

Les glaces polaires des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique ont permis de par leur épaisseur de quelques 3 km de remonter le temps sur environ 800 000 ans.

Chaque strate de glace correspond aux chutes de neige compactées d'une année. Cette neige emprisonne des bulles d'atmosphère et les poussières en suspension sédimentées avec les chutes de neige.

1. COMPRENDRE LA NOTION DE THERMOMÈTRE ISOTOPIQUE

A. Appréhender la variation de température - Principe de la mesure du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

Notion concernant les isotopes de certains éléments (oxygène, hydrogène, carbone...)

Les isotopes les plus légers, stables, sont toujours les plus abondants. Les isotopes les plus légers ont tendance à diffuser et à réagir plus facilement que les isotopes les plus lourds.

La molécule d'eau renferme de l'oxygène, on distingue l'eau de mer et l'eau douce (vapeur, pluie et glace).

1. Le thermomètre isotopique

Le dioxygène est un mélange de deux isotopes stables principaux, en proportions très inégales : près de 99,8 % de ^{16}O et 0,2 % de ^{18}O , proportions qui se retrouvent dans les molécules d'eau H_2^{16}O et H_2^{18}O (eau de mer, eau douce ou glace).

Les proportions relatives des deux isotopes peuvent être mesurées avec une grande précision à l'aide d'un spectrographe de masse. En réalisant de telles mesures dans les glaces polaires, les scientifiques ont constaté d'une part que ces glaces sont plus pauvres en ^{18}O que les eaux océaniques et d'autre part que leur teneur en ^{18}O est fonction de la température à laquelle la neige précipite. Or, cette glace représente la condensation finale de l'eau vaporisée au-dessus des océans.

On peut donc penser que l'accumulation d'inlandsis gigantesques sur les continents lors des périodes glaciaires s'est traduite par un enrichissement relatif de l'eau océanique en ^{18}O . Les variations des proportions $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans les glaces et dans les océans au cours de l'histoire de la Terre constituent donc des paléothermomètres permettant de connaître l'évolution du climat.

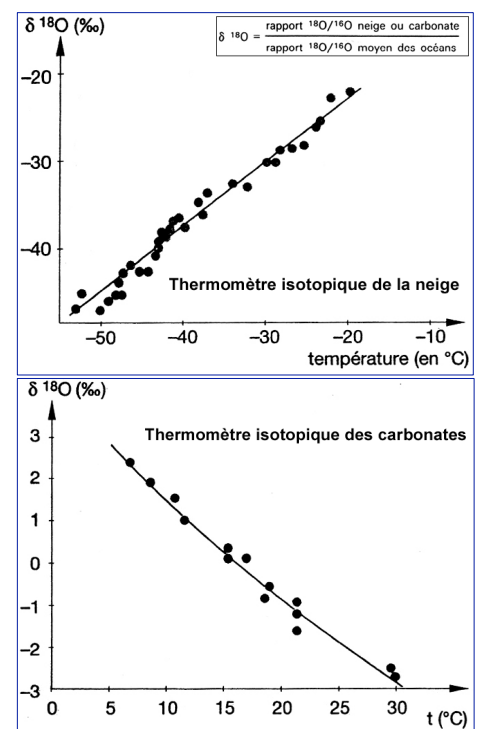
2. Comment étalonner le thermomètre isotopique ?

Pour évaluer les paléotempératures de l'air, on mesure le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans des échantillons de glace obtenus par carottages dans la calotte glaciaire (Antarctique ou Groenland). On étalonne ensuite le thermomètre en mesurant, en différents sites de l'Antarctique par exemple, le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ actuel dans des échantillons de neige en fonction de la température au sol au moment de la précipitation.

