

Les isotopes cosmogéniques

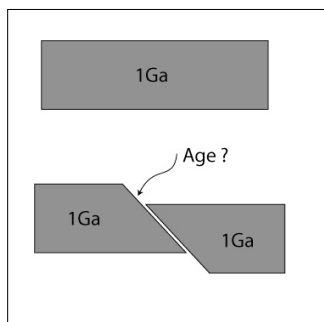
Cours M1 - mesure du temps en géosciences

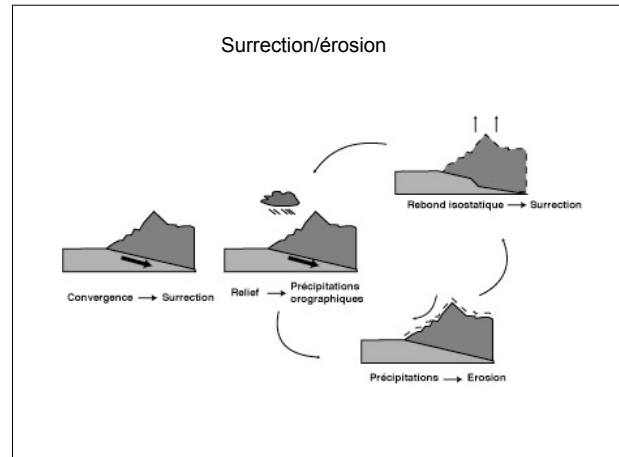
Introduction

*Comment déterminer des taux d'érosion

*Comment dater des surfaces ?

*Exemple des failles, coulées volcaniques, éboulements, moraines glaciaires





1. Les isotopes cosmogéniques

- * Exemple le plus célèbre: le ^{14}C
- * Réaction de *spallation* dans l'atmosphère: $^{14}\text{N} + n \Rightarrow ^{14}\text{C} + p$
(notation $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$)
- * Radioactif ($T_{1/2} = 5400\text{ans}$)

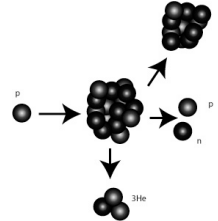
Familles de particules, réactions nucléaires,

- * Le photon
 - * Les Leptons (e^-, e^+ , muons, neutrinos)
Interactions faibles
 - * Les Mésons (pions, kaons)
 - * Les baryons (nucléons, ...)
- } Hadrons
Interactions fortes

	Masse	Charge
Electron (e)	0,00051 GeV/c ²	-1
Neutrino (ν_e)	<8 eV/c ²	0
Muon (μ)	0,106 GeV/c ²	-1
Neutrino (ν_μ)	<250 keV/c ²	0
Tau (τ)	1,784 GeV/c ²	-1
Neutrino (ν_τ)	<35 MeV/c ²	0

Spallation

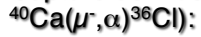
Emission of nuclear particles by bombardment: a nuclear reaction in which several particles are emitted from the nucleus of an atom after bombardment with high-energy particles or radiation



Quelques processus nucléaires (en dehors des réactions de spallation)

* Capture de neutron

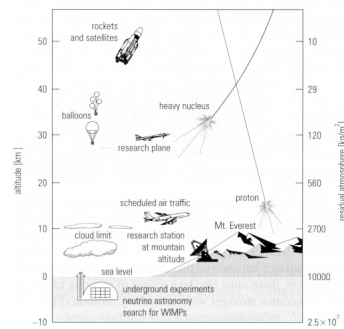
* Capture de muons (μ^-) par le noyau (ex:

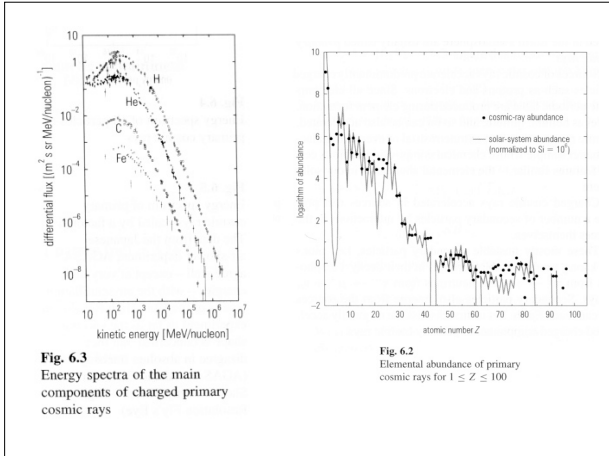


* En fait: $\mu^- + p \Rightarrow \nu + n$, donc:



