

L'évolution des paysages.

Prof. D.L. Bourlès

CEREGE

UMR 7330

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

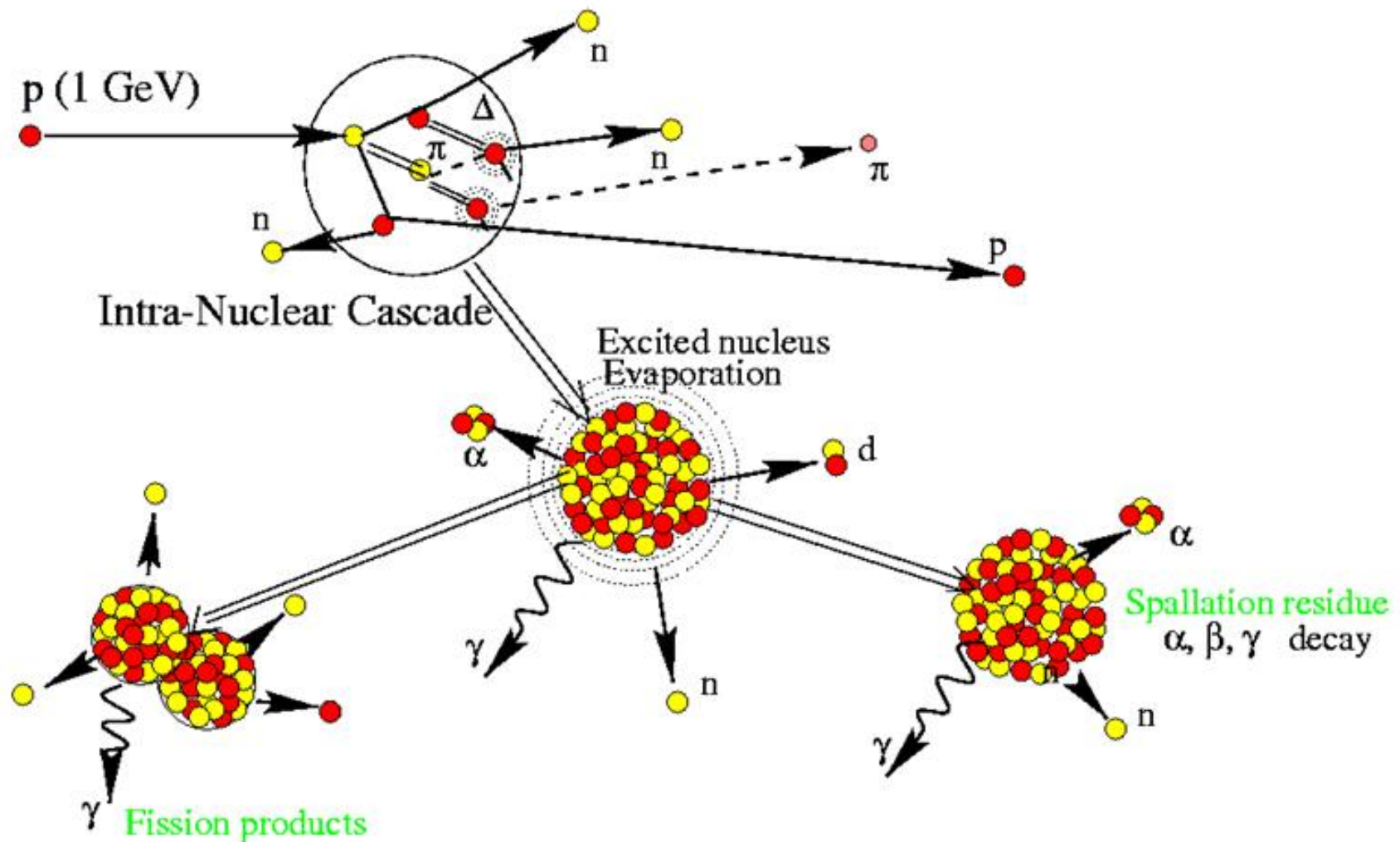
Nucléides cosmogéniques

Terme générique désignant l'ensemble des nucléides formés dans l'environnement terrestre lors de réactions nucléaires induites par les particules constituant le rayonnement cosmique.

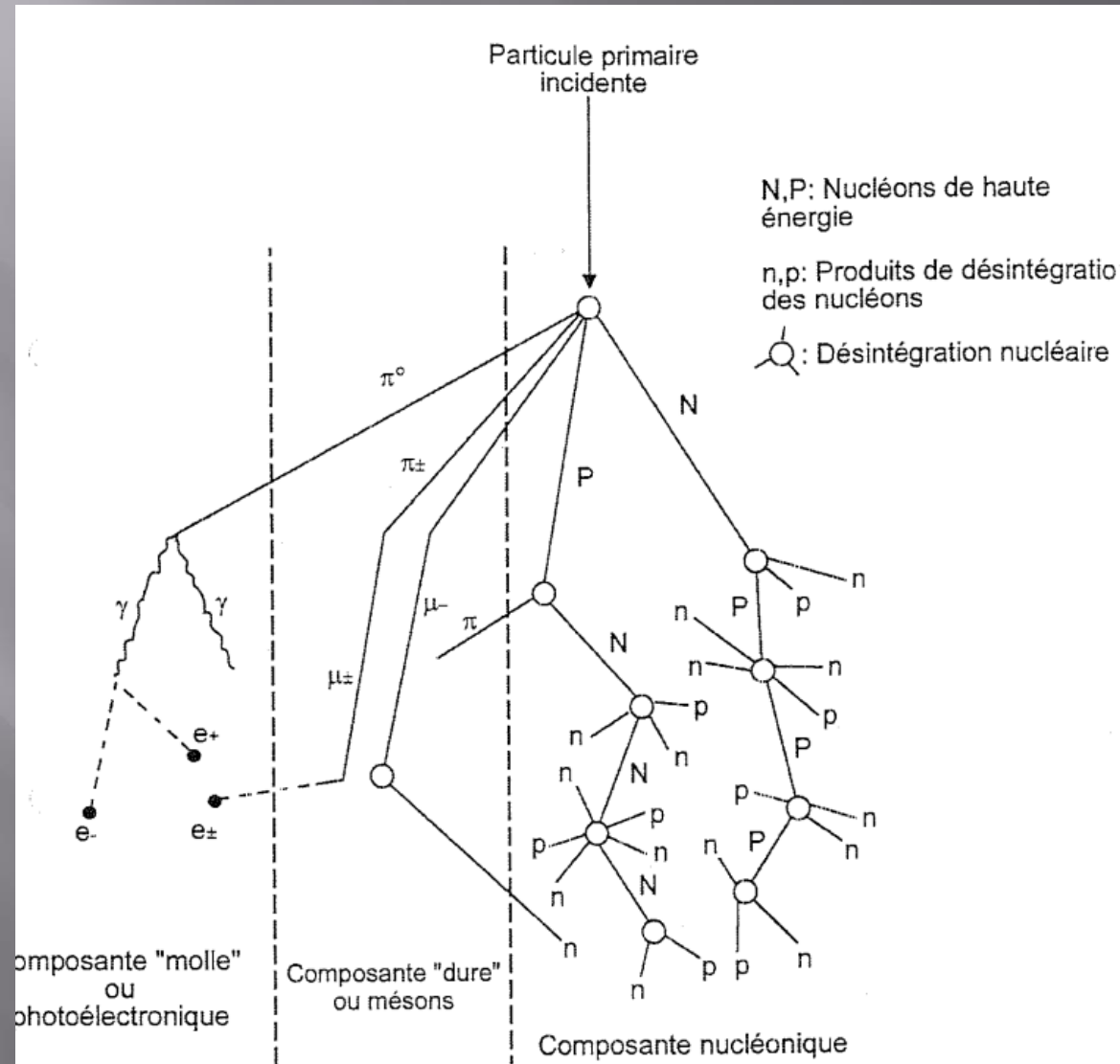
Rayonnement cosmique

Il est essentiellement constitué de protons (p) et de noyaux d'hélium (particules α) tel que $10 \leq (p / \alpha) \leq 20$. On y trouve aussi 1% de noyaux plus lourds et des électrons.

Réaction de spallation



Gerbe atmosphérique.



La cascade nucléaire issue de l'interaction rayons cosmiques/atmosphère

Taux de production des nucléides cosmogéniques

Dans l'atmosphère, comme dans la lithosphère, le taux de production des nucléides cosmogéniques décroît exponentiellement avec la masse de matière traversée selon une longueur caractéristique, la longueur d'atténuation (L en g.cm^{-2}), caractéristique du type de particules interagissant.

En première approximation, la variation de la concentration (N) en fonction de la profondeur (x) peut être modélisée en utilisant la relation :

$$N_{(x)} = N_{(0)} e^{-x/L}$$

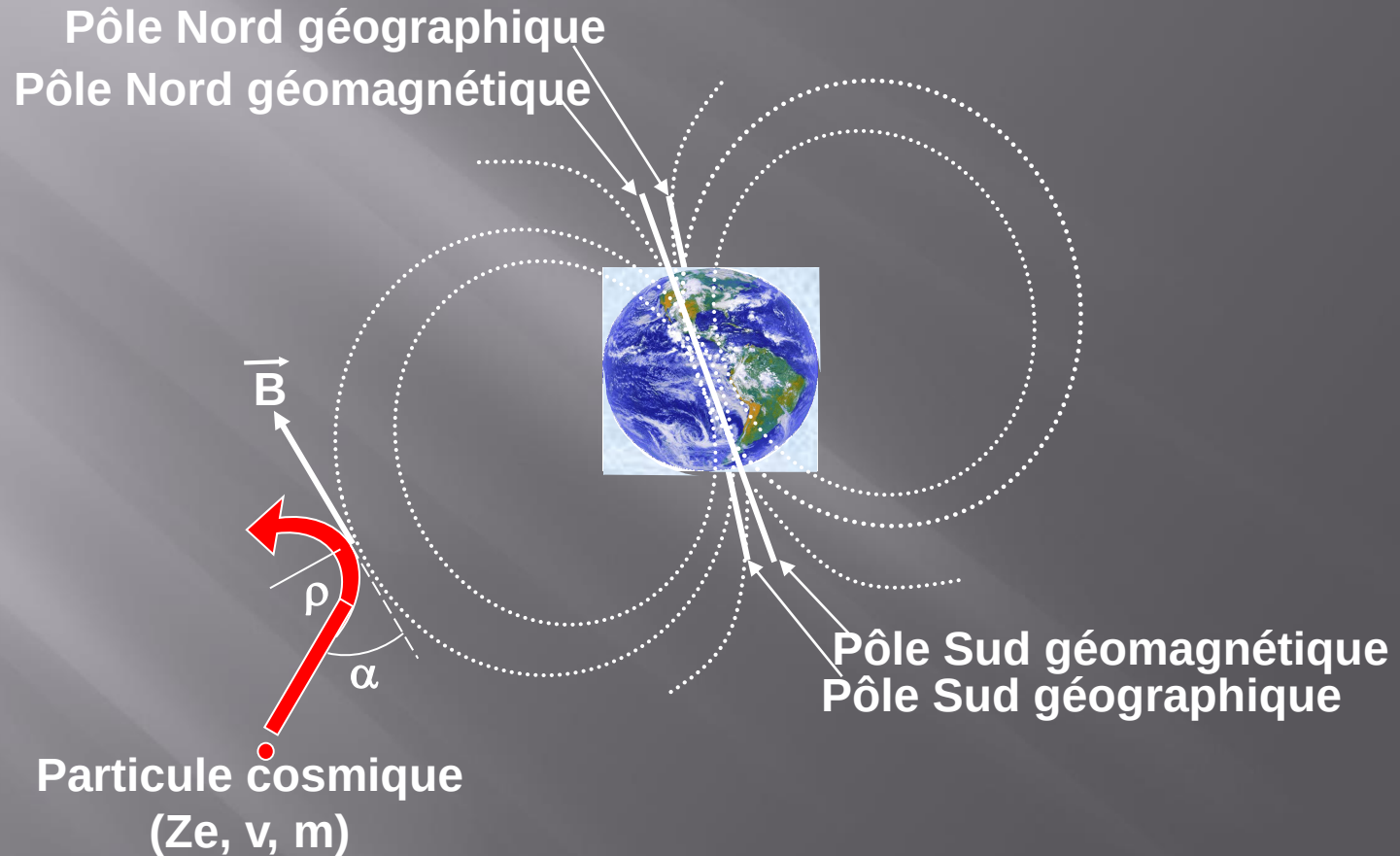
Taux de production des nucléides cosmogéniques

Le plus grand nombre des réactions nucléaires induites par les rayons cosmiques le sont dans l'atmosphère.

Toutefois, du fait de la rapide dissipation de l'énergie, le flux de particules énergétiquement efficaces décroît rapidement avec la profondeur d'atmosphère traversée.

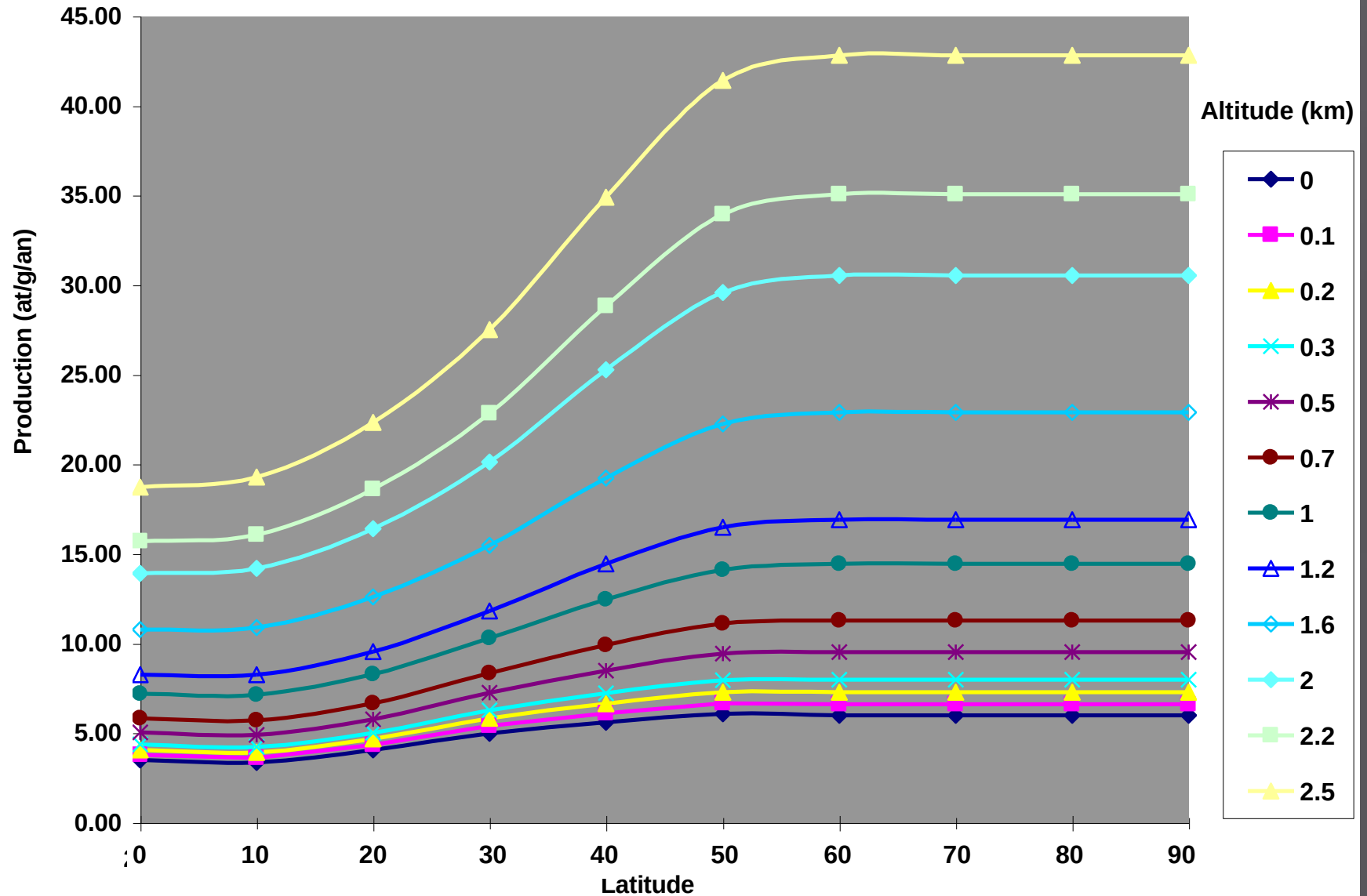
En conséquence, le taux de production des nucléides cosmiques dépend également de l'altitude.

