

## CLIMATOLOGIE

### LES GLACIATIONS : CRISES OU CYCLES ? «CRISES CYCLIQUES OU CYCLES DE CRISES»

par Jean-Luc VOISIN<sup>1</sup>

Des glaciations ont eu lieu tout au long de l'histoire de la terre. Les plus anciennes connues (trois ou quatre) remontent au Précambrien. D'autres se sont développées au cours du Paléozoïque et du Quaternaire. Doit-on les considérer comme des crises ou comme des cycles ? Afin d'illustrer cette réflexion je vais commencer par traiter la glaciation quaternaire, la mieux connue. Ensuite je poursuivrai par les glaciations paléozoïques. Les fluctuations glaciaires, avancées ou reculs des glaces sur de très courtes périodes (une dizaine d'années environs), ne seront pas traitées. Ces fluctuations complexes ont des origines diverses et sont encore mal comprises de nos jours.

#### Les glaciations quaternaires

Si on considère le Quaternaire dans son ensemble ainsi que la fin du Tertiaire, on constate, par rapport au Secondaire et au Paléogène, un refroidissement très net. Le secondaire est en effet caractérisé par un climat chaud et humide alors que le Quaternaire l'est par la formation aux pôles de calottes glaciaires importantes, dont l'extension a fluctué au cours du temps. Doit-on alors parler de glaciation pour tout le Quaternaire, ou doit-on parler de glaciation pour chaque avancée importante des inlandsis polaires ? Cette question sera traitée plus loin. Ici le terme glaciation sera employé pour chaque développement important des inlandsis du Quaternaire.

#### Les cycles glaciaires quaternaires

Depuis longtemps il a été établi qu'une partie du Néogène ainsi que le Quaternaire ont été le théâtre d'un certain nombre de glaciations. La première stratigraphie glaciaire a été établie, au début du siècle, par Penck et Brückner en Bavière, d'après l'étude des terrasses du Danube, puis affinée dans les Alpes. Ce travail a permis de définir six grandes glaciations séparées les unes des autres par des interglaciaires. Ces glaciations étaient les suivantes : Biber, Donau, Günz, Mindel, Riss et Würm, dont les trois premières étaient dans le Tertiaire et les trois suivantes dans le Quaternaire. Des études dans d'autres régions du monde ont permis de définir d'autres phases glaciaires (tab. 1). Cependant, ces chronologies présentaient un certain nombre de problèmes car la notion de réchauffement est mal définie, car les reculs glaciaires ne se font pas de manière synchrone dans le monde entier, ce qui conduit à des imprécisions. De surcroît il n'y a pas eu d'accord sur ces différentes phases glaciaires et leurs amplitudes temporelles étaient très variables selon les auteurs. Le tableau 1 montre une tentative de corrélation entre ces glaciations, mais elle est erronée car il n'y a pas six glaciations<sup>2</sup> au sein du Quaternaire, mais une vingtaine comme nous allons le voir plus loin. Quoi qu'il en soit nos prédécesseurs avaient réussi à montrer l'existence de fluctuations glaciaires au cours des temps géologiques.

<sup>1</sup> Institut de Paléontologie Humaine, 1 rue René Panhard, 75013 PARIS ; e-mail : jeanlucv@mnhn.fr

<sup>2</sup> Cependant il est impossible de faire abstraction de ces chronologies glaciaires car elles ont été utilisées pendant plus d'un siècle. Elles ont maintenant un intérêt historique important.

ALPES	EUROPE DU NORD	RUSSIE	SIBERIE OCCIDENTALE	AMERIQUE DU NORD
Glaciation du Würm	Weichselien	Waldai	Stade de Sartan	Wisconsin
			Zyrianka	
			Stade de Zyrianka	
<b>Interglaciaire Riss- Würm</b>	<b>Eemien</b>	<b>Mikulino</b>	<b>Transgression de Kasancev</b>	<b>Sangamon</b>
Glaciation du Riss	Stade de la Warthe	Stade de Moscou	Stade de Tasjenissei	Illinois
	interstade de Saale- Gerdau	Interstade d'Odzowo	Transgression de Sancugov	
	Stade de la Drenthe	Stade du Dniepr	Stade de Samarov	
<b>Interglaciaire Mindel-Riss</b>	<b>Holsteinien</b>	<b>Likhvino</b>	<b>Tobol</b>	<b>Yarmouth</b>
Glaciation du Mindel	Elsterien récent	Oka	Jarska	Kansas
<b>Interglaciaire Günz-Mindel</b>	<b>Harreskovien</b>	<b>Bjelovjesh</b>		<b>Afton</b>
Glaciation du Günz	Elsterien ancien	Narev		Nebraska
<b>Interglaciaire Donau-Günz</b>				
Glaciation du Donau				
<b>Interglaciaire Biber-Donau</b>				
Glaciation de Biber				

**Tableau 1** : Corrélations entre les stratigraphies glaciaires de l'Hémisphère Nord (D'après Chaline, 1972). Les interglaciaires sont en grisé. Noter l'absence d'âge pour chaque phase glaciaire et interglaciaire.

Afin de pallier ces problèmes, une chronologie basée sur les variations des proportions en isotopes d' $O^{16}$  et d' $O^{18}$ , dans les tests de Foraminifères a été élaborée car ces fluctuations isotopiques sont directement liées au volume de glace présent à la surface du globe. Le principe réside dans le fait que l'isotope de l'oxygène 18 est plus lourd que l'isotope d'oxygène 16. Ce dernier est donc plus facilement incorporé dans l'atmosphère lors de l'évaporation qui affecte les océans, et est ainsi immobilisé préférentiellement dans les calottes glaciaires lors des périodes froides. Cela provoque alors un enrichissement relatif des océans en  $O^{18}$ . Au contraire, lors d'une période de réchauffement, la fusion des glaces libère une quantité croissante d' $O^{16}$ , ce qui diminue l'importance relative de l' $O^{18}$  dans les eaux océaniques. Les tests de Foraminifères et de certains autres Invertébrés nous informent sur la composition et la température du milieu aquatique dans lequel ils vivaient car ils sont constitués de carbonates et utilisent indifféremment les deux formes isotopiques. Ils sont en équilibre avec le milieu extérieur, et ne subissent pas de recristallisation secondaire après leur mort. Si la diagenèse est forte, ils peuvent malgré tout subir des modifications de leur composition isotopique. Cependant les Foraminifères présentent une relative stabilité isotopique après leur mort, contrairement d'autres invertébrés à squelette calcaire tels que les Echinodermes et les Coraux qui ne sont pas en équilibre avec le milieu extérieur de leur vivant.

Ces études ont permis de montrer que le volume de glace varie régulièrement entre un maximum et minimum, notés respectivement par des stades pairs et impairs. Ainsi on constate qu'il y a eu au cours du Quaternaire une vingtaine de glaciations entrecoupées par autant d'interglaciaires. Le regroupement d'un stade pair et du stade impair qui le suit, forme un cycle de 100 000 ans environ.

### Causes de cette cyclicité

Pour que les glaces puissent prendre un développement suffisamment important, et avoir un effet notable sur le climat, un certain nombre de paramètres doivent être réunis. Deux facteurs possèdent toutefois un rôle majeur. Le premier est la nécessité qu'un continent de taille relativement importante coïncide avec le pôle sud. En effet un continent tel que l'Antarctique permet une réserve de froid très importante. De surcroît l'ouverture du détroit de Drake il y a 10 ma a permis le développement des courants circumpolaires. Actuellement le pôle sud a une position très centrale sur le continent Antarctique, ce qui fait que les deux coïncideront pendant encore 20 ma au moins. Les pulsations glaciaires qui ont caractérisé le Quaternaire sont donc au début de leur histoire. Le deuxième facteur affectant le développement des glaces est d'ordre astronomique. En effet si on met en parallèle la courbe d'insolation de la surface terrestre et celle du niveau d'englacement (fig. 1), qui correspond à la courbe du rapport en  $O^{16}$  et  $O^{18}$ , on constate qu'elles évoluent de manière presque identique. Il existe cependant un décalage net entre ces deux courbes. Le minimum d'insolation ne correspond pas tout à fait au maximum glaciaire. Cela s'explique facilement par l'inertie thermique que de telles masses d'eau représentent.

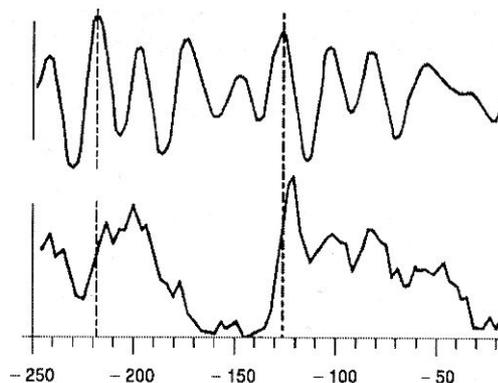


Figure 1 : courbe du  $\delta O^{16}/O^{18}$  et courbe de l'insolation (Foucault, 1993).

L'ensoleillement de la surface terrestre dépend, essentiellement, de trois paramètres de l'orbite planétaire : l'obliquité, l'excentricité et la précession des équinoxes<sup>3</sup> qui varient de manière cyclique. L'obliquité présente une période de 41 000 ans environ, la précession une de 21 700 ans et l'excentricité deux amplitudes très différentes : 100 000 et 400 000 ans. Chacun de ces paramètres jouent un rôle plus ou moins important dans les fluctuations climatiques, mais c'est essentiellement l'association conjointe de l'excentricité et de la précession qui influe le plus sur le développement des inlandsis.

Les études menées sur les carottes de glaces polaires montrent une diminution de la concentration en CO<sub>2</sub> lors des avancées glaciaires. Mais est-ce la diminution de la concentration de ce gaz à effet de serre qui est en partie responsable des avancées glaciaires, ou au contraire cette diminution est-elle une conséquence du développement des glaces ? Dans ce dernier cas de figure les variations de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique auraient alors uniquement un rôle amplificateur (Foucault, 1993). Le même problème se retrouve pour interpréter le rôle de la circulation océanique, car lors du dernier maximum glaciaire celle-ci présentait des différences notables avec celle que l'on connaît actuellement (Ganopolski et al., 1998).

Les glaciations dépendent donc de la géodynamique terrestre et des paramètres de l'orbite terrestre. Lorsqu'une période glaciaire est établie, tel que celle du Quaternaire par exemple, les mouvements des fronts glaciaires, avancées et reculs, dépendent très nettement de paramètres de l'orbite terrestre qui sont périodiques. En cela les glaciations sont cycliques. Dans ce cas on emploie le terme glaciation dans son sens quaternariste, c'est-à-dire qu'il est synonyme d'une avancée d'un inlandsis existant déjà sur un continent polaire. Toutefois, pour que ces variations du volume des glaces existent, il faut une réserve de froid, donc un continent qui coïncide avec l'un des pôles géographiques. Cette superposition des pôles avec un continent est-elle cyclique ? Nous verrons dans le prochain chapitre ce qu'il en est.

### Les enregistrements sédimentaires

Comme nous venons de le voir, l'alternance des glaciations peut être mise en évidence par l'enregistrement isotopique de la cryoséparation, ou encore par d'autres biomarqueurs comme les alcénones<sup>4</sup>. Ces molécules ne sont produites que par quelques espèces de *Coccolithophoridae* et les types d'alcénones synthétisées varient en fonction de la température. Cette variation est très fortement corrélée à la courbe des  $\delta O^{16/18}$  dans les premiers mètres des sédiments marins, puis, plus la profondeur augmente dans le sédiment, plus cette corrélation diminue, pour finalement devenir nulle. Il est possible que la diagenèse dénature ces molécules. De même, les glaciations entraînent une migration des faunes et des flores vers les basses et les hautes latitudes, en fonction des refroidissements et des réchauffements. L'enregistrement paléontologique est alors constitué d'alternances de faunes froides et de faunes chaudes. De ce point de vue aussi, les glaciations sont des cycles.

Ces alternances glaciaires ont aussi influencé les types de sédimentation. En effet chaque phase glaciaire se traduit par une régression importante et inversement par une transgression lors de l'interglaciaire qui suit. La dernière glaciation a entraîné une baisse du niveau général des mers de 120 m environ par rapport au niveau actuel. Cela a entraîné une diminution des surfaces des plateformes continentales, qui correspondent aux zones les plus riches du point de vue de la biodiversité. Ces milieux abritent souvent des espèces très spécialisées qui supportent mal les changements de leur

<sup>3</sup> La précession peut être calculée soit par rapport aux étoiles, c'est la précession astronomique, soit par rapport à l'orbite terrestre. C'est cette dernière qui est prise en considération ici.

<sup>4</sup> Ces molécules sont constituées d'une chaîne carbonée linéaire avec une fonction cétone et un nombre variable d'insaturations.

écosystème. Dans certaines régions, comme la Méditerranée par exemple, ces zones de plates-formes présentent une extension très limitée actuellement, et une diminution importante du niveau des mers entraîne nécessairement leur quasi-disparition et donc un appauvrissement, en diversité, des formes de vie. Les alternances de régressions et de transgressions impliquent aussi des modifications dans les dépôts sédimentaires, lorsque des séquences marines alternent avec des séquences continentales. Ainsi le fond de la Manche, qui subit actuellement une sédimentation marine, était exondé lors de la dernière glaciation, et présente des formations fluviales qui correspondent aux prolongements de la Seine, de la Tamise, ... De plus, lors des glaciations, la proportion des dépôts terrigènes augmente dans les bassins et les mers des régions périglaciaires par les apports fluviaux. Par exemple, la Seine qui actuellement ne peut transporter que des limons, même en période de crue, a été beaucoup plus puissante comme en témoignent les dépôts de cailloutis de la région parisienne (Auboin et *al.*, 1978). Ces différents enregistrements peuvent évidemment montrer une certaine cyclicité, comme c'est le cas pour les migrations des faunes et des flores en fonction des avancées et des reculs glaciaires. Cependant, si au lieu de considérer le Quaternaire dans son ensemble, on étudie la transition entre une phase chaude et une phase froide dans une région donnée, on constate des changements fauniques importants qui peuvent être assimilés à une crise locale. C'est d'ailleurs sur ce critère que fut définie la limite Tertiaire/Quaternaire dans les années cinquante, puisqu'il a été décidé que la limite inférieure du Quaternaire coïnciderait avec le premier indice de détérioration du climat enregistré par les faunes marines du Néogène italien (Chaline, 1986). Cela correspond à la première pénétration d'*Artica islandica* dans la Méditerranée. De plus, l'augmentation des apports terrigènes lors des avancées glaciaires peut transformer la turbidité du milieu aquatique et ainsi renforcer l'aspect de crise dû à la diminution des températures. Les pulsations glaciaires du Quaternaire peuvent donc aussi être considérées comme des crises sur des périodes de 100 000 ans environ.

### **Les glaciations paléozoïques**

Au cours de cette ère deux grandes périodes glaciaires sont reconnues : l'une à l'Ordovicien supérieur et l'autre au Carbonifère supérieur.

#### **La glaciation ordovicienne**

Cette glaciation se développe à l'Ordovicien supérieur et s'étend sur environ 10 à 15 ma. A cette période les terres émergées étaient regroupées en cinq continents, dont quatre de petite taille et un supercontinent : le Gondwana, qui coïncidait avec le pôle sud. Il s'est alors développé un inlandsis plus grand que celui de l'Antarctique actuel. Le climat dans les régions non recouvertes par les glaces était essentiellement aride. Cela s'explique d'autant mieux que le couvert végétal était absent, car à l'époque la conquête du milieu aérien n'avait pas commencé, ou alors faiblement. Il faut noter que certains auteurs voient dans les tillites et quelques autres dépôts glacio-marins de ces périodes des « impactites » résultant de l'impact de météorites (Oberbeck et *al.*, 1993).

Les glaciations ordoviciennes et quaternaires sont des glaciations de plate-forme. Cependant la glaciation ordovicienne présente des particularités propres par rapport à la glaciation actuelle. En effet, le modèle le plus probable de cette glaciation du Paléozoïque inférieur serait l'existence de plusieurs centres de glaciation largement disséminés avec une extension des climats polaires bien plus considérable que ce qui a pu exister au cours du Quaternaire (Legrand, 1983).

#### **La glaciation carbonifère**

Cette dernière glaciation est beaucoup moins connue et fut particulièrement longue car elle a duré 80 ma environ. Actuellement, certains auteurs proposent un modèle avec deux glaