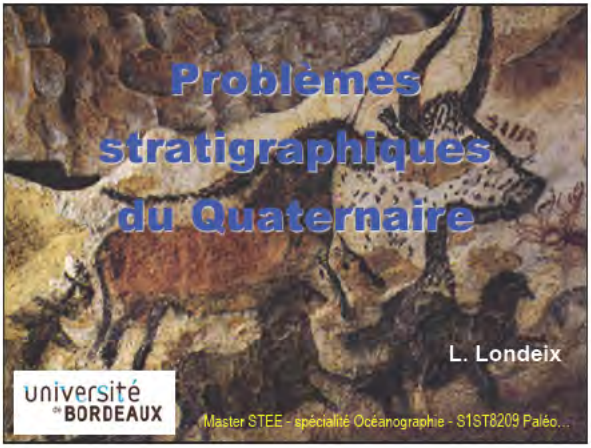


Particularités

La stratigraphie du Quaternaire pourrait ne présenter que peu de particularités car les méthodes utilisées sont relativement classiques et communes avec celles des autres périodes géologiques.

Toutefois, pour documenter l'évolution de l'Homme et celle du climat au cours de cette période, il est nécessaire de disposer d' une chronologie la plus précise possible, et ce, avec des résolutions allant de la 100^{t} de ka à une échelle décadale.

Particularités

Une telle résolution recherchée est quasi unique en géosciences

Néanmoins,
cela est facilité par le fait que les données appréhendées sont :

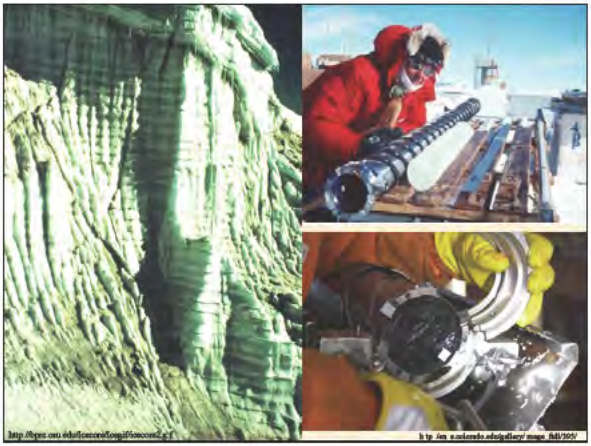
- récentes, donc
- plus facilement accessibles,
- relativement bien préservées, et
- particulièrement variées (*sédiments, glaces, coraux, spéléothèmes…)*

Aspect technique

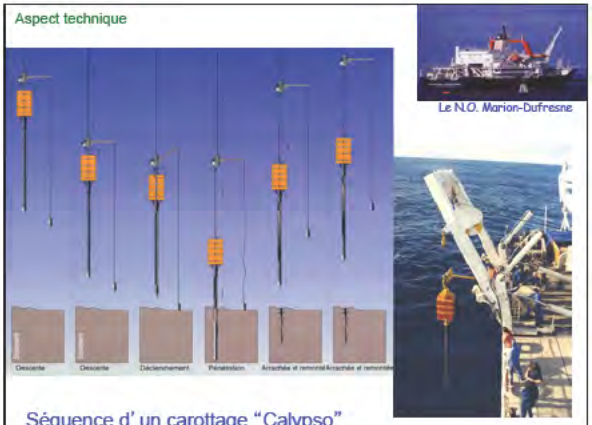
Bien sûr, les performances techniques des appareils utilisés sont déterminantes…
[spectromètres de masse (pas encore banalisés, mais de plus en plus utilisés en "routine" pour le $\partial^{18}O$), accélérateurs de particules (^{14}C), *etc.*]

… et la technologie intervient aussi sur la récupération des archives géologiques :

- carottes de glace
- carottes marines (diamètre, longueur…)



Aspect technique



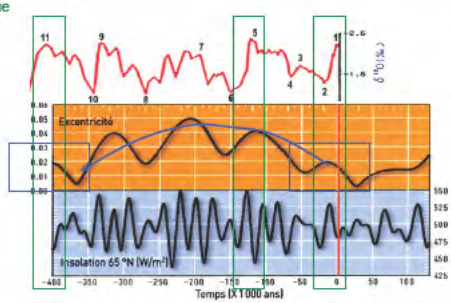
Séquence d' un carottage "Calypso"

Aspect technique

Techniques, et matériels de carottages (*e.g.* carottier "Calypso") ont été bien améliorés…

- diamètre carottes plus grand (7 → 12 cm)
- record mondial de longueur carottée (gravité) : ~64 m (Marion-Dufresne)

Aspect technique



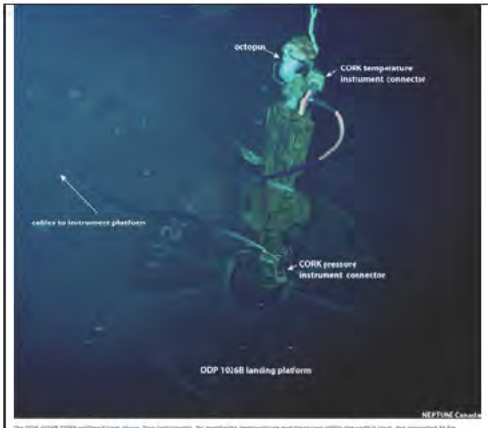
Ces performances permettent d'accéder, notamment, au stade isotopique 11
(MIS 11 = meilleur analogue de la période actuelle).

Aspect technique

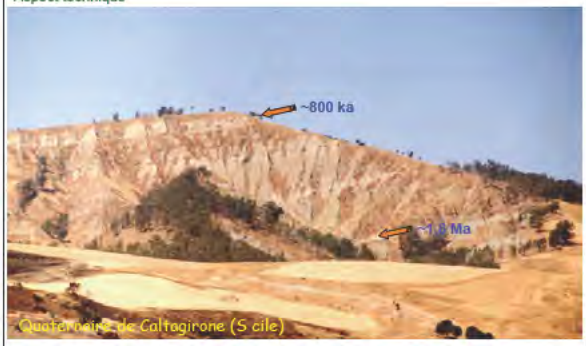
Au delà de ces profondeurs (= âges), il faut forer ou combiner forage et carottage (*cf.* IODP), ce qui est beaucoup plus lent et contraignant,
ou encore… chercher des coupes sur le terrain.

