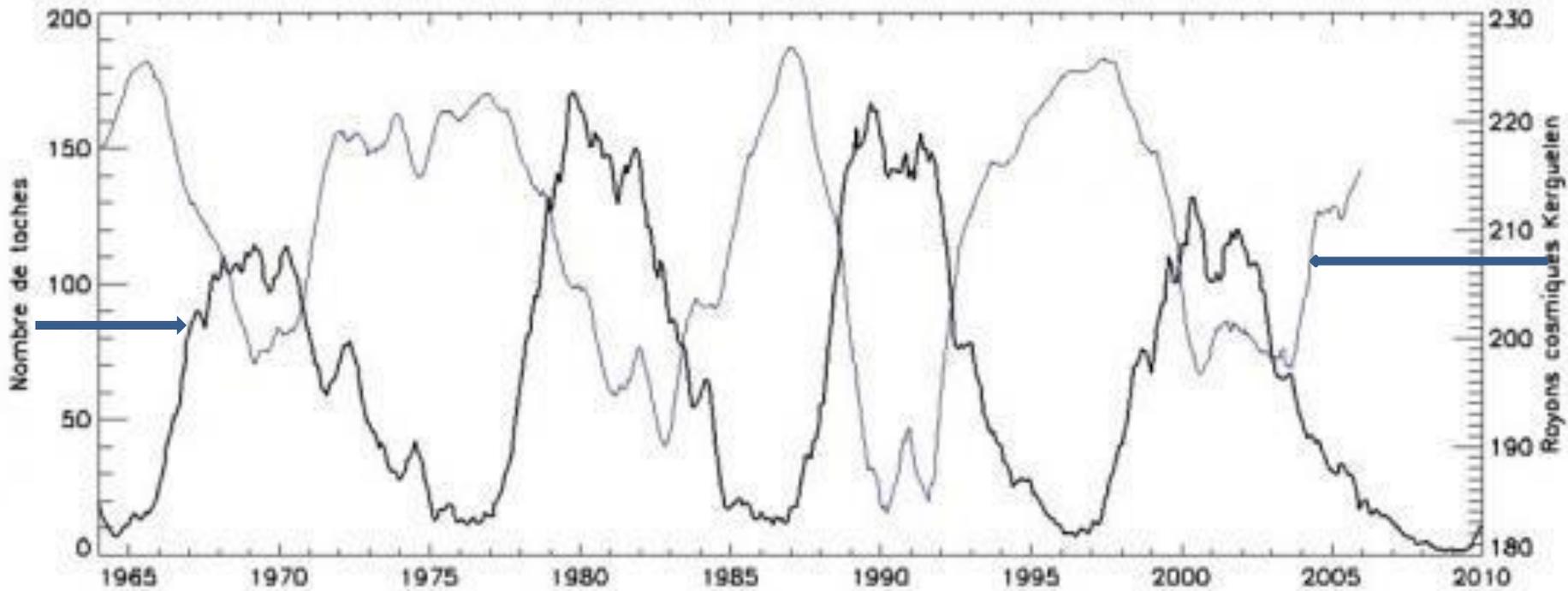
Rigidité de coupure.

Vertical Cut-off at 100 km ($K_p=0$)