Pour évaluer les paléotempératures de l'eau de mer, on mesure le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans le carbonate de calcium des coquilles produites par les foraminifères marins. La partie droite du graphique, obtenue en mesurant le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans un



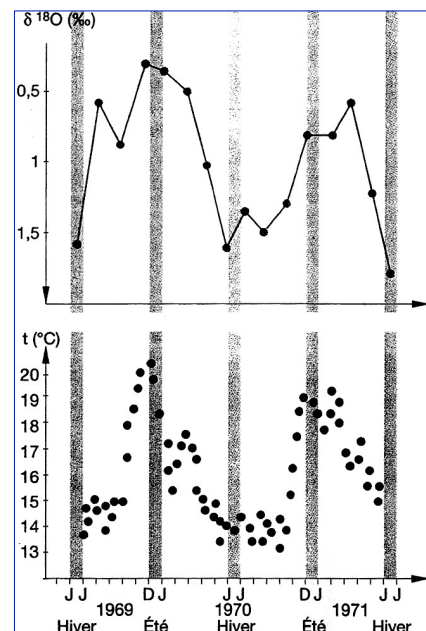
carbonate en fonction de la température où celui-ci précipite, permet donc d'estimer la température de l'eau de mer au moment où vivaient des foraminifères (image d'un Globigérinoïde ci-contre) récoltés dans une carotte de sédiment océanique. Les variations de la composition isotopique du carbonate des tests, d'un niveau à l'autre de la carotte, traduit les variations de la température des eaux océaniques au cours du temps.



Ce thermomètre isotopique des carbonates des coquilles de mollusques ou des tests de foraminifères dans les sédiments de plateforme, a été validé par des mesures du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates prélevés sur les couches de la coquille de *Patelles* (« chapeau chinois ») vivant dans l'hémisphère Sud pendant leur croissance sur deux années de 1969 à 1971 (voir document ci-contre).

• Avec l'aide du logiciel « Oxygène ($^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$) », formuler les notions énoncées ci-dessous, conclure.

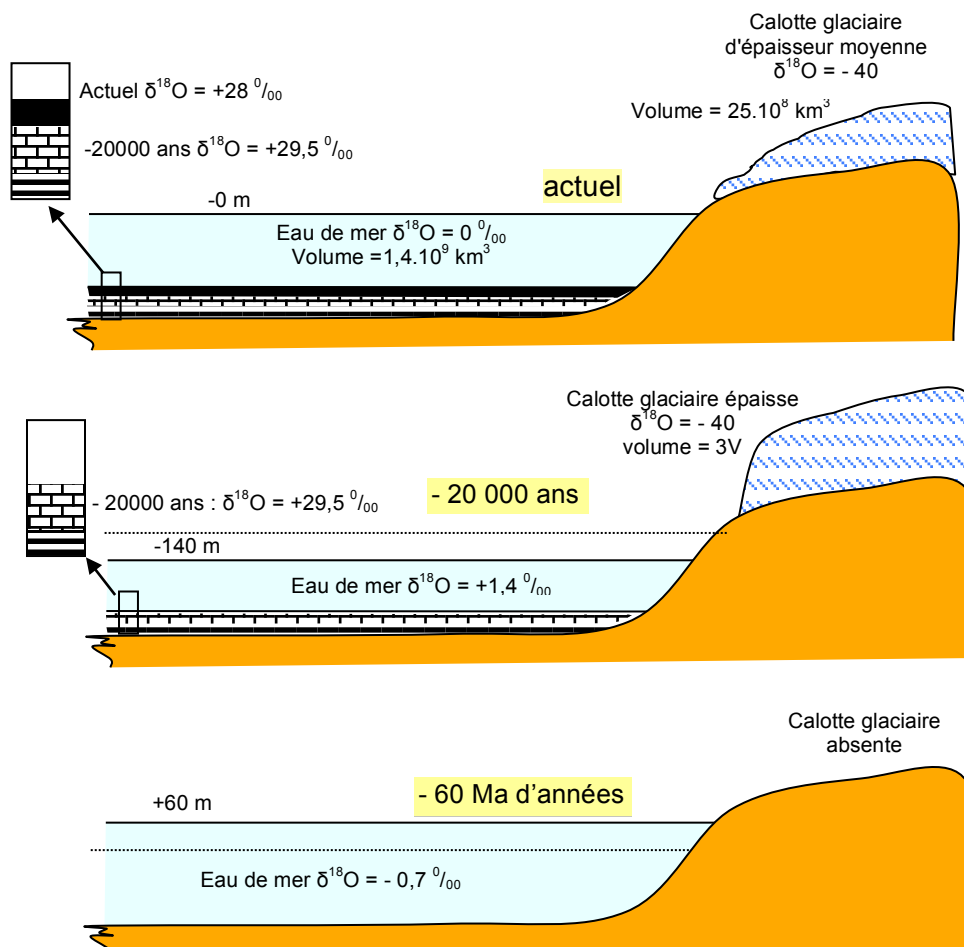
- Différences isotopiques entre ^{16}O et ^{18}O d'où différence entre les molécules H_2^{16}O et H_2^{18}O .
- Distribution relative des isotopes ^{16}O et ^{18}O dans l'eau océanique et dans les nuages après évaporation et après condensation dans les eaux de pluie.
- Nature des renseignements fournis par les tests de Globigérines récoltés lors de carottages.
- Variation principale du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des zones d'évaporation vers les zones polaires.
- Variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en période chaude et en période glaciaire.
- Utilisation des tests carbonatés de sédiments océaniques comme indicateurs paléoclimatiques.