L < 65 m

le 'Joides Resolution'
(un des navires du programme de carottage profond 'IODP')



Aspect technique



chercher des coupes sur le terrain.

Méthodes de datation

Les méthodes de datation s'appliquant aux échantillons quaternaires sont nombreuses :

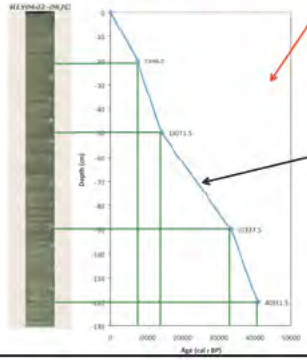
- radio-éléments
- thermoluminescence

} méthodes numériques directes

- racémisation des acides aminés
- dendrochronologie
- numération de couches
- paléomagnétisme
- téphrochronologie
- isotopes stables
- astrochronologie
- bio/éco-stratigraphie
- *etc.*

Méthodes de datation

Le but étant de construire un "modèle d'âge"



Méthodes de datation

La résolution des méthodes de datation utilisées pour le Quaternaire est poussée aux limites des précisions actuellement envisageables ;

ces limites sont technologiques,

et aussi scientifiques :

Un exemple significatif : cas des datations par le ^{14}C…

Le cas du ^{14}C

La méthode de datation par le ^{14}C est, sans conteste, la méthode numérique phare pour le Quaternaire récent.

Et très paradoxalement,

la précision de la mesure est grande,

mais l'incertitude de l'âge est fort…

En effet, bien que l'incertitude analytique soit souvent inférieure à 3%…

plusieurs corrections sont à apporter à cet âge numérique :

Le cas du ^{14}C

Remarque préliminaire

Le radiocarbone est un isotope radioactif du carbone dont la période radioactive (ou demi-vie) est égale à :

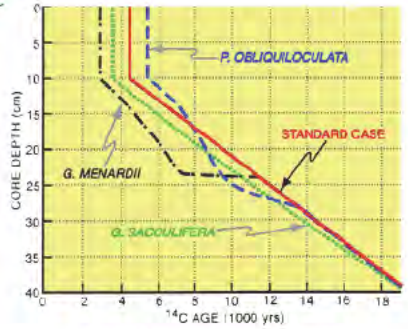
5 734 ± 40 ans

selon des calculs relevant de la physique des particules datant de 1961.

Cependant, pour les datations on continue par convention d'employer la valeur évaluée en 1951, de :

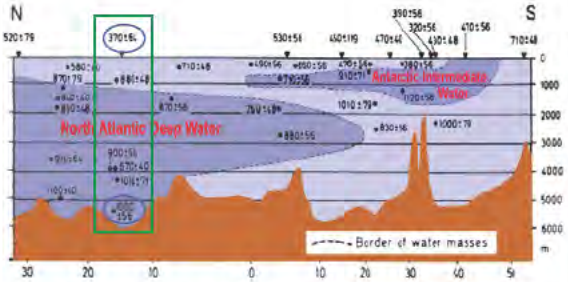
5 568 ± 30 ans

- le fractionnement est différent selon les organismes datés ; *e.g.* photosynthétiques ou non, mode de vie… ⇒ correction "effet vital"



3 espèces de foraminifères planctoniques ⇒ 3 âges différents

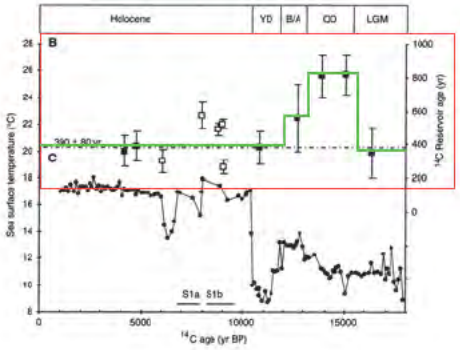
- le fractionnement est différent selon les organismes datés ⇒ correction "effet vital"
- les eaux marines ont un certain âge, différent entre eaux de surface (~400 ans) et eaux de fond (~800 ans) ⇒ correction "effet réservoir"



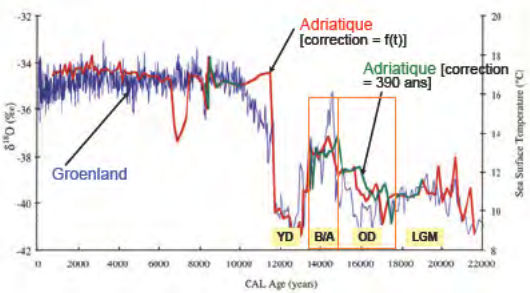
=> f. planctoniques et f. benthiques contemporains et issus d'une même colonne d'eau n'auront pas le même âge ^{14}C ! (sauf s'il y a un fort brassage)

- le fractionnement est différent selon les organismes datés ⇒ correction "effet vital"
- les eaux marines ont un certain âge, différent entre eaux de surface (~400 ans) et de fond (~800 ans) ⇒ correction "effet réservoir"
- la ventilation des océans ayant varié au cours du temps (*cf.* glaciaires / interglaciaires) et selon les bassins (*e.g.* Méditerranée),

⇒ "effet réservoir" = f(t)