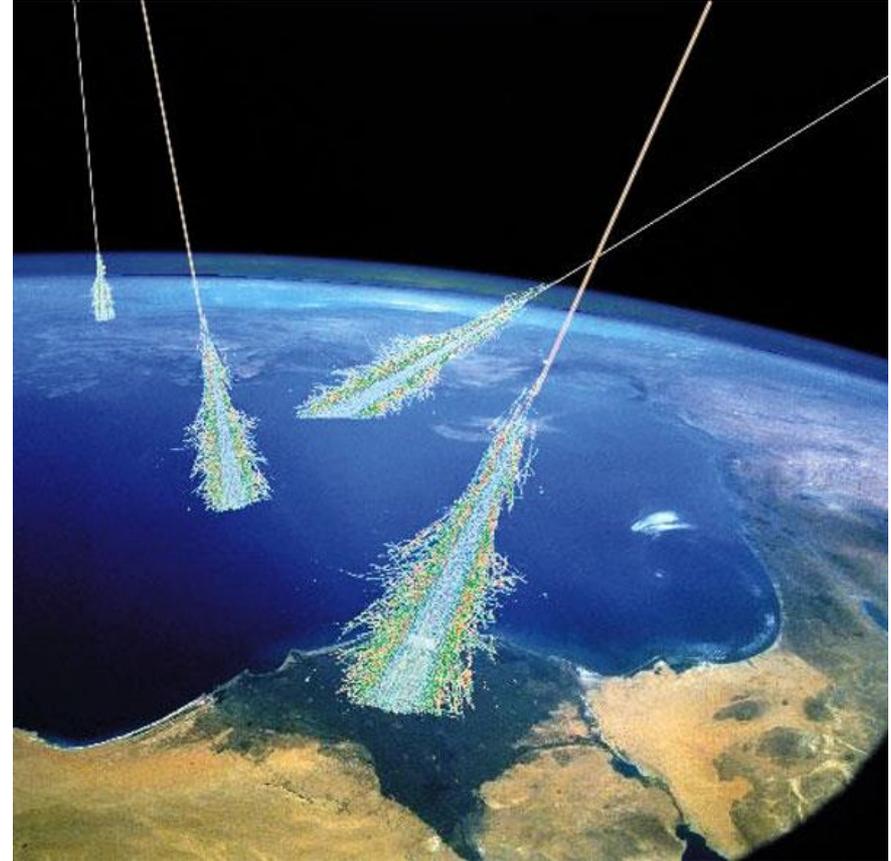




En résumé, de l'équateur vers les pôles, de plus en plus de particules cosmiques ayant une rigidité de plus en plus faible peuvent parvenir au sommet de l'atmosphère.

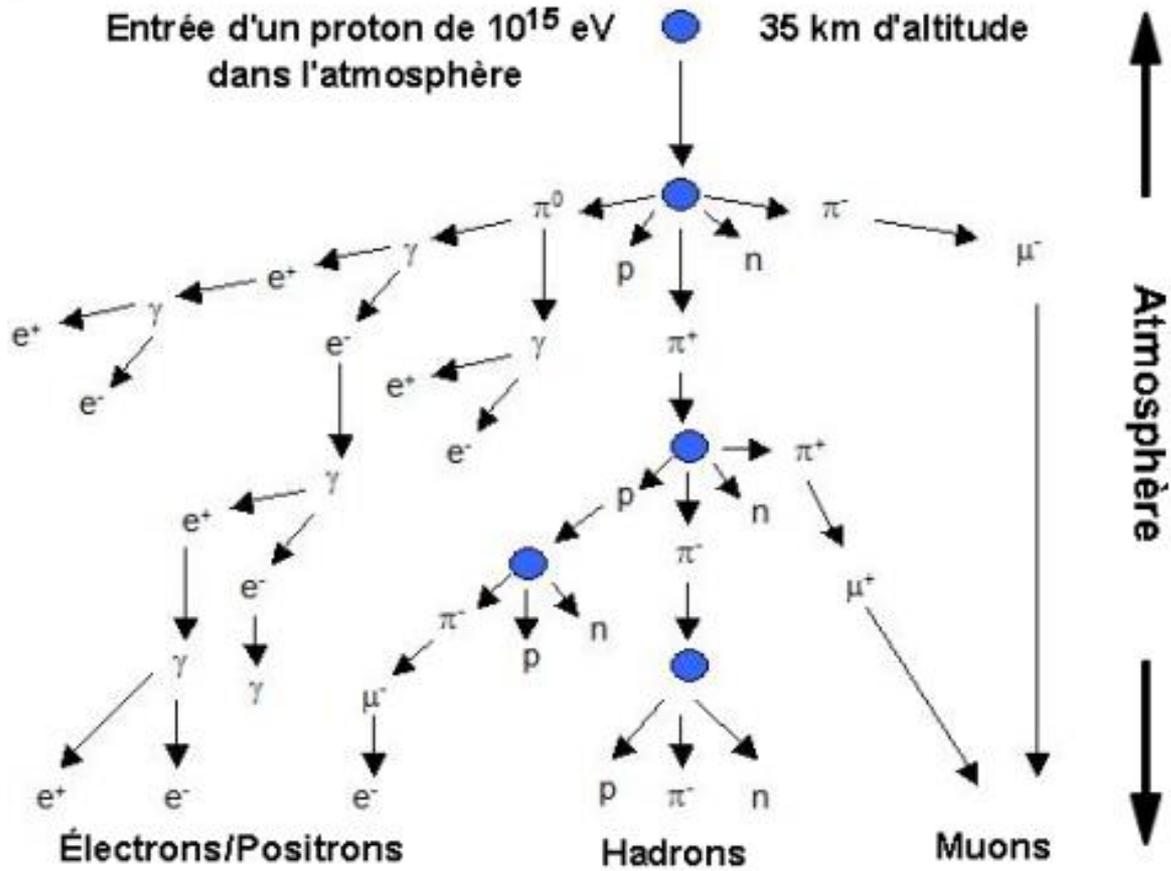


Aux hautes latitudes, le flux de particules cosmiques est d'autant plus faible que l'activité solaire est élevée, et inversement.

