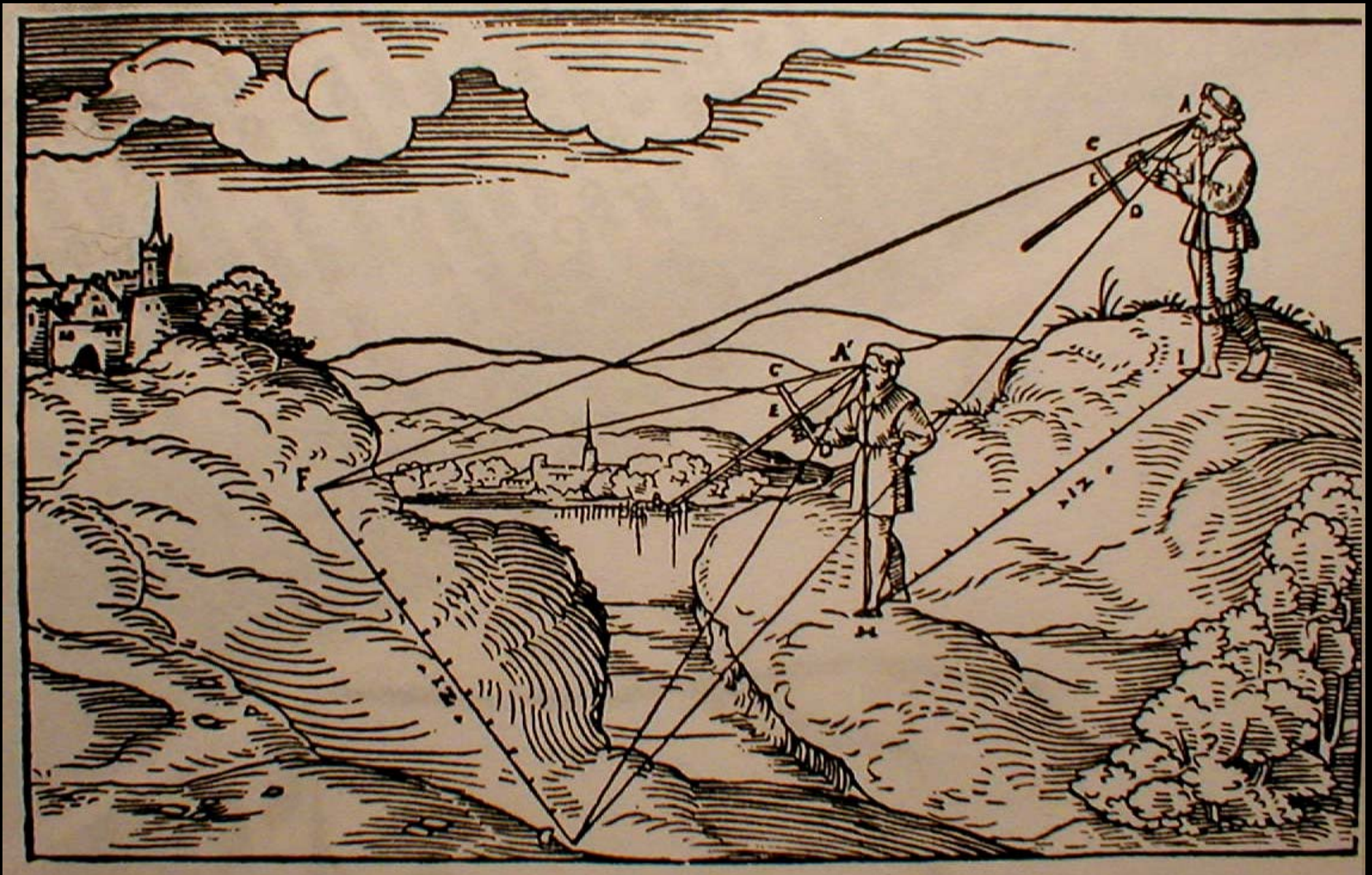
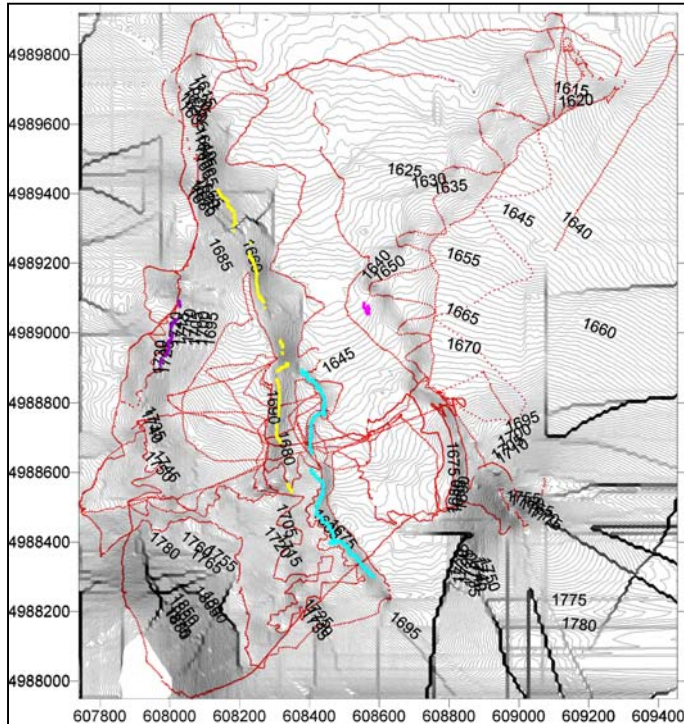


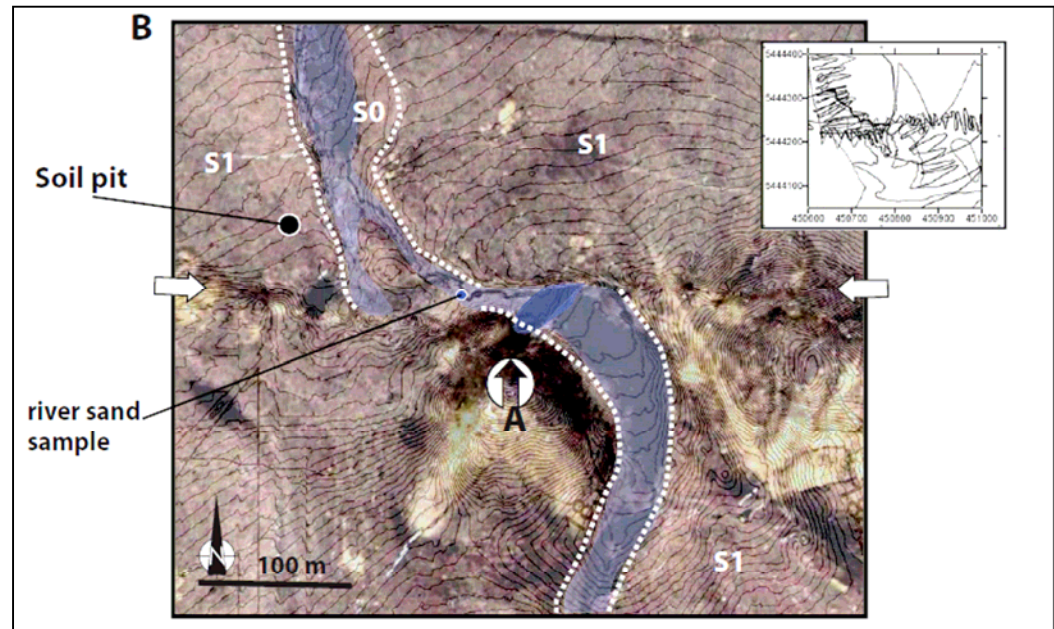
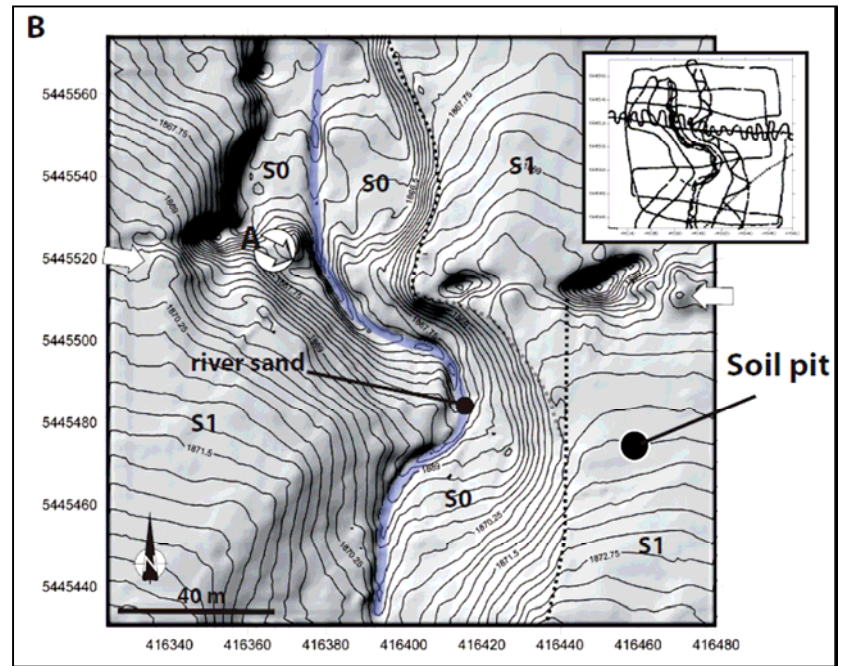
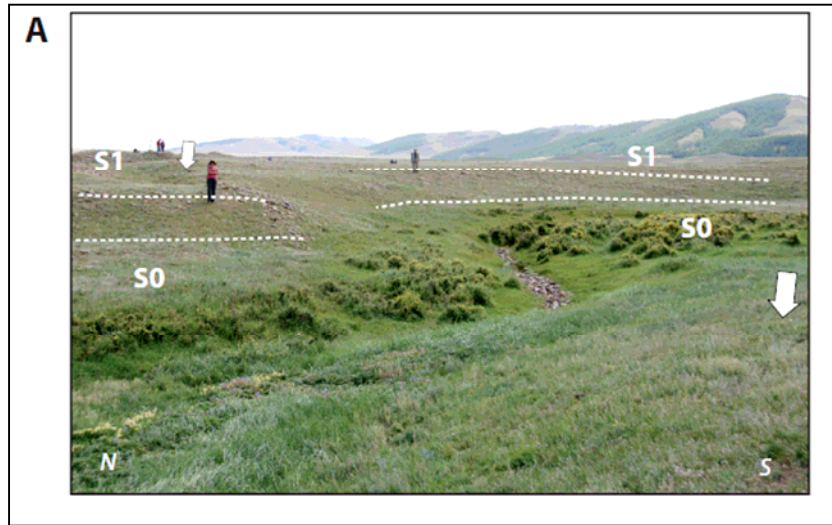
COMMENT MESURER