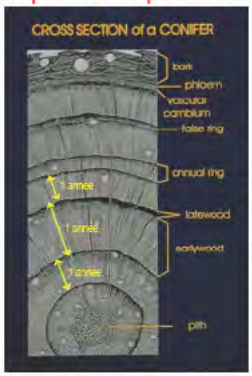
Le cas du ^{14}C



la courbe —— *est plus précise que la* ——

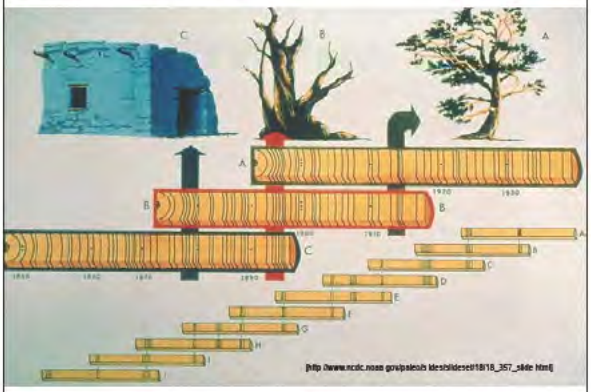
Le cas du ^{14}C

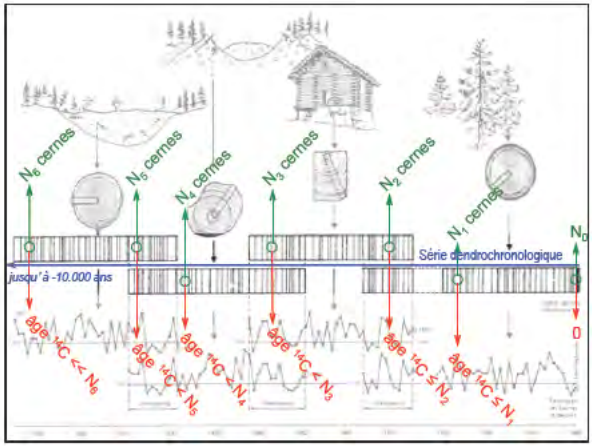
Malgré ces corrections, un problème persiste :



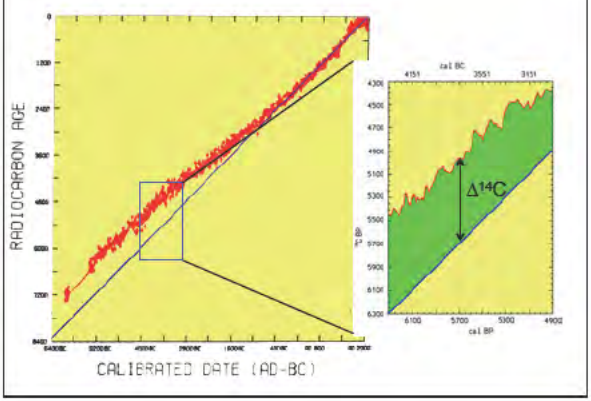
[http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/ctl/dendro/dendro18_357_a_slide.html]

Le cas du ^{14}C / Dendrochronologie





Le cas du ^{14}C



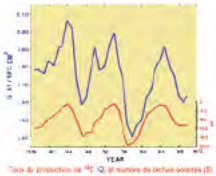
Le cas du ^{14}C

Le rapport $^{14}C/^{12}C$ a varié au cours du temps !

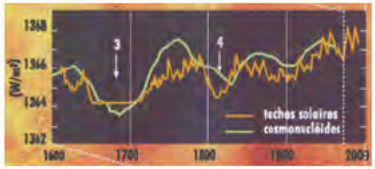
Plusieurs causes envisagées :

- modifications des échanges océan/atmosphère (40t vs 1t actuellement) liées aux variations climatiques
- variations de production de ^{14}C liées à des fluctuations du flux cosmique et/ou de l'activité solaire
- déviations du rayonnement cosmique par le champ géomagnétique

Le cas du ^{14}C



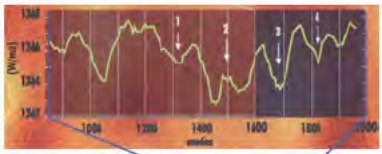
Taux de production de ^{14}C (Q) et nombre de taches solaires (S)

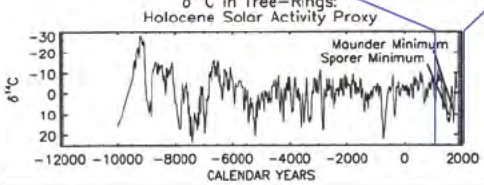


3 = min. de Maunder ; 4 = min. de Dalton

Le cas du ^{14}C

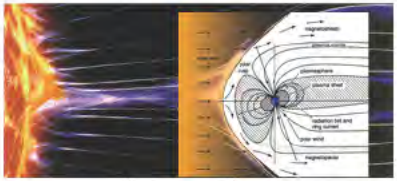
L'analyse des variations de production du ^{14}C ($\Delta^{14}C$) permet de retracer l'activité solaire jusqu'à -10 000 ans.

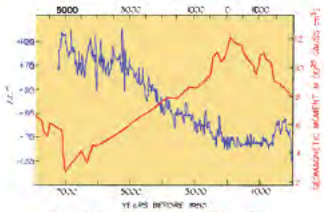




Le cas du ^{14}C

production de ^{14}C et intensité du champ géomagnétique…



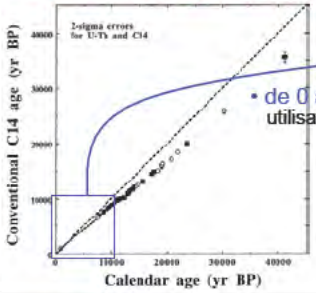


Concentration relative de ^{14}C dans l'atmosphère et intensité du champ géomagnétique

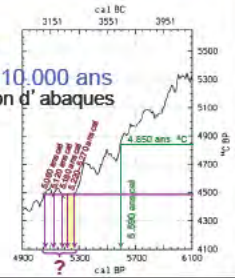
Le cas du ^{14}C

La demi-vie du ^{14}C est de 5.734 ± 40 ans

La période d'utilisation du radiocarbone pour les calculs d'âges est inférieure à 50.000 ans



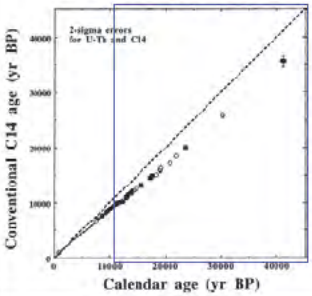
- de 0 à 10.000 ans
  utilisation d'abaques



Le cas du ^{14}C

La demi-vie du ^{14}C est de 5.734 ± 40 ans

La période d'utilisation du radiocarbone pour les calculs d'âges est inférieure à 50.000 ans