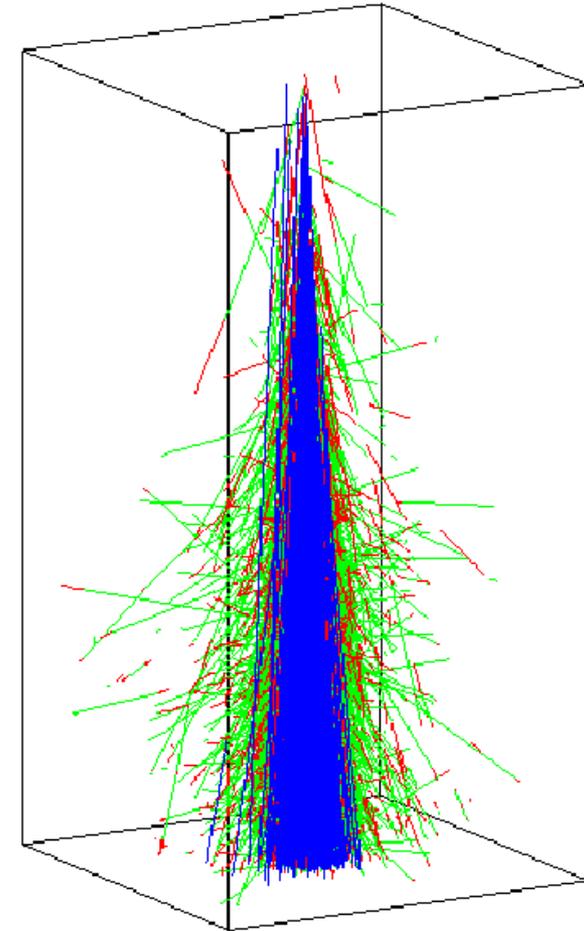


Quand elles frappent les couches supérieures de l'atmosphère, les particules de très haute énergie en provenance de notre galaxie et de galaxies lointaines génèrent des gerbes cosmiques.

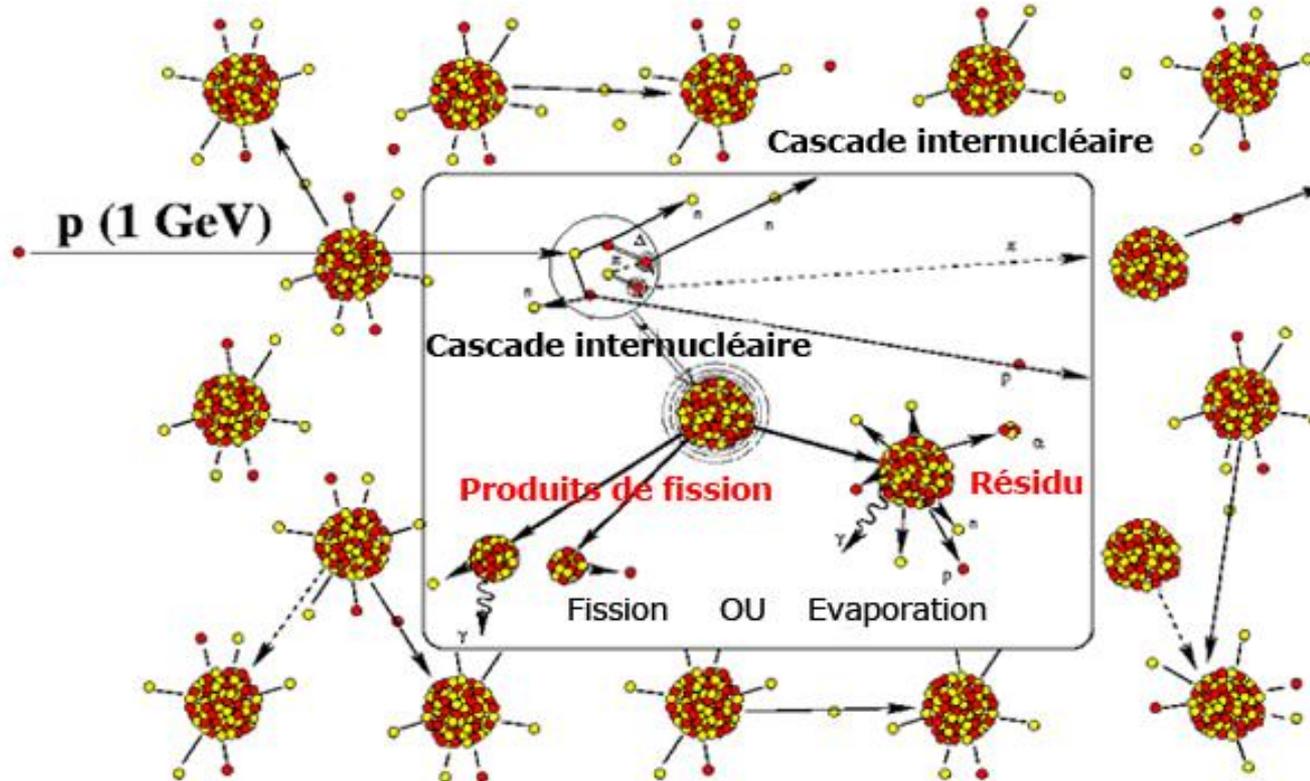
Gerbe atmosphérique.