B. Thermomètre isotopique dans les sédiments marins de plateforme

• À partir des informations tirées de la fiche « Thermomètres isotopiques » et du document ci-dessous, montrer que les données tirées des sédiments et des tests carbonatés du plancton permettent d'évaluer les variations du volume des océans et par conséquent du volume des calottes glaciaires.

Mise en relation de l'épaisseur des calottes glaciaires à 3 époques différentes et détermination du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer et des sédiments à ces mêmes périodes.



B. L'étude comparée de la composition de bulles de gaz et de la composition isotopique des glaces de Vostok met en évidence des oscillations climatiques périodiques

• À l'aide du logiciel « Vostok », formuler les notions énoncées ci-dessous, conclure.

- Relier les variations locales de la température aux variations de concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère
- Mettre en évidence les variations climatiques montrant des alternances de périodes glaciaires et interglaciaires en comparant à la courbe des températures, la courbe des variations du $\delta^{18}\text{O}$, les courbes de concentration en CO_2 et en méthane.

• *Aller plus loin - À l'aide des deux documents ci-dessous « L'opposition climatique Nord-Sud », dire comment évoluent les deux hémisphères.*

➤ Document 1

L'opposition climatique Nord-Sud dans les carottes de glace

L'examen des carottes de glace du Groenland, pour les derniers 110 000 ans, a révélé des épisodes de réchauffement et de refroidissement brusques (en quelques décennies), nommés événements Dansgaard/Oeschger. Les carottes glaciaires prélevées en Antarctique témoignent aussi de fluctuations moins rapides et d'amplitude bien moindre. En replaçant les enregistrements sur une même échelle de temps, nous avons confirmé, pour un passé récent, ce que des modèles et des prélèvements sédimentaires océaniques laissaient penser : ces fluctuations dans les deux hémisphères sont en opposition de phase.

Comment déterminer une échelle temporelle précise pour les carottes de glace ? On utilise des marqueurs stratigraphiques, témoins d'événements dont les conséquences ont touché simultanément tout le Globe : leur observation dans les carottes du Groenland et de l'Antarctique permet d'établir une chronologie commune. Les principaux sont les éruptions volcaniques importantes, les pics de béryllium 10, radioélément produit dans la haute atmosphère et dont le flux vers la surface dépend de l'activité solaire ou du champ magnétique terrestre, et les variations de la concentration atmosphérique de gaz traces.

Ces dernières ont l'avantage sur les autres marqueurs d'être quasi continues, et de produire une longue échelle de temps relative. Toutefois, la neige séjourne un certain temps sur le glacier avant de se transformer en glace et d'emprisonner de l'air : ce dernier est donc toujours plus récent que la glace qui l'entoure. La quantification de cette différence d'âge détermine la précision des corrélations possibles.