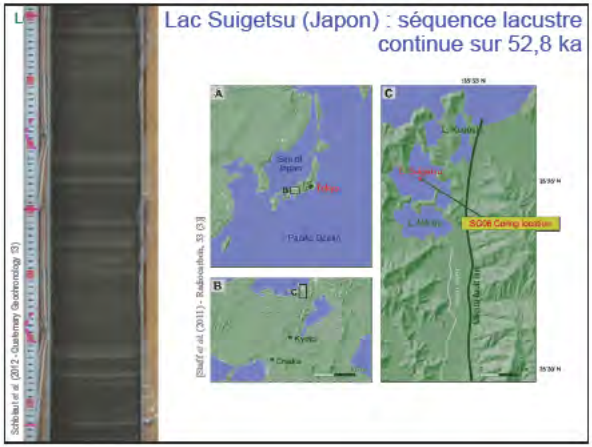
- de 0 à 10.000 ans
  utilisation d'abaques
- de 10 à 50 ka
  utilisation de polynômes

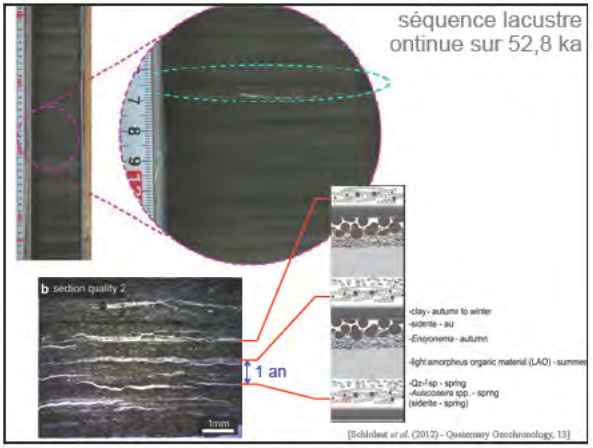
[Age cal ans BP] = $-3{,}0126 \times 10^{-6} \times$ [âge ^{14}C ans BP]^2 + $1{,}2896 \times$ [âge ^{14}C ans BP] - 1005

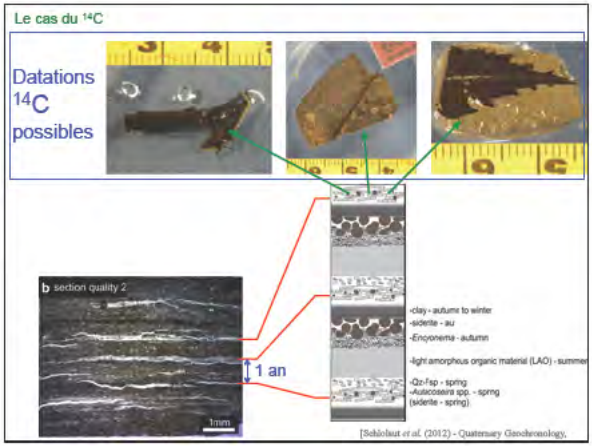
Le cas du ^{14}C

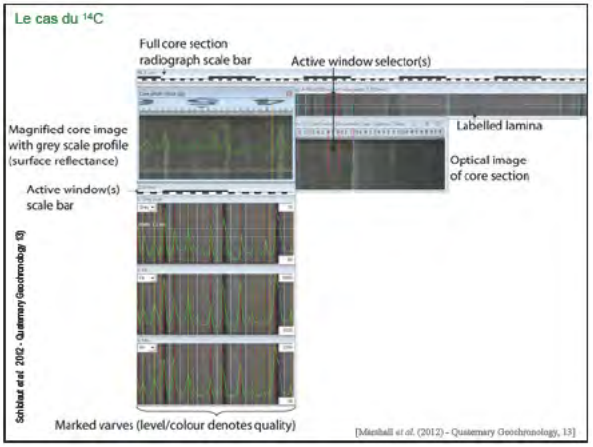
Certains dépôts lacustres présentent aussi une cyclicité annuelle…

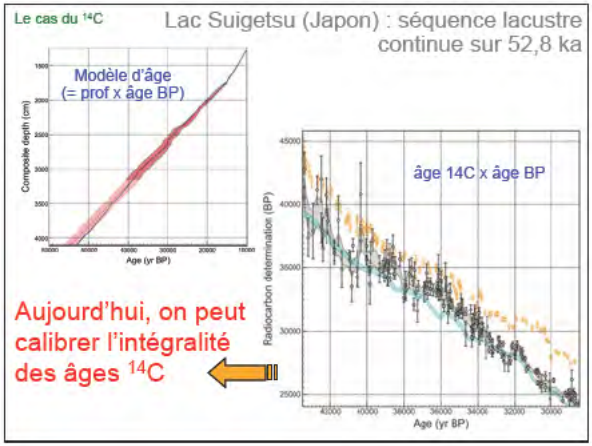
mais souvent limitée à 11.000 ans

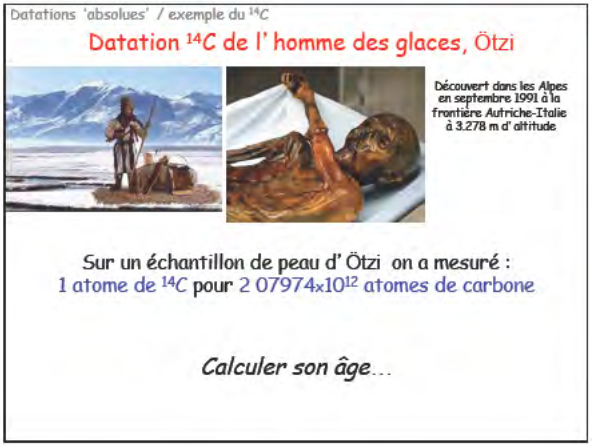

Lac Suigetsu (Japon) : séquence lacustre
continue sur 52,8 ka
A
B
C
Sea of Japan
Tokyo
PACIFIC OCEAN
Kyoto
Osaka
L. Kasumi
L. Mikata
SG06 Coring location
[Staff et al. (2011) - Radiocarbon, 53 (3)]
Schlolaut et al. (2012 - Quaternary Geochronology 13)


séquence lacustre
ontinue sur 52,8 ka
b section quality 2
1 an
1mm
-clay - autumn to winter
-siderite - au
-Enyonema - autumn
-light amorphous organic material (LAO) - summer
-Qz-Fsp - spring
-Aulacoseira spp. - spring
(siderite - spring)
[Schlolaut et al. (2012) - Quaternary Geochronology, 13]


