

"CLUB DU TEMPS LIBRE"

Mardi 2 Mars 1982

Les glaciations et les changements de climat depuis
un million d'années ; si demain la Terre se réchauffait
ou se refroidissait, quelles seraient les conséquences ?

Plus de soixante adhérents sont venus assister à la conférence de Monsieur LETOLLE sur "les glaciations et les changements de climat depuis un million d'années" et pour entendre une réponse à la question : "si demain la Terre se réchauffait ou se refroidissait, quelles seraient les conséquences ?"

Monsieur LETOLLE, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, dirige le département de géologie dynamique ainsi que l'Institut d'hydrologie et de climatologie. En 1981, il était venu nous entretenir des déserts et de leur extension.

CLIMAT, METEOROLOGIE, LES DIFFERENTS ETATS DE L'EAU.-

Dans un premier temps, trois notions sont à définir : le climat, la météorologie, et les différents états de l'eau.

La météorologie est l'étude des phénomènes atmosphériques et de leurs lois, notamment en vue de la prévision du temps.

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression atmosphérique, vents, précipitations) qui caractérisent un état moyen et son évolution en un lieu donné. On peut dès lors classer les climats, dire, par exemple, que la France jouit d'un climat tempéré. Tout le monde se pose la question : notre climat change-t-il ?

L'eau peut se trouver sous trois formes : l'état liquide, l'état solide, l'état gazeux (fig. 1) (un nuage n'est pas de la vapeur d'eau).

Comment la Terre dispose-t-elle de différents climats ?

Elle tourne autour du soleil, mais son équateur n'est pas dans le plan de l'orbite terrestre (= écliptique). Les pôles reçoivent les rayons du soleil d'une manière oblique et sont donc moins chauffés que les autres régions du globe (fig. 2).

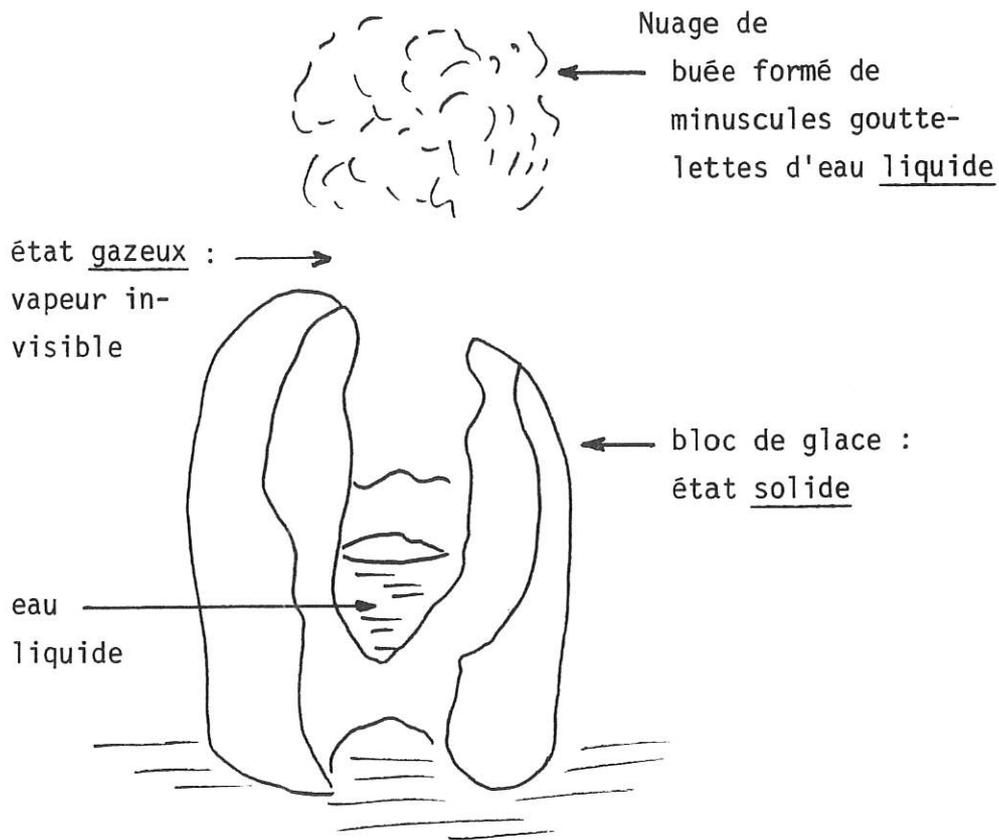


fig. 1.- L'eau sous ses trois formes.

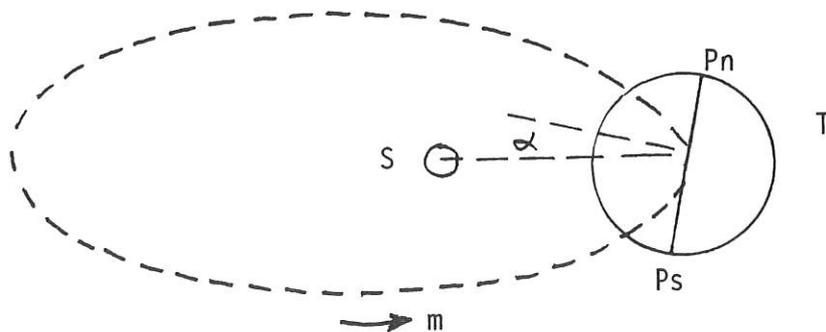


fig. 2.- La Terre T au solstice d'hiver

- S = Soleil
- T = Terre
- m = mouvement de translation autour du Soleil dans le plan de l'écliptique.
- Pn = pôle Nord Ps = pôle Sud
- α = $23^{\circ}27'$ angle que fait le plan de l'Equateur terrestre avec la droite qui joint le centre de la Terre au Soleil.

La température de l'air étant plus élevée à l'équateur, des courants ascendants entraînent l'atmosphère et sa vapeur d'eau de l'Equateur aux pôles puis reviennent vers l'Equateur.

La figure 3 illustre cela : l'air s'échauffe dans les régions équatoriales puis retombe dans les régions polaires pour revenir vers l'Equateur.

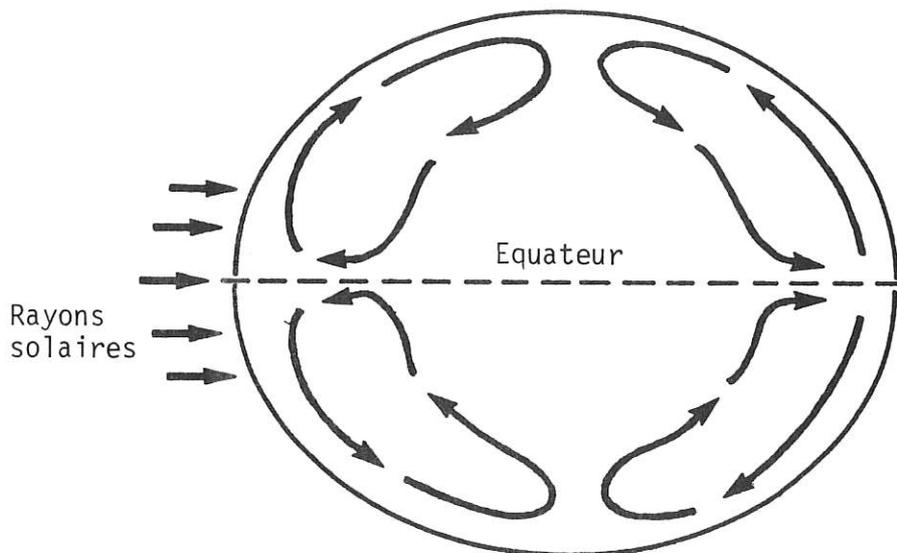


Fig. 3.- Vue de la surface de la Terre. Les rayons solaires réchauffent les eaux équatoriales qui augmentent de volume et "descendent" en direction des pôles. Les eaux polaires s'enfoncent et, en profondeur, se dirigent vers l'Equateur.

Il en est de même pour l'atmosphère.

La Terre tournant sur elle-même, pour des raisons mécaniques, les courants sont déviés vers leur droite dans l'hémisphère nord et vers leur gauche dans l'hémisphère sud.

C'est pour cette raison que dans cet hémisphère nord, les vents dominants sont toujours dirigés d'Ouest en Est.

La force qui dévie les courants s'appelle la force de Coriolis ; elle est nulle à l'Equateur et augmente en allant (fig.4) vers les pôles.

Par opposition aux régions polaires, une diapositive nous montre le désert d'Atacama (Nord du Chili) où il n'a pas plu depuis 51 ans. Il se trouve dans une région tempérée mais où le système des vents est tel qu'il n'y a pas d'humidité.

Actuellement, ce qui nous frappe dans la mécanique des circulations atmosphériques et des océans, donc dans ce qui crée le climat, c'est que tout est conditionné par une source froide

gigantesque : le continent antarctique (fig. 5). 95% de l'eau douce de la Terre est concentrée sur ce continent. L'inlandsis arctique est moins important (fig. 6).