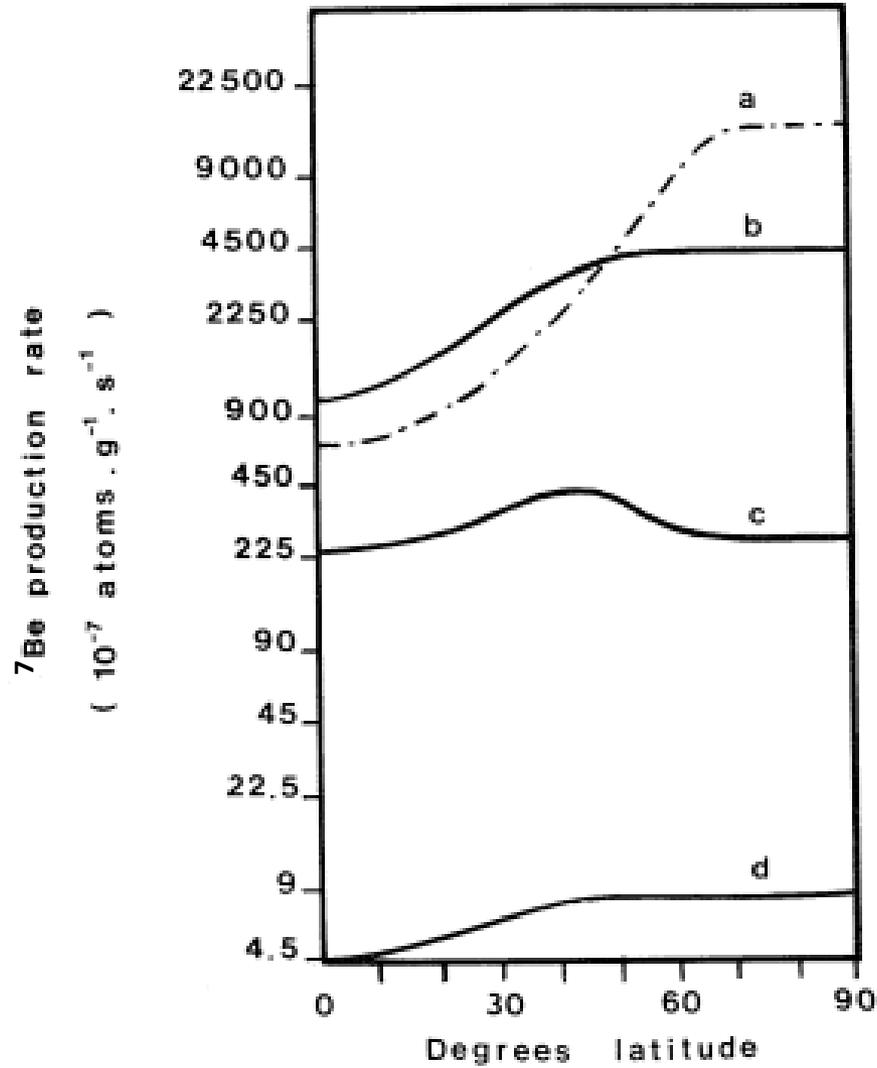
Arrivée au sol de quelque 10^6 particules :
80% γ ; 18% e^-/e^+ ; 1,7% muons ; 0,3% hadrons