Le cas du 14C
Datations
14C
possibles
b section quality 2
1 an
1mm
-clay - autumn to winter
-siderite - au
-Enyonema - autumn
-light amorphous organic material (LAO) - summer
-Qz-Fsp - spring
-Aulacoseira spp. - spring
(siderite - spring)
[Schlolaut et al. (2012) - Quaternary Geochronology,


Le cas du 14C
Full core section
radiograph scale bar
Active window selector(s)
Magnified core image
with grey scale profile
(surface reflectance)
Labelled lamina
Optical image
of core section
Active window(s)
scale bar
Marked varves (level/colour denotes quality)
Schlolaut et al. 2012 - Quaternary Geochronology 13)
[Marshall et al. (2012) - Quaternary Geochronology, 13]


Le cas du 14C
Lac Suigetsu (Japon) : séquence lacustre
continue sur 52,8 ka
Modèle d'âge
(= prof x âge BP)
Composite depth (cm)
Age (yr BP)
âge 14C x âge BP
Radiocarbon determination (BP)
Age (yr BP)
Aujourd'hui, on peut
calibrer l'intégralité
des âges 14C


Datations 'absolues' / exemple du 14C
Datation 14C de l' homme des glaces, Ötzi
Découvert dans les Alpes
en septembre 1991 à la
frontière Autriche-Italie
à 3.278 m d' altitude
Sur un échantillon de peau d' Ötzi on a mesuré :
1 atome de 14C pour 2 07974x10^12 atomes de carbone
Calculer son âge…

Accélérateur de particules (AMS) : ligne pour le ^{14}C

Datation ^{14}C de l' homme des glaces, Ötzi

$P_{(t)}$ = 1 atome de ^{14}C pour $2{,}07974 \times 10^{12}$ atomes de carbone

P_0 = 1 atome de ^{14}C pour $1{,}2 \times 10^{12}$ atomes de carbone

T_{14C} = 5.568 ans

$P_{(t)} = P_0\, e^{-\lambda t}$ <=> $e^{-\lambda t} = P_{(t)} / P_0$

<=> $\lambda t = \ln(P_0/P_{(t)})$

<=> $t = \ln(P_0/P_{(t)}) / \lambda$

<=> $t = T \times \ln(P_0/P_{(t)}) / \ln 2$

$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

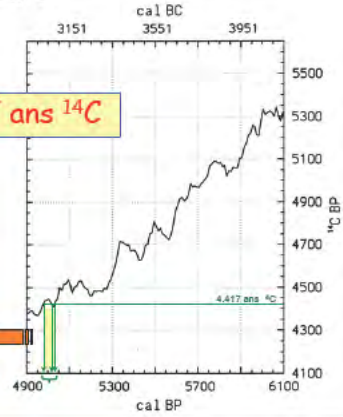
$(t = t_1 - t_0)$

nombre d'atomes radioactifs restant à un instant t

constante de désintégration

nombre d'atomes radioactifs initial à l' instant t_0

=> t = 4.417 ans ^{14}C



=> t = 4.417 ans ^{14}C

- 4.980 ans
  ou
- 5.020 ans
  ou
- 5.040 ans

m = 5.010 ans

Calib

Calib Rev 5.1beta

```
CALIB RADIOCARBON CALIBRATION PROGRAM*
Copyright 1986-2006 M Stuiver and PJ Reimer

*To be used in conjunction with:
 Stuiver, M., and Reimer, P.J., 1993, Radiocarbon, 35, 215-230.
```

=> t = 4.417 ans ^{14}C

m = 5.010 ans

calib5 File Edit Options Calibrate View Tools Help

Calib

Calib Rev 5.1beta

Sample Properties

1 Sample Number

4417 Radiocarbon age

120 Age Uncertainty

Labcode001 Description Samcode001

IntCal04

0 Percent Marine 0 Delta R 0 Delta R Uncertainty

0 Sample Age Span

0 Laboratory Erro

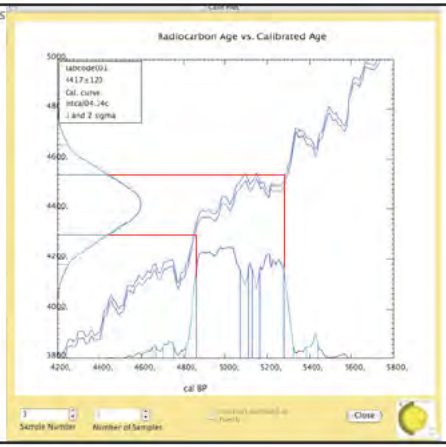
Sample is Enabled

Enter Delete Close

Calib

Calib Rev 5.1beta

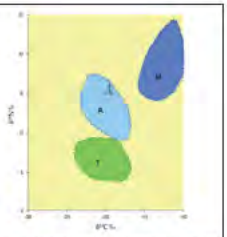
```
CALIB RADIOCARBON CALIBRATION PROGRAM*
Copyright 1986-2006 M Stuiver and PJ Reimer

*To be used in conjunction with:
 Stuiver, M., and Reimer, P.J., 1993, Radiocarbon, 35, 215-230.

Labcode001
Description
Radiocarbon Age 4417±120
Calibration data set: intcal04.14c
# Reimer et al. 2004
One Sigma Ranges: [start-end] relative area
                  [cal BP 4865: cal BP 5070] 0.641246
                  [cal BP 5108: cal BP 5125] 0.046381
                  [cal BP 5167: cal BP 5276] 0.312273
Two Sigma Ranges: [start-end] relative area
                  [cal BP 4655: cal BP 4667] 0.003586
                  [cal BP 4706: cal BP 4761] 0.016505
                  [cal BP 4810: cal BP 5327] 0.958744
                  [cal BP 5387: cal BP 5447] 0.021135

Ranges marked with a * are suspect due to impingment on the end of the calibration
data set

# PJ Reimer, MGL Baillie, E Bard, A Bayliss, JW Beck, C Bertrand, PG Blackwell,
#   CE Buck, G Burr, KB Cutler, PE Damon, RL Edwards, RG Fairbanks, M Friedrich,
#   TP Guilderson, KA Hughen, B Kromer, FG McCormac, S Manning, C Bronk Ramsey,
#   RW Reimer, S Remmele, JR Southon, M Stuiver, S Talamo, FW Taylor,
#   J van der Plicht, and CE Weyhenmeyer (2004), Radiocarbon 46:1029-1058.
```