Dépendance latitudinale de la production



$$B \cdot \rho \cdot c = (m \cdot v \cdot c) / Ze \cdot \sin \alpha$$

Dépendance altitudinale et latitudinale de la production



Principaux nucléides cosmogéniques

^3He	stable	O, Mg, Si, Ca, Fe, Al $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$
^{10}Be	1,387 Ma	<u>$^{16}\text{O}(n,4p3n)^{10}\text{Be}$</u> ; <u>$^{14}\text{N}(n,3p4n)^{10}\text{Be}$</u> ; $^{28}\text{Si}(n,x)^{10}\text{Be}$; <u>$^{16}\text{O}(\mu^-, \alpha pn)^{10}\text{Be}$</u> $^{28}\text{Si}(\mu^-, x)^{10}\text{Be}$; $^7\text{Li}(\alpha, p)^{10}\text{Be}$; $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$; $^{10}\text{B}(n, p)^{10}\text{Be}$; $^{13}\text{C}(n, \alpha)^{10}\text{Be}$
^{14}C	5,73 ka	<u>$^{16}\text{O}(n,2pn)^{14}\text{C}$</u> ; $^{28}\text{Si}(n,x)^{14}\text{C}$; <u>$^{16}\text{O}(\mu^-, 2p)^{14}\text{C}$</u> ; <u>$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$</u> ; <u>$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$</u> ; $^{11}\text{B}(\alpha, p)^{14}\text{C}$
^{21}Ne	stable	Mg, Na, Al, Fe, and Si; $^{16}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}$; $^{19}\text{F}(\alpha, pn)^{21}\text{Ne}$
^{26}Al	717 ka	$^{28}\text{Si}(n,p2n)^{26}\text{Al}$; $^{28}\text{Si}(\mu^-, 2n)^{26}\text{Al}$; $^{23}\text{Na}(\alpha, n)^{26}\text{Al}$
^{36}Cl	301 ka	$^{40}\text{Ca}(n,2n3p)^{36}\text{Cl}$; $^{39}\text{K}(\mu^-, p2n)^{36}\text{Cl}$; $^{40}\text{Ca}(\mu^-, \alpha)^{36}\text{Cl}$; $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$; $^{39}\text{K}(n, \alpha)^{36}\text{Cl}$

Méthodes de détection

- Comptage des décroissances radioactives.
- Spectrométrie de masse.

Limites des méthodes

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

EXEMPLE

Taux de production de ^{10}Be : 100 fois inférieur
à celui ^{14}C

Période de ^{10}Be : 300 fois supérieure
à celle ^{14}C

Radioactivité ^{10}Be : 30.000 fois inférieure
à celle ^{14}C

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 ; $M/\Delta M = 84\,000$

10	4	14	BE	-NN	40970	SYST	68900	SYST	17320	SYST	14..04399
9	5		B	+	23657	30	85431	30	20637	30	14..025397
8	6		C		3019..922	0..024	105285..73	0..39	156..478	0..009	14..003241993
7	7		N		2863..444	0..023	104659..81	0..38	-5144..9	0..5	14..003074008
6	8		U		8008..3	0..5	98732..5	0..6	-25600	SYST	14..0085972
5	9		F	-	33610	SYST	72350	SYST	*		14..03608



$$14,003241993/(14,003241993-14,003074008)=83.357,6$$

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 à la fois le niveau de séparation et les limites de détection.

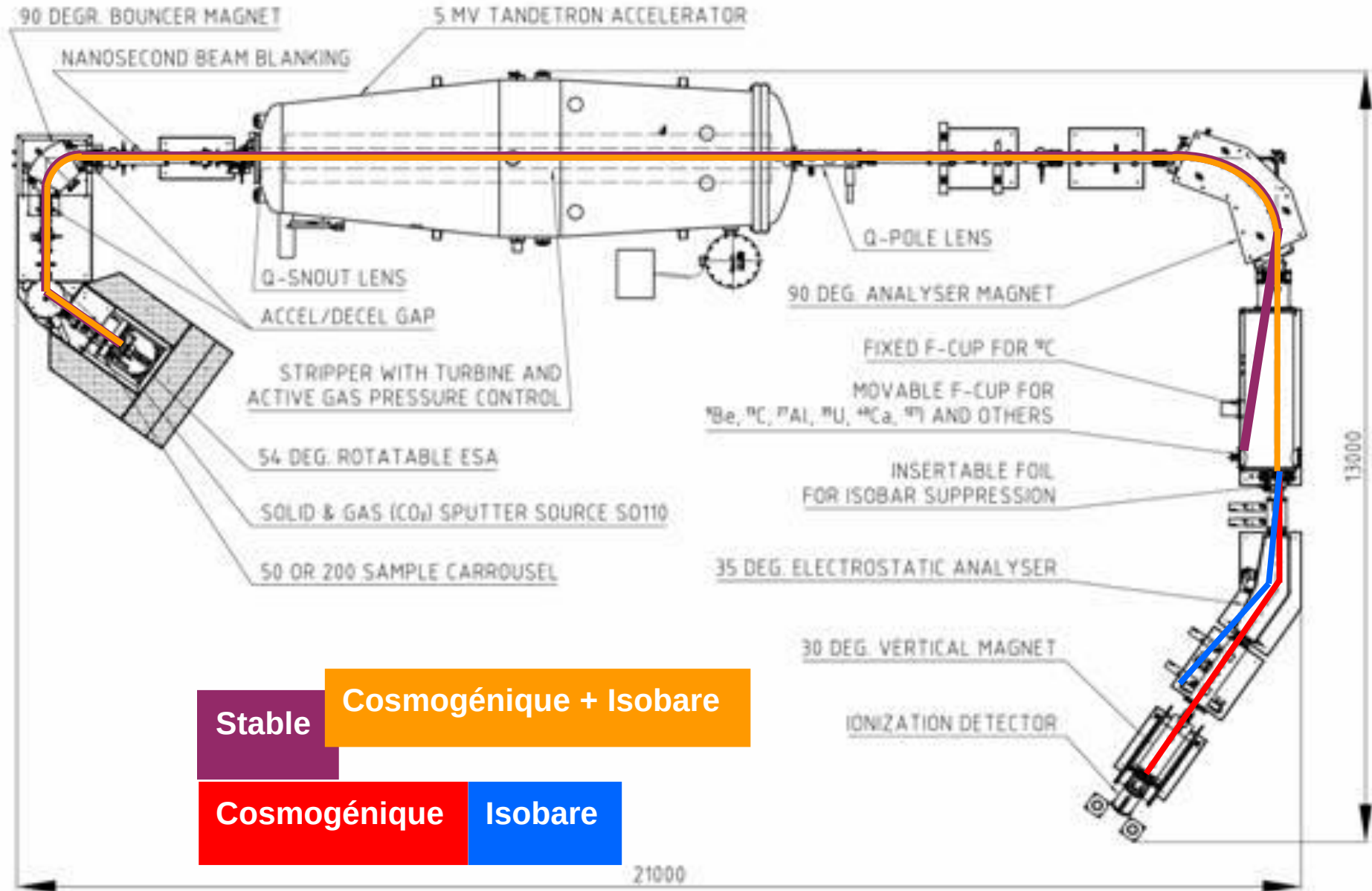
Spectrométrie de Masse par Accélérateur

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

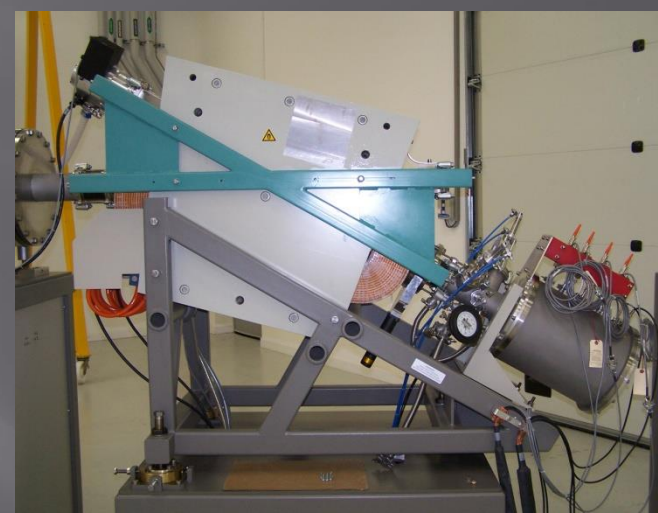
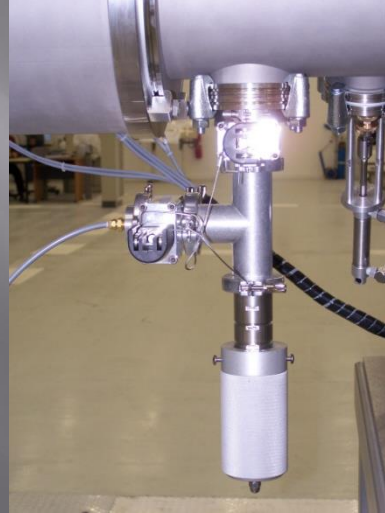
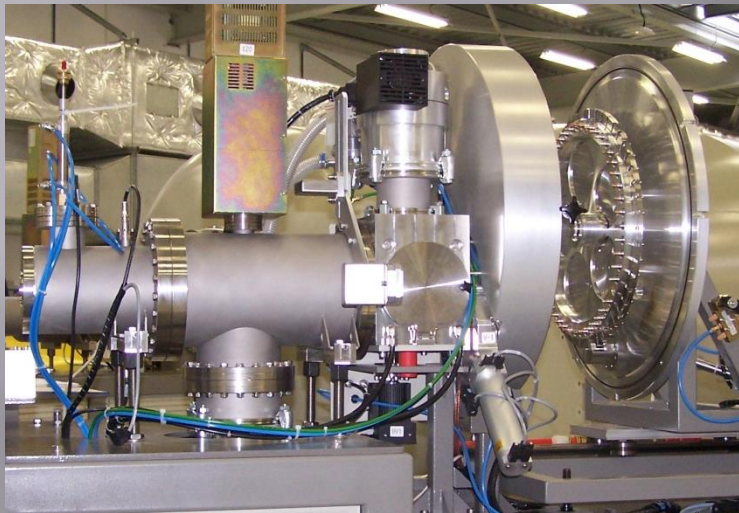
- Loi de Bethe-Bloch :
$$\frac{dE}{dx} = \frac{k(Z_{eff})^2}{v^2}$$