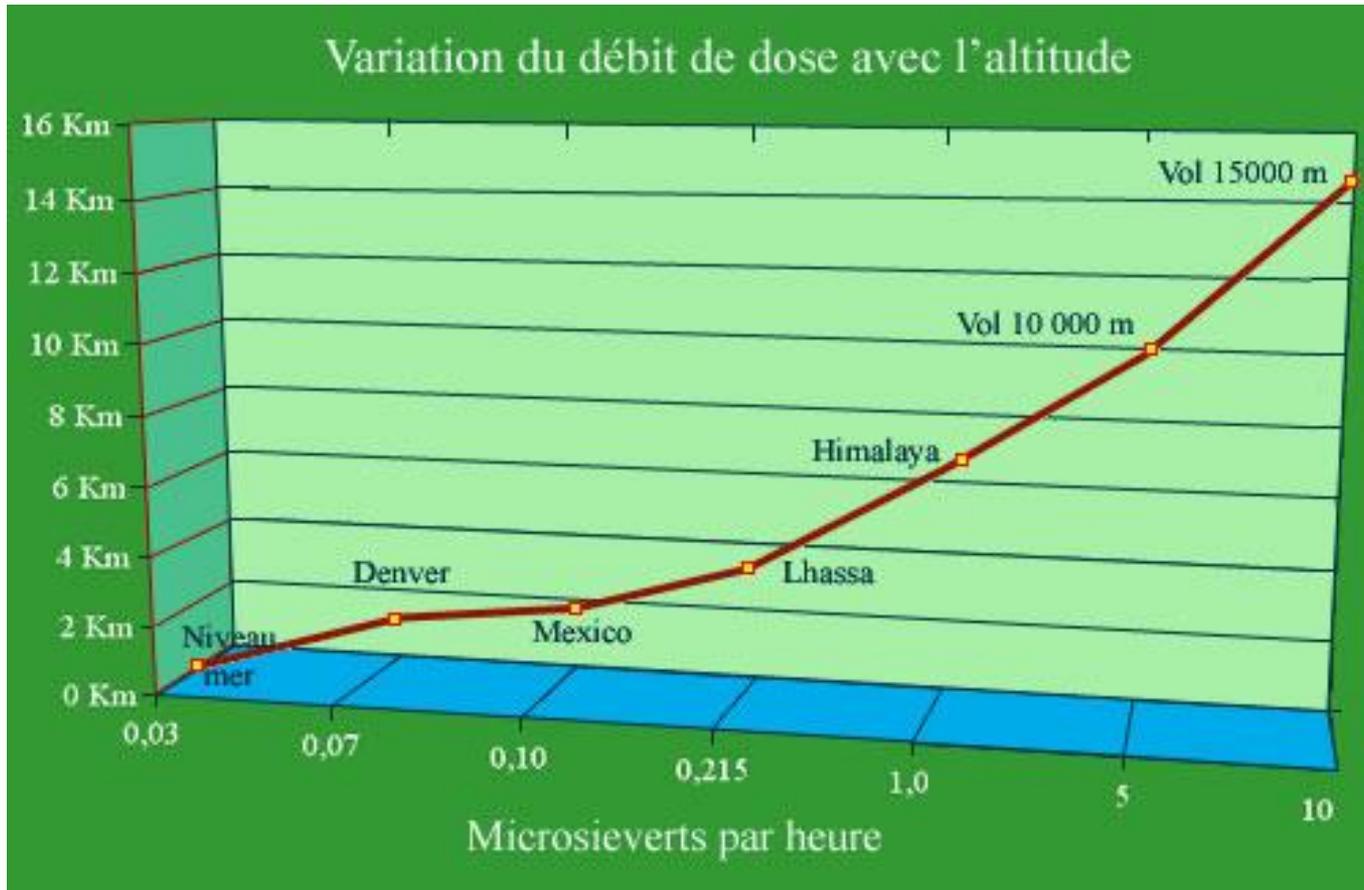


Réaction de spallation.



Dans une réaction de spallation, une particule de haute énergie est envoyée sur une cible qui éjecte alors une gerbe de particules. Parmi elles se trouvent beaucoup de neutrons. Ceux-ci sont ensuite envoyés sur les noyaux que l'on souhaite transformer, transmuter. En effet, lors de sa transmutation, le noyau excité capture des neutrons et ensuite, soit il fissionne, soit il s'évapore en perdant ses particules les plus énergiques.