lab ID	sample ID	bone type	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	^{14}C age	age offset
OxA-8502	IG[D]1.1	human	−18·6	13·2	8300±60	
OxA-8579	IG[D]1.2	ungulate	−20·6	5·0	7790±100	510±117
OxA-8547	IG[D]2.1	human	−19·3	13·9	8240±60	
OxA-8580	IG[D]2.2	ungulate	−20·8	6·1	7770±240	470±247
OxA-8581	IG[D]3.1	human	−19·5	15·1	8330±75	
OxA-8582	IG[D]3.2	ungulate	−22·0	9·4	7880±290	450±300
OxA-8583	IG[D]4.1	human	−18·5	15·0	8380±80	
OxA-8584	IG[D]4.2	ungulate	−21·5	4·7	7915±65	465±103
OxA-8585	IG[D]4.3	ungulate	−20·9	4·5	7780±75	600±110
OxA-8548	IG[D]5.1	human	−18·2	15·3	8200±70	
OxA-8549	IG[D]5.2	ungulate	−20·4	7·7	7905±60	295±92
OxA-8550	IG[D]5.3	ungulate	−21·2	4·7	7805±70	395±99

TABLE 3. $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ measurements, ^{14}C ages and ^{14}C age offsets in human bone and associated ungulate bone samples from Schela Cladovei. All ^{14}C ages and age offsets are expressed as conventional radiocarbon years BP (before 1950). The errors are expressed at the one sigma level of confidence.

Cook *et al.* (2002). Problems of dating human bones from the Iron Gates. *Antiquity*, 78 77-85.



Bonsall *et al.* (1997). *J. Europ. Archaeology*, 5.1 50-92.

lab ID	skeleton	^{14}C age	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	aquatic diet (%)*
OxA-5827	31a	7770±90	−18·7	15·7	86
OxA-5830	44	7590±90	−18·9	15·3	81
OxA-5828	32	7270±90	−19·5	11·9	43
OxA-5831	88	7130±90	−20·2	10·9	32
OxA-5829	35	6910±90	−19·7	11·2	36

TABLE 5. Correcting human bone dates from Lepenski Vir III for the aquatic reservoir age using the $\delta^{15}N$ value to determine percentage aquatic diet. All ^{14}C ages are expressed as conventional radiocarbon years BP (before 1950). The errors are expressed at the one sigma level of confidence.

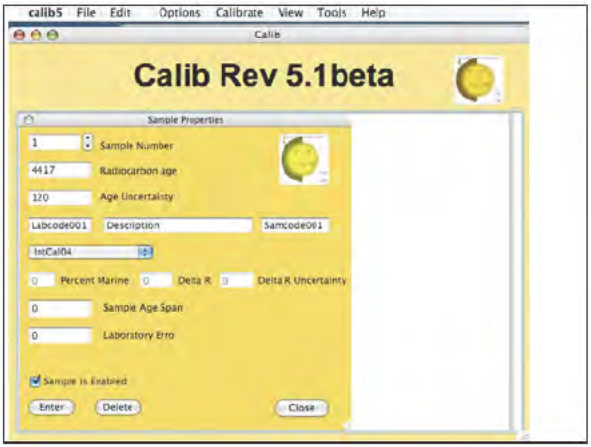
Cook *et al.* (2002). Problems of dating human bones from the Iron Gates. *Antiquity*, 78 77-85.

lab ID	skeleton	^{14}C age	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	aquatic diet (%)*	corrected ^{14}C age Method 1	corrected ^{14}C age Method 2	corrected ^{14}C age Method 3
OxA-5827	31a	7770±90	−18·7	15·7	86	7410±108	7280±101*	7240±108
OxA-5830	44	7590±90	−18·9	15·3	81	7150±106	7150±101	7090±108
OxA-5828	32	7270±90	−19·5	11·9	43	7040±95	7050±97*	7010±95
OxA-5831	88	7130±90	−20·2	10·9	32	6960±93	6910±97*	6930±93
OxA-5829	35	6910±90	−19·7	11·2	36	6720±93	6690±97*	6690±93

* used for Methods 1 and 3 a 100% reservoir correction applied to a 36% reservoir correction applied.

TABLE 5. Correcting human bone dates from Lepenski Vir III for the aquatic reservoir age using the $\delta^{15}N$ value to determine percentage aquatic diet. All ^{14}C ages are expressed as conventional radiocarbon years BP (before 1950). The errors are expressed at the one sigma level of confidence.

Cook *et al.* (2002). Problems of dating human bones from the Iron Gates. *Antiquity*, 78 77-85.



Change of Diet of the Greenland Vikings 161

Table 2 ^{14}C dates and $\delta^{13}C$ values for bone collagen and cloth from Norse churchyards in Greenland

Lab number (AAR-)	Object ID number	Sample sex, age	Conventional ^{14}C age (yr BP)	Calendar age (cal AD)	cal AD range, 1σ	$\delta^{13}C$ (‰ VPDB)	Percent marine diet
Eastern Settlement							
Herjolfsnes[a] (E11, Ikigaat)							
1271	IV/KAL1106	u, 10–15	767 ± 45	1430	1407-1447	−16.3	55
1290	D10606	Cloth	553 ± 45	1410	1330-1428	−22.1	
1269	XVIII/KAL906	F, 20–23	899 ± 84	1418	1329-1456	−14.4	78
1289	D10605	Cloth	480 ± 43	1434	1419-1445	−22.3	
1270	I/KAL1105	F, 45–50	750 ± 56	1437	1413-1467	−16.2	57
1288	D10581	Cloth	480 ± 60	1434	1413-1449	−21.8	
2201	D10612	"Burgundy cap"	685 ± 40	1300	1280-1380	−22.6	
2200	D10594	Garment	650 ± 40	1305-1375	1295-1395	−22.4	

Arneborg *et al.* (2002). Change of diet of the Greenland V kings... and ^{14}C dating of their bones. *Radiocarbon*, 41(2) 157-168.

Datations 'absolues'

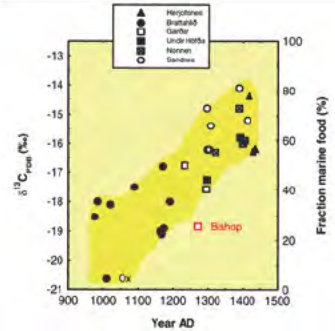
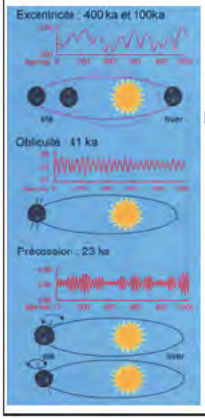


Figure 3 Measured δ13C versus calendar year for Norse skeletons from Greenland. Symbols refer to churchyards. Sandnes is in the Western Settlement, the others are in the Eastern Settlement. Right-side ordinate axis is the marine food fraction calculated from δ13C. The scatter in δ13C is due to real differences in diet of individuals. Note the terrestrial value for the ox bone. High social status or recent arrival from Norway could explain the low marine diet of the bishop buried in the Garðar cathedral.

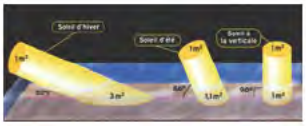
Arneborg *et al.* (2002). Change of diet of the Greenland Vikings... and 14C dating of their bones. *Radiocarbon*, 41(2) 157-168.

Astrochronologie

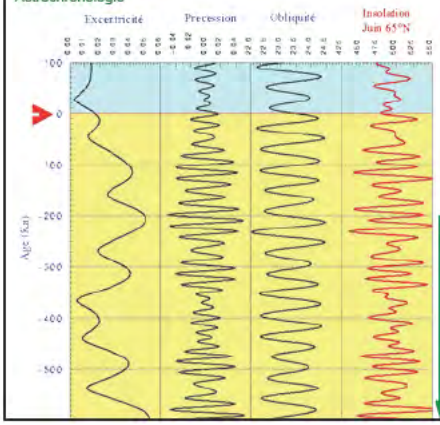
Astrochronologie



Le calcul des variations des paramètres orbitaux terrestres sont maintenant suffisamment précis pour servir de référence temporelle



Astrochronologie



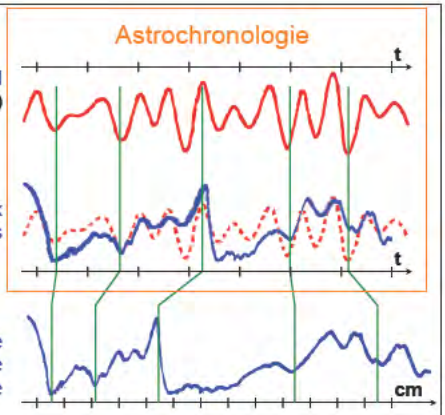
Calcul insolation :

Plio-Quaternaire = OK (e.g. Berger & Loutre)

40 Ma = ± OK (e.g. Hilgen)

200 Ma = ?! (Laskar)

Astrochronologie

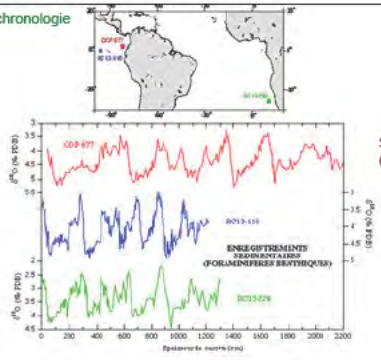


Forçage orbital (= métronome)

Signaux corrélés

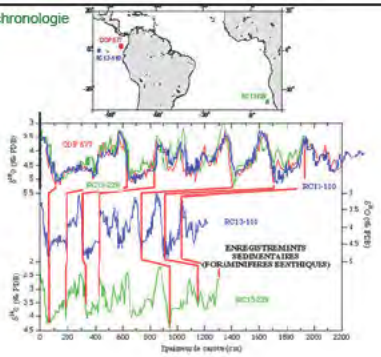
Réponse climatique sédimentée

Astrochronologie

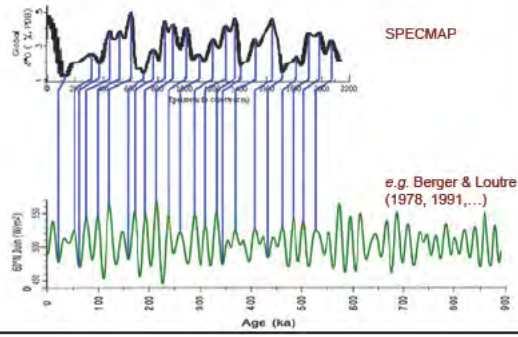


Shackleton *et al.* (1984, 1990)

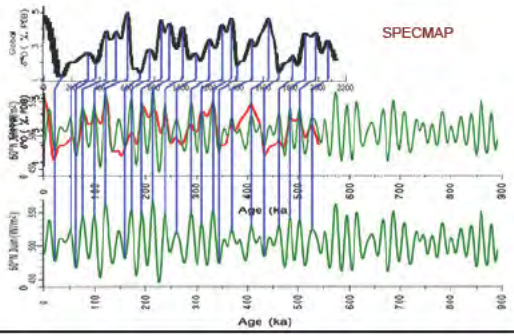
Astrochronologie



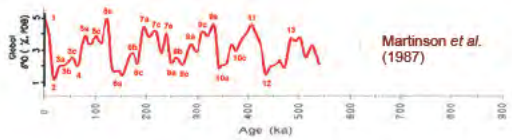
Astrochronologie



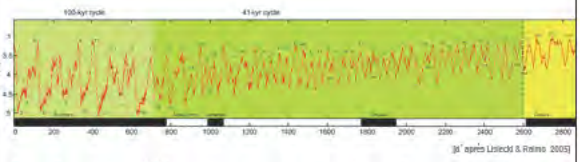
Astrochronologie



Astrochronologie



Astrochronologie



[à après Lisiecki & Raimo 2005]

Courbes de référence pour le Quaternaire

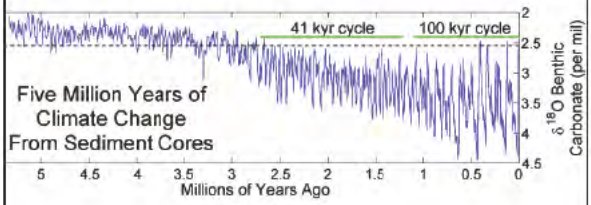
Marines :

= *e.g.* SPECMAP => 0–780 ka ($\partial^{18}O_{F.planct}$) ; 0–291 ka ($\partial^{18}O_{F.benth}$)
Lisiecki & Raimo (2005) => 0–848 ka ($\partial^{18}O_{F.benth}$)

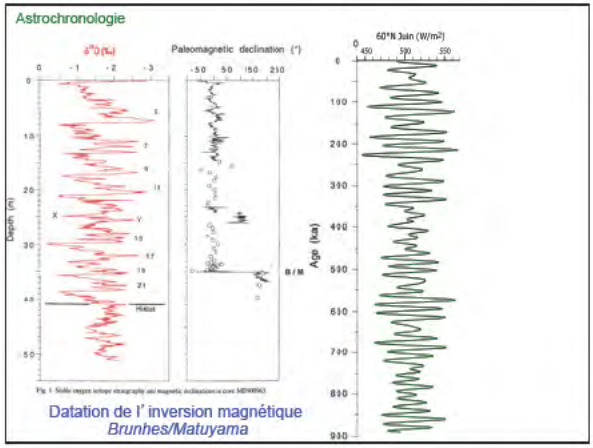
Continentales (glace polaire) :

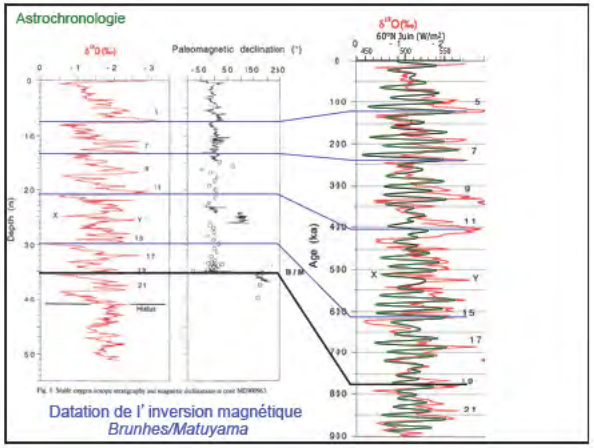
= *e.g.* EPICA members (2004), Jouzel *et al.* (2007) => 0–801 ka ($\partial T°_{deutérium}$)
NGR P, GISP, GRIP2 => 0–123 ka ($\partial^{18}O_{glace}$)

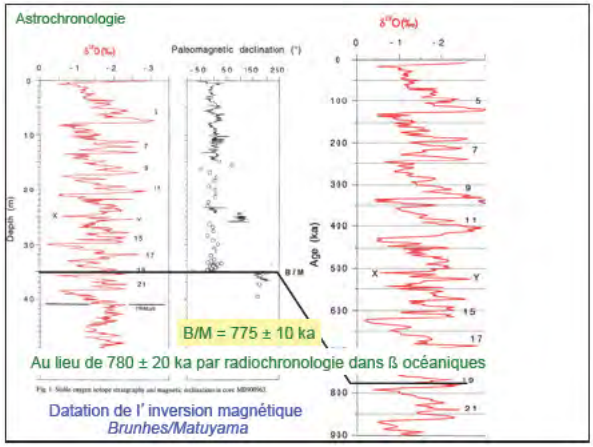
Astrochronologie

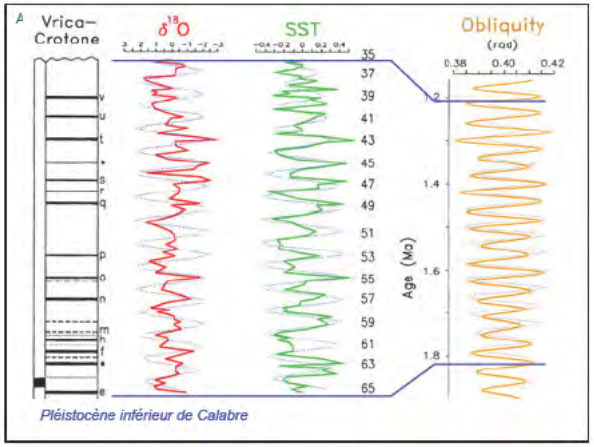


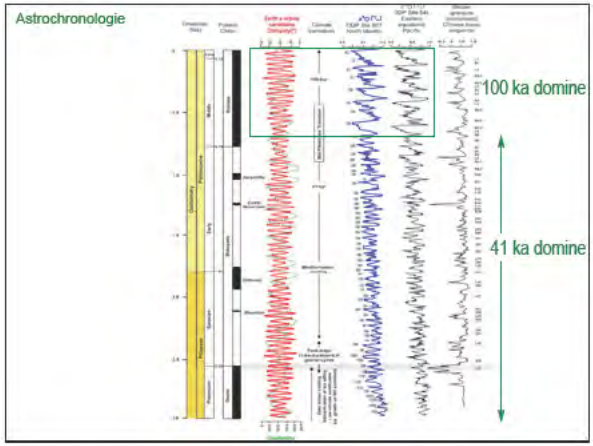
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Five_Myr_Climate_Change.png]


Astrochronologie
δ18O (‰)
Paleomagnetic declination (°)
60°N Juin (W/m²)
Depth (m)
Age (ka)
B/M
Hiatus
Datation de l' inversion magnétique
Brunhes/Matuyama


Astrochronologie
δ18O (‰)
Paleomagnetic declination (°)
60°N Juin (W/m²)
Depth (m)
Age (ka)
B/M
Hiatus
Datation de l' inversion magnétique
Brunhes/Matuyama


Astrochronologie
δ18O (‰)
Paleomagnetic declination (°)
Depth (m)
Age (ka)
B/M
Hiatus
B/M = 775 ± 10 ka
Au lieu de 780 ± 20 ka par radiochronologie dans ß océaniques
Datation de l' inversion magnétique
Brunhes/Matuyama


A
Vrica–Crotone
δ18O
SST
Obliquity
(rad)
Age (Ma)
Pléistocène inférieur de Calabre


Astrochronologie
100 ka domine
41 ka domine