(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

10^4 ATOMES

10^{10} ATOMES

LIMITE DE DATATION

≈ 10 PERIODES

≈ 4 PERIODES

CONTRAINTE CHIMIQUE

SIMPLE SEPARATION

CIBLE RADIOCHIMIQUEMENT ULTRE-PURE

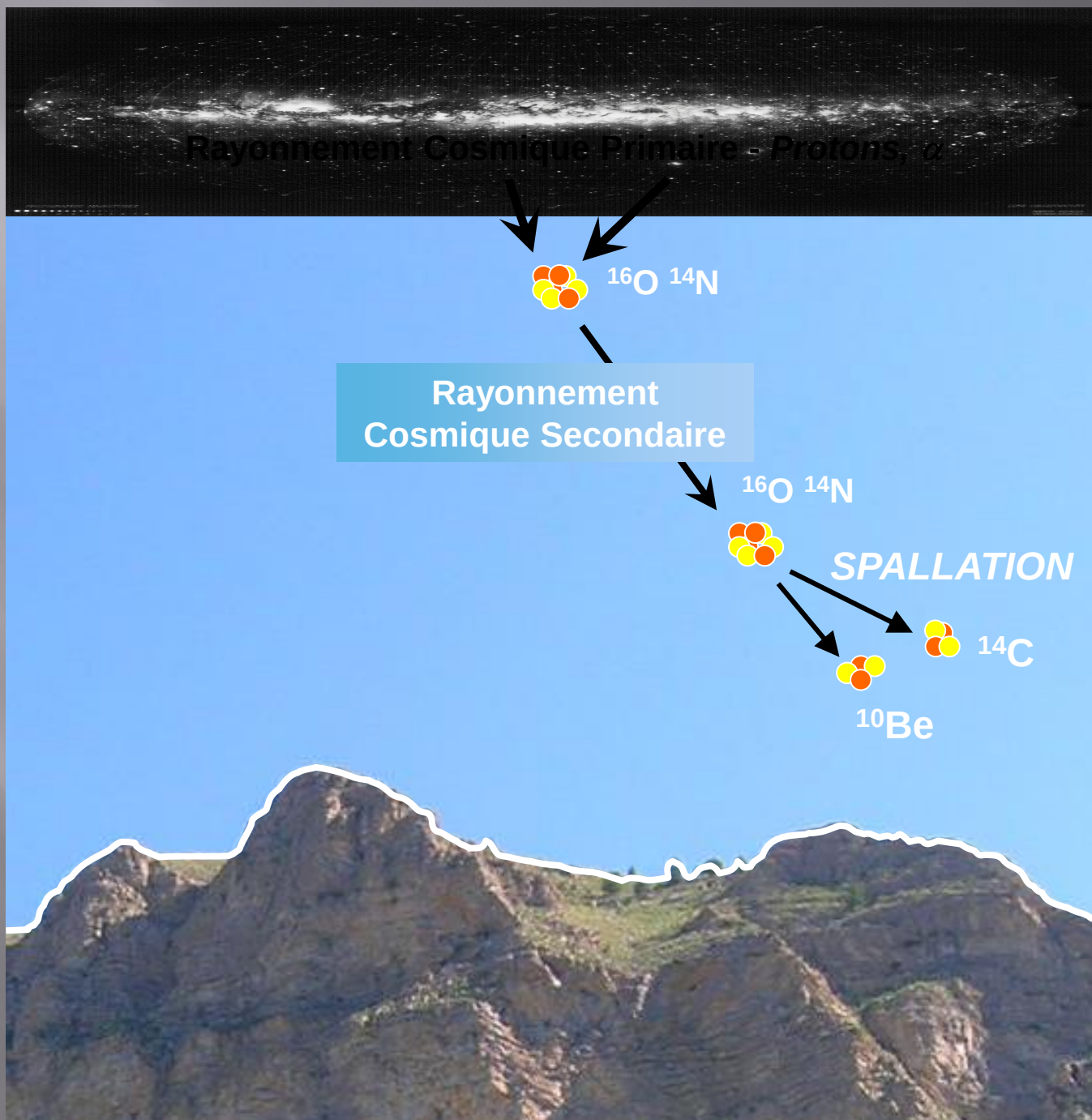
TEMPS DE MESURE

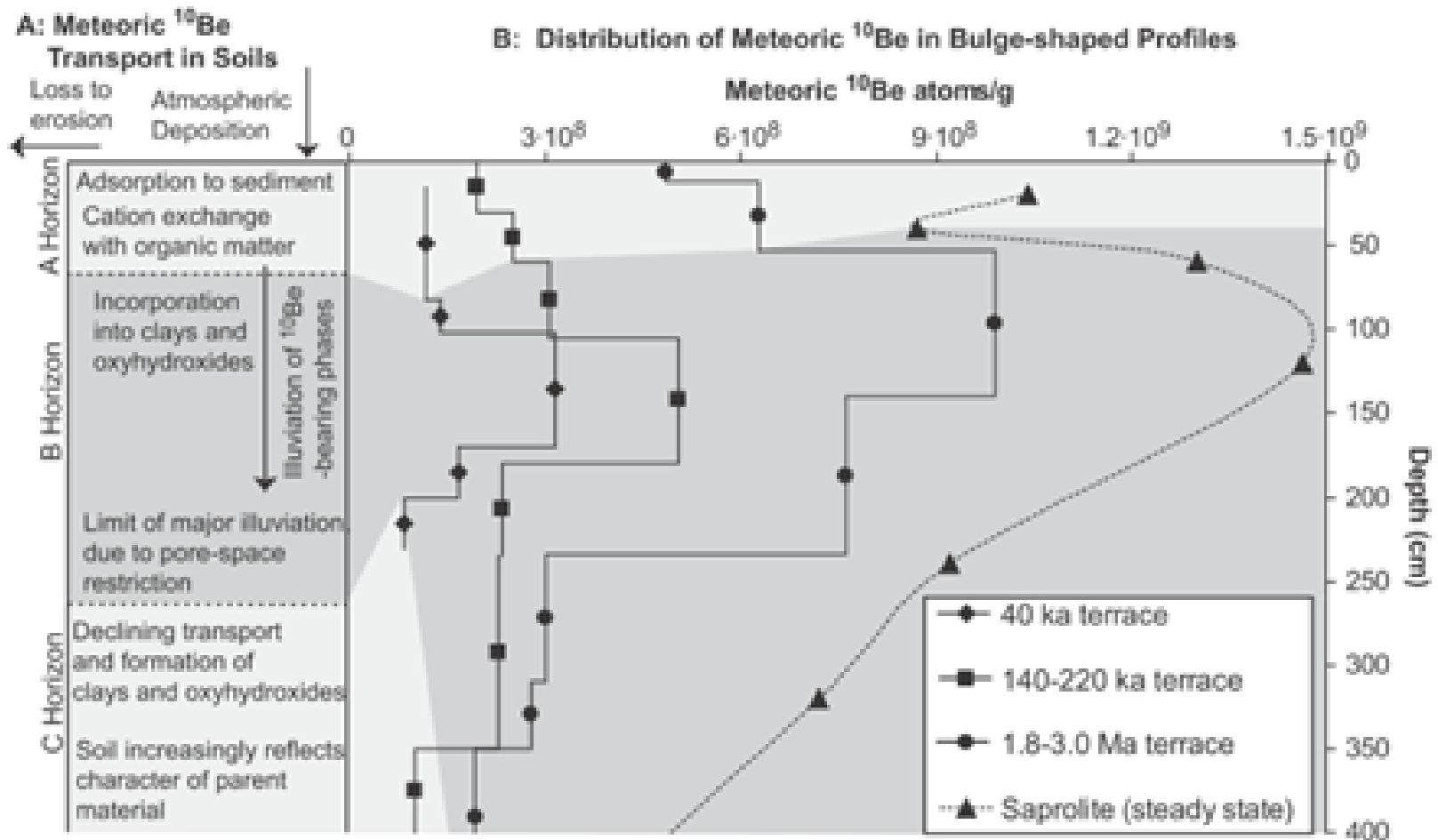
QUELQUES MINUTES

QUELQUES JOURS

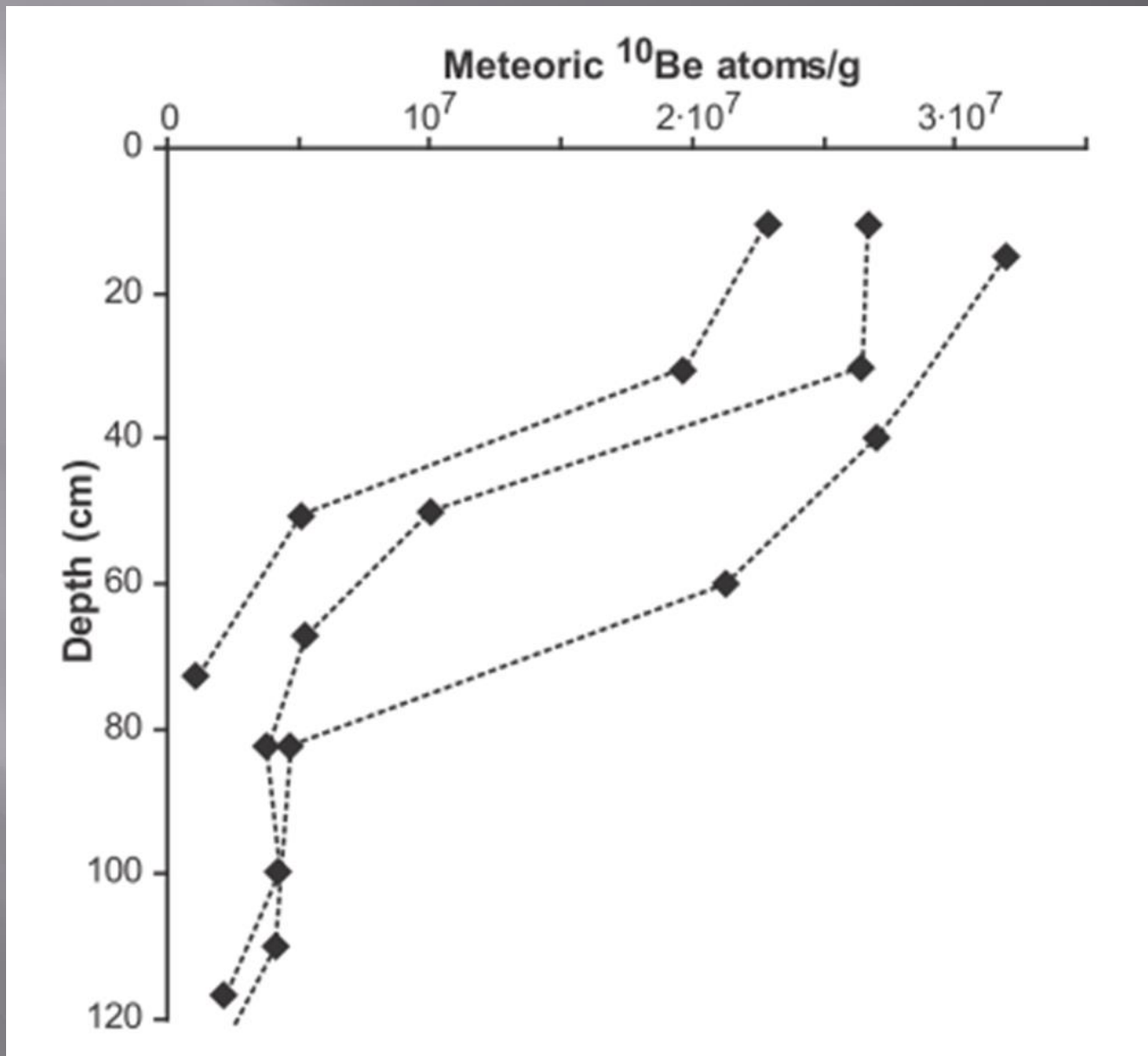
VOIE
LACTEE

ATMOSPHERE

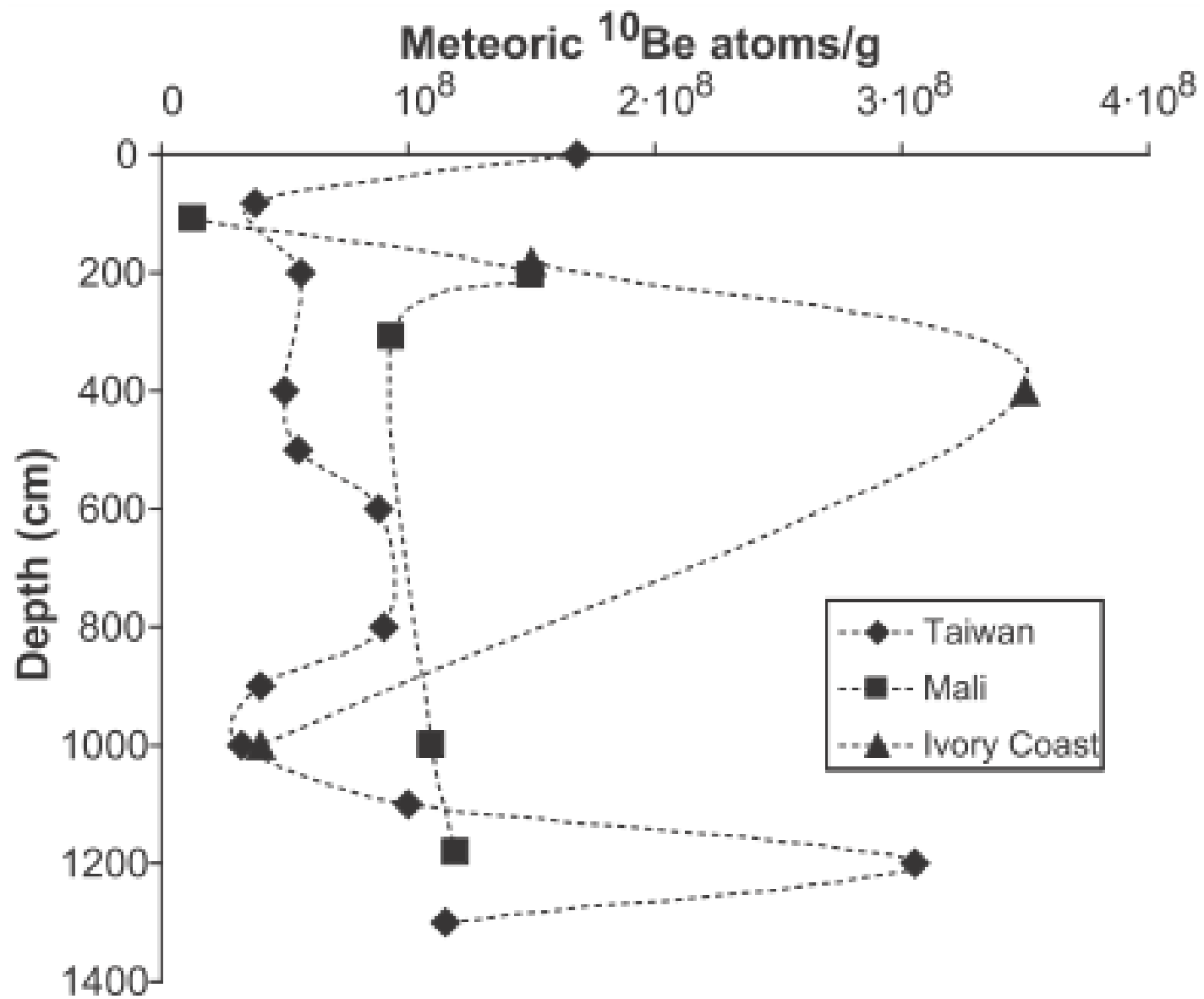




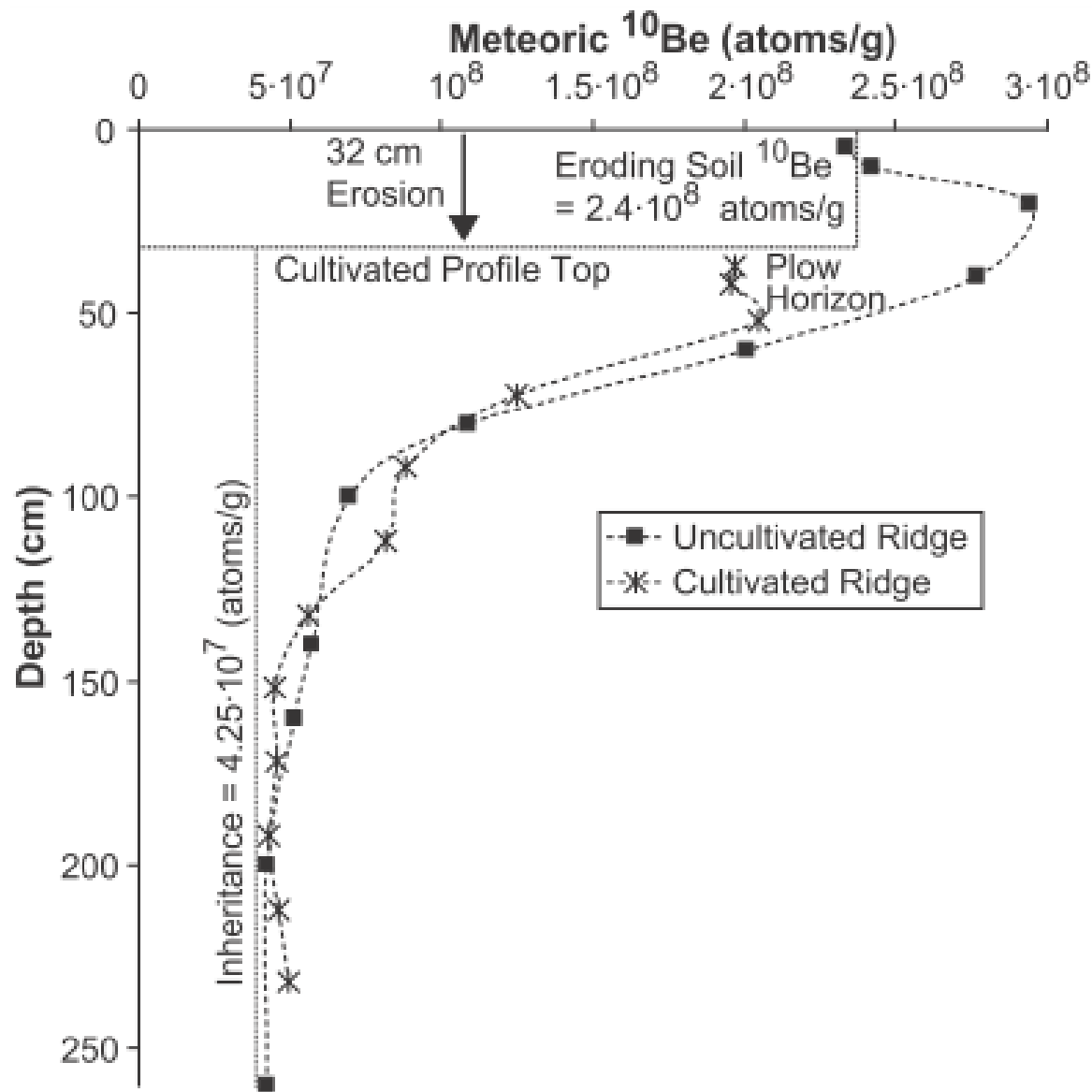
Conceptual model of the control of soil processes on meteoric ^{10}Be distribution (A) compared to the top 400 cm of selected meteoric ^{10}Be depth profiles from fluvial terraces of the Merced River, California and a Virginia saprolite core showing the typical “bulge” profile shape (B). Dashed lines indicate interpolation between point-sampled measurements. Solid lines indicate sections of the profile were integrated in the field during sample collection.



Hillslope profiles from Contra Costa, California, showing declining profile shape.



Tropical and subtropical oxic soils showing deeper infiltration of meteoric ^{10}Be and different profile shape dynamics than temperate soil profiles.