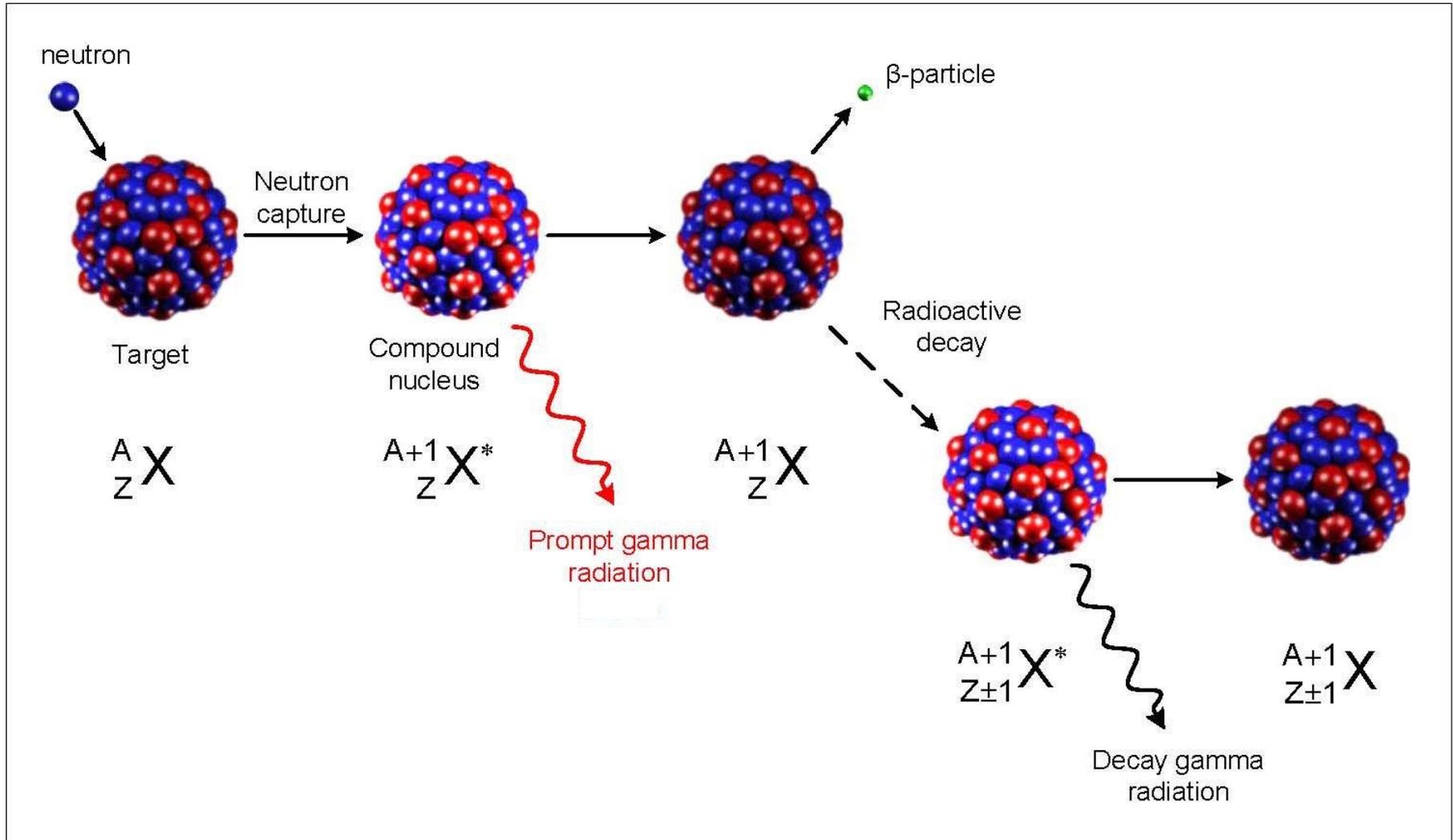


Effets de l'altitude.

L'exposition aux rayons cosmiques, mesurée par le débit de dose, croit avec l'altitude. Le débit de dose est ici mesuré en micro-sieverts par heure (un micro-sievert ou millième de milli-sievert). A titre d'indication la dose d'exposition moyenne à la radioactivité naturelle est de 2 400 micro-sieverts par an.

@IRSN

Capture neutronique.



Nucléides formés par l'action des rayons cosmiques sur les éléments de l'air

<i>Isotope</i>	<i>Mode de formation</i>	<i>Demi-vie</i>
³ H (tritium)	¹⁴ N (n, 12C) ³ H	12,32 a
⁷ Be	Spallation (N et O)	53,22 j
¹⁰ Be	Spallation (N et O)	1,39 × 10⁶ a
¹¹ C	Spallation (N et O)	20,334 min
¹⁴ C	¹⁴ N (n, p) ¹⁴ C	5,73 × 10³ a
¹⁸ F	¹⁸ O (p, n) ¹⁸ F et Spallation (Ar)	109,771 min
²² Na	Spallation (Ar)	2,6027 a
²⁴ Na	Spallation (Ar)	14,9590 h
²⁸ Mg	Spallation (Ar)	20,915 h
²⁶ Al	Spallation (Ar)	7,17 × 10⁵ a
³¹ Si	Spallation (Ar)	157,3 min
³² Si	Spallation (Ar)	170 a
³² P	Spallation (Ar)	14,263 j
^{34m} Cl	Spallation (Ar)	32,00 min
³⁵ S	Spallation (Ar)	5,05 min
³⁶ Cl	³⁵ Cl (n, γ) ³⁶ Cl	3,01 × 10⁵ a
³⁷ Ar	³⁷ Cl (p, n) ³⁷ Ar	35,04 j
³⁸ Cl	Spallation (Ar)	37,24 min
³⁹ Ar	³⁸ Ar (n, γ) ³⁹ Ar	269 a
³⁹ Cl	⁴⁰ Ar (n, np) ³⁹ Cl et Spallation (Ar)	55,6 min
⁴¹ Ar	⁴⁰ Ar (n, γ) ⁴¹ Ar	109,61 min
⁸¹ Kr	⁸⁰ Kr (n, γ) ⁸¹ Kr	2,29 × 10⁵ a