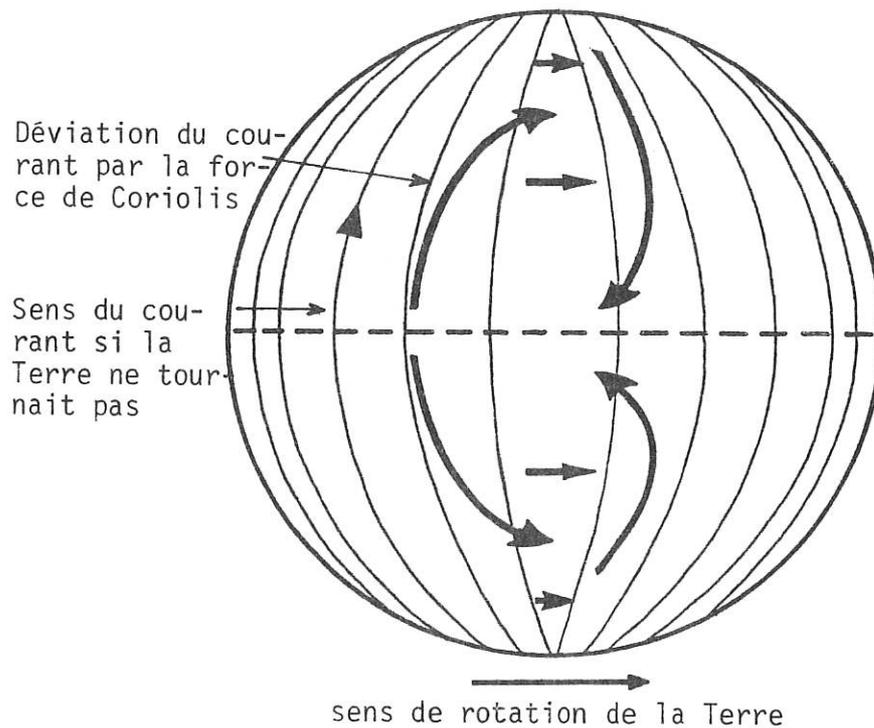


Fig. 4.- L'effet Coriolis, provoqué par la rotation terrestre, déporte vents et courants marins vers leur droite dans l'hémisphère Nord, vers leur gauche dans l'hémisphère Sud.

Cette réserve de froid existe depuis à peu près 15 millions d'années.

Entre l'hémisphère Nord et Sud, une différence considérable dans la répartition des zones climatiques existe. Sur la fig. 7 est représentée la Terre avec l'équateur géographique, l'équateur thermique c'est-à-dire la zone où il fait en moyenne le plus chaud, distantes l'une de l'autre d'environ 2000 km.

Ce grand intervalle est dû au fait que l'hémisphère Sud, plus riche en froid que le Nord a tendance à repousser les parties chaudes de la Terre. Le glacier antarctique exporte du froid. De la même manière, la zone tempérée Nord n'est pas symétrique de la zone tempérée Sud par rapport à l'équateur (Valence se trouve au 45ème parallèle nord; au Sud, au 45ème parallèle, on trouve des icebergs). L'équateur thermique ne partage donc pas la surface terrestre en deux hémisphères égaux ; le mot est ainsi mal choisi.

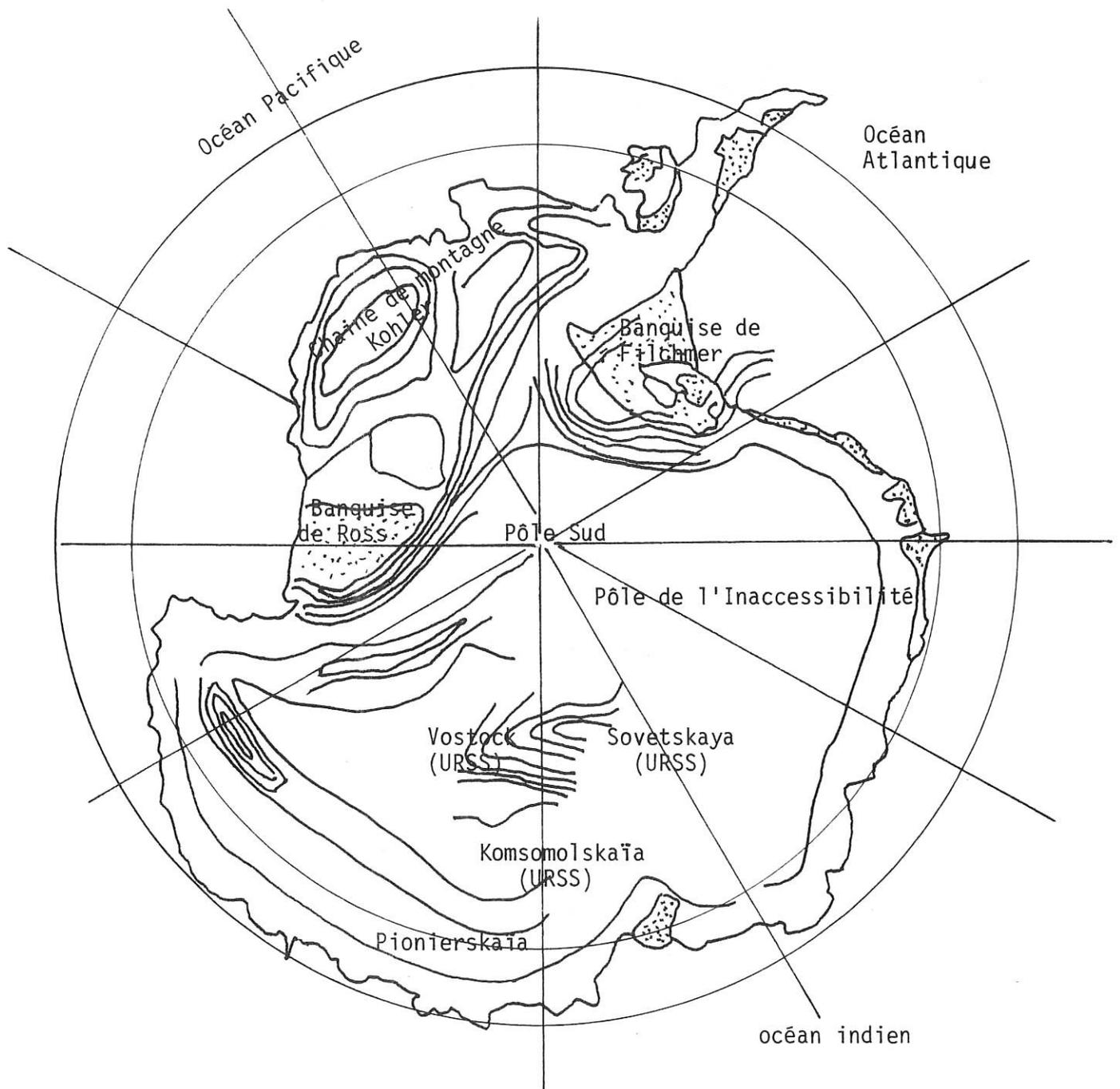


Fig. 5.- Le continent antarctique.