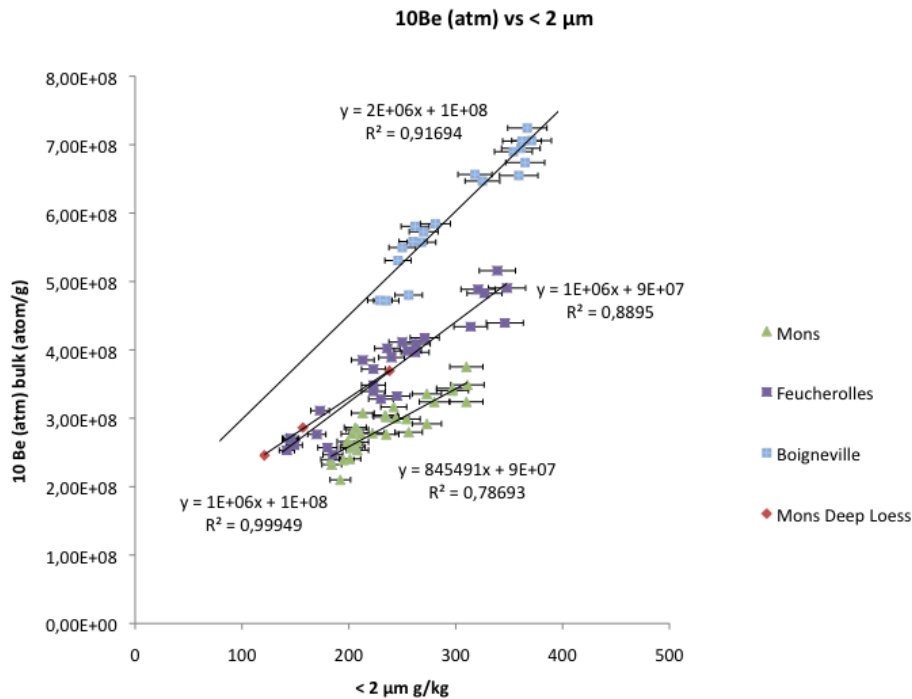
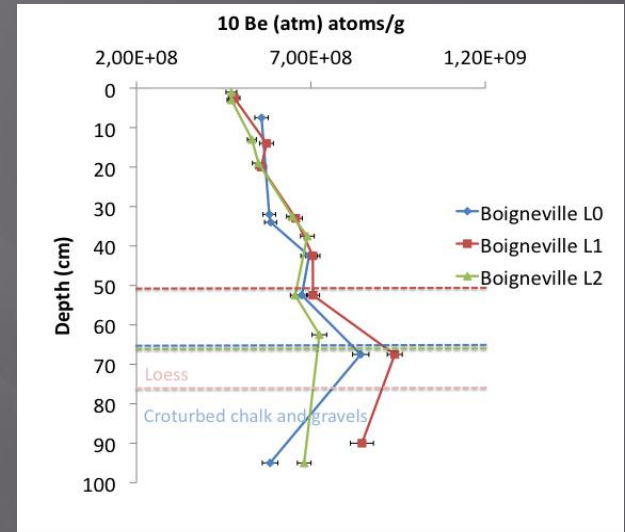
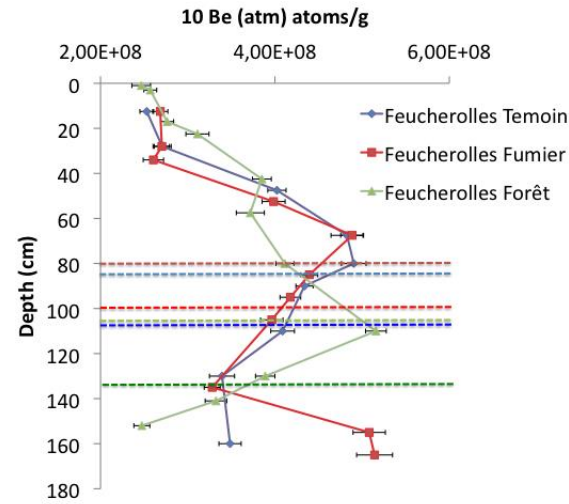
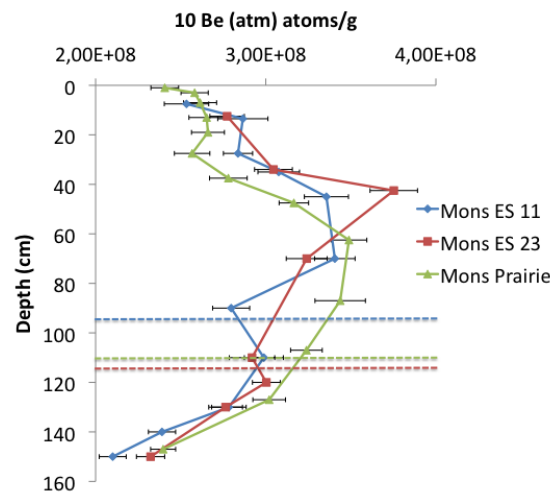
Meteoric ^{10}Be depth profiles from uncultivated and cultivated ridges in the loess hills of Western Iowa. The cultivated profile is plotted with depth corrected for erosional loss.

Caractérisation et quantification des processus de transferts verticaux de matière.

Objectif : quantifier la perte des argiles dans les sols et notamment par lessivage.

Modèle pédogénétique simple : le Luvisol.

Meteoric ^{10}Be concentrations in bulk soil samples as a function of depth.
Dashed lines show limits between successive loess deposits.



Relationship between ^{10}Be concentrations in bulk samples and lutum particle-size fraction ($0-2 \mu\text{m}$) per site.

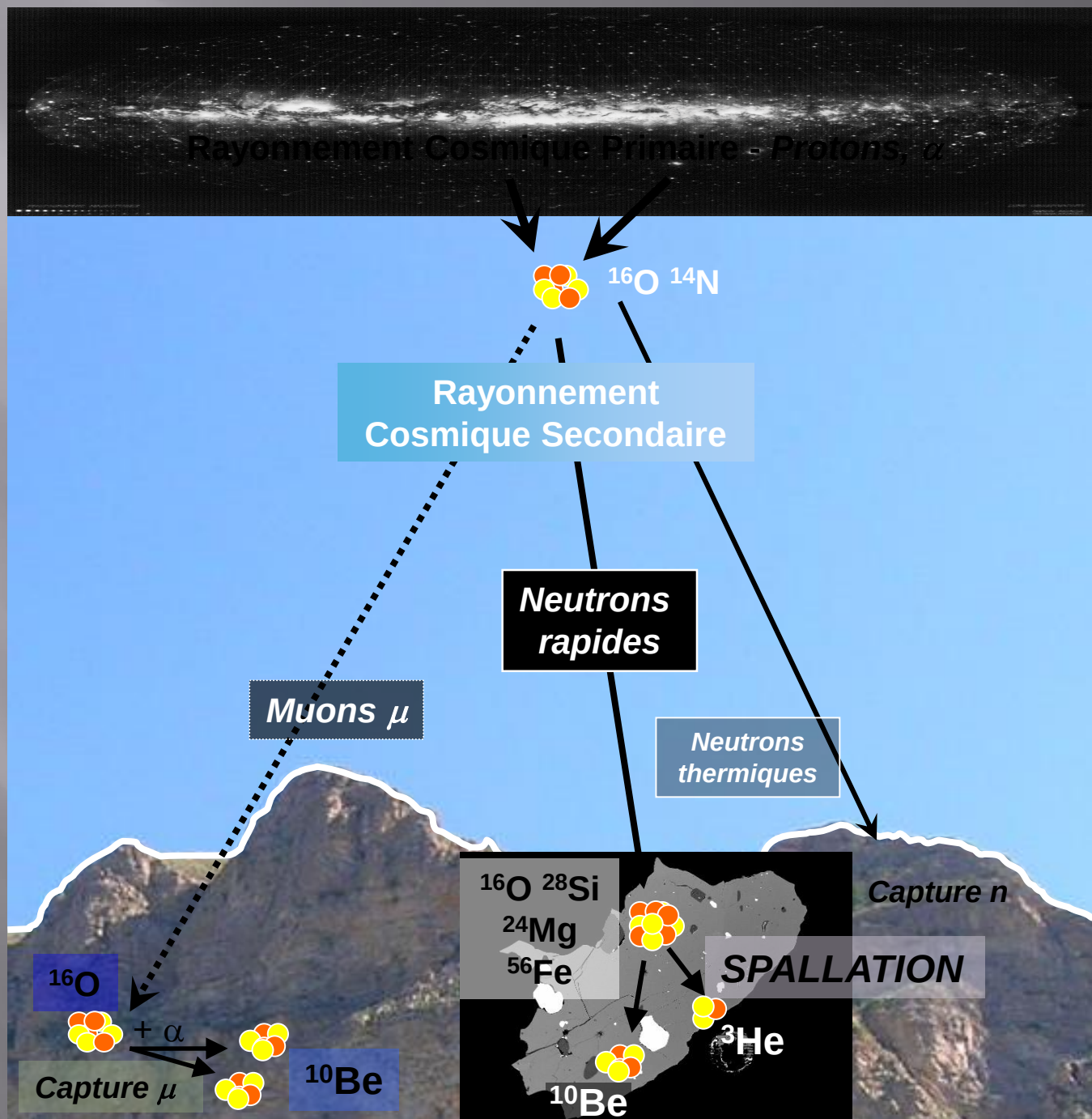
La modélisation des traceurs isotopiques par une équation de convection-diffusion a permis :

1/ de simuler sur 15ka le transfert des particules fines au sein des profils.

Cette simulation montre la mise en place d'un ventre de particules fines en 30 ans qui descend dans le profil pour atteindre sa position actuelle autour de 9.000 ans et une réactivation du lessivage vers 12.000 ans lors de la mise en place de l'agriculture ;

2/ de simuler la redistribution du C organique dans les sols mettant en évidence l'importance des interactions C orga – particules fines prise en compte dans cette modélisation.

VOIE
LACTEE



ROCHES

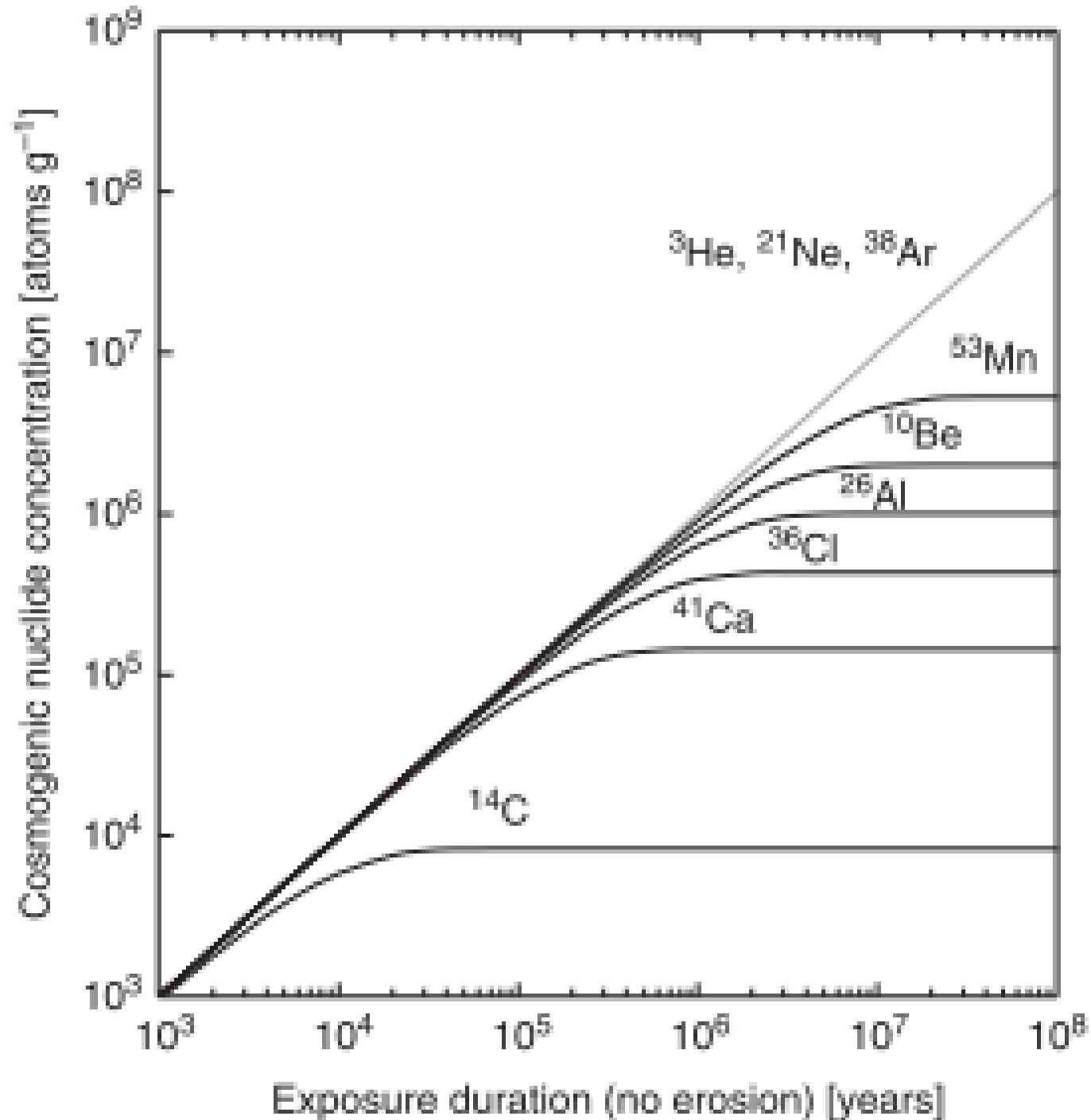
Loi d'accumulation du ^{10}Be .

$$\frac{dC}{dt} = \underbrace{P_0 \cdot \exp\left(-\frac{X}{L}\right)}_{\text{Gain.}} + \underbrace{\varepsilon \cdot \frac{dC}{dx} - \lambda C}_{\substack{\text{Pertes.} \\ \text{Par érosion } (\varepsilon) \\ \text{Par décroissance radioactive } \lambda}}$$

P_0 : production en surface ;

X : profondeur en g/cm^2 ;

L : longueur d'atténuation des particules incidentes.



Accumulation du ^{10}Be en régime érosif.

$$C(0,t) = \frac{P_0}{\frac{\varepsilon}{L_n} + \lambda} \cdot \left(1 - \exp\left(-t \times \left(\frac{\varepsilon}{L_n} + \lambda\right)\right) \right)$$

deux limites



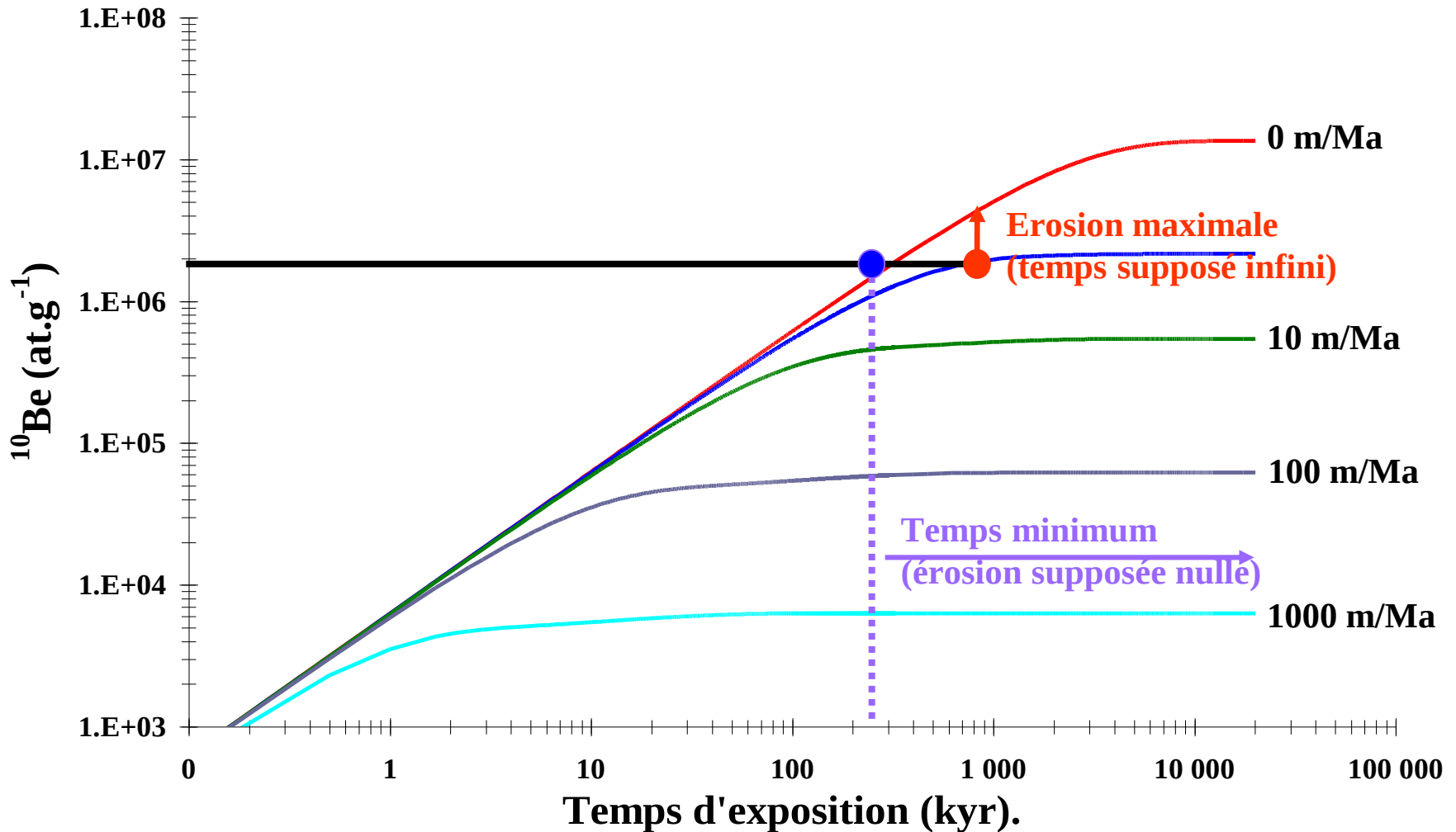
"Pas d'érosion"

$$t_{\min} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(1 - \frac{\lambda \cdot C(0,t)}{P_0}\right)$$

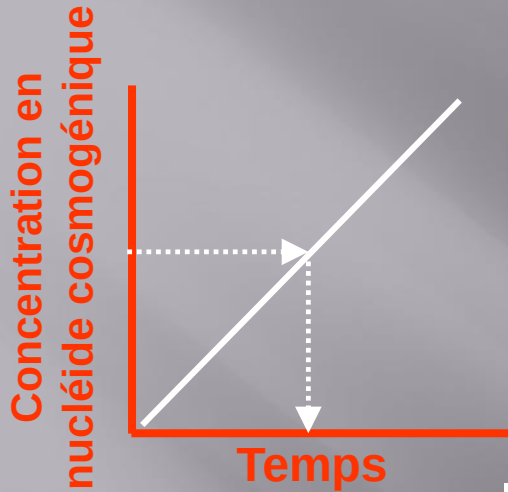
"Exposition infinie"

$$\varepsilon_{\max} = \left(\frac{P_0}{C(0,\infty)} - \lambda\right) \cdot L_n$$

Accumulation du ^{10}Be en régime érosif.