Le rayonnement cosmique

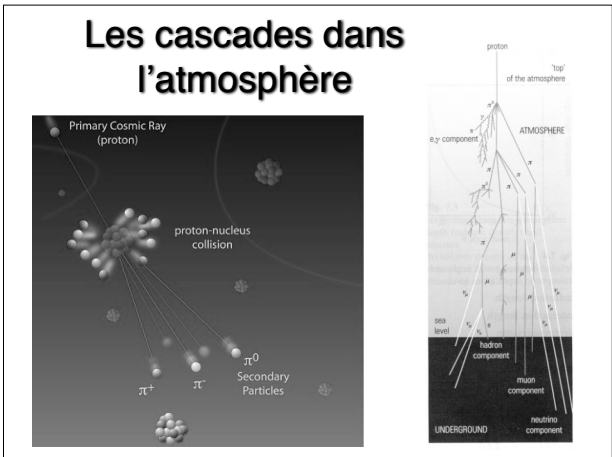
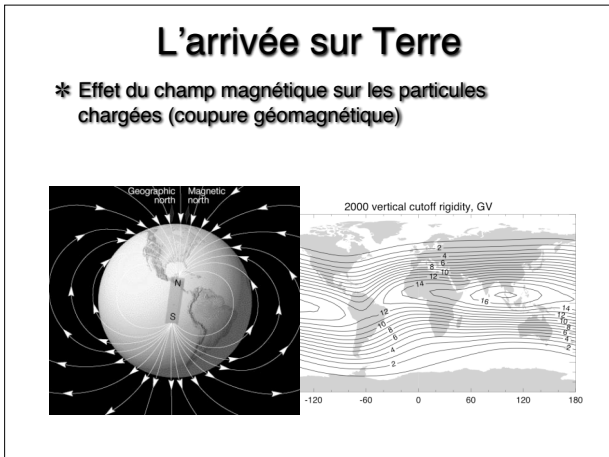




Origine

- * Novae $E < 10^{12} \text{eV}$
- * Supernovae $E < 10^{15} \text{eV}$
- * Pulsars $E < 10^{18} \text{eV}$

*** Soleil ne participe pas aux rayons cosmiques (sauf quelques éruptions solaires rares $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{eV}$)**



Les profondeurs en g/cm²

*On utilise souvent les profondeurs (atmosphère, roches) non pas en cm mais en g/cm².

$$*L(\text{g/cm}^2) = L(\text{cm}) \times \rho(\text{g/cm}^3)$$

(utile pour comparer des longueurs caractéristiques de matériaux différents)

Pression atmosphérique

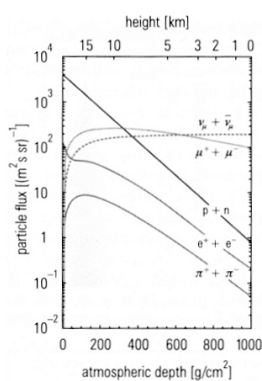
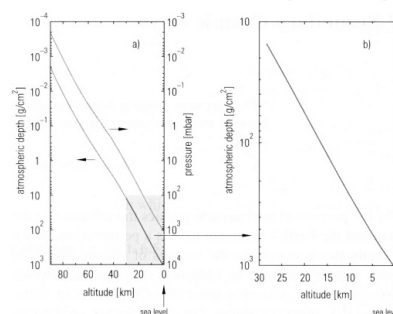


Fig. 7.10 Intensities of cosmic-ray particles with energies > 1 GeV in the atmosphere

2. Taux de production d'isotopes cosmogéniques

*Isotopes cosmogéniques dans les roches

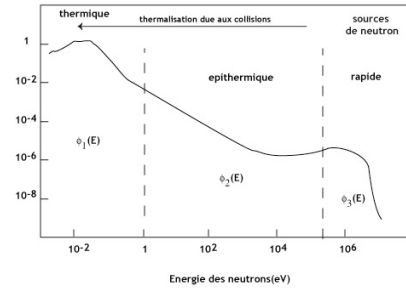
*Les paramètres qui influent le taux de production