Isotope	Période (ans)	Inventaire		Désintégration Mode, énergie β maximale
		Global (PBq)	mBq/m ³	
Carbone-14	5310	12 750	56,3	β^- (156 keV)
Tritium	12,3	1273	1,4	β^- (18,6 keV)
Beryllium-7	53,3 j	413	12,5	Capture électronique, γ
Beryllium-10	1 510 000	230	0,15	β^- (555 keV)
Argon-39	269	27	6,5	β^- (565 keV)

Principaux radioéléments cosmogéniques

Le carbone-14 et le tritium sont les principaux éléments générés par le rayonnement cosmique. L'inventaire correspond à l'activité totale dans l'atmosphère estimée à l'échelle de la Terre (1 PqQ égale 1 million de giga becquerels). Une partie du carbone-14 est absorbée par les plantes et pour le tritium dans l'eau. Les activités sont de l'ordre de quelques milli-becquerels par mètre cube d'air.

@IN2P3 (Source Cours K.Gerber)

Nucléides cosmogéniques à longue demi-vie communément mesurés

<i>Élément</i>	<i>Masse atomique</i>	<i>Demi-vie (années)</i>	<i>Application</i>
Béryllium	10	1 387 000	Reconstructions paléoclimatiques et paléomagnétiques ; datation de dépôts sédimentaires ; durée d'exposition des roches, sols, ... ; taux de dénudation.
Aluminium	26	720 000	Durée d'exposition des roches ; durée d'enfouissement de roches, sédiments, artefacts archéologiques,...
Chlore	36	308 000	Durée d'exposition des roches carbonatées ; taux de dénudation ; traceur d'eaux souterraines.
Calcium	41	103 000	Durée d'exposition des roches carbonatées.
Iode	129	15,7 millions	Traceur des masses d'eau souterraines et océaniques.

Méthodes de détection

- Comptage des décroissances radioactives.
- Spectrométrie de masse.

Limites des méthodes

- Comptage des décroissances:
 - cibles radiochimiquement très pures
 - quantité de matière importante pour obtenir une statistique satisfaisante en un temps raisonnable
 - pour un taux de comptage constant, la quantité de matière à analyser croît lorsque le taux de production décroît ou lorsque l'âge augmente.

Limites des méthodes

- Spectrométrie de masse

Principalement deux limitations:

- la résolution en masse
- le niveau de séparation

Une bonne résolution en masse ne s'obtient qu'au dépend de l'efficacité. Un compromis raisonnable permet d'obtenir une résolution $M/\Delta M \sim 5\,000$ (M en u.m.a.)

Exemple: ^{14}N et ^{14}C ; $M/\Delta M = 84\,000$

Limites des méthodes

- Spectrométrie de masse

Dans le meilleur des cas, le niveau de séparation atteint est de l'ordre de 10^6 .

Or, par exemple, ^{10}B est au moins 10^8 fois plus abondant que ^{10}Be

Il est donc nécessaire de mettre en œuvre une technique améliorant la sensibilité.