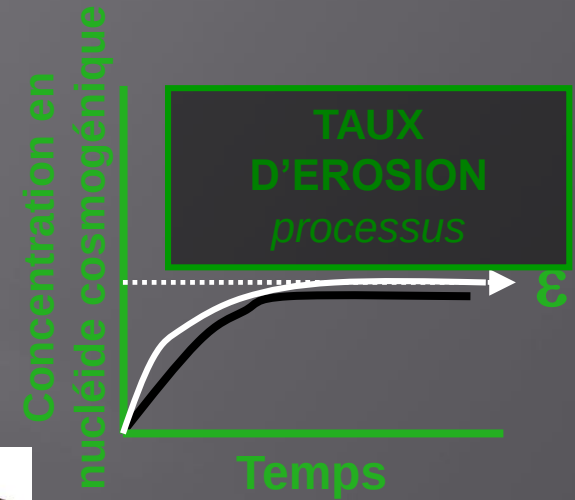


Principes théoriques

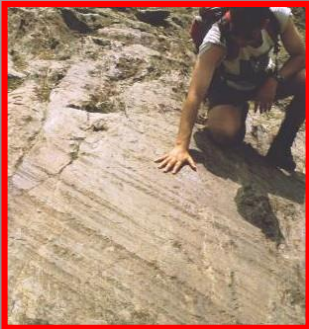


Si surface non érodée

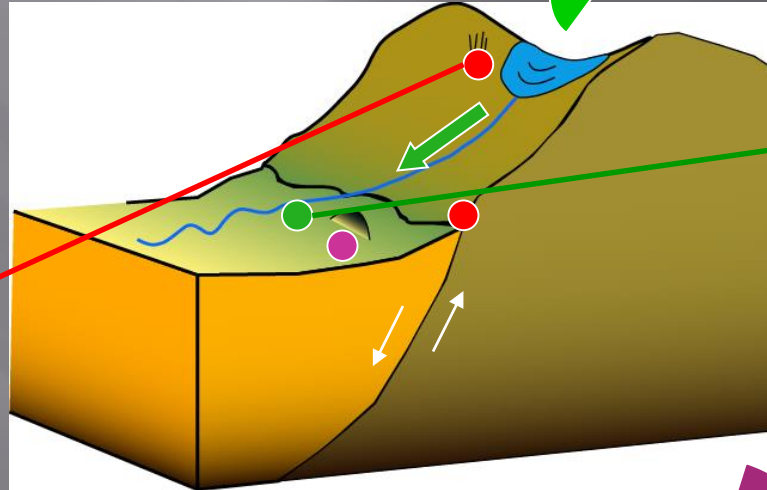
Erosion à l'état stationnaire



DATATION DE SURFACES événements



ex. Polis glaciaires



ex. Sédiments rivières

AGES D'ENFOUISSEMENT événements

Couple de nucléides cosmogéniques $\lambda_1 \neq \lambda_2$

Accumulation du ^{10}Be en régime érosif.

$$\begin{array}{c}
 \text{Neutrons} \\
 \hline
 C(x,t) = (1-X) \times \frac{P_o \times \exp(-\frac{x}{L_n})}{\frac{\epsilon}{L_n} + \lambda} \times \left[1 - \exp(-t \times (\frac{\epsilon}{L_n} + \lambda)) \right] \\
 \downarrow \\
 \text{Pourcentage muonique} \\
 \uparrow \\
 (X) \times \frac{P_o \times \exp(-\frac{x}{L_\mu})}{\frac{\epsilon}{L_\mu} + \lambda} \times \left[1 - \exp(-t \times (\frac{\epsilon}{L_\mu} + \lambda)) \right] \\
 \hline
 \text{Muons}
 \end{array}$$

The diagram illustrates the accumulation of ^{10}Be in an erosive regime, showing the contribution of neutrons and muons. The total concentration $C(x,t)$ is the sum of the neutron and muon components.

Neutrons Component:

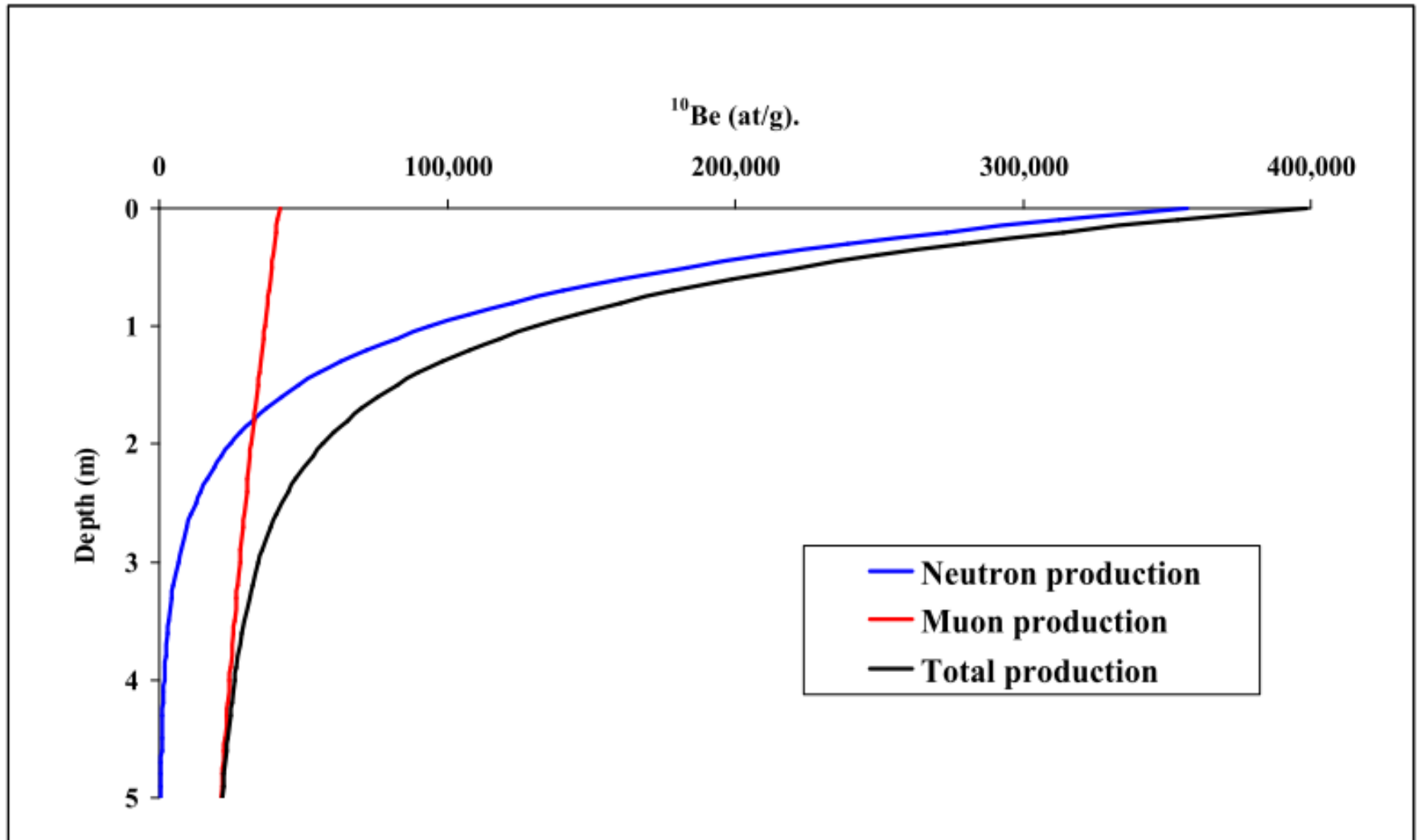
$$(1-X) \times \frac{P_o \times \exp(-\frac{x}{L_n})}{\frac{\epsilon}{L_n} + \lambda} \times \left[1 - \exp(-t \times (\frac{\epsilon}{L_n} + \lambda)) \right]$$

Muons Component:

$$(X) \times \frac{P_o \times \exp(-\frac{x}{L_\mu})}{\frac{\epsilon}{L_\mu} + \lambda} \times \left[1 - \exp(-t \times (\frac{\epsilon}{L_\mu} + \lambda)) \right]$$

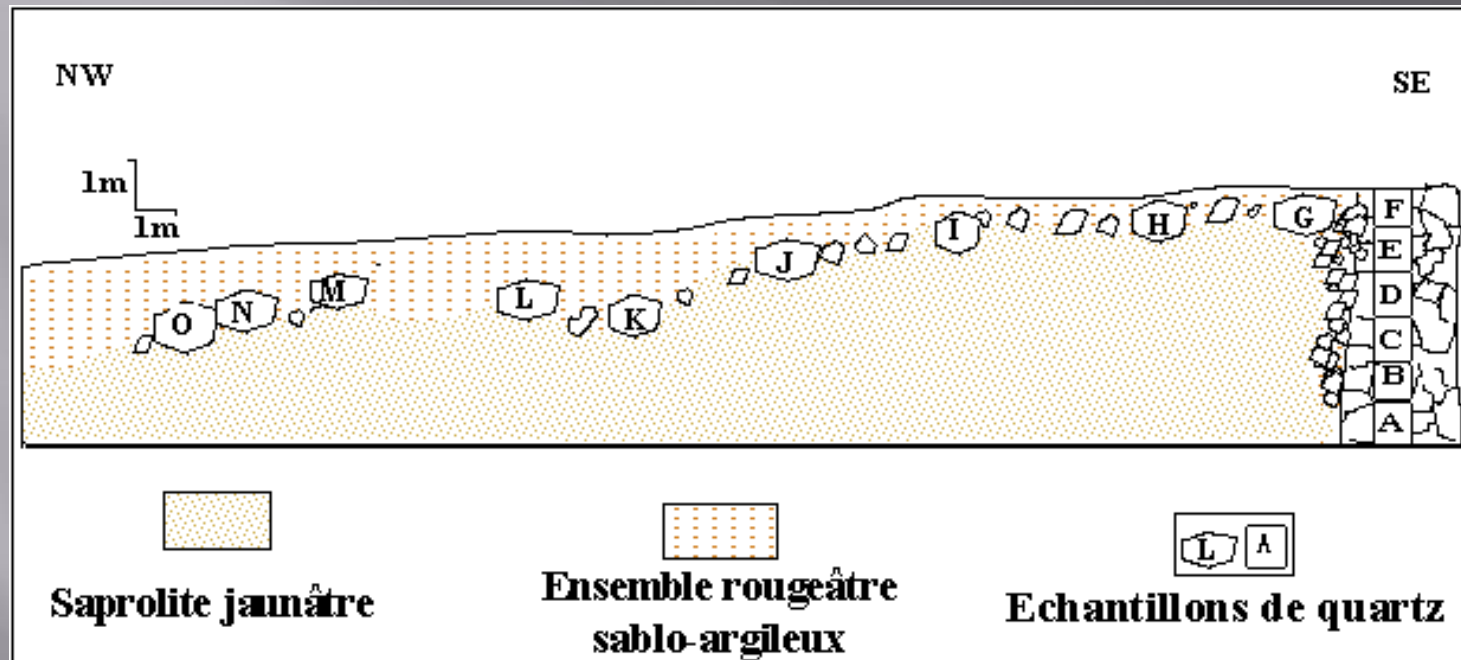
The diagram uses arrows to link the variables $(1-X)$ and (X) to the text "Pourcentage muonique" (Muon percentage), indicating that X represents the muon percentage.

Evolution de la concentration en fonction de la profondeur.

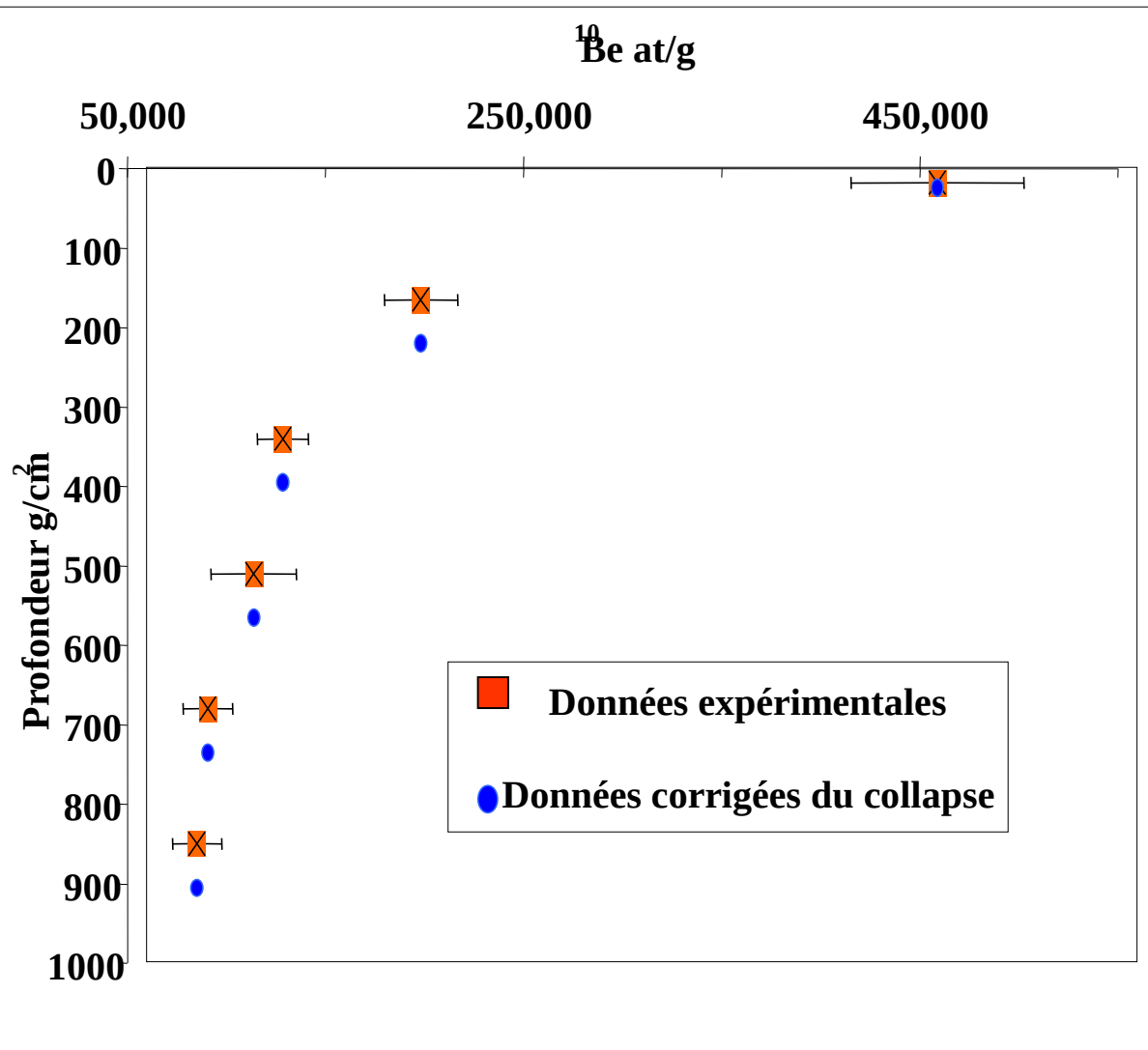


Stone-lines : allochtones ou autotochtones ?

Colline d'Itabéraba (Brésil).



Distribution du ^{10}Be en fonction de la profondeur pour le filon de quartz d'Itaberaba.



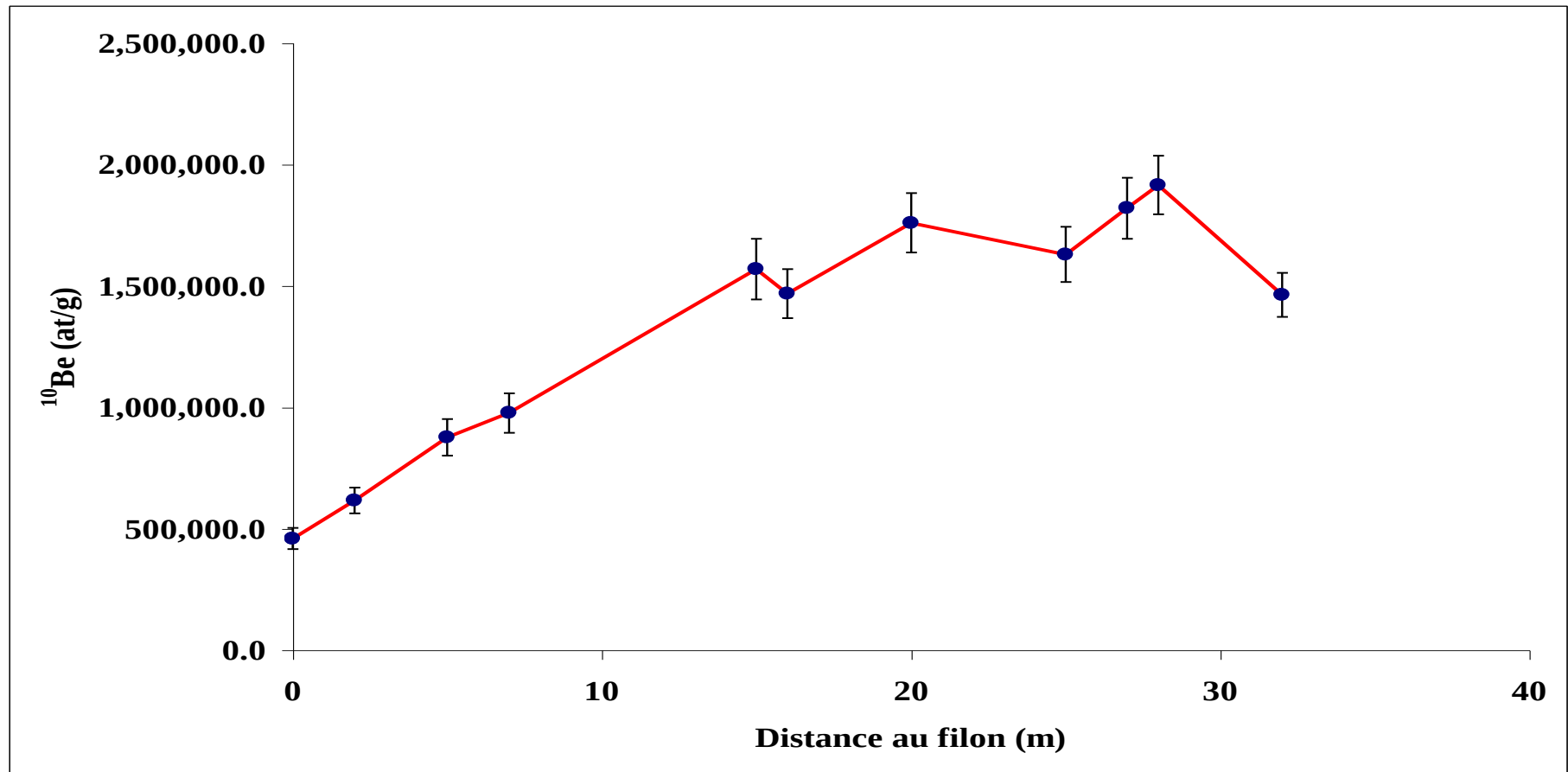
- **Forme exponentielle:** développement *in-situ*

- **Erosion moyenne de ~ 9 m/Ma.**

- **Contribution muonique fixée à 1.5%.**

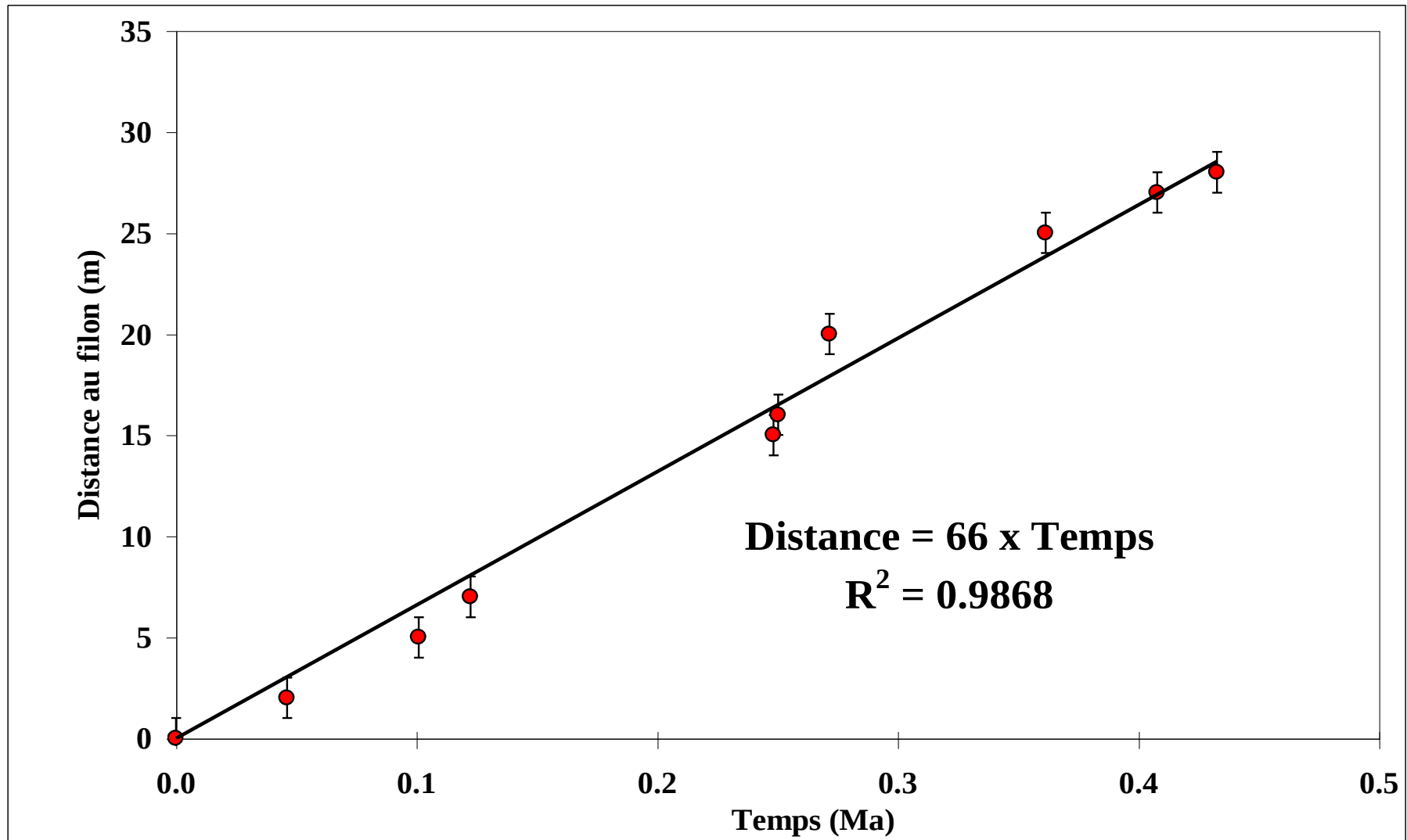
- **Collapse de 35% sur les 2 premiers mètres.**

Distribution du ^{10}Be en fonction de la distance au filon pour la "stone-line" d'Itaberaba



Augmentation de la teneur en ^{10}Be en fonction de l'éloignement
⇒ Calcul du déplacement latéral.

Mesure des déplacements latéraux par le modèle type « enfouissement ».

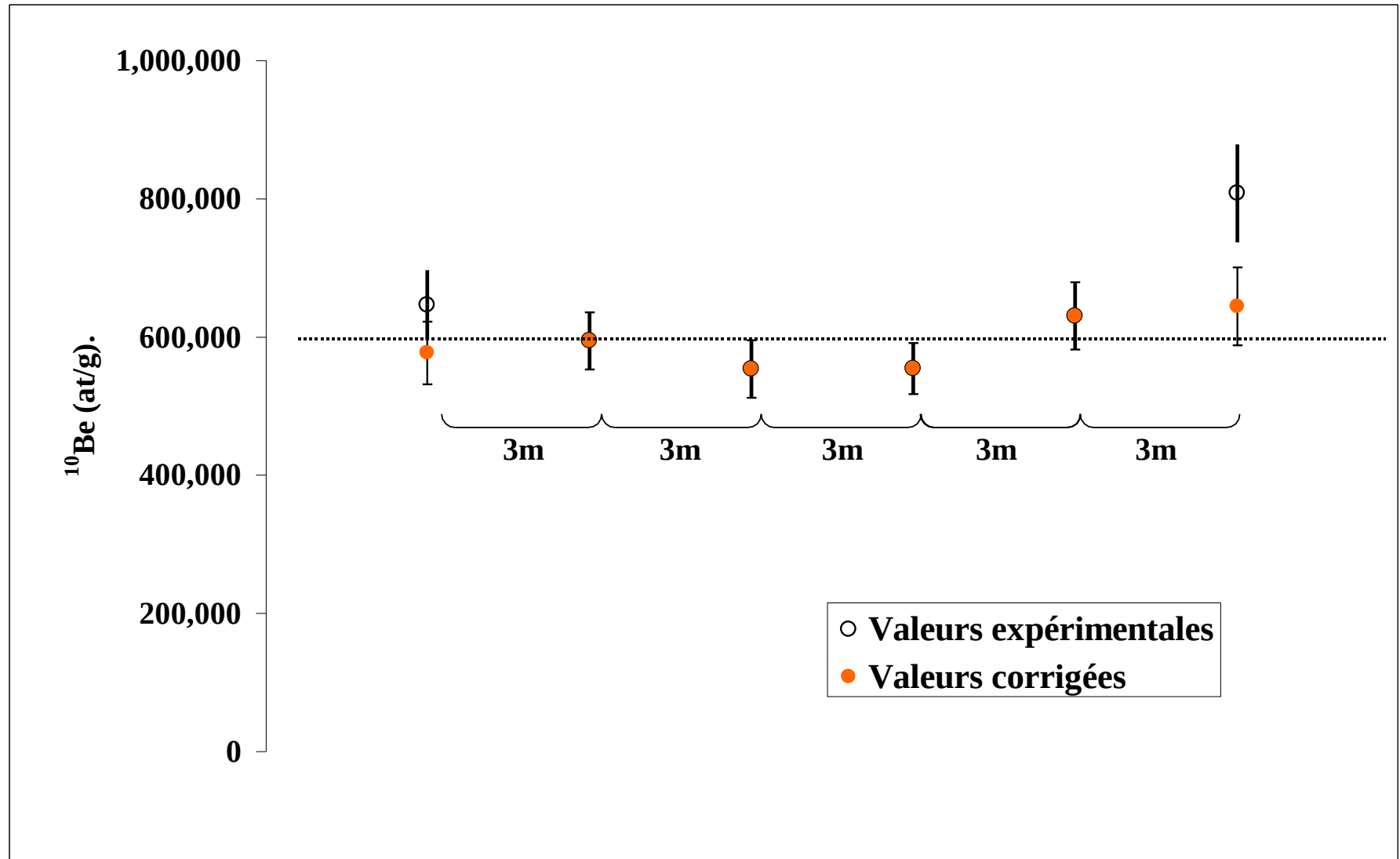


Stone-lines : allochtones ou autotochtones ?

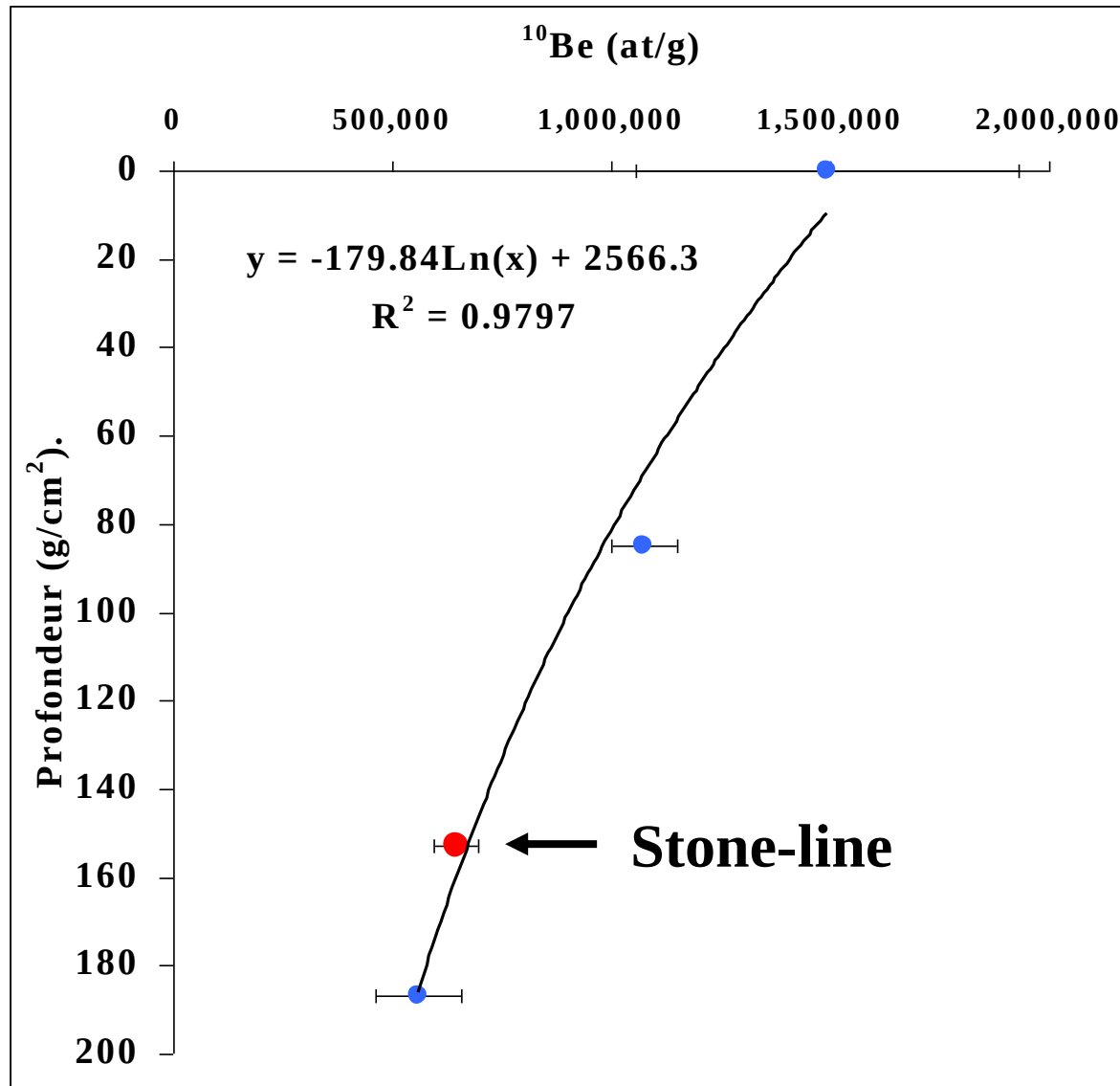
Cuiaba (Brésil).



Distribution latérale du ^{10}Be pour la "stone-line" de Cuiaba.



Distribution du ^{10}Be dans un profil qui coupe la stone-line.



- **Forme exponentielle: développement *in-situ* depuis le dépôt.**

- **Erosion moyenne de 2,5 m/Ma pour une contribution muonique fixée à 1,5 %.**

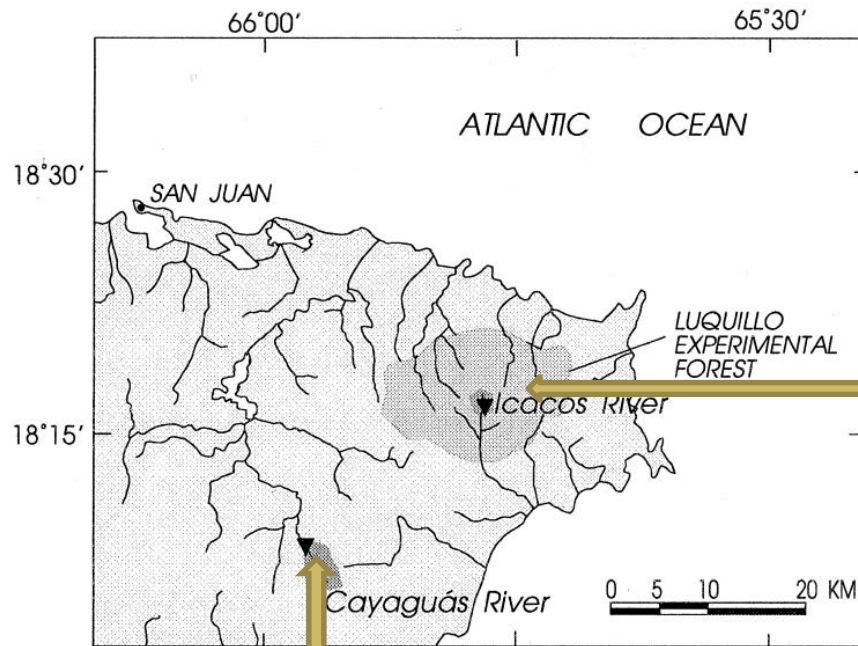
- **DEPOT RAPIDE ET CONTEMPORAIN AU RUISSELEMENT EN NAPPE.**

Conclusion

Les nucléides cosmogéniques produits *in-situ* permettent :

- de distinguer les processus autochtones des processus allochtones ;
- de quantifier des taux de dénudation et/ou d'enfouissement ;
- d'estimer des vitesses de déplacements latéraux ;
- de mettre en évidence l'étendue de l'activité biologique.

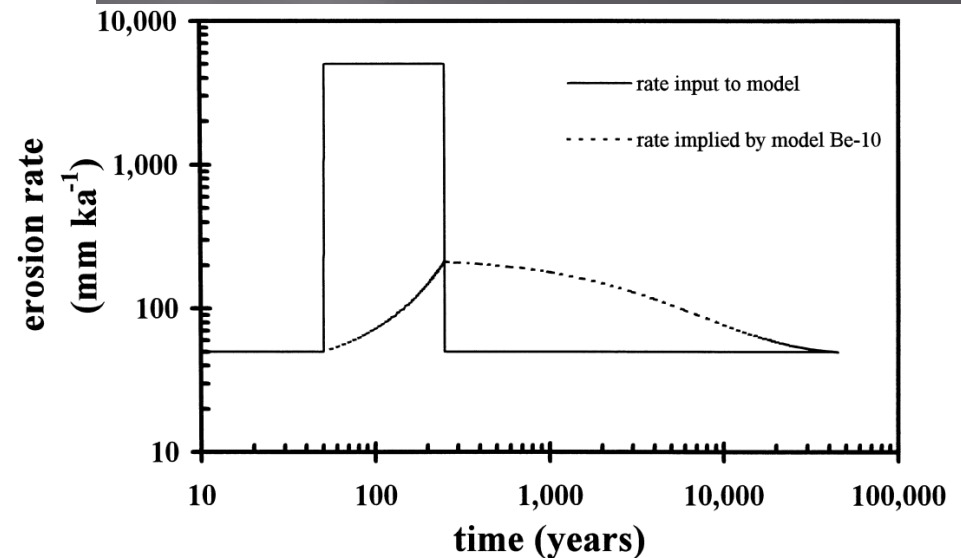
Quantifier l'impact anthropogénique.



Taux de dénudation ^{10}Be
moyen : $(45 \pm 15) \text{ mm/ka}$.

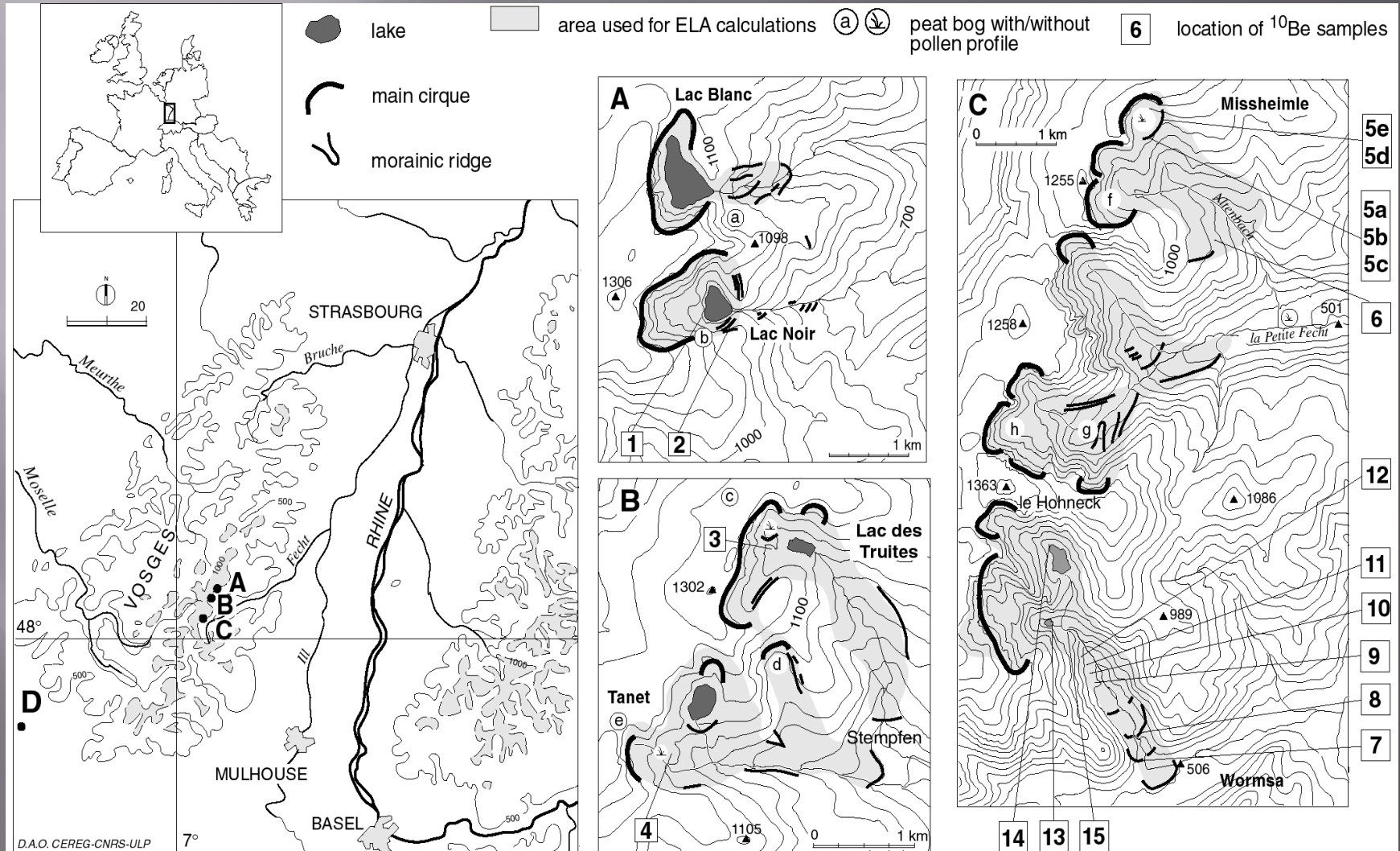
Taux de dénudation ^{10}Be
moyen : $\sim 85 \text{ mm/ka}$.

Taux de dénudation actuel :
 $\sim 750 \text{ mm/ka}$.



Evolution des paysages : climat.

Vosges orientales.



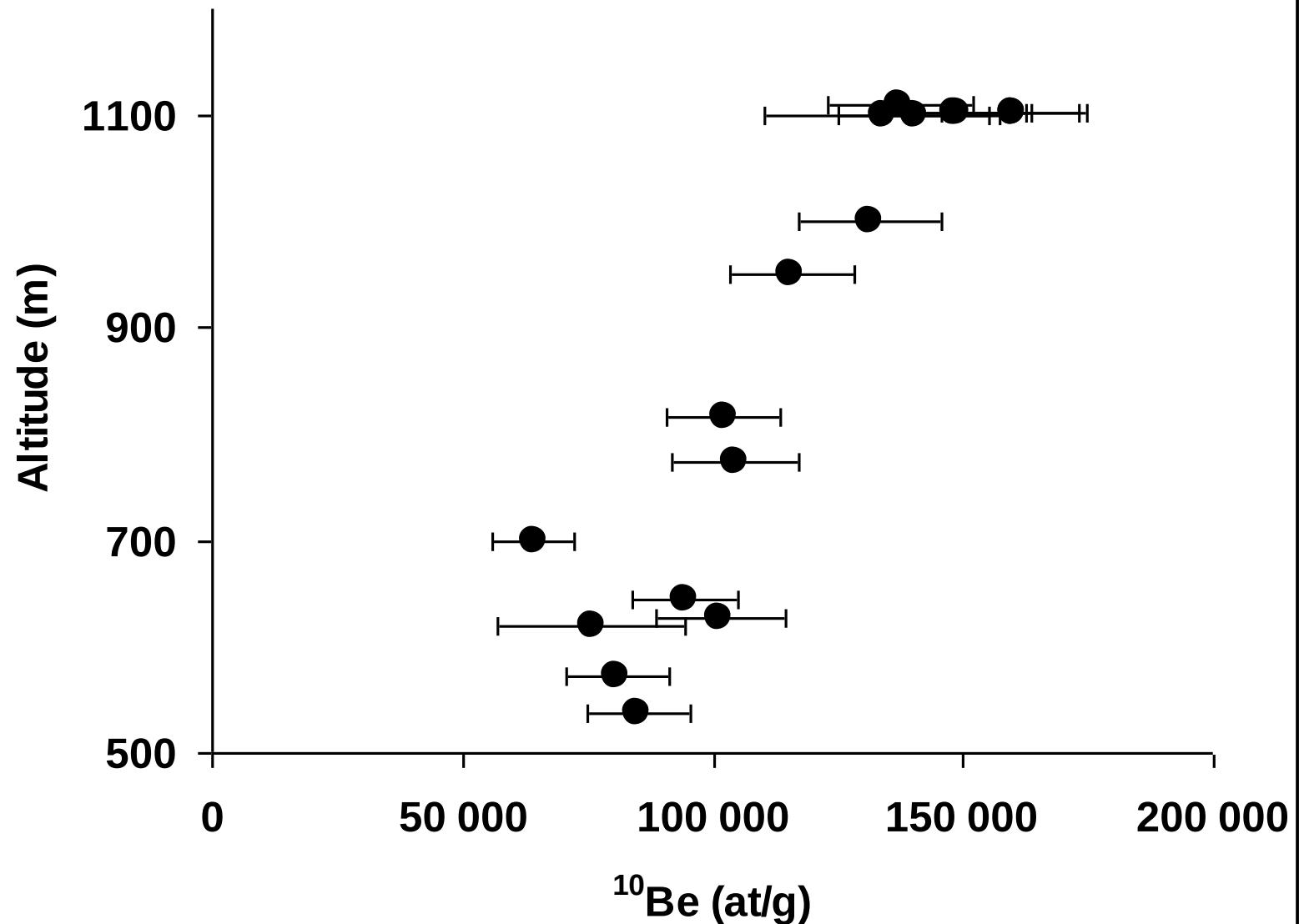
Basse vallée de la Wormsa.