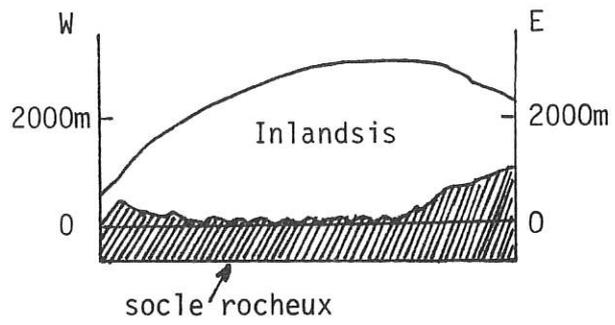


Fig. 6.- Schéma de la disposition de l'indlandsis du Groenland

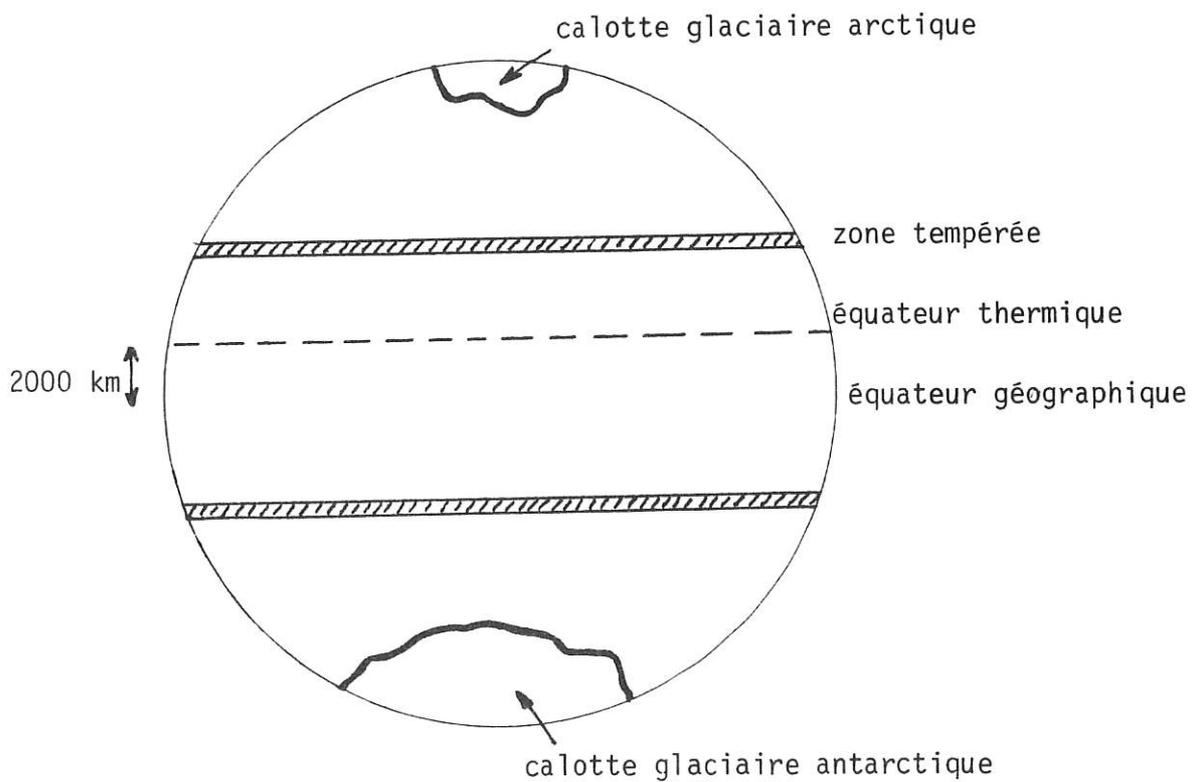


Fig. 7.-

Il y a 18000 ans (fig. 8), les calottes glaciaires antarctique et arctique étaient plus développées qu'actuellement. Les zones tempérées étaient donc plus rapprochées de l'équateur et les zones tropicales, équatoriales étaient plus petites. Le Sahara avait un climat méditerranéen, l'Afrique du Nord équatorial. On connaît depuis peu de temps le fond rocheux enseveli du continent antarctique grâce à des mesures faites au radar. Le fait qu'il y ait sous la glace des montagnes, avec par endroit des vallées, prouve que cette glace n'a pas toujours été présente et que l'action de l'érosion a sculpté d'anciennes montagnes dont on a déterminé le profil sous-glaciaire.

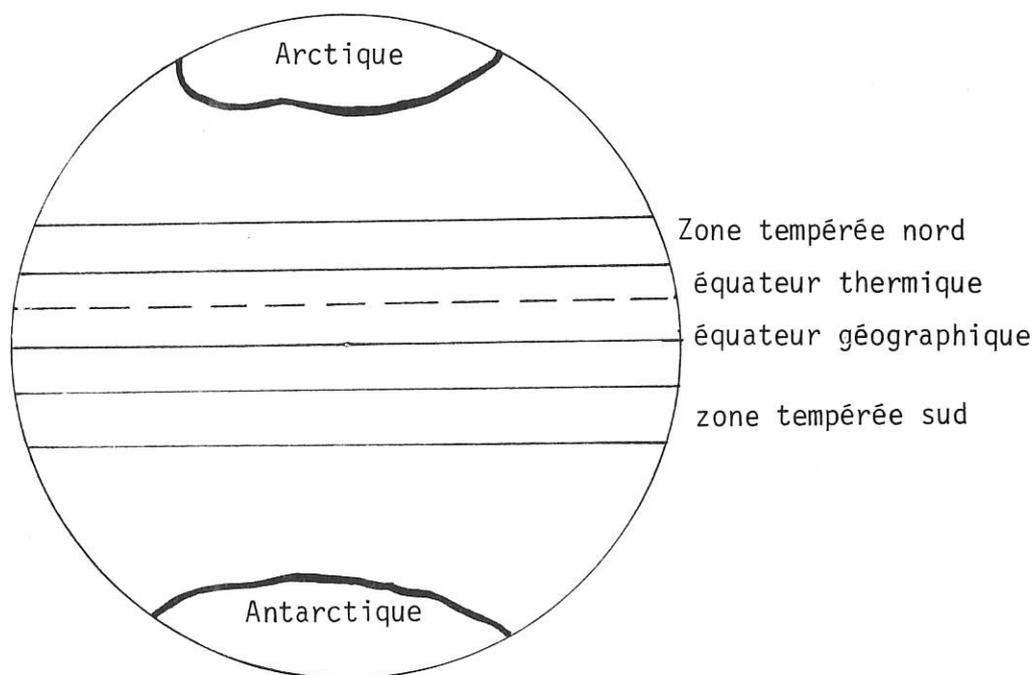


Fig. 8.- La Terre il y a 18 000 ans.

Les glaciers sont-ils figés ?

On trouve parfois des moraines, c'est à dire des débris arrachés à la montagne et transportés par les glaciers alors qu'il n'y a pas de glaciers immédiatement à proximité. Ceci signifie que le glacier avance puis recule. S'il est davantage alimenté en neige dans sa partie amont, il va avancer et repousser devant lui tous les cailloux qu'il avait préalablement transportés. Dans le cas contraire, il reculera et abandonnera les cailloux qu'il laissera devant lui (Mer de glace).

Pour que ce phénomène existe, il faut au moins 20 à 25 ans de changement climatique. Au 17ème siècle par exemple, la moyenne de

température était en Europe environ de 3° en dessous de la température actuelle.

A cette époque la Mer de Glace est descendue de 1,5km.

Inversement on sait qu'entre 1850 et 1920 la température moyenne s'est élevée de 1,5°.

Les géologues évaluent l'avancée et le recul des glaciers, qui sont un excellent indicateur des changements climatiques, en regardant par ailleurs s'ils n'ont pas laissé d'autres indices que les moraines qui ne subsistent que peu de temps (100 000 ans) du fait de leur manque de cohésion.

- Le glacier strie les roches et façonne des roches "moutonnées" sur le fond de son lit en usant les roches avec les cailloux transportés sous lui et enchassés dans la glace. Grâce à ces paysages, on sait donc que le glacier est passé là.

- Une diapositive nous montre un bloc erratique, n'ayant pas la composition des roches environnantes, de plus intransportable du fait de sa masse par une rivière. La présence de ce bloc dans la région lyonnaise nous prouve le passage d'un glacier.

- Les formes des vallées sont aussi des indices de la présence passée de glaciers. Des vallées dissymétriques, un flanc raide, un flanc non raide ou en V sont caractéristiques de l'érosion par les rivières ; mais les glaciers qui envahissent ces vallées les transforment en auge avec un profil en U. Des roches calcaires cassées sont également caractéristiques d'un froid très dur et prolongé sur une roche, disloquée en profondeur et fragmentée (gélification).

- L'alternance du gel et du dégel fait monter et descendre des cailloux dans le sol qui se boursoufle en buttes ou se creuse en ostioles ; ainsi se forment les sols polygonaux (cryoturbation) (fig. 9).

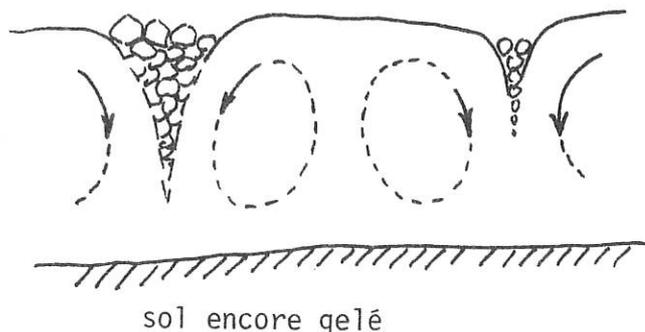


Fig. 9.- Formation des sols polygonaux.
Les phénomènes de convection dans la couche superficielle dégelée et au-dessus du sol gelé, repoussent les pierres vers les bords de polygones tandis que la terre reste au centre.

- La tourbe (accumulation de mousses) ne se forme que dans les pays froids. C'est aussi un témoignage de la présence antérieure de la glace. Elle présente l'avantage d'être un enregistrement de l'histoire pendant que la tourbe se formait. Renfermant du carbone, on peut la dater par le carbone 14. Elle contient également tout ce qui a été apporté par le vent, par exemple des poussières, du sable, des minéraux, des grains de pollen ...). Les grains de pollens ont une coque extrêmement dure qui se conserve très bien. Ils vont permettre de déterminer les plantes qui vivaient dans la région et connaître ainsi les températures.

La figure 10 montre les traces d'un climat périglaciaire en France par la couverture de loess, limon de teinte jaune paille, au toucher farineux, formé de poussières apportées par les vents.