Les neutrons

*3 « types » de neutrons:

- * Rapides
- * Épithermiques
- * Thermiques (thermalisés)

flux normalisé de neutrons ($n/cm^2/s/eV$)

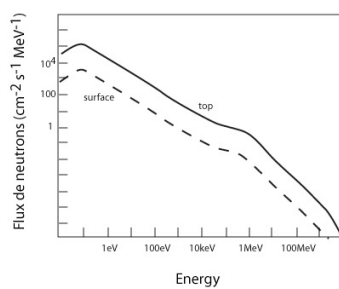


$$\phi_{\text{therm}} = \int \phi_1(E) dE$$

$$\phi_{\text{epi}} = \int \phi_2(E) dE$$

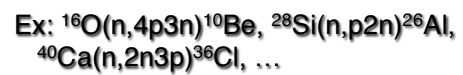
$$\phi_{\text{rap}} = \int \phi_3(E) dE$$

Spectre d'énergie des neutrons à la surface

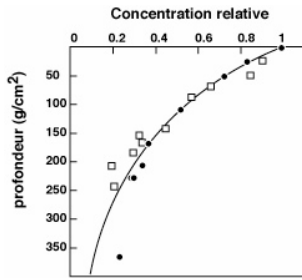


Réactions de spallation

* Les neutrons vont casser les atomes de la roche:



Variation avec la profondeur



Notion de longueur d'atténuation:

$$P(z) = P(z=0) e^{-z/\Lambda}$$

Où Λ est appelée longueur d'atténuation (en g/cm²)

Longueur typique: 160g/cm² dans le basalte

Les muons

* Capture de μ^- .

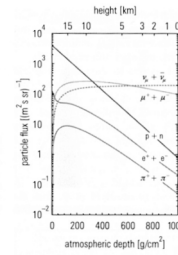
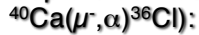


Fig. 7.10 Intensities of cosmic-ray particles with energies > 1 GeV in the atmosphere

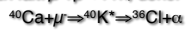


Capture de muons

* Capture de muons (μ^-) par le noyau (ex:

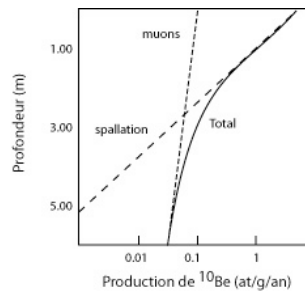


* En fait: $\mu^- + p \Rightarrow \nu + n$, donc:



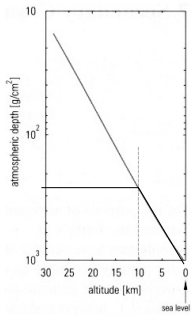
On peut produire tous les isotopes cosmogéniques « classiques » (¹⁰Be, ²⁶Al, ³⁶Cl)

Capture de muons négligeable à la surface



Important quand érosion

Variation avec l'altitude



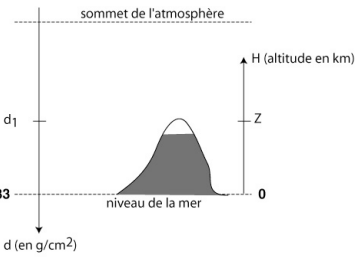
* Longueur d'atténuation dans l'air:

$$\Lambda = 165 \text{ g/cm}^2$$

* Conversion altitude en km en épaisseur d'atmosphère en g/cm^2 :

$$d \sim 1033 e^{-0.1305H}$$

Avec H en km



AN:
à 3000m:
Le taux de production
est 7.6 fois celui du
niveau de la mer

taux de production τ :

$$\tau(d_1) = \tau(d=0) \exp(-d_1/\Lambda)$$

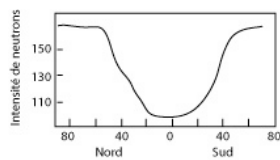
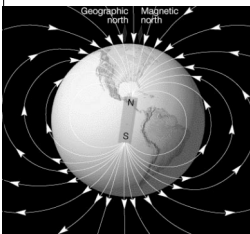
$$\tau(d=1033) = \tau(d=0) \exp(-1033/\Lambda)$$

$$\longrightarrow \tau(d_1) = \tau_0 \exp([1033-d_1]/\Lambda)$$

où τ_0 est le taux de production au niveau de la mer
et $d_1 = 1033 \exp(-0.1305 Z)$

Effet de latitude

* En raison du champ magnétique terrestre, les taux de production dépendent de la latitude



Polynôme (de Lal)

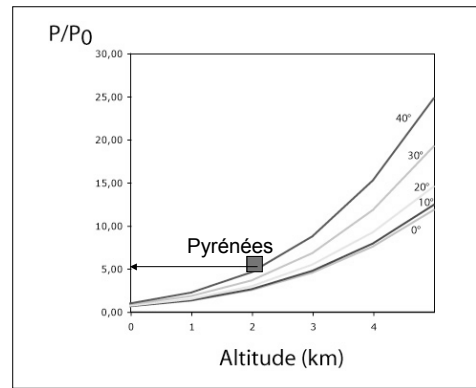
* On utilise un polynôme pour avoir le taux de production en fonction de la latitude et de l'altitude:

$$* P(\lambda, h)/P_0 = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3$$

Où h est l'altitude (en km), λ la latitude et P_0 le taux de production au niveau de la mer à haute latitude.

latitude	a_0	a_1	a_2	a_3
0	0,587	0,454	0,175	0,036
10	0,600	0,447	0,197	0,037
20	0,678	0,483	0,235	0,044
30	0,833	0,700	0,174	0,084
40	0,933	0,897	0,252	0,104
50	1,014	1,044	0,303	0,135
60-90	1,000	1,104	0,315	0,140

Polynome de Lal:
 $P(\lambda, h)/P_0 = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3$



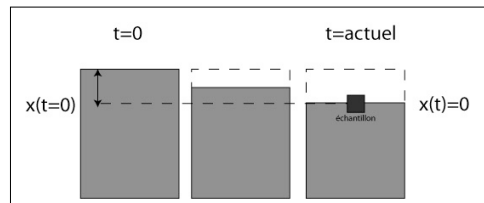
P_0 = taux de production au niveau de la mer à haute latitude

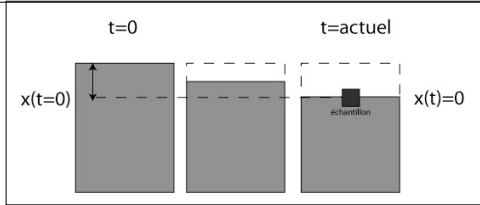
4. Théorie

- * Cas général: $N = P \times \text{temps}$
- * Si on mesure N au laboratoire, si on connaît P (le taux de production) on en déduit le temps d'exposition.

Deux paramètres importants:

- * Le champ magnétique varie: $P = P(t)$
- * Il y a de l'érosion: $P(x) \neq P(x=0)$





$$X(t) = x_0 - \varepsilon t$$
 si l'érosion est constante
 et,

$$P(x) = P(x=0) \exp(-x(t)/\Lambda)$$

$$= P(x=0) \exp(-[x_0 - \varepsilon t]/\Lambda)$$

$$* \frac{dN(x,t)}{dt} = P(x,t) - \lambda N(x,t)$$
 = production-désintégration radioactive

$$* P(x,t) = P_0 \exp(-[x_0 - \varepsilon t]/\Lambda)$$

* Solution:

$$N(t) = \frac{P_0 e^{-x_0/\Lambda}}{\varepsilon/\Lambda + \lambda} \left\{ e^{\varepsilon/\Lambda t} - e^{-\lambda t} \right\}$$

Si on prélève l'échantillon à la surface: $x=0 = x_0 - \varepsilon t$

$$N(t) = \frac{P_0}{\varepsilon/\Lambda + \lambda} \left\{ 1 - e^{-(\lambda + \varepsilon/\Lambda)t} \right\}$$

* Pour deux isotopes:

$$\frac{N_1}{N_2}(t) = \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \left(\frac{\varepsilon/\Lambda + \lambda_2}{\varepsilon/\Lambda + \lambda_1} \right) \left\{ \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \varepsilon/\Lambda)t}}{1 - e^{-(\lambda_2 + \varepsilon/\Lambda)t}} \right\}$$

(on supprime les problèmes de variation de champ magnétique, de latitude et d'altitude)

Exemple: ^{10}Be et ^{26}Al