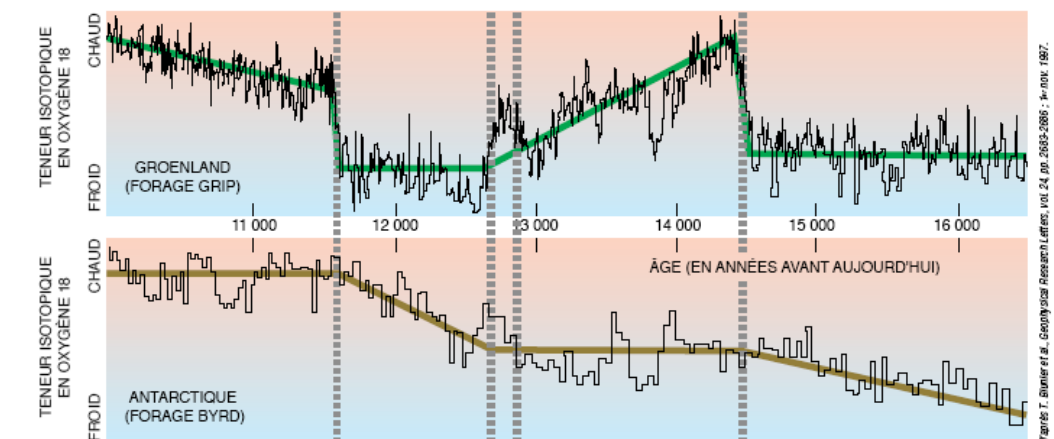
Deux paramètres gazeux ont été utilisés jusqu'ici pour corréler les carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique : la composition isotopique de l'oxygène de l'air (le rapport d'abondance entre l'oxygène 18 « lourd » et l'oxygène 16 « léger ») et la concentration en méthane. Grâce

au premier, Mike Bender et ses collègues ont montré que la température s'est élevée significativement en Antarctique seulement quand les événements Dansgaard/Oeschger du Groenland ont duré plus de 2 000 ans. L'incertitude sur la différence d'âge entre l'air et la glace, et la faible variabilité de la composition isotopique de l'oxygène atmosphérique les a toutefois empêchés de déterminer la relation temporelle entre Groenland et Antarctique avec une précision meilleure que 3 000 ans.