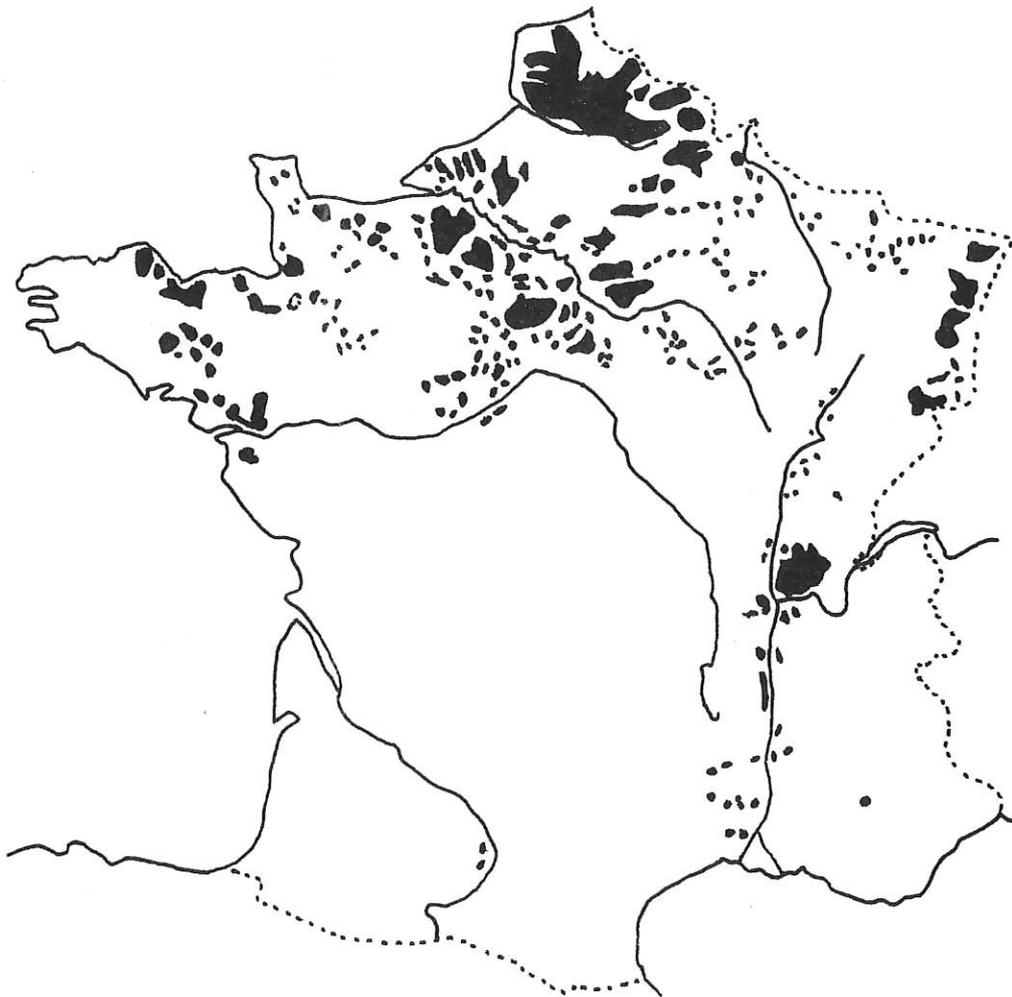


Fig. 10.- Répartition du loess en France ;
Témoignage d'un climat périgla-
ciaire

- Une diapositive nous montre une vue d'une plage en Ecosse où l'on voit que le niveau relatif de la mer et de la plage a changé, soit que le niveau de la mer a baissé, soit que le niveau de la plage ait monté.

Cela s'observe sur les côtes de régions où il y avait des glaciers. En effet le continent, recouvert de glace, s'enfonce sous le poids de la glace.

Quand les glaciers ont disparu, le continent commence à remonter doucement. Actuellement le nord de l'Ecosse est en train de retrouver le niveau qu'il avait auparavant.

En Scandinavie, cette remontée dépasse un mètre par siècle de sorte que des ports en activité au 16^{ème} siècle sont inutilisables actuellement. Ce n'est pas la quantité d'eau de la mer qui a baissé, mais le continent qui remonte. En fonction de la vitesse de remontée on peut connaître l'épaisseur de glace qui se trouvait sur ces régions. (Si on enlevait la calotte de glace du continent antarctique, ce continent remonterait de 300 à 400 mètres).

La datation.

Dans l'océan, on descend une tubulure qui permet de remonter une carotte, colonne de terre, de vase, de sédiments divers.

On y décèle des foraminifères*, caractéristiques de l'eau dans laquelle ils vivaient. On s'est aperçu que la composition de leurs capsules a changé en fonction de la température de l'eau. Ainsi on peut déterminer la température de l'eau de mer dans laquelle ces foraminifères ont vécu en mesurant la teneur en isotopes de l'oxygène ^{18}O dans le calcaire de ces coquilles.

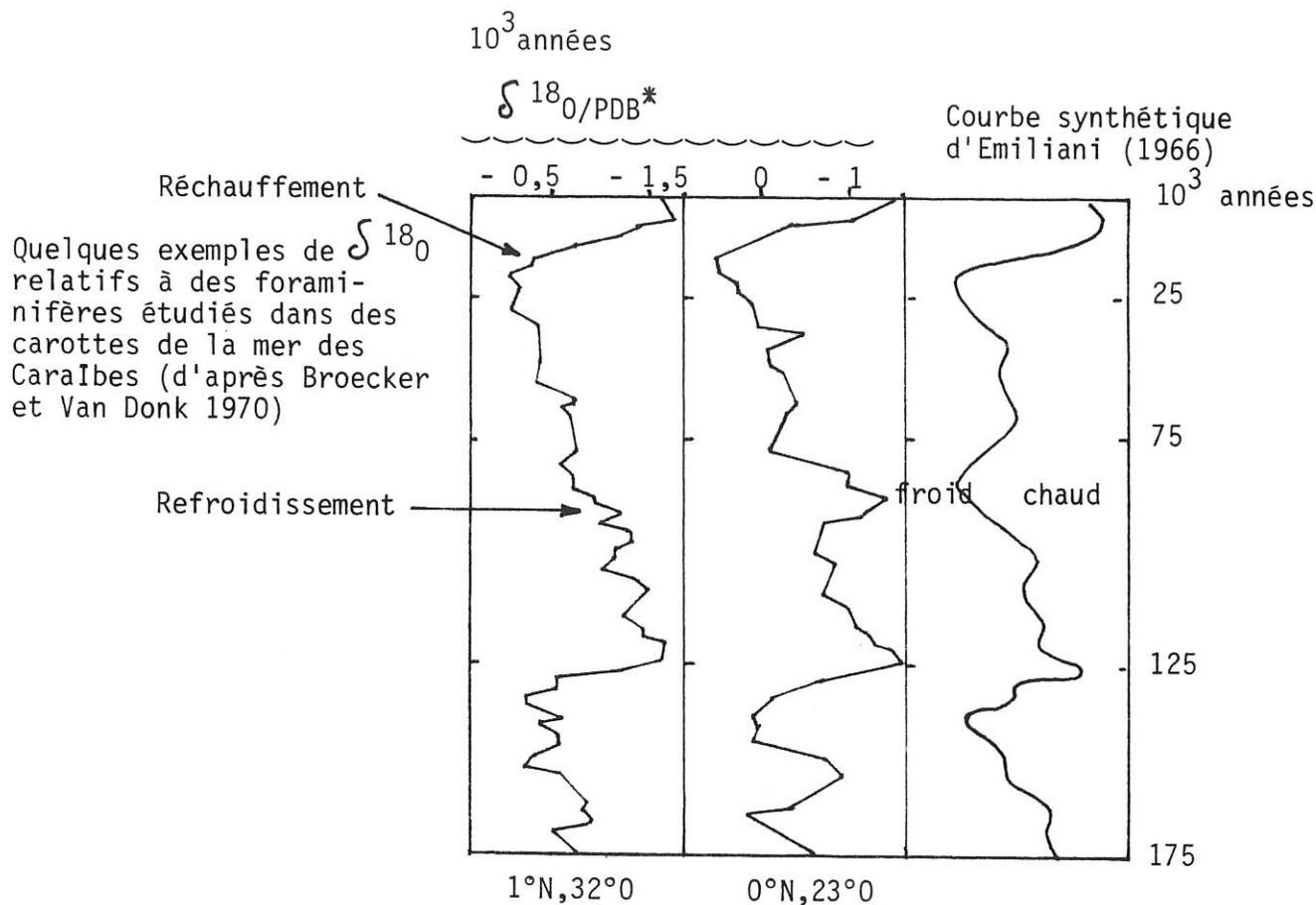
La figure n°11 nous montre un enregistrement sur 3 carottes prises en 3 endroits différents dans la mer des Caraïbes.

Plus la mer est chaude, plus les courbes sont décalées vers la droite ; plus elle est froide, plus les courbes sont décalées vers la gauche.

On a pu dater les tranches de ces carottes par l'isotope de l'oxygène. On constate que tout doucement la température de l'eau de mer s'est refroidie et s'est réchauffée. Puis elle s'est à nouveau refroidie, puis brutalement réchauffée.

Voici 20 000 ans environ elle était de 15°C.

* foraminifères : sous classe de protozoaires marins dont la cellule est entourée d'une capsule calcaire perforée de minuscules orifices.



* Le PDB est un carbonate marin pris comme référence.

Fig. 11.-

Ceci est donc la preuve, par l'eau de mer, du refroidissement général de la surface de la Terre imposé par le développement du glacier antarctique.

Les figures 12 et 13 nous montrent les courbes d'enregistrement de l'isotope 18 de l'oxygène prélevé dans des carottes de l'Océan Pacifique. On obtient des bons résultats sur 1 million d'années, moins bons sur 2,5 millions et acceptables sur 50 millions d'années.

Ces enregistrements montrent que la Terre a connu des dizaines d'épisodes glaciaires (froid et réchauffement).

Il y a 40 millions d'années, il n'y avait pas de glace sur le continent antarctique.

Pour ces travaux la teneur en isotope de l'oxygène dans la glace a également été étudié (fig. 14).