LES MARQUEURS GEOMORPHOLOGIQUES

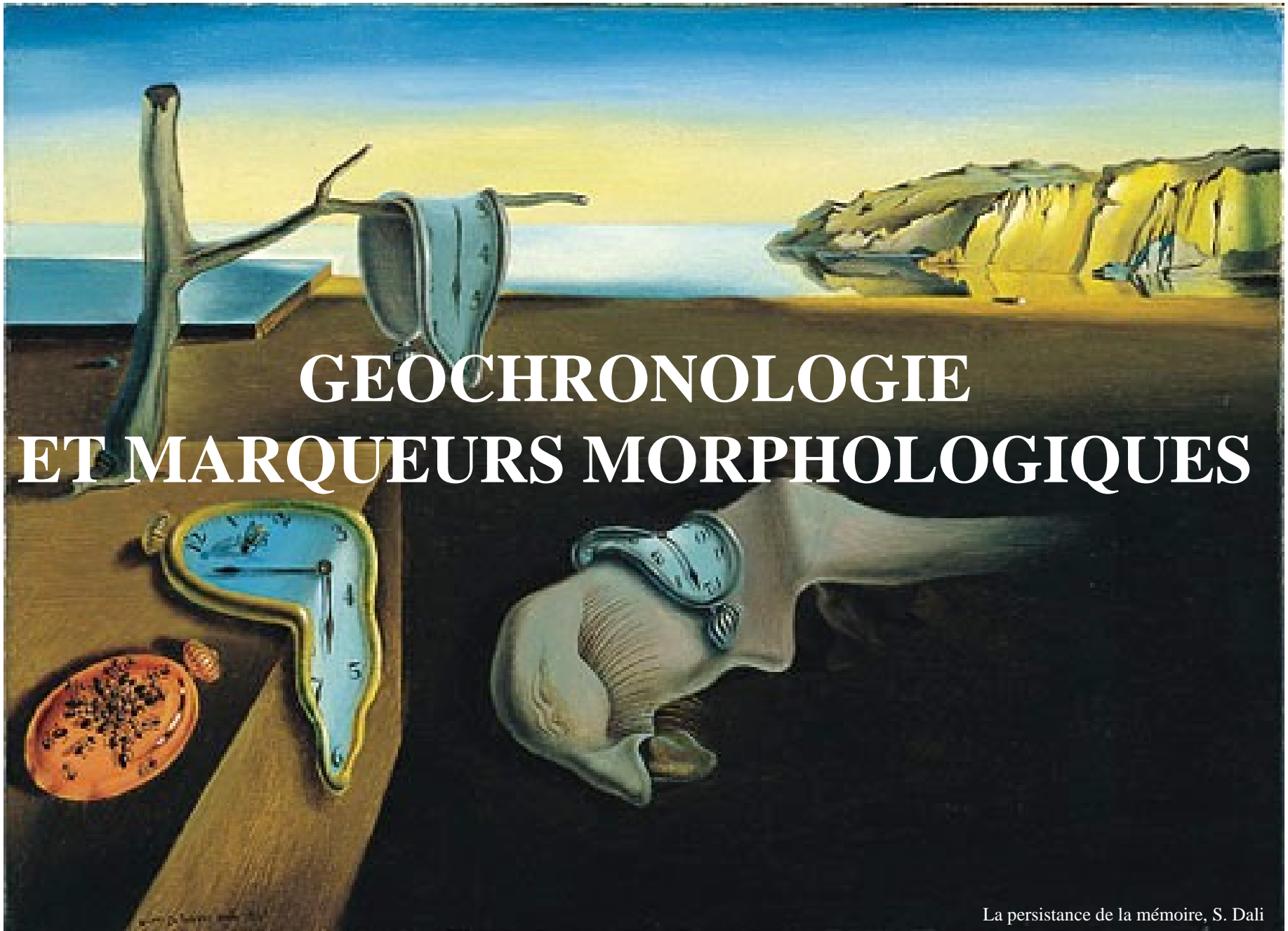


GPS cinématique





Interpolation des points
topographiques avec Surfer



GEOCHRONOLOGIE ET MARQUEURS MORPHOLOGIQUES

METHODES DE DATATION UTILISEES EN GEOMORPHOLOGIE

	Bois Plantes	Os	Dents Email	Coqui- lles	Coraux	Spéleo- thèmes	Sédi- ments	Surfa- ces	Verres	Mx vol- caniques	Poterie
Dendrochronologie	😊										
14C atm.	😊	😊	😞	😊	😊	😊	😊				😊
K-Ar; Ar-Ar										😊	
Série U		😊	😊	😞	😊	😊	😞			😊	
Traces de fission									😊	😊	
TL, OSL						😊	😊			😞	😊
ESR			😊	😊	😊	😊				😊	
Cosmogéniques							😊	😊			

😊 Matériaux bien adapté

😞 marche pas souvent

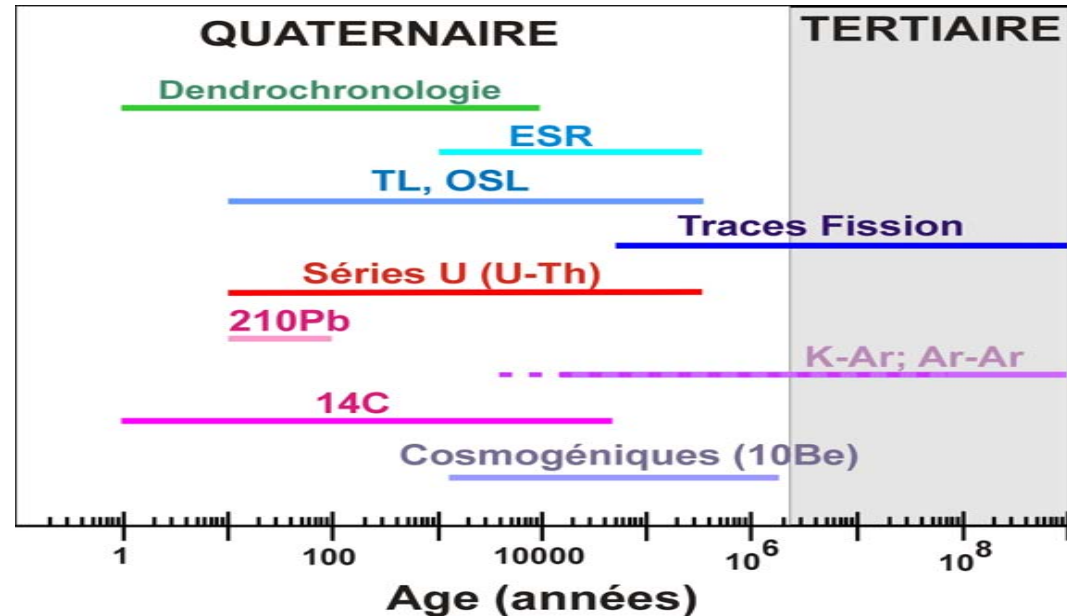
😊 Marche pas toujours

☐ pas possible

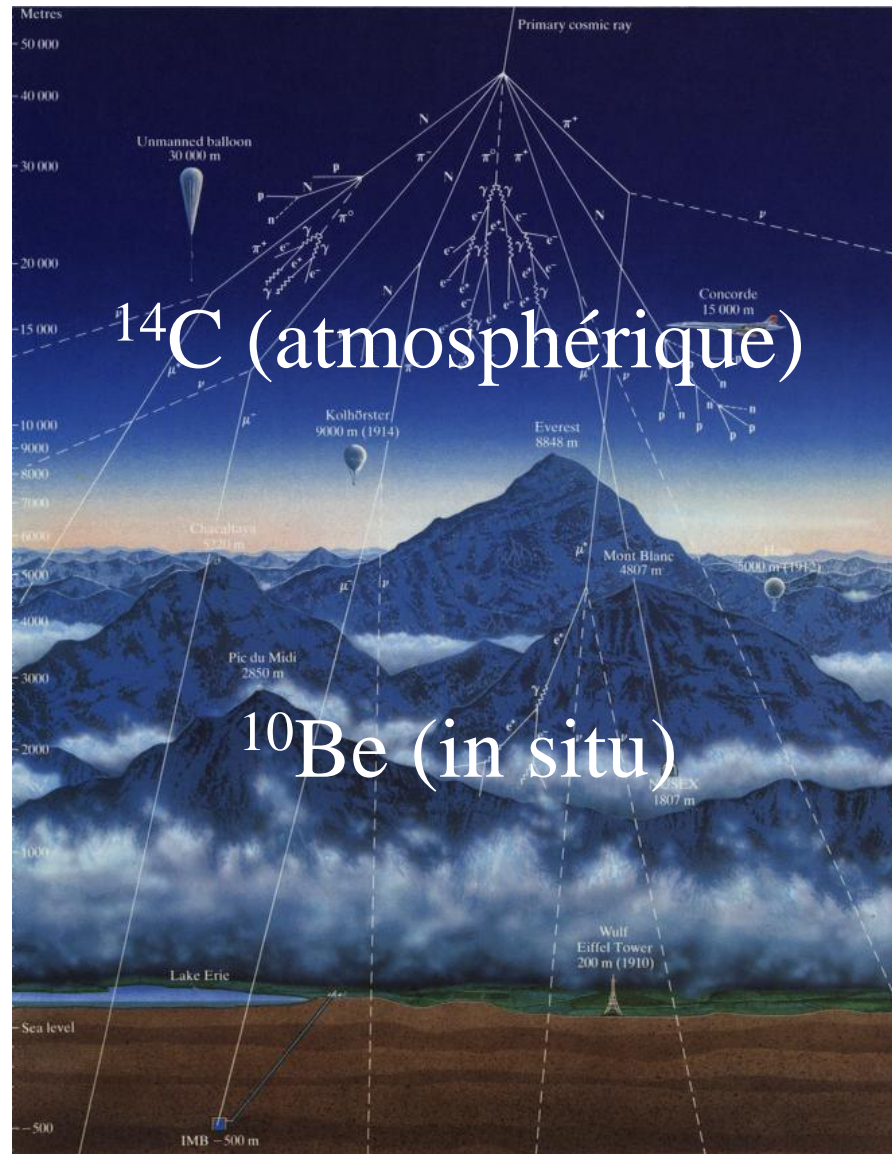
*C. Verati,
Géosciences Azur*

Mais il y a aussi :

- Paléontologie
- Palynologie
- Varves
- Lychénométrie
- etc...



DATATION PAR ELEMENTS COSMOGENIQUES



Le ^{14}C

Le carbone dans l'atmosphère :

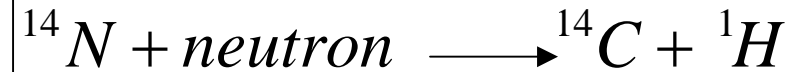
^{12}C : 98,9 %

^{13}C : 1,1 %

^{14}C : peanuts (mais fondamentaux!)

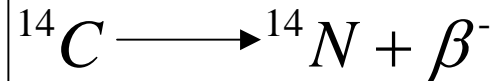
Le ^{14}C est produit dans la haute atmosphère par action du rayonnement cosmique sur les atomes d'azote. On parle de «*cosmonucléide atmosphérique*»

Production :



Puis, s'intégrant dans des molécules de CO_2 par oxydation, il se mélange rapidement dans toute l'atmosphère (et plus lentement dans les océans), où sa distribution peut être considérée homogène. La production est compensée par la désintégration par radioactivité

Désintégration :



$$\lambda_{^{14}\text{C}} = 1,209 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$$

$$T_{1/2} = 5730 \pm 40 \text{ a}$$

(premiers travaux par W.F. Libby, années '40)

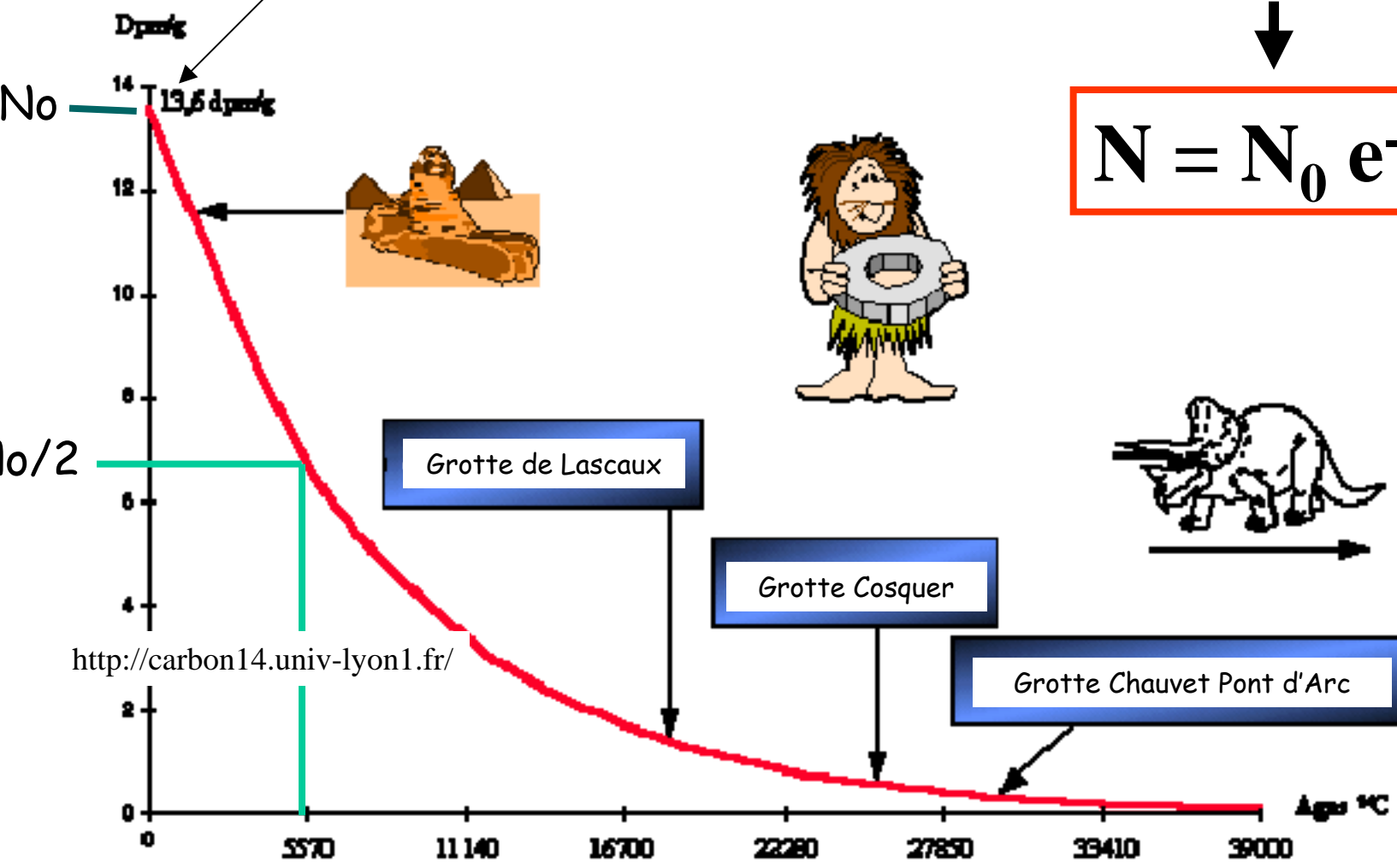
ce qui fixe un rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ relativement constant dans le temps:
 $N_0 = 1,3 \cdot 10^{-12}$ chêne du 1850 (préindustriel)

Les êtres vivants ont un rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en équilibre avec celui de l'atmosphère

Mort d'un organisme

fermeture du système

début de la décroissance du ¹⁴C



$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\ln(N / N_0) = - \lambda * t \iff \ln(N_0 / N) = \lambda * t$$

$$t = \ln(N_0 / N) \cdot 1 / \lambda_{\text{Libby}} = 8033 \cdot \ln(N_0 / N)$$

Après ~ 7 demi-vies (35-40 ka), la fréquence des désintégrations passe en dessous du seuil de détection ($N = 0.8\% N_0$)

VARIATIONS DU RAPPORT $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ DANS LE TEMPS

Long terme

Pléisto-Holocène :

- variations du rayonnement cosmique (ex. supernovae), de l'activité solaire et de l'intensité du champ magnétique terrestre : **fluctuations dans la production**
- **fractionnement** des isotopes par les végétaux
- **fractionnement** des isotopes par la circulation océanique
- **rejet de C dépourvu de ^{14}C** par le volcanisme

>>> nécessité d'une calibration par d'autres méthodes géochronologiques

Court terme

- combustion de carbone fossile (tout le ^{14}C s'est désintégré au cours des temps géologiques) :
Période début ère industrielle (2^{ème} moitié XIX^{ième}) – avant essais nucléaires : $[\text{}^{14}\text{C}] \searrow 2\%$
(effet SUESS)

- début des essais nucléaires (1950) : $[\text{}^{14}\text{C}] \nearrow$ (+ 90% en 1964, ça diminue depuis)

>>> datations ^{14}C partent de 1950 (before present) et utilisent un rapport N_0 standard préindustriel

Autre complication : révision de la constante de désintégration λ

$T_{1/2}$ conventionnel = 5568 ans (utilisé pour les calculs) ; $T_{1/2}$ réel = 5730 ± 40 ans

>>> facteur de correction de 1,029

CALIBRATION DES AGES ^{14}C

Par d'autres méthodes
de géochronologie absolue :

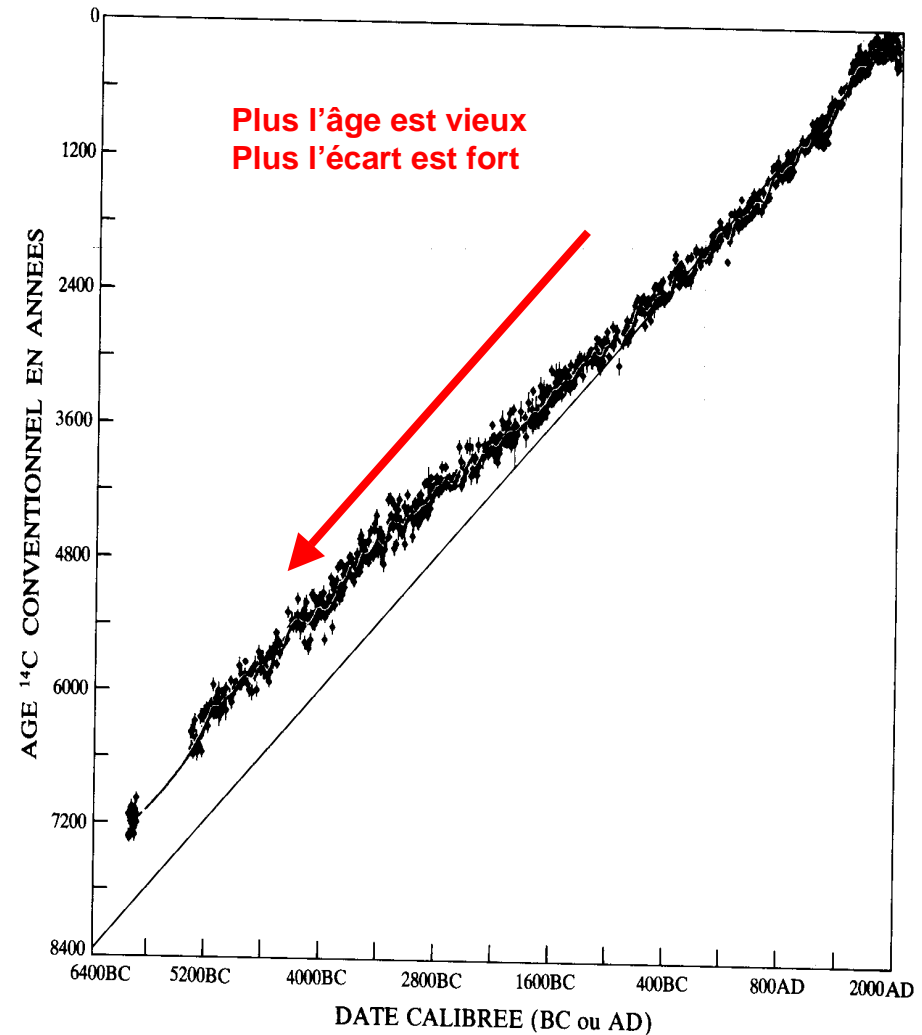
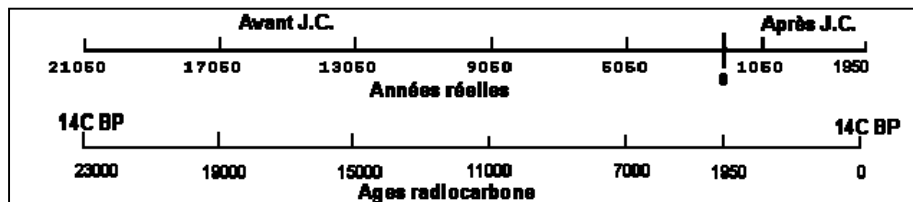
- Dendrochronologie
- Études de varves
- U/Th sur coraux et spéléothèmes

L'écart entre les âges ^{14}C 'brutes'
et les âges calibrés augmente
avec le temps.

Un échantillon daté de 10000 ans
BP par la méthode ^{14}C a un âge
réel ^{14}C cal de 11000 ans BP.

Un échantillon daté de 18000 ans
BP par la méthode ^{14}C a un âge
réel ^{14}C cal de 22000 ans BP.

**Correspondance entre le calendrier
des années réelles (Avant / Après J.C.) et le
calendrier radiocarbone (Ages ^{14}C BP)**



Représentation graphique de la période couverte par les tables de calibration (d'après KLEIN et al., 1982). En ordonnées, les âges ^{14}C conventionnels calculés avec la période de 5568 ans, en abscisse, la période calendaire en années avant ou après J.-C.

QU'EST-CE QUE L'ON DATE EXACTEMENT AU ^{14}C ?

Théoriquement, la méthode du radiocarbone sert à dater la fin de l'équilibre naturel $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ entre l'atmosphère et un échantillon de matière organique (charbon de bois, os, bois, herbes, feuilles, tissus, tourbe, coquillages ...)

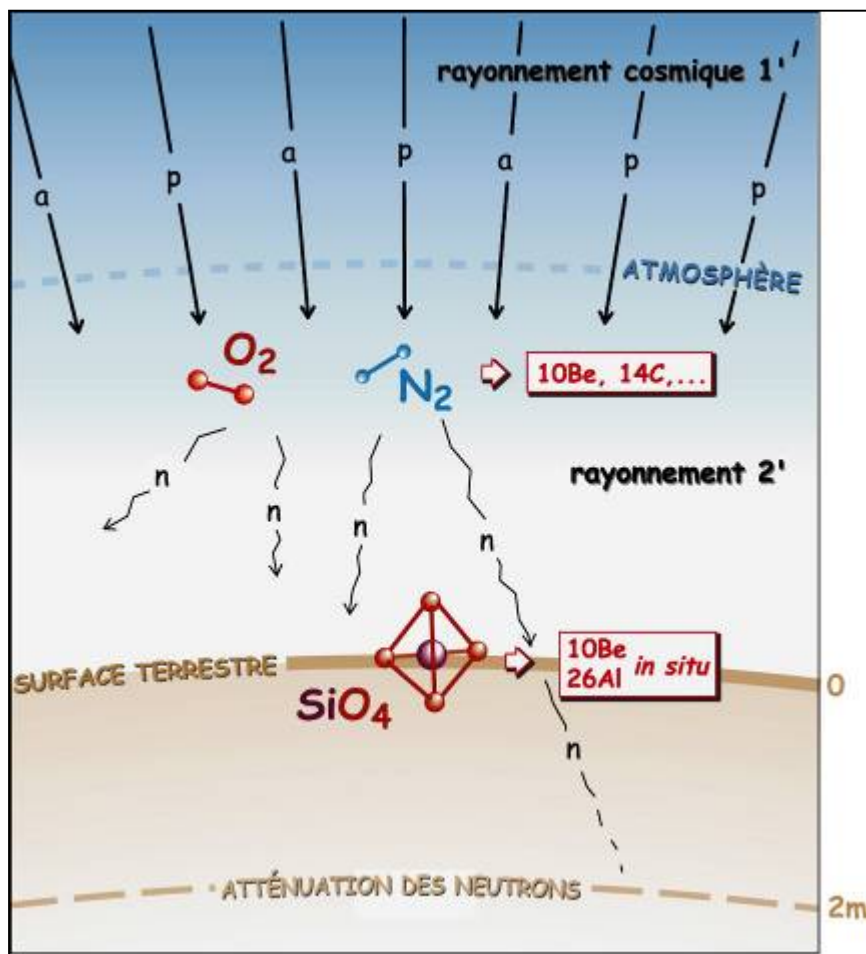
Mais attention...

- **L'échantillon (ou une fraction de celui-ci) peut être bien plus vieux que le dépôt qui le contient (remaniements) ;**
- **Depuis son enfouissement, le système a pu être contaminé par des fluides (vérifiable par mesure du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), des racines, des acides humiques ou des micro-particules organiques du sol ;**

Et lors de l'échantillonnage...

- **Faire attention à ne pas ramasser des bouts de racines actuelles ou des grains de calcaire ;**
- **Éviter les contacts avec vernis, papier, coton et autres matériaux contenant de la matière organique.**

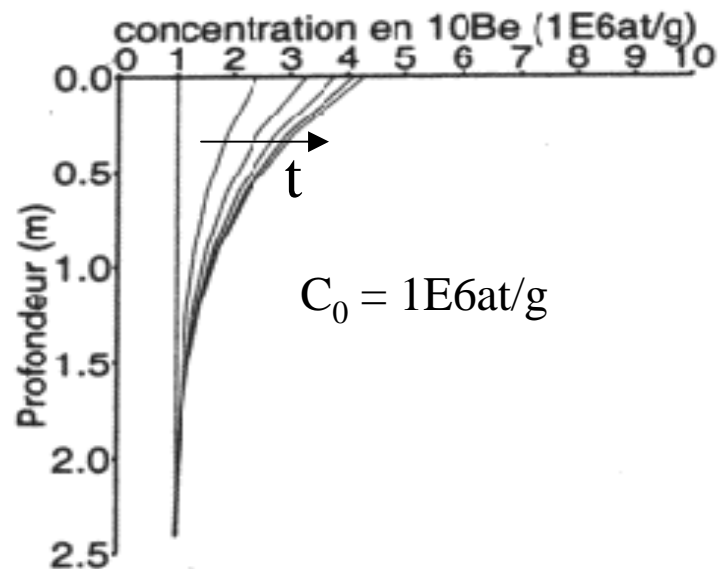
DATATION DE MARQUEURS MORPHOLOGIQUES PAR LA METHODE ^{10}Be IN SITU



Production de ^{10}Be cosmogénique in situ par double réaction de spallation : 1) atmosphère, 2) premiers mètres de la croûte

Taux de production annuel connu dans le quartz (qq atomes / grammes), varie en fonction de latitude (champ géomagnétique) et altitude (densité atmosphère)

Décroissance exponentielle de la production en profondeur (atténuation de la pénétration des particules secondaires (neutrons + muons) à travers de la matière)



Perte de ^{10}Be par désintégration radioactive (période de $\frac{1}{2}$ vie = 1,36 Ma)

Perte de ^{10}Be par dénudation de la surface terrestre

$$C(x,t) = C(x,0) \times e^{-\lambda t} + \frac{P_0}{\frac{\varepsilon \rho}{\Lambda} + \lambda} \times e^{-\frac{\rho x}{\Lambda}} \times (1 - e^{-(\lambda + \frac{\varepsilon \rho}{\Lambda})t})$$

ε : taux de dénudation

$C(x,0)$: ^{10}Be hérité



Inconnues difficiles à déterminer

C = concentration (at/g)

P_0 = production en surface (at/g/an)

x = profondeur (g.cm⁻²)

λ = constante de désintégration (5,1.10⁻⁷an⁻¹, Nishiizumi et al., 2007)

t = temps = durée d'exposition (an)

ε = taux d'érosion (g/cm²/an)

ρ = densité de la matière (g/cm³)

Λ = longueur d'atténuation des particules secondaires

$$\Lambda_{\text{neutrons}} = 150 \text{ g/cm}^2$$

$$\Lambda_{\text{muons}} = 1500 \text{ à } 5300 \text{ g/cm}^2$$

CAS 1

Si on est capables de déterminer ε ou $C(x,0)$ par ailleurs, par inversion des données on peut calculer un âge exact de la surface

CAS 2

Mais le plus souvent on est obligés de faire des hypothèses à partir des observations géomorphologiques afin de simplifier l'équation générale dans une des deux formes suivantes :

Si on suppose ε nul :

$$T_{\min} = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(1 - \frac{\lambda \times C_{(0,t)}}{P_0} \right)$$

Si on suppose t très long :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Lambda}{\rho} \times \left[\frac{P_0}{C_{(0,\infty)}} - \lambda \right]$$

LE PARAMETRE EROSION

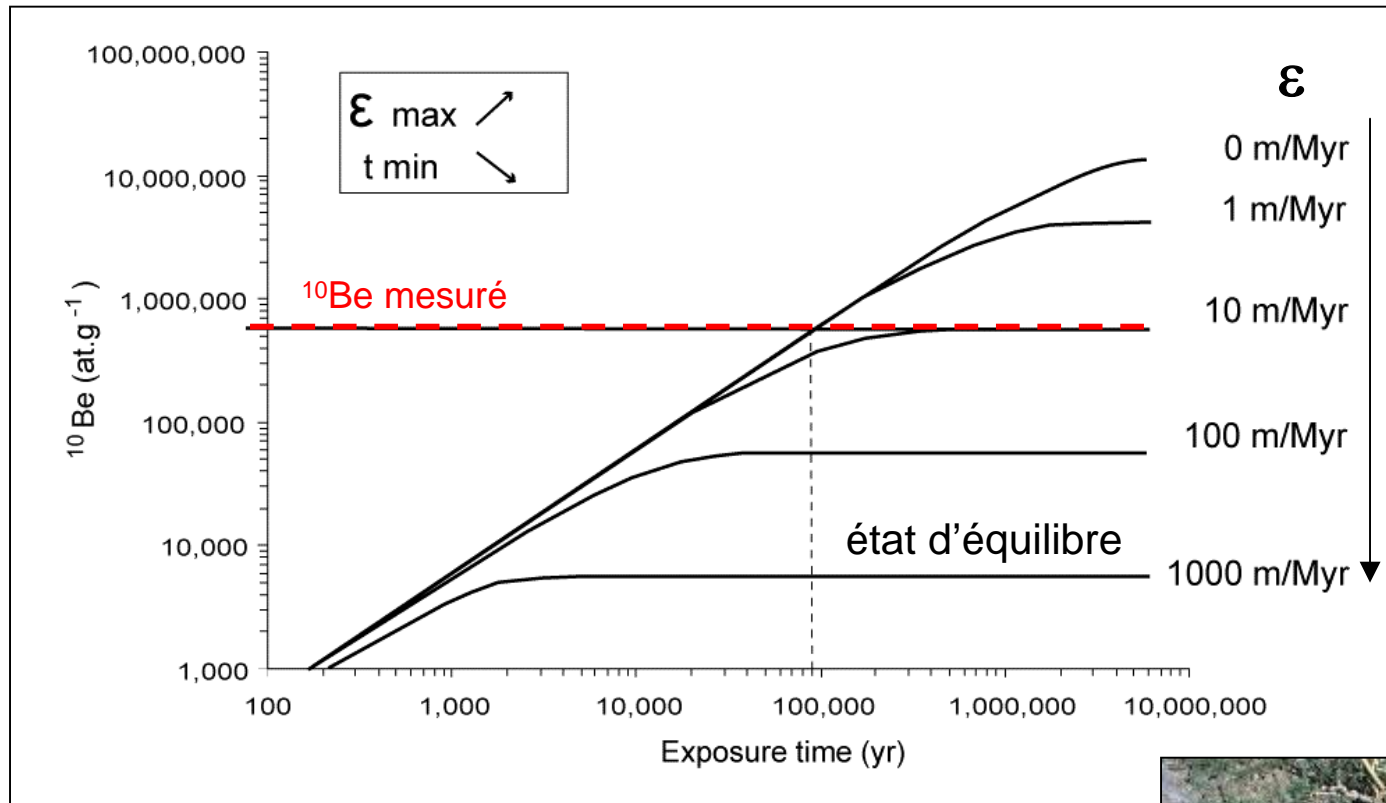
Dégradation des blocs



Dénudation de la surface



Evolution de la concentration avec le temps



d'après Brown et al., 1991



LE PROBLEME DE LA PRE-EXPOSITION



exhumation...



... stockage...

... transport...



... dépôt final



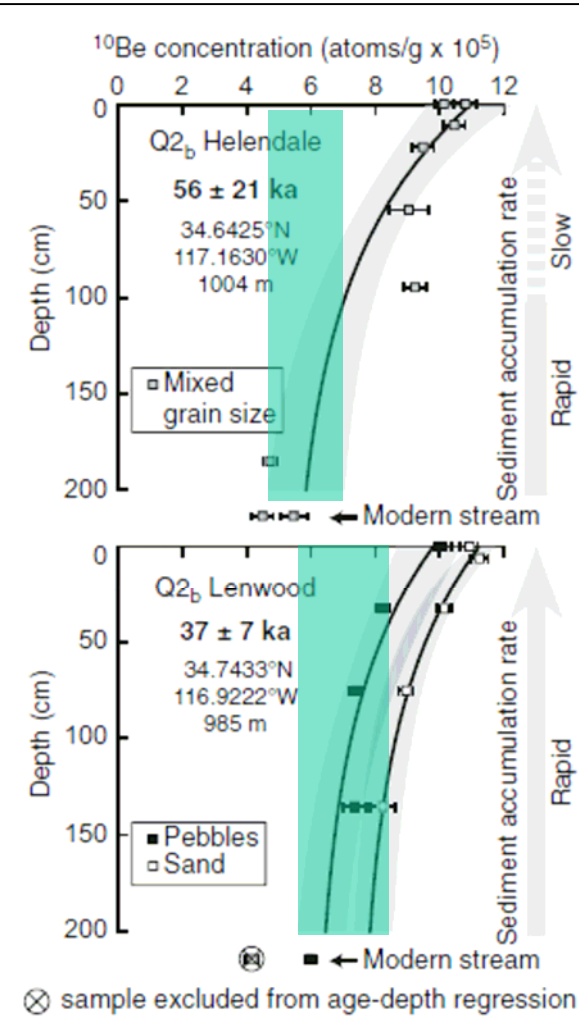
^{10}Be hérité

Héritage

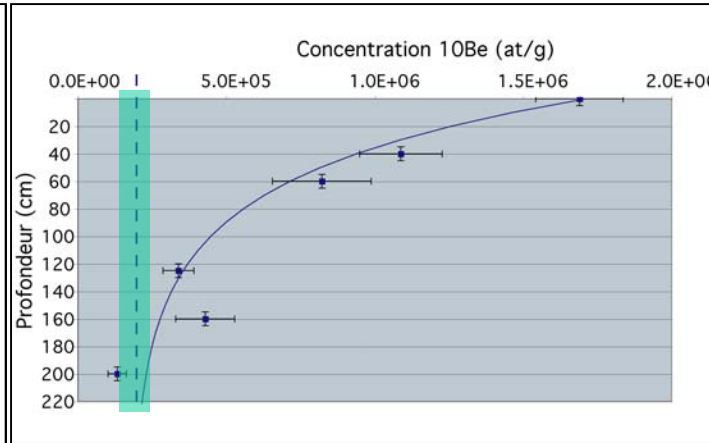
Non-négligeable et uniforme

(Quasi)négligeable et uniforme

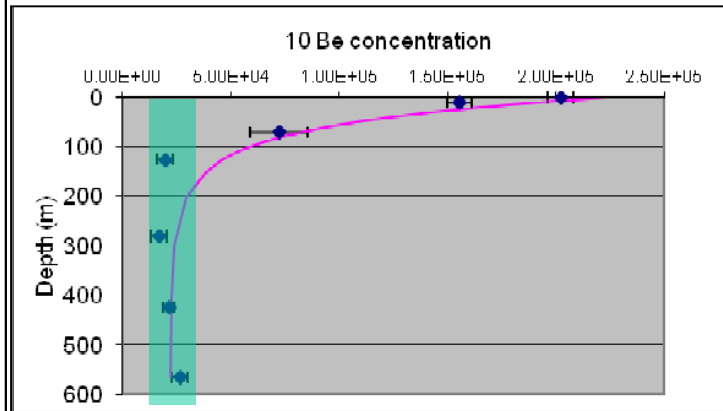
Non uniforme



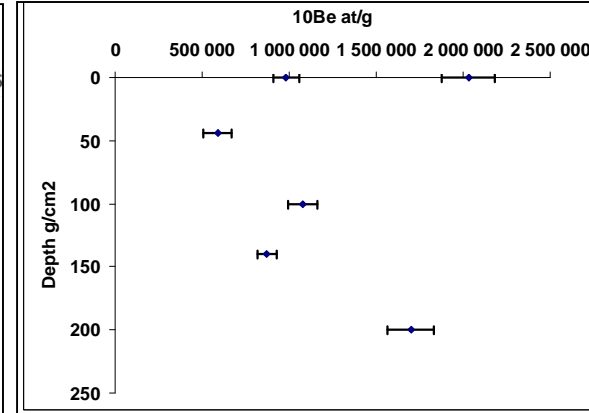
Oskin et al., 2008



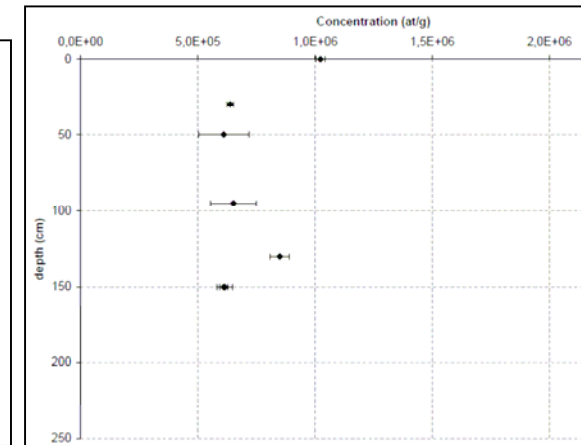
Vassallo et al., 2007



Vignon et al., in prep.



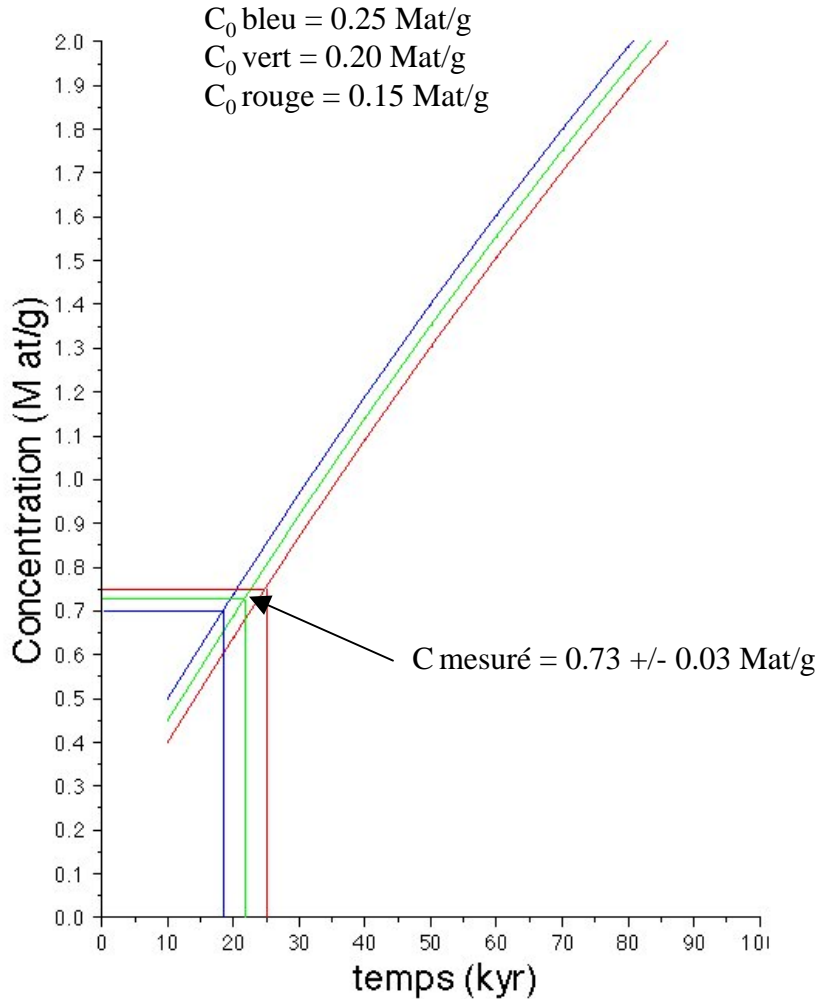
Vassallo, 2006



Rizza et al., in prep.

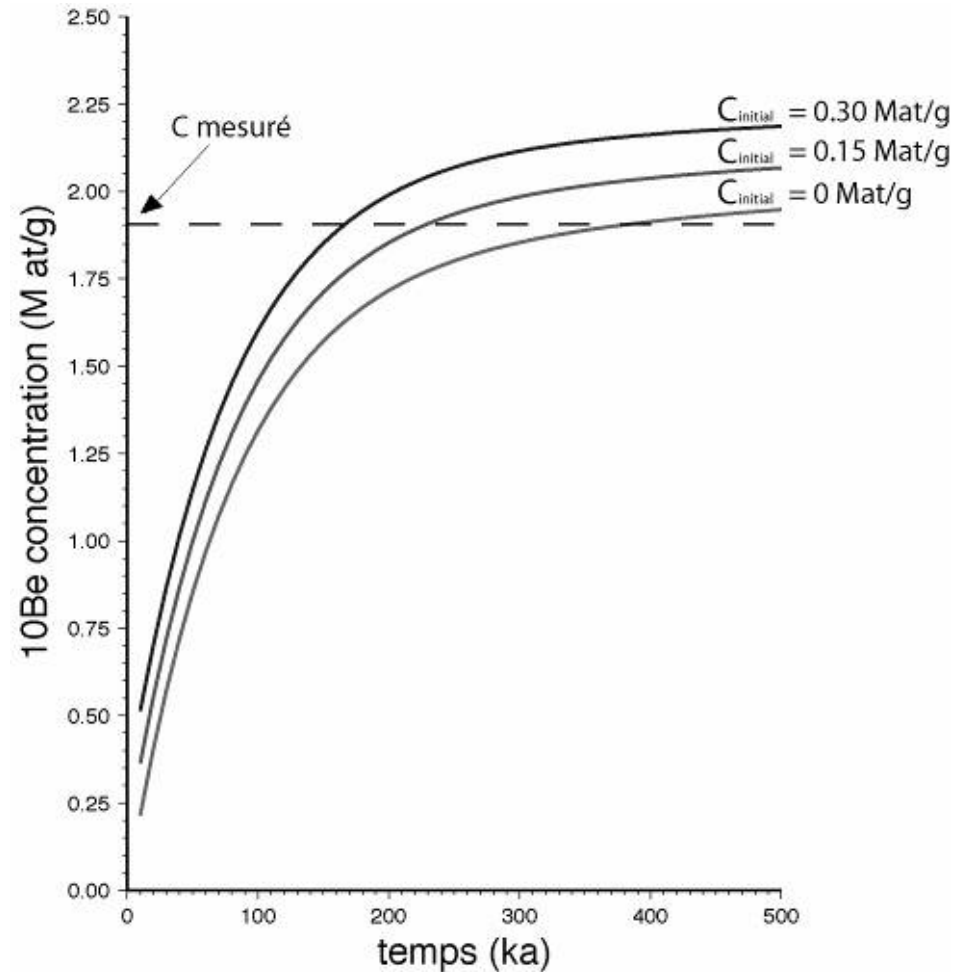
Problème pour les surfaces « jeunes » (< 50 ka) :

Surestimation de l'âge



Problème pour les surfaces « vieilles » (> 50 ka) :

Concentration à l'état d'équilibre ou pas?



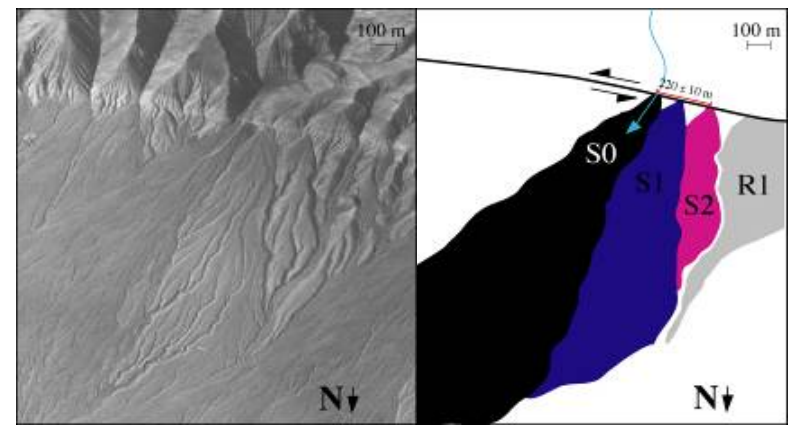
Stratégie d'échantillonnage vis-à-vis d'érosion et de pré-exposition

- Gros blocs (si possible) en surface
- Dessus-dessous (si hommes forts)
- Profil en profondeur (s'ils ont encore la force de creuser...)



APPLICATIONS POSSIBLES

- 1) Datation de marqueurs morphotectoniques
→ quantification de vitesses de déplacement le long de failles



- 2) Datation de terrasses alluviales étagées
→ quantification de taux d'incision (fonction de la tectonique, du climat et du fonctionnement propre des rivières)

- 3) Datation de surfaces d'arrachement

- détermination de la chronologie des glissements de terrain



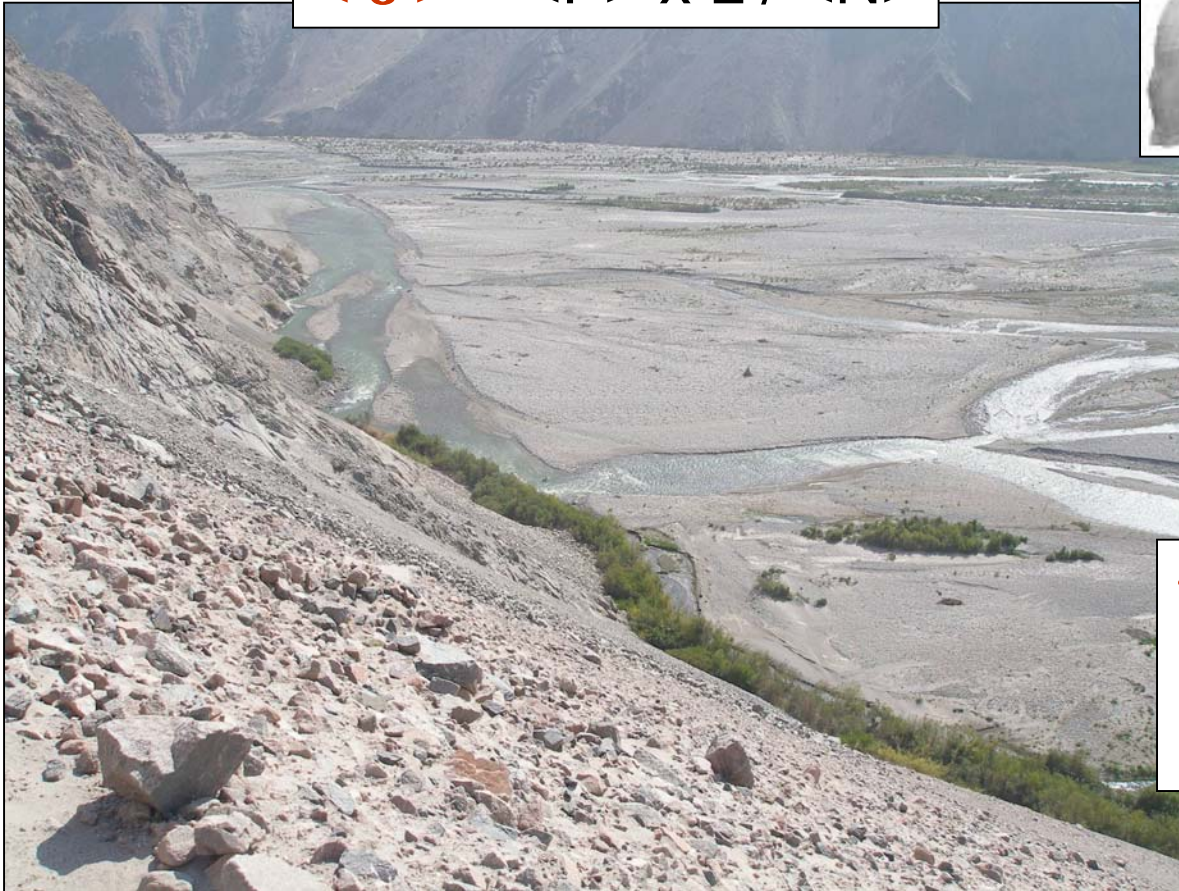
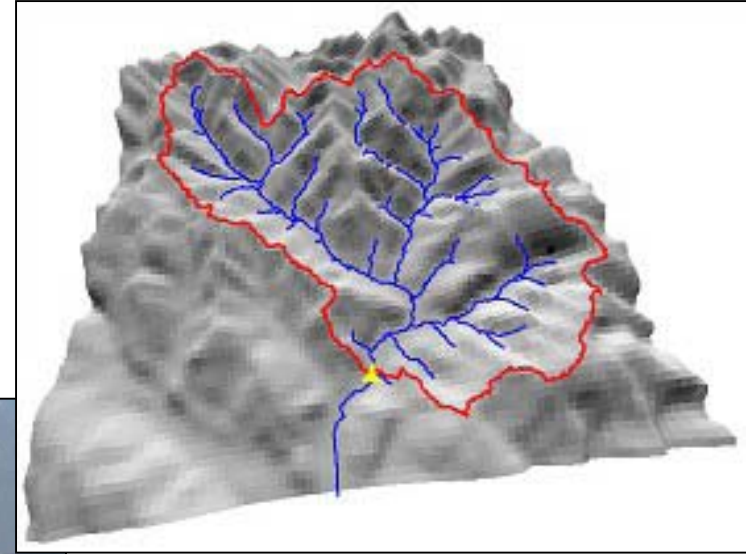
- 4) Datation de roches moutonnées, moraines et blocs erratiques
→ reconstitution des phases d'avancée et de recul des glaciers

5) Estimation du taux d'érosion moyen d'un bassin versant (couplage de différents cosmonucléides : ^{10}Be , ^{26}Al , ^{21}Ne ...)

Hypothèses:

- Sable dans la rivière échantillonne tout le bassin versant
- Concentrations sur les pentes sont à l'équilibre
- Temps de transport négligeable

$$\langle \varepsilon \rangle = \langle P \rangle \times L / \langle N \rangle$$



ε = taux d'érosion du bassin versant
P = taux de production
L = longueur d'atténuation
N = concentration ^{10}Be (ou ^{26}Al , ^{21}Ne)
mesurée dans le sable

OSL et TL

Optically Stimulated Luminescence (ou 'Luminescence Optique') et ThermoLuminescence



Ces techniques permettent de dater la période d'enfouissement d'un sédiment (grains de quartz, feldspaths) en mesurant l'énergie accumulée dans les imperfections des minéraux par le rayonnement radioactif de l'encaissant et par le rayonnement cosmique

Irradiation par radioactivité ambiante (U, Th, K) et rayonnement cosmique

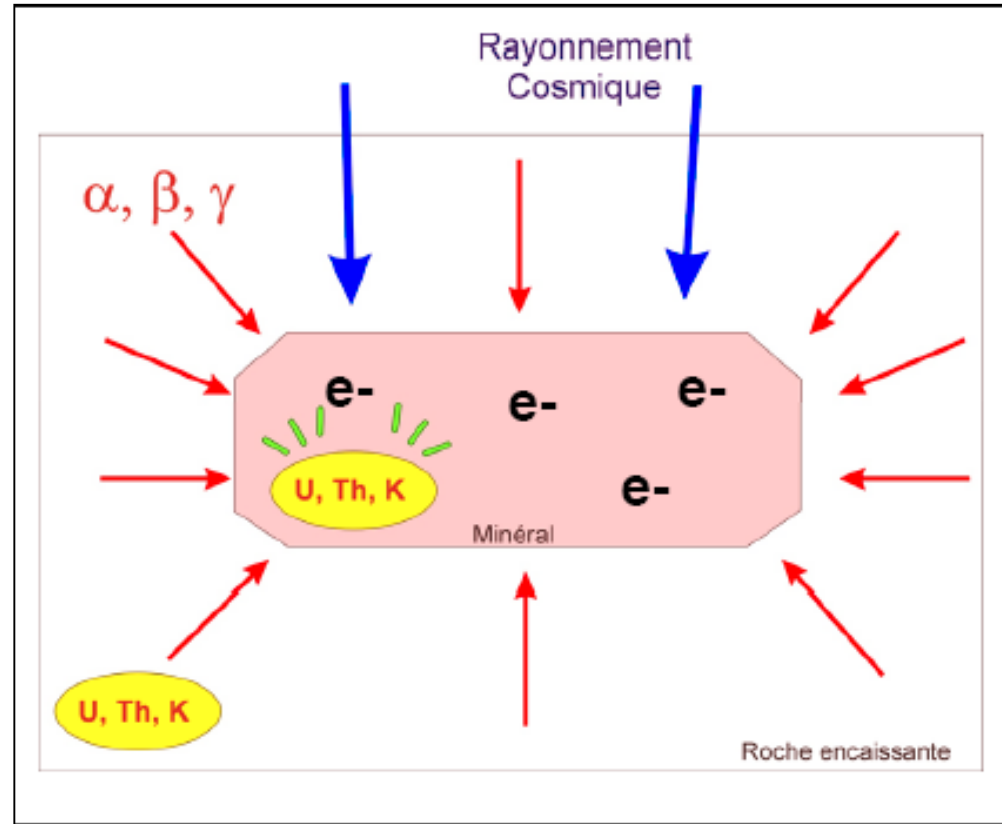


ionise le cristal en expulsant des électrons de leur état stable

électrons ensuite piégés dans les défauts cristallins à des "profondeurs" (niveaux d'énergie) variables, en quantité proportionnelle à la dose naturelle reçue par le minéral (radioactivité ambiante, temps)



apport d'une énergie externe (chaleur, lumière) permet aux électrons de quitter les pièges: luminescence proportionnelle à la quantité d'électrons piégés



Michel, 2004

Dans le milieu naturel, l'énergie nécessaire pour expulser les électrons de leur piège est produite par la lumière solaire. L'horloge OSL des minéraux est alors remise à zéro



La stimulation optique du minéral en laboratoire permet de mesurer le signal naturel qui n'est autre que la quantité d'électrons piégés au cours de l'enfouissement



La comparaison de la luminescence naturelle avec celle induite par l'ajout en laboratoire de doses de radiations artificielles permet de déterminer la dose équivalente à la paléodose enregistrée par le minéral

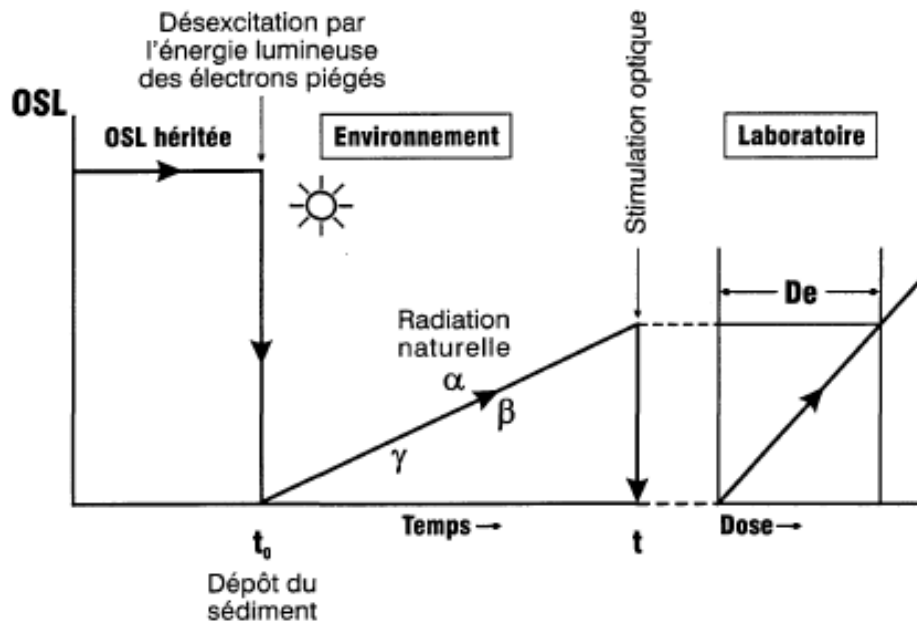


Schéma récapitulatif expliquant le principe de datation par luminescence optique. L'OSL héritée est remise à zéro suite à l'exposition du sédiment à la lumière solaire. Dès que le sédiment est enfoui (t_0) les pièges à électrons commencent à se remplir suite à l'ionisation des atomes par les rayonnements α , β et γ du milieu environnant. En laboratoire, la comparaison du signal naturel à celui induit par des doses d'irradiations artificielles permet de déterminer la dose équivalente.

$$t = \text{Paléodose (Gy)} / \text{Dose annuelle (Gy/t)}$$

t : temps

Gy: unité de la dose de radiation (1 Gray = 1 J.kg*1)

Remise à zéro du chronomètre

Céramiques, poteries et outils archéologiques (échantillons chauffés) :

bonne remise à zéro pour le signal TL ;

Sédiments éoliens et fluviatiles fins (longue exposition au soleil) :

bonne remise à zéro pour le signal OSL ;

Sédiments fluviatiles grossiers, glaciaires, lacustres ou marins (exposition parfois très courte) :

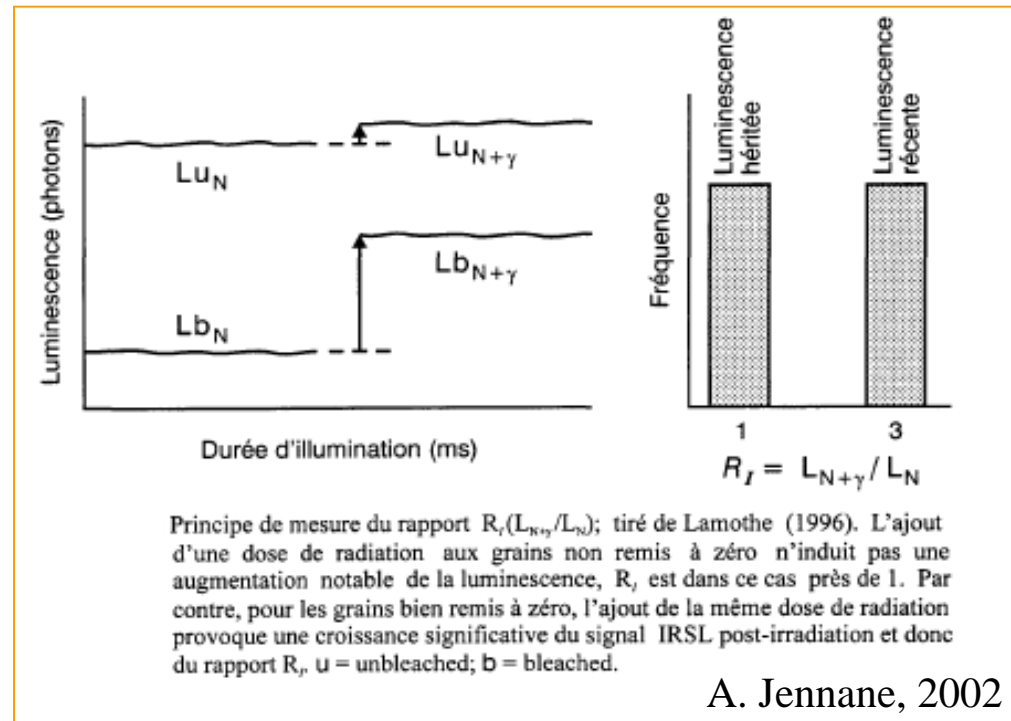
remise à zéro pas toujours réalisée (mais plus rapide pour le signal OSL).

Exemple : quartz de 500 ka perd 90% du signal OSL en 10 sec et 83% du signal TL en 20 h (Godfrey-Smith *et al.*, 1988)

➔ Si remise à zéro partielle :
surestimation de l'âge

POUR VERIFIER LA REMISE A ZERO :
ANALYSE DE GRAINS INDIVIDUELS

Le rapport de l'intensité du grain irradié sur celle naturelle du même grain ($R_j = L_{N+Y}/L_N$; Lamothe, 1996) représente un facteur de discrimination qui permet d'évaluer l'homogénéité de l'échantillon analysé



Perte du signal (Anomalous Fading)

Dans les **feldspaths** : effet 'tunnel' pas bien compris, qui permet à une partie des électrons piégés dans les défauts cristallins de revenir à leur niveau normal.

Possible sous-estimation des âges jusqu'à 30-50%

VERIFICATION DE LA PERTE DU SIGNAL :

Mesure du signal de luminescence juste après irradiation et ensuite quelques mois plus tard (long et pas toujours probant à cause de la différence entre échelle de temps naturelle et de laboratoire)

Période d'application de la méthode

En moyenne quelques 100 ka, mais fonction de...

- l'apparition de la saturation du signal (dose feldspaths > dose quartz) ;
- la dose annuelle (saturation plus ou moins rapide) ;
- la stabilité des pièges

Échantillonnage

Éviter absolument d'exposer les échantillons à la lumière !

2 techniques envisageables :

- échantillonner dans le noir (sous une bâche ou la nuit) ; on a le droit à un éclairage en lumière rouge (grande longueur d'onde) ou de la lune



- échantillonner un volume de sédiments consolidés dans un tube opaque (ou une boîte de conserve...) et enlever la partie superficielle (~1 cm) en laboratoire