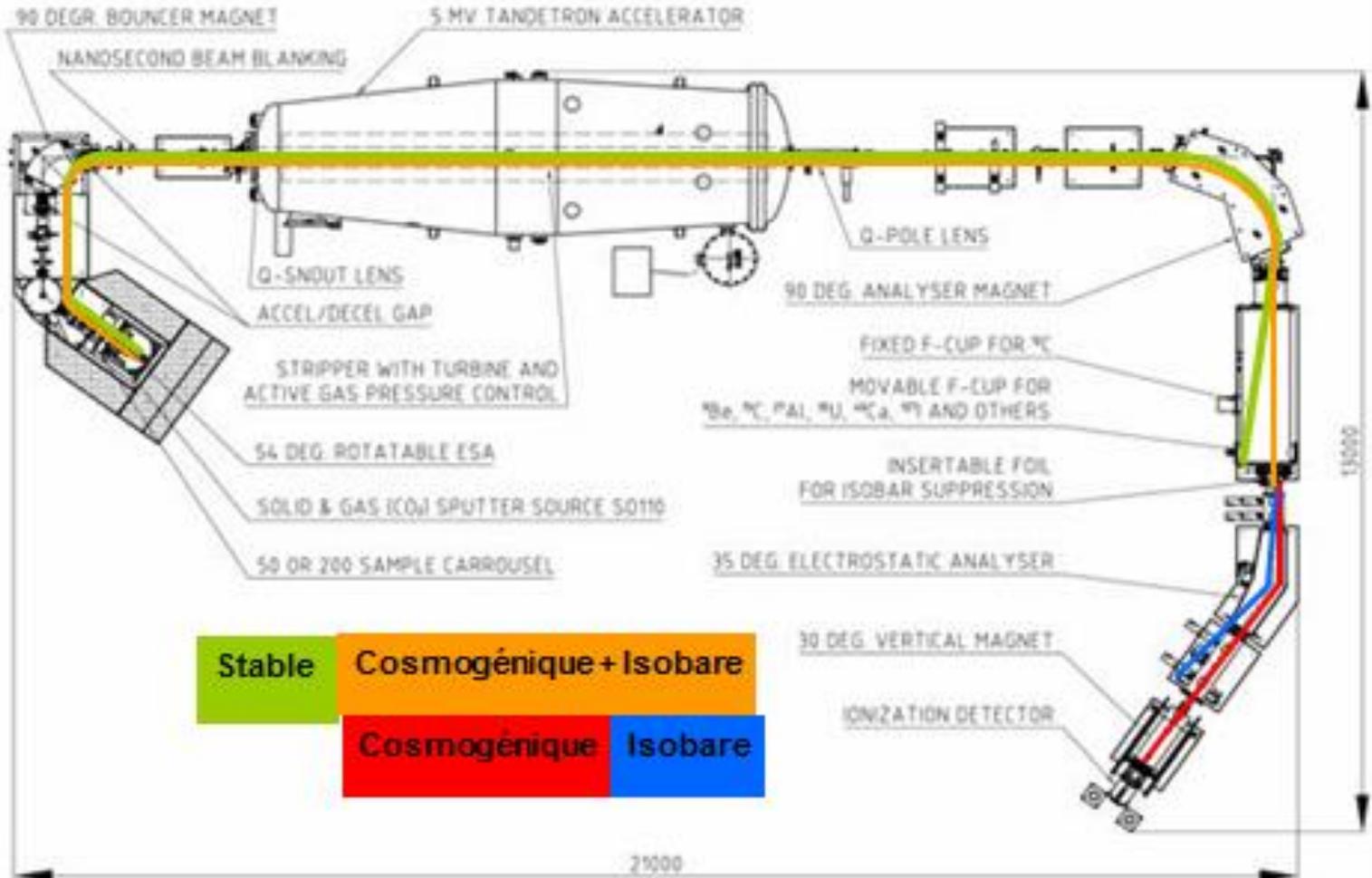
Spectrométrie de masse par accélérateur

- Le principe : compter les atomes
- Caractériser l'atome à la fois par son nombre de masse (N) et son numéro atomique (Z)

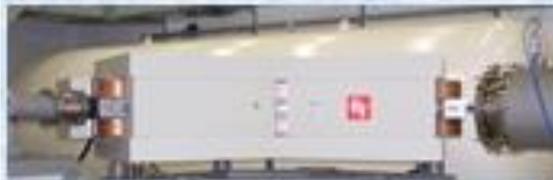
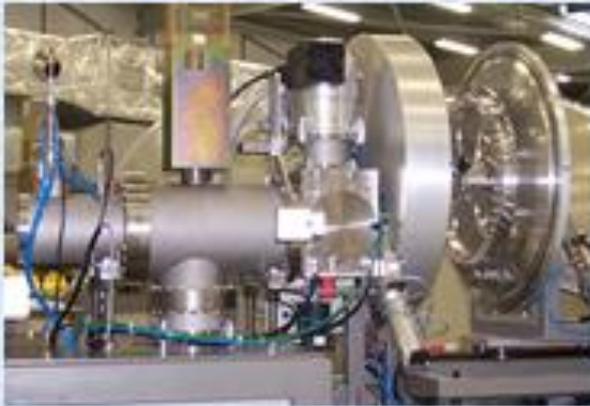
- Loi de Bethe-Bloch :
$$\frac{dE}{dx} = \frac{k(Z_{eff})^2}{v^2}$$

(Z_{eff} le numéro atomique effectif et v la vitesse).

ASTER : Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques



ASTER : Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques



**SPECTROMETRIE DE MASSE PAR
ACCELERATEUR**

**COMPTAGE DES DECROISSANCES
RADIOACTIVES**

LIMITE DE DETECTION

10⁴ ATOMES

10¹⁰ ATOMES

LIMITE DE DATATION

= 10 PERIODES

= 4 PERIODES

CONTRAINTE CHIMIQUE

SIMPLE SEPARATION

CIBLE RADIOCHIMIQUEMENT ULTRE-PURE

TEMPS DE MESURE

QUELQUES MINUTES

QUELQUES JOURS



MERCI POUR VOTRE ATTENTION.