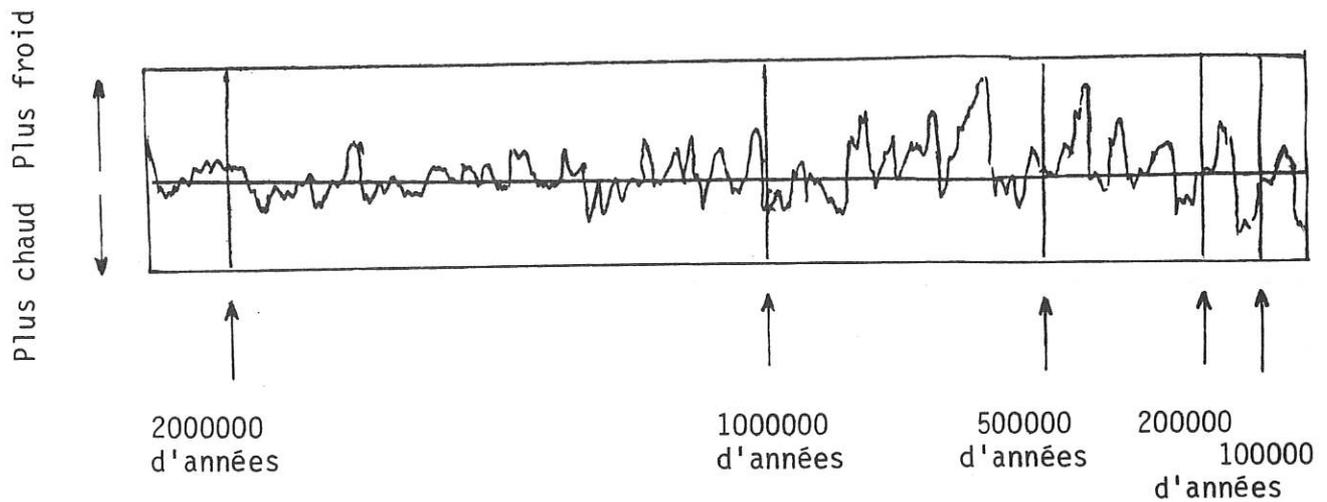


Fig. 12.- Les variations climatiques

Courbe établie à partir des carottes de sédiments prélevées dans le fond du Pacifique.

Sur 2000000 d'années, on distingue plus d'une vingtaine de cycles froids séparés par des cycles plus chauds.

Pendant les 600000 dernières années, les variations plus importantes ont provoqué des glaciations de grande ampleur.

Situation de l'Europe il y a 18 000 ans ? (maximum de froid).

Tous les indices que l'on a indiquent que, sur la France, la température moyenne était 8 à 9° en dessous de la température actuelle (11°). Cela correspond à la température actuelle du nord de la Norvège.

La figure 15 montre une reconstitution du glacier alpin à cette époque, d'après les moraines laissées en place.

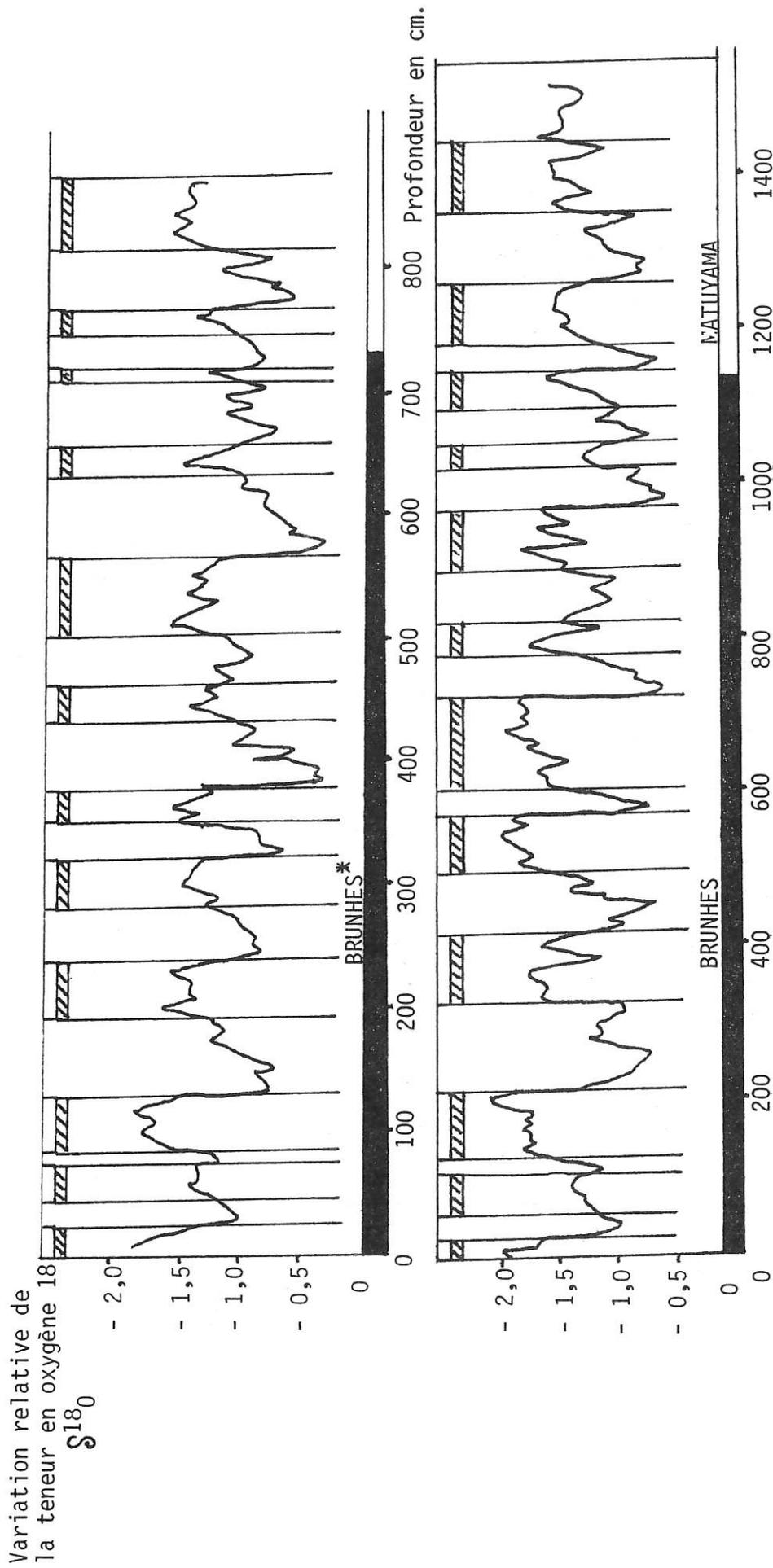
On ne connaît pas de manière précise comment cette glace a fondu.

La figure 16 nous montre l'étendue des glaciers dans le monde. Tout le nord de l'Europe, le Groënland, le nord de l'Atlantique, le nord de l'Amérique sont recouverts de glace.

Par contre rien en Sibérie ni en Alaska car bien qu'il y faisait très froid, il n'y pleuvait pas.

La mer avait baissé de 120 mètres (voir la figure 17 avec les cinq glaciations du quaternaire).

Si toute la glace actuelle fondait le niveau de la mer remonterait et la mer serait à Paris.