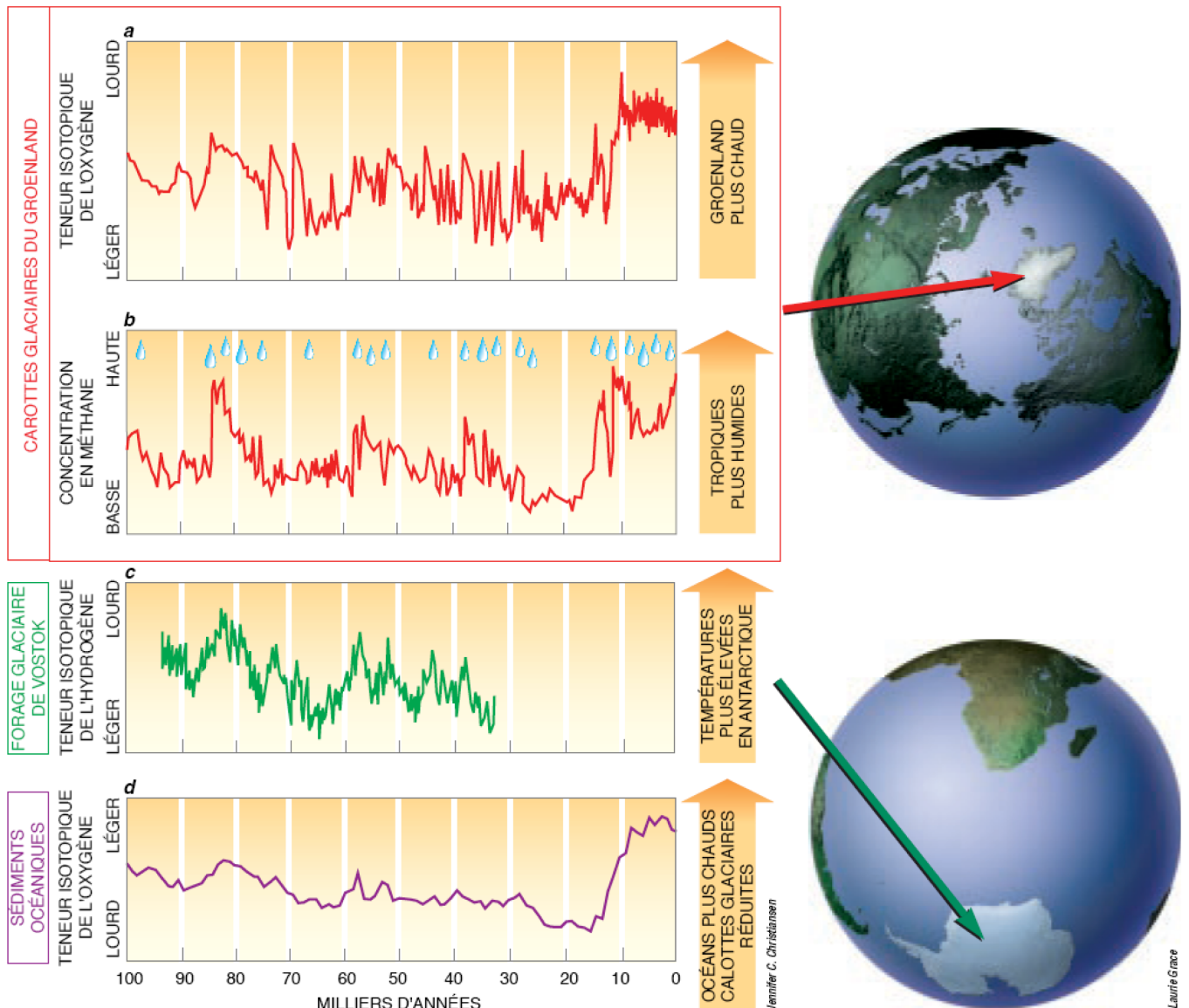
La concentration en méthane varie beaucoup plus au cours du temps. En collaboration avec nos collègues de l'Université de Berne, en Suisse, nous l'avons mesurée et montré que l'épisode à température constante qui interrompait pendant 1 500 ans le réchauffement de l'Antarctique lors de la dernière déglaciation était simultané à un épisode chaud au Groenland. De même, le refroidissement spectaculaire du Dryas récent (il y a 12 500 à 11 500 ans) au Groenland était accompagné d'un réchauffement en Antarctique.

Cette relation temporelle entre les climats du Nord et du Sud prouve que, comme des modèles océaniques l'avaient prédit, pendant la dernière déglaciation, le flux de chaleur provenant de l'océan qui entoure l'Antarctique était en opposition de phase avec celui de l'océan Atlantique Nord. Ainsi, les climats des régions polaires Nord et Sud semblent-ils toujours couplés, via la circulation océanique globale, durant cette phase de changement climatique fondamental, mais avec des conséquences opposées dans les deux hémisphères. Nous poursuivons actuellement les analyses de la concentration en méthane sur la période d'il y a 50 000 à 25 000 ans, afin de vérifier si la même relation existait pendant cette période.