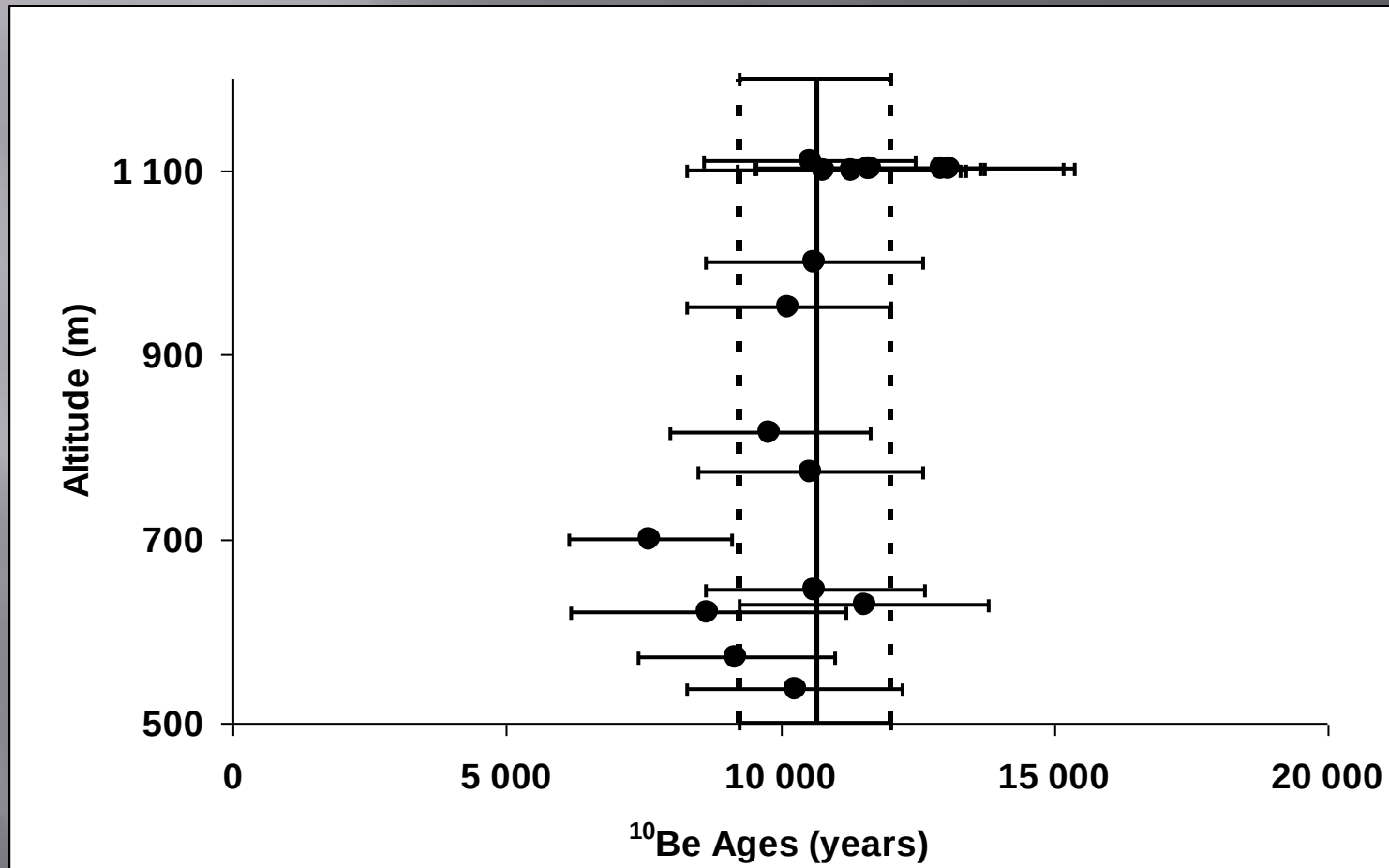


**Roche moutonnée
dans la haute vallée de
la Wormsa.**

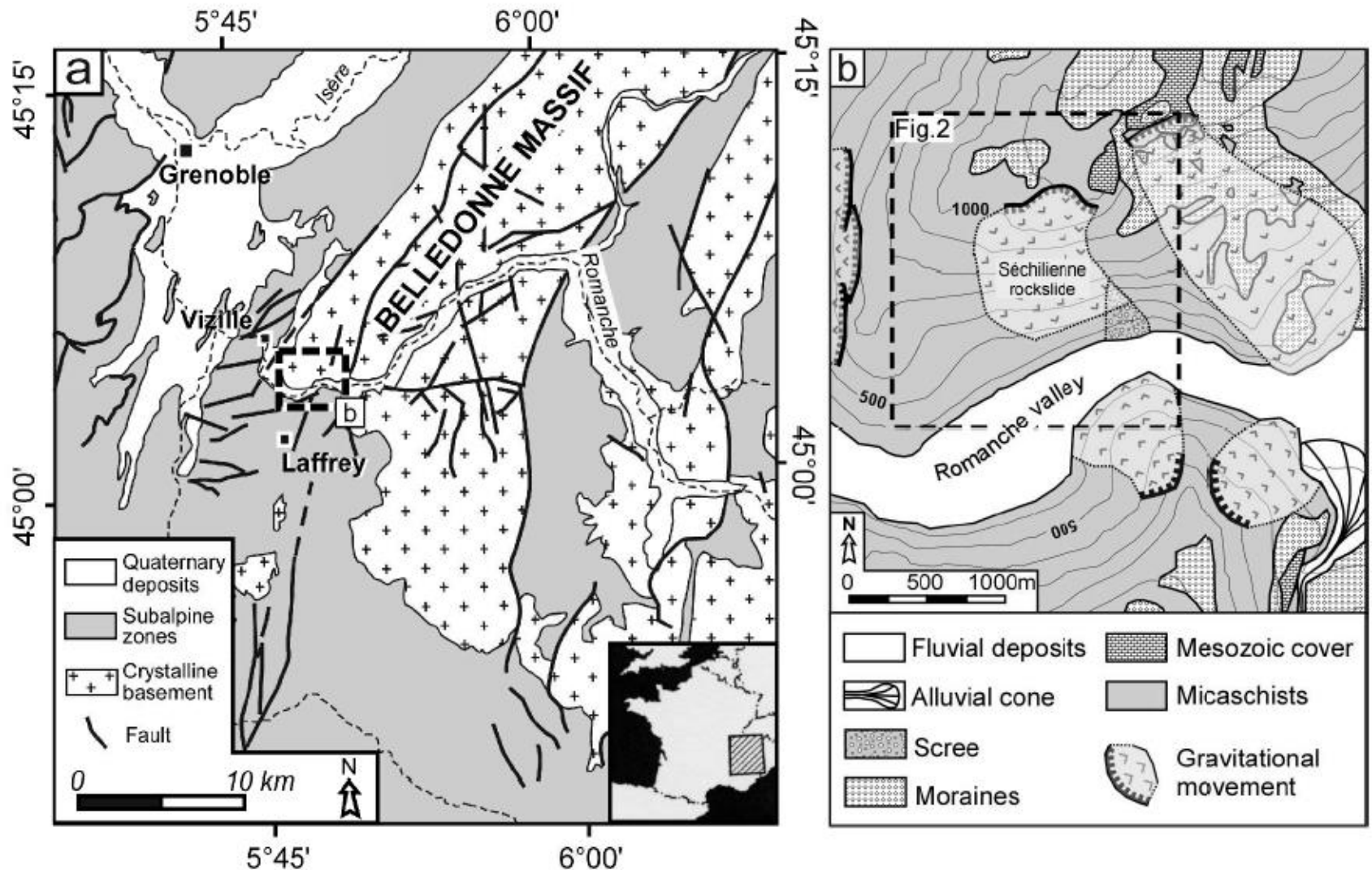
Evolution des concentrations en ^{10}Be en fonction de l'altitude.



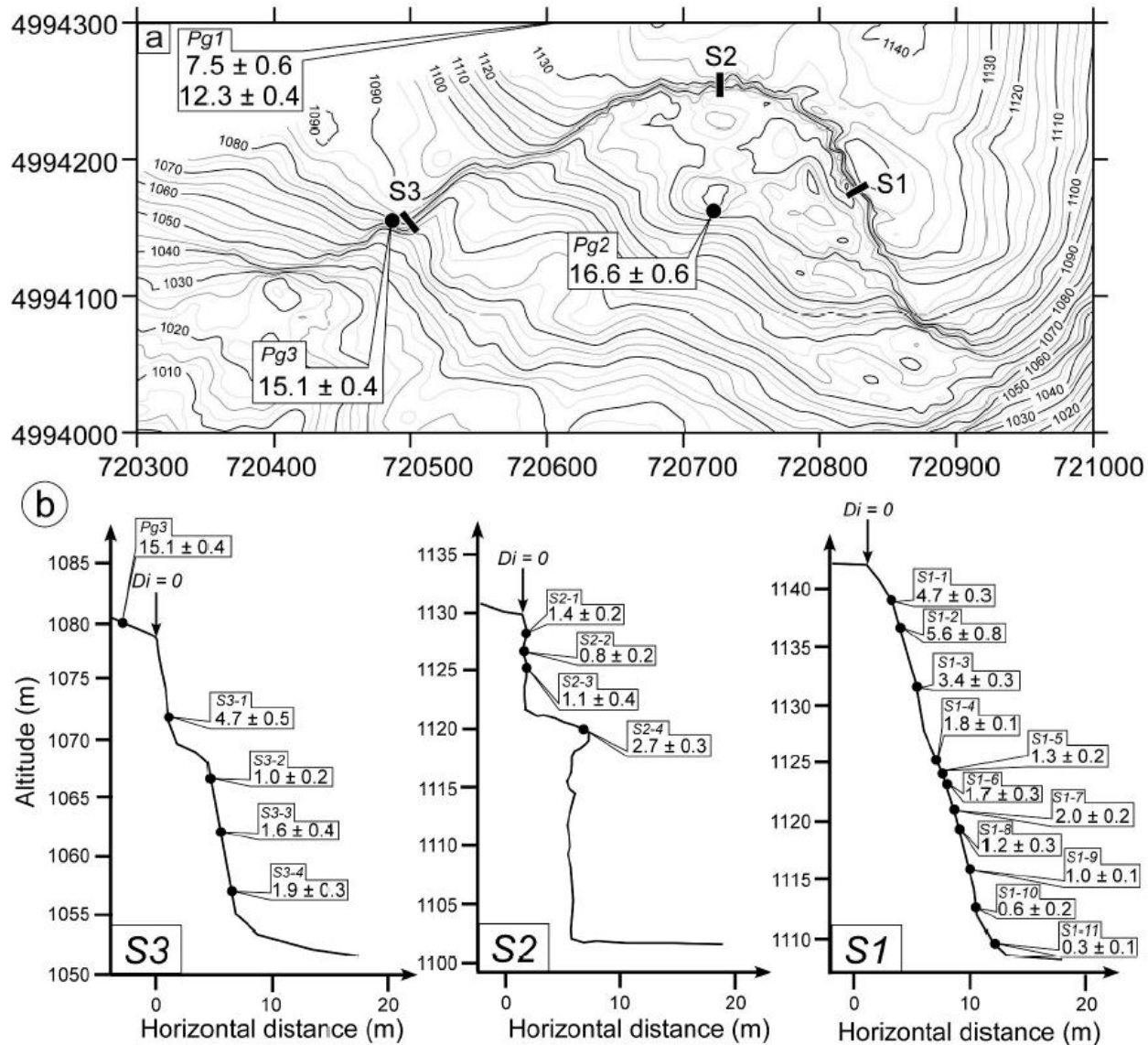
Ages ^{10}Be en fonction de l'altitude.



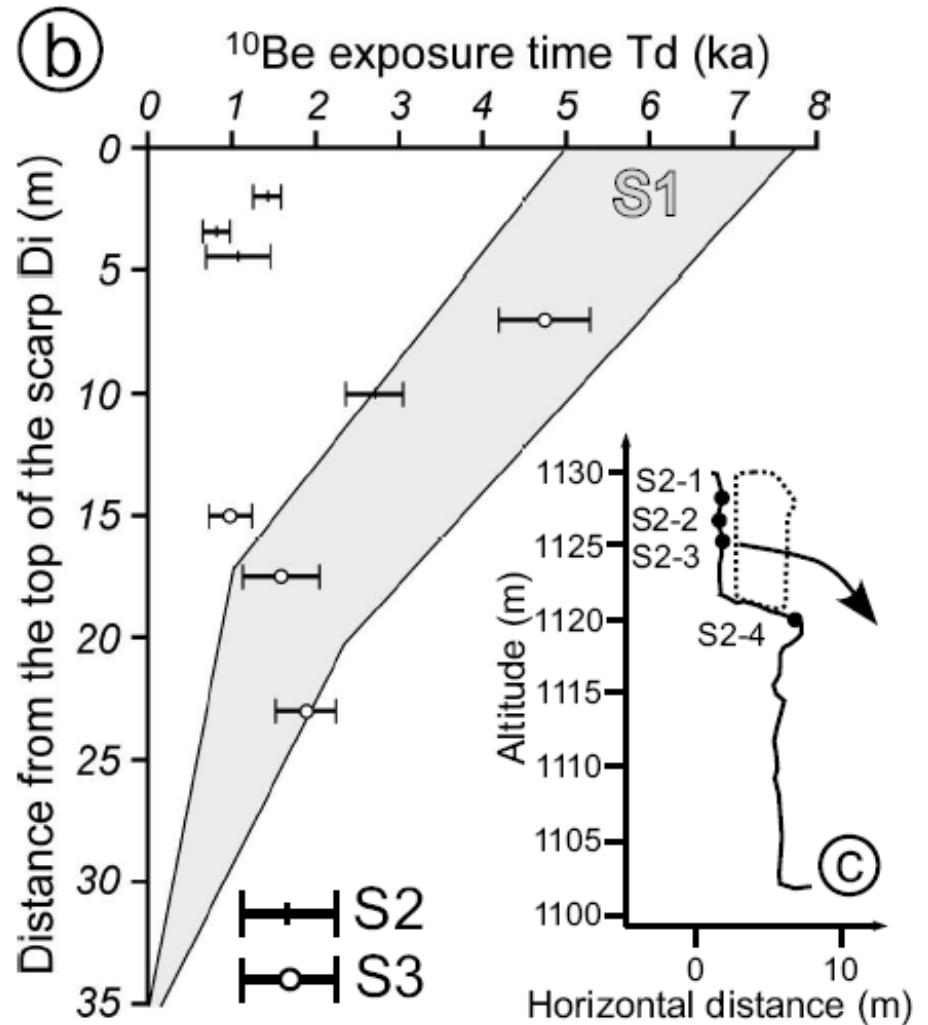
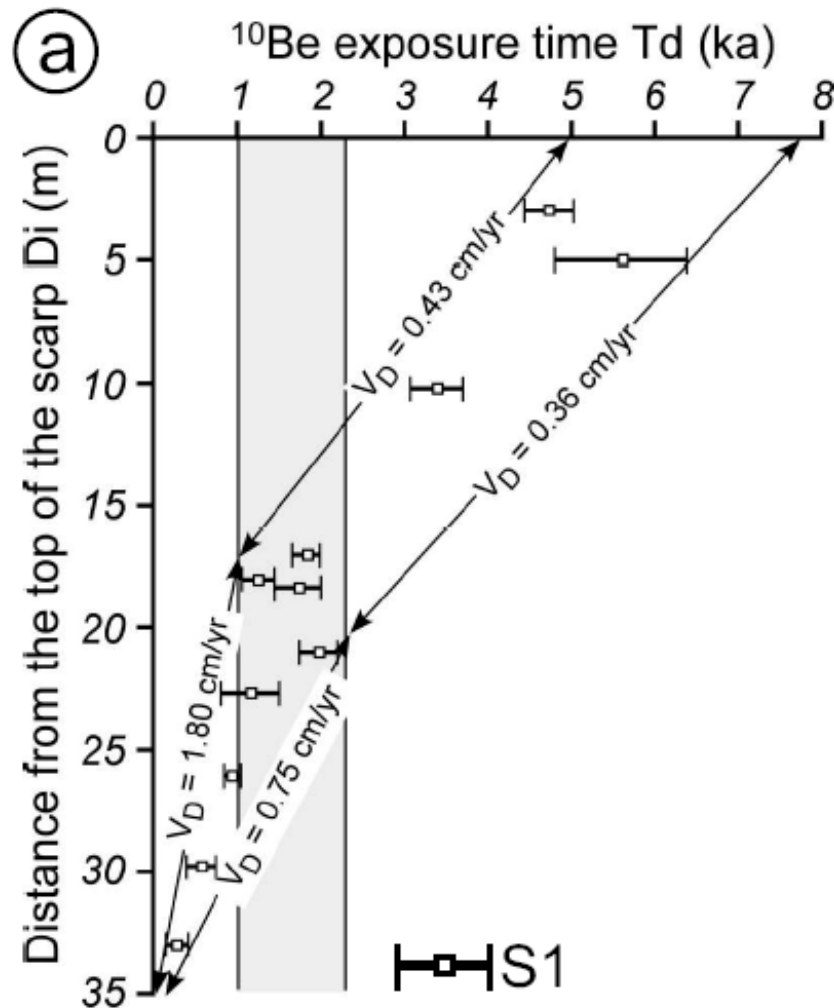
Aléa gravitaire : Séchilienne.



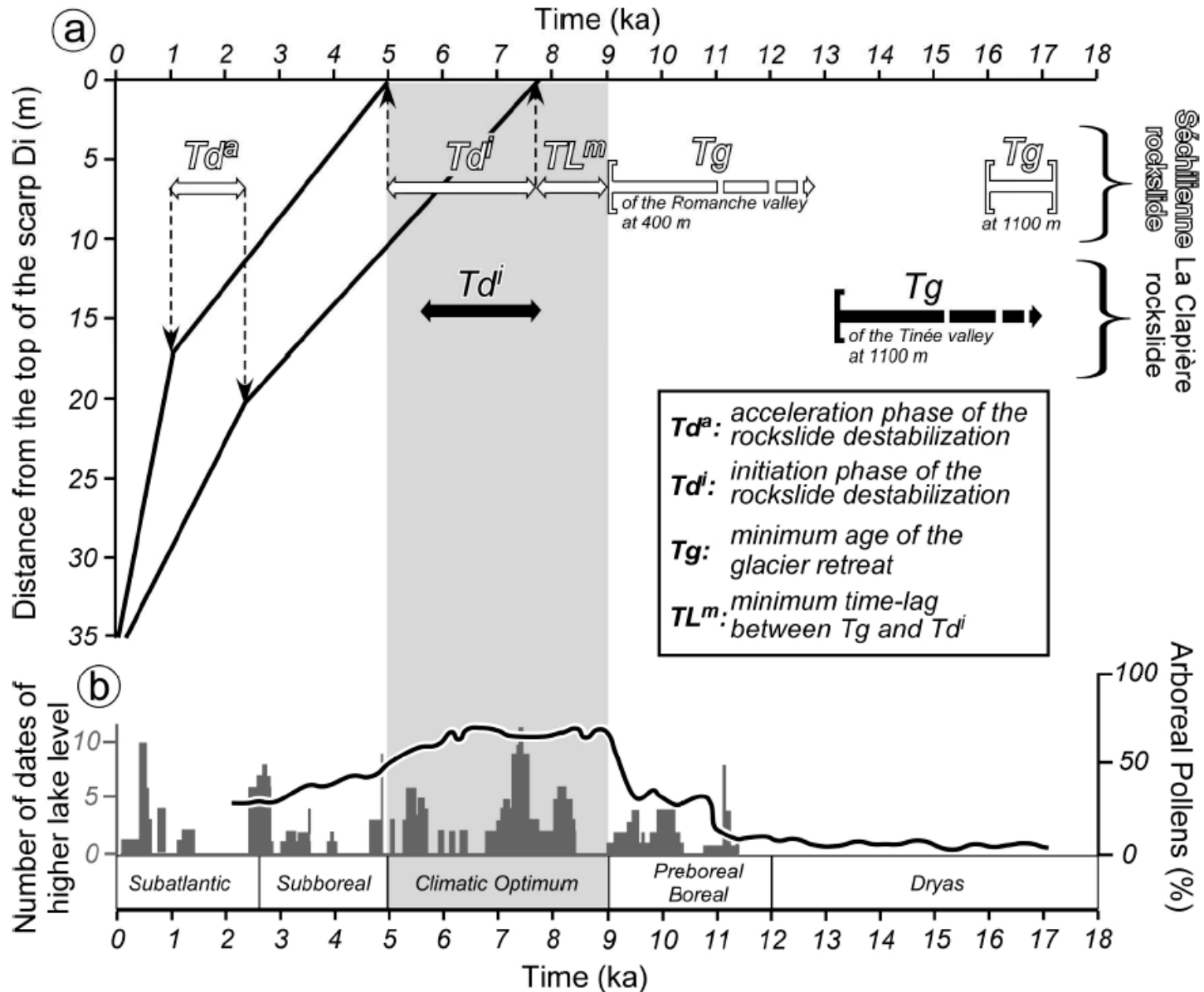
Aléa gravitaire : Séchilienne.



Aléa gravitaire : Séchilienne.



Aléa gravitaire : Séchilienne.





MERCI POUR VOTRE ATTENTION