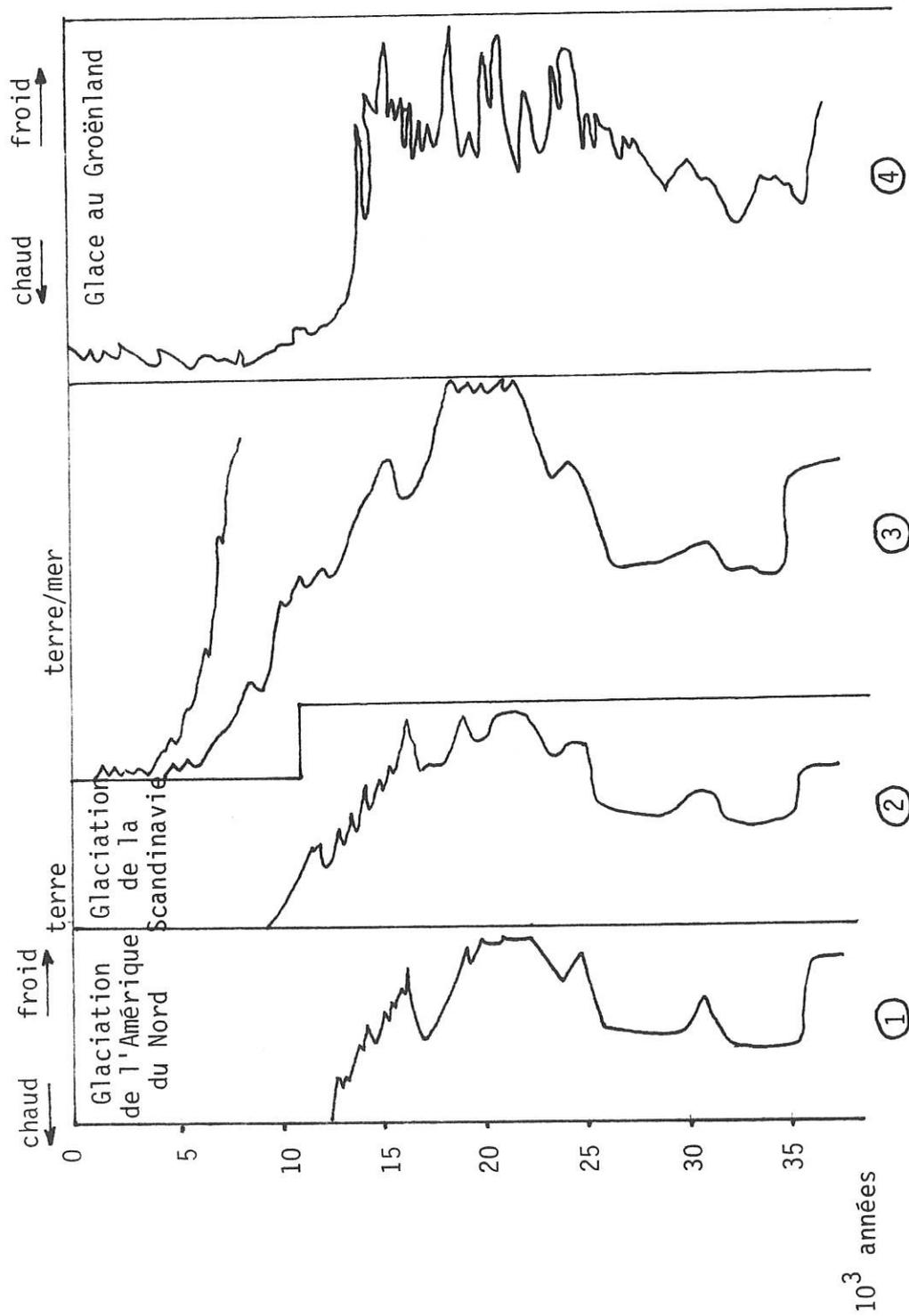


Enregistrement de l'oxygène 18 jusqu'à une profondeur de 880 cm dans le Pacifique d'après Shackleton et Opdyke (1976)

Brunhes* : Actuellement nous sommes depuis 700000 ans avec les pôles tels que nous les connaissons aujourd'hui. C'est la période que les spécialistes appellent "la période directe de Brunhes". Auparavant, pendant environ 1800000 ans a eu lieu la période Matuyama.

Brunhes correspond donc à une période de temps.

Fig. 13.-



Les courbes ① ② ③ représentent l'estimation de la température par reconstitution de paléovégétation. La courbe ④ est la variation de la teneur en ^{18}O .

Fig. 14.-

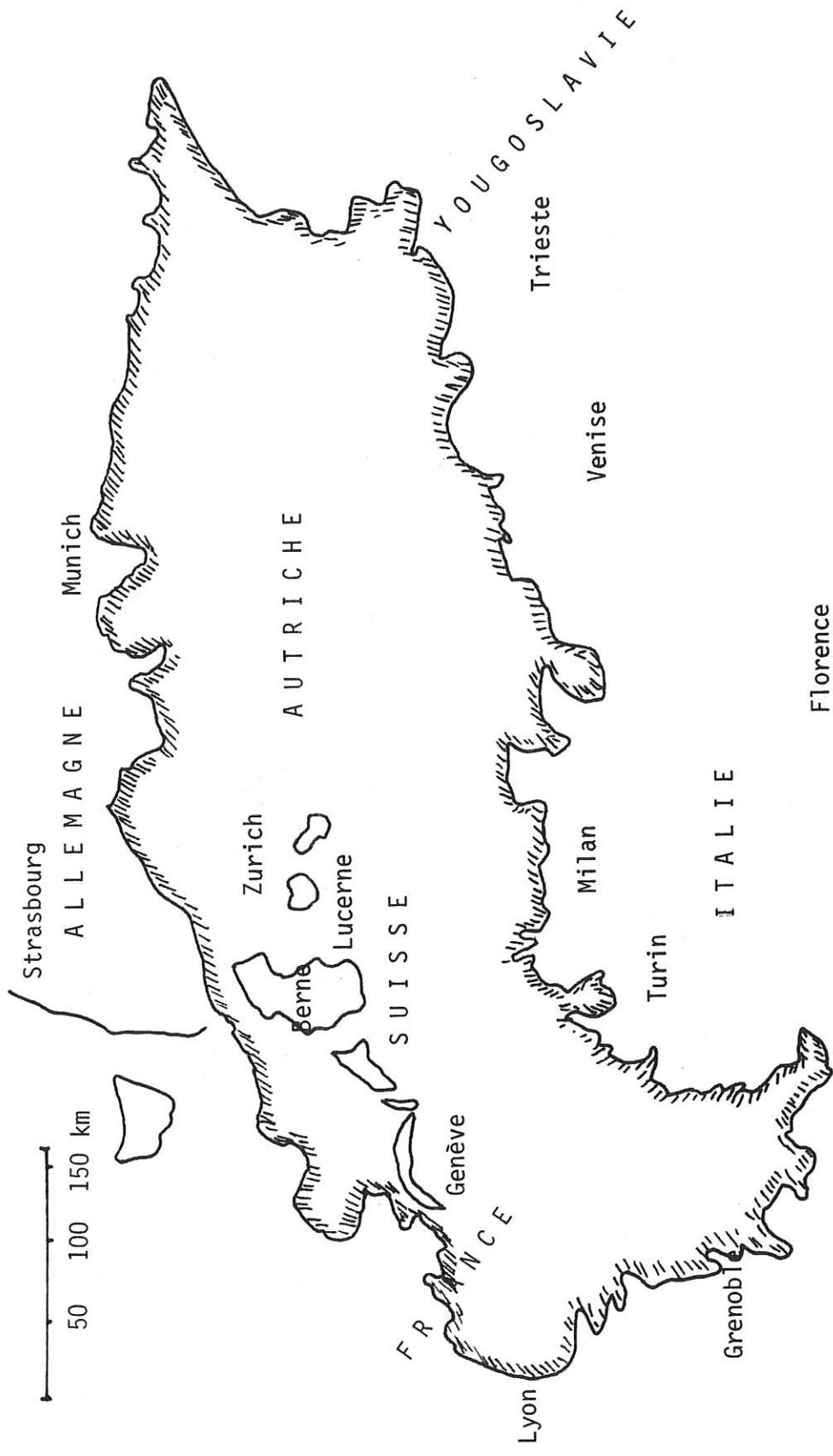


Fig. 15.- L'extension des glaciers alpins
11 y a 18 000 ans.

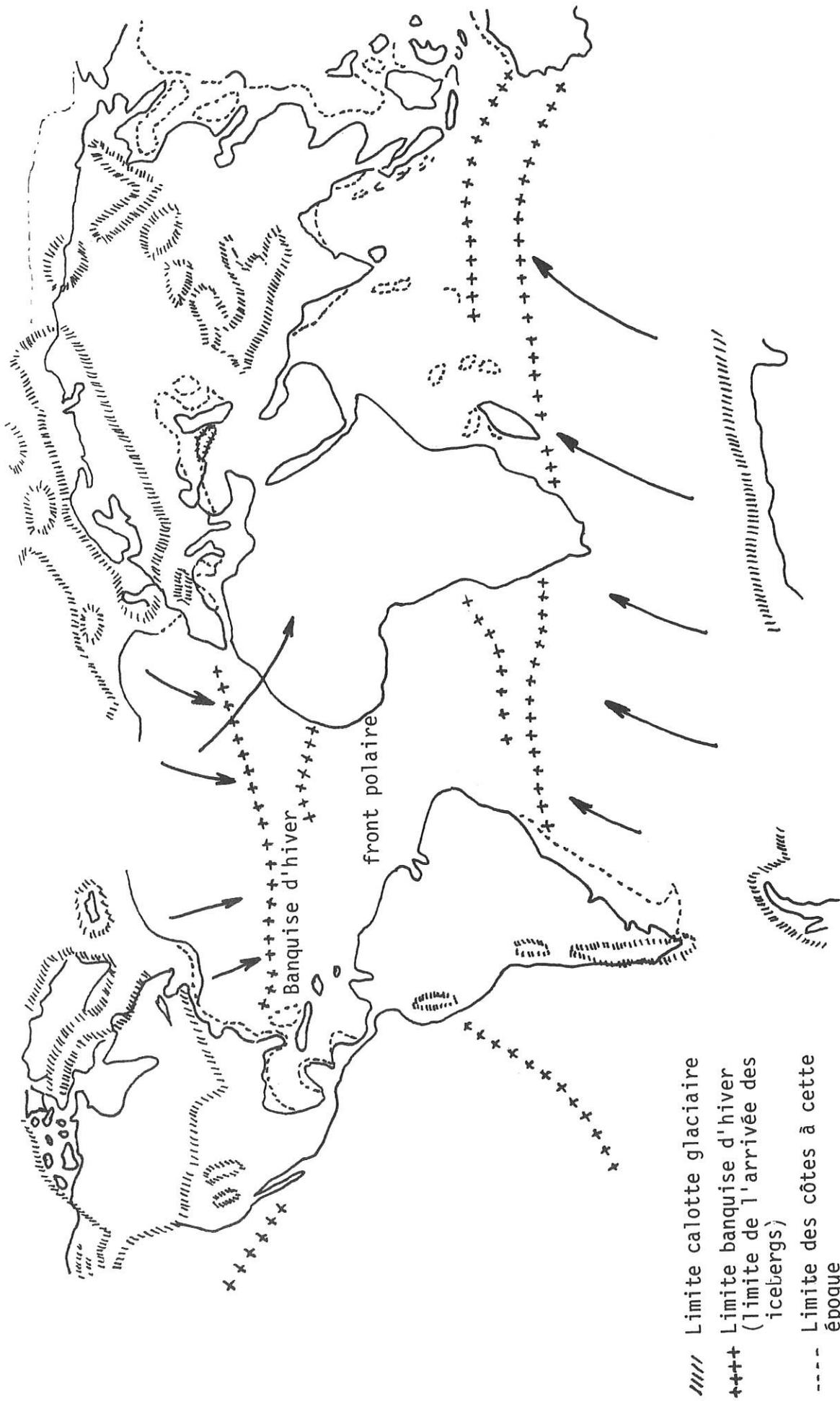


Fig. 16.- Les glaciers dans le monde il y a 18 000 ans.