Jérôme CHAPPELLAZ, CNRS
Laboratoire de glaciologie et géophysique
de l'environnement, Saint-Martin-d'Hères



➤ Document 2



2. LES TEMPÉRATURES (a) et les concentrations en méthane dans l'atmosphère (b) ont été déterminées, pour les 100 000 dernières années, par l'étude des carottes de glace du Groenland. Ces mesures confirment les résultats des études analogues menées sur des carottes glaciaires prélevées à Vostok, en Antarctique (c), et les calculs du

volume total de glace dans le monde réalisés à partir de l'analyse des sédiments marins profonds (d). Le Globe se réchauffe tous les 20 000 ans. Le refroidissement progressif, jusqu'à il y a 20 000 ans, et le réchauffement rapide il y a 20 000 à 10 000 ans suivent un cycle de période plus longue, égale à 100 000 ans environ.

2. RECOUPER LES DONNÉES GLACIAIRES ET SÉDIMENTAIRES POUR CONFIRMER LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU COURS DU QUATERNAIRE RÉCENT

• À partir des mesures effectuées dans les bulles d'air emprisonnées dans les glaces des calottes polaires et dans les carbonates des tests de foraminifères de sédiments benthiques (de plateforme), par les méthodes de thermomètres isotopiques :

- repérer les variations de climatiques sur les 225 000 dernières années,
- comparer les données obtenus dans l'Antarctique avec celles obtenues dans la calotte arctique (Groenland),
- nommer les différentes périodes.

Deux documents à disposition :

- 1) Un fichier Excel « *Taylorgripocen.xls* » comportant les résultats
 - des sondages des inlandsis : Taylor Dome dans l'Antarctique (δD) et Grip au Groenland ($\delta^{18}O$)
 - des sondages de sédiments benthiques (plateforme) du Pacifique
- 2) Une chronologie des glaciations en Europe

Chronologie des glaciations en Europe

	CHRONOLOGIE basée sur les glaciations	INVERSIONS MAGNÉTIQUES	DATATIONS (années) avant J.C.	INDUSTRIES PRÉ HISTORIQUES	FAUNE MARINE	FAUNE TERRESTRE	HOMINIDÉS
HOLOCÈNE	POST GLACIAIRE	- +		Âge des métaux Néolithique		Faune actuelle	
PLEISTOCÈNE SUPÉRIEUR	TARDIGLACIAIRE		- 8 200	PALÉOLITHIQUE SUPÉRIEUR		Âge du Renne	Homo sapiens sapiens
	WURM RÉCENT	LASCHAMP MUNGO				Mammouth - Cerf (Mégacéros) Rhinocéros laineux - Renne Bœuf musqué	
	WURM ANCIEN		- 35 000	PALÉOLITHIQUE MOYEN			Homo sapiens neanderthalensis
	RISS-WURM (EEMIEN)	BLAKE	- 80 000			Bœuf - Cerf - Panthère Loup - Cheval	
PLEISTOCÈNE MOYEN	sup. RISS	JAMAÏCA	- 120 000	ACHEULÉEN		Renne - Mammouth	Homo sapiens neanderthalensis
	mod. MINDEL-RISS		- 250 000		<i>Strombus bubonius</i> <i>Mytilus senegalensis</i>	Bœuf - Cerf - Lion Panthère - Hyène	
	ancien MINDEL	LEVANTIN	- 300 000	PALÉOLITHIQUE INFÉRIEUR		Hyène - Loup - Lynx Renard - Ours	Homo erectus
	GUNZ-MINDEL		- 650 000			Rhinocéros laineux Elephas antiquus et Elephas meridionalis Hippopotamus major	
PLEISTOCÈNE INFÉRIEUR	final GUNZ	JARAMILLO	- 900 000	PEBBLE CULTURE			Homo habilis
	DONAU-GUNZ	MATUYAMA	- 1 200 000		<i>Globorotalia truncatulinoides</i>	Fin des Mastodontes et Dinotherium Elephas meridionalis Mastodon arvernensis	
	DONAU	OLDUVAÏ	- 1 800 000		<i>Cyprina islandica</i>		
PLIOCÈNE SUPÉRIEUR	BIBER-DONAU				fin des Discoasters <i>Globorotalia inflata</i> <i>Gl. exilis</i>	Fin des Hipparions Equus stenus Mastodon bursonis	
	BIBER	GAUSS normal	- 3 300 000				