Les glaciations

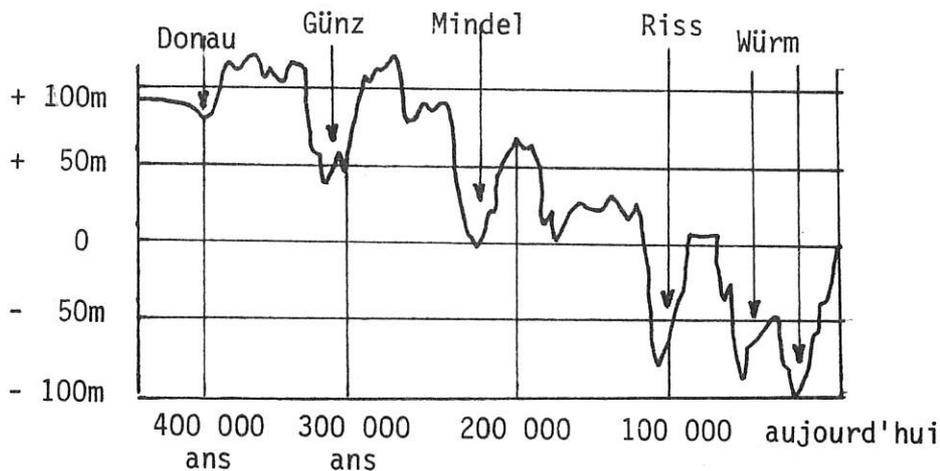


Fig. 17.- Les variations du niveau marin au quaternaire.

Depuis 400 000 ans, cinq grandes glaciations dans l'hémisphère Nord ; elles se traduisent par une baisse du niveau marin.

Le réchauffement provoque une remontée de ce niveau. De 6000 à 2500 ans avant J.C. le niveau est monté de quelques mètres (transgression flandrienne).

La figure n° 18 nous montre la France à cette époque.

On peut observer les côtes actuelles et les côtes à - 120m, la limite du grand glacier qui recouvre une grande partie de la Grande Bretagne, la totalité du pays de Galles, tout le sud de l'Irlande ; figure aussi le tracé des cours d'eau actuels et de leur prolongement jusqu'à la mer à - 120 m.

Il n'y avait pas de glacier sur la France (sauf dans la région alpine), mais de la neige de façon permanente sur l'Artois, les monts d'Arrée, les collines du Perche. Tout le centre du bassin de Paris connaissait la toundra c'est à dire une prairie herbeuse avec des arbrisseaux (hiver - 10°, été 15 à 20°). Plus au Sud s'étendait la steppe (la Provence était comparable à la Normandie actuelle).

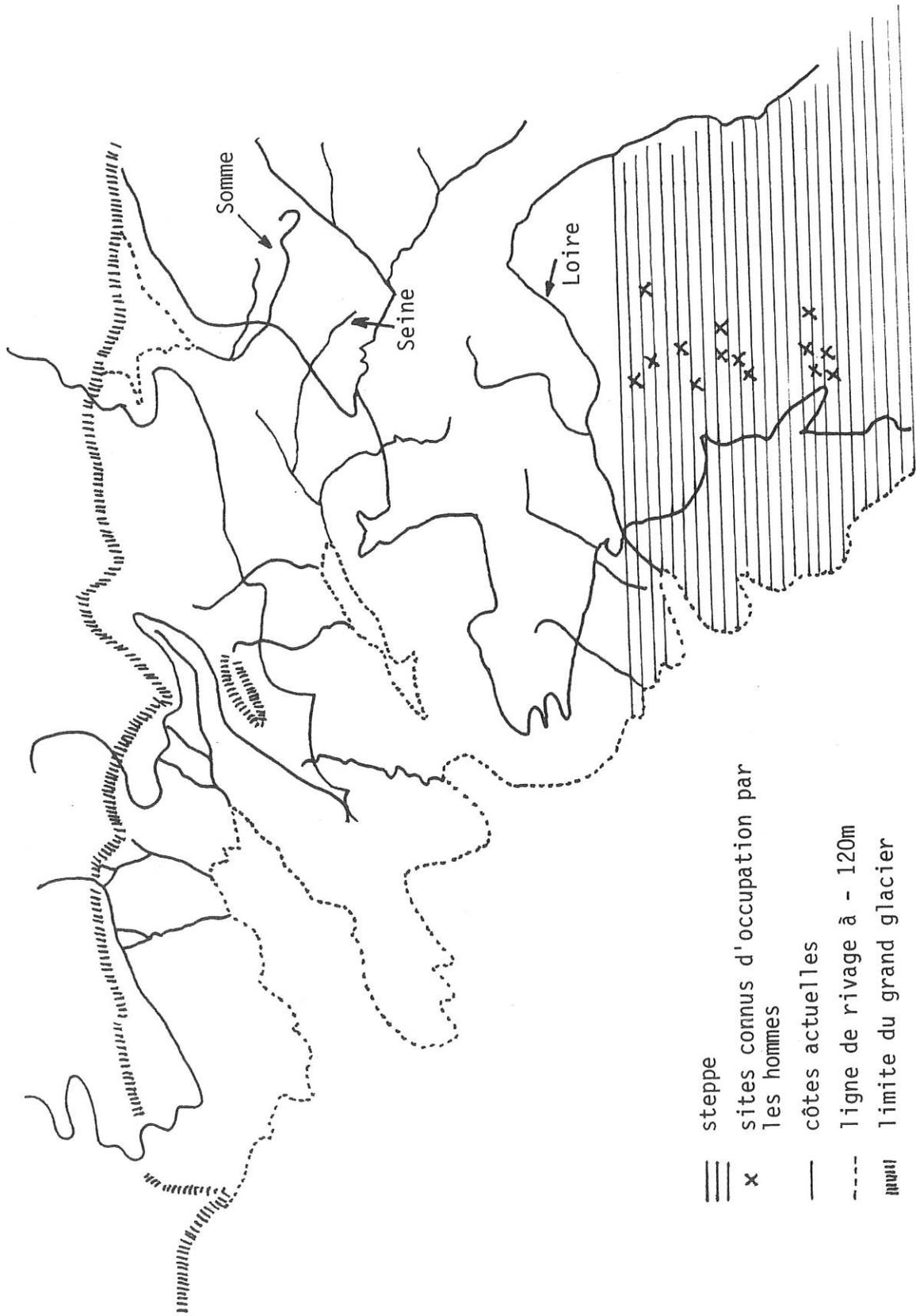


Fig. 18.- La France il y a 18 000 ans.

A quoi est dû le mécanisme des glaciations ?

Il est probablement lié à l'activité du soleil.

Plusieurs possibilités sont envisageables :

- le soleil est peut-être une étoile variable au point de vue du rayonnement thermique qui varie sur une période de 100 000 ans (durée d'une glaciation).

- le rayonnement solaire a peut-être rencontré des poussières interplanétaires qui auraient fait écran.

Prévisions ?

Il y a comme nous l'avons vu précédemment 15 ou 20 dents de scie climatique dans le passé qui correspondent à des glaciations. Il y a lieu de penser qu'il y en aura une autre dans l'avenir. Elle a commencé dès que la dernière glaciation s'est achevée, c'est-à-dire il y a 18 000 ans. On peut prévoir que dans 20 à 25000 ans, la température moyenne se sera abaissée sur la France de 2 à 3°. Se superposent à cela des accidents secondaires : il y a 11000 ans un refroidissement brutal s'est produit ; il a duré 300 ans. On ne sait pourquoi la température a subitement diminué.

Rôle de l'homme ?

Depuis environ un siècle l'homme est intervenu en rejetant dans l'atmosphère des quantités de gaz et de fumées, du gaz carbonique plus particulièrement (fig. 19, 20 et 21).

En 1900, 0,0312% de CO₂ était dans l'air.

En 1976, on est arrivé à 0,033% soit une augmentation de 10 à 15% en moins d'un siècle.

Le gaz carbonique est un écran pour la chaleur qui est freinée au retour de la terre. On a un effet de serre, comme sous la cloche de verre du jardinier.

Les prévisions nous sont montrées sur la figure 21.

La température de la Terre tend à s'élever pour arriver à un nouvel équilibre thermique.

Si la température de l'air s'élève, la glace va fondre et le niveau de la mer va se hausser.

Un autre scénario consiste à dire que si la température s'élève, l'évaporation des océans, la chute d'eau sur les pôles et donc la glace, augmenteront. D'où une nouvelle période glaciaire.

L'exposé de Monsieur LETOLLE fut vivement applaudi. Nous reverrons Monsieur LETOLLE le mardi 4 mai pour une conférence sur l'histoire de la Terre et des Planètes.

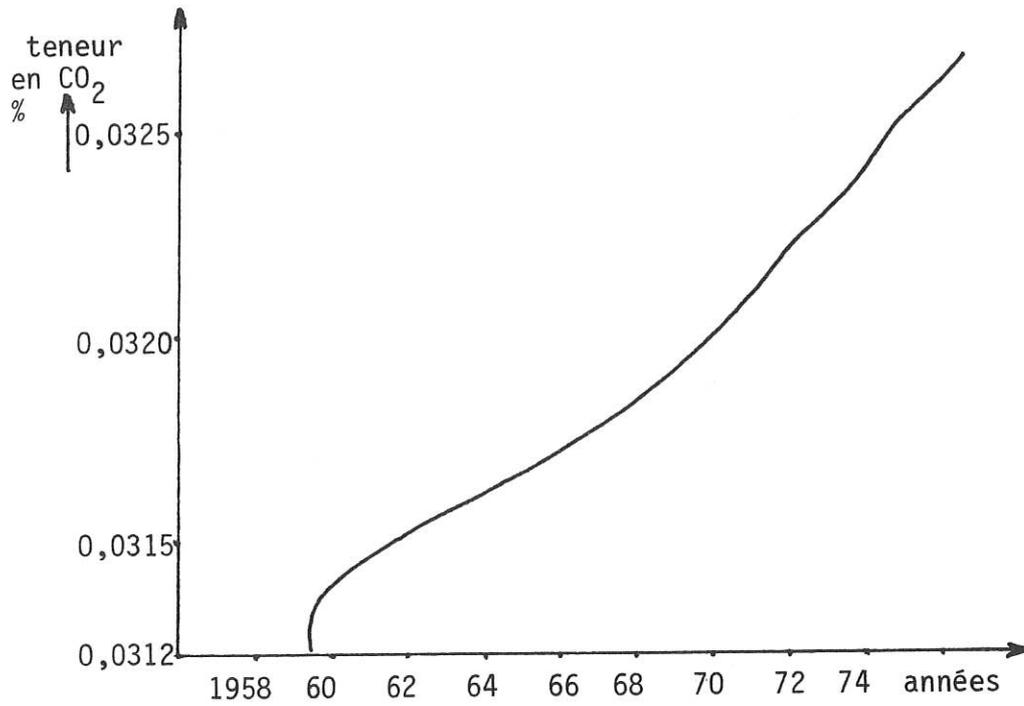


Fig. 19.- Augmentation globale de la teneur en CO₂ de l'atmosphère.

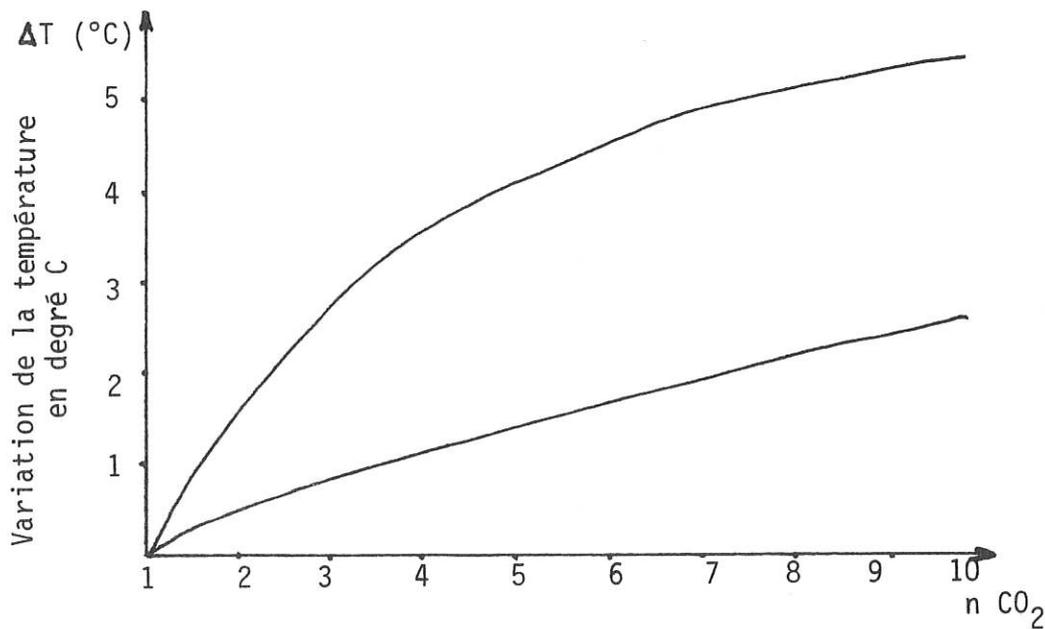


Fig. 20.- Effet de l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. sur la température.

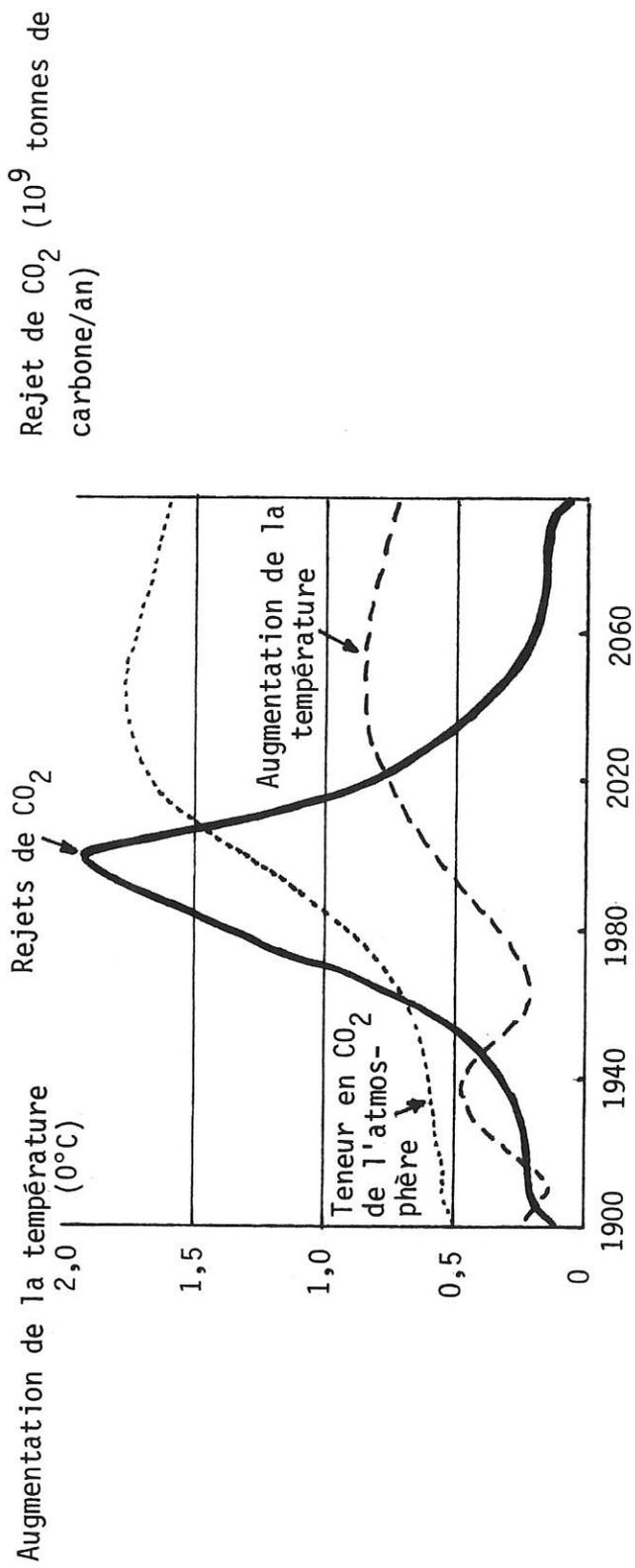


Fig. 21.-

Prévisions des températures, jusqu'en 2060, en fonction de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, qui elle, dépend des rejets.

ANNEXE

Les cycles réguliers des glaciations ; la théorie de Milankovitch

Réponse de Monsieur Letolle à une question posée par un auditeur

Les différents procédés mis en oeuvre font apparaître des oscillations de la température dont la période varie entre 80000 ans et 150000 ans. L'étude des fossiles océaniques révèlent l'existence d'une dizaine d'ères glaciaires particulièrement rigoureuses séparées par des périodes plus chaudes et plus courtes dont la durée varie de 10000 à 20000 ans.

En 1940, l'astronome yougoslave Milutin Milankovitch a présenté une théorie selon laquelle les ères glaciaires seraient liées aux variations de l'orbite terrestre qui passe du cercle à l'ellipse tous les 100000 ans ; d'autre part l'axe de rotation de la Terre connaît deux mouvements d'oscillation avec des périodes respectives de l'ordre de 20000 à 40000 ans.

Enfin, la précession des équinoxes qui entraîne une variation de l'énergie solaire reçue par la terre à chaque saison se modifie tous les 23000 ans.

Les variations du climat expriment l'enchevêtrement de tous ces cycles périodiques.

La théorie de Milankovitch implique la répétition des cycles réguliers constitués dans le passé ... on peut penser que les conditions astronomiques favorables au renouvellement d'une glaciation se présenteront dans cinq à dix mille ans.

Il peut y avoir des fluctuations secondaires avec des périodicités plus courtes (reconnues par l'oxygène 18 dans la carotte glaciaire du Groënland) variant entre quatre vingts et cent quatre vingts ans. C'est le "petit âge glaciaire" amorcé dans la seconde moitié du XVIème siècle et qui persista jusqu'au début du XIXème ; pendant cette période les glaciers alpins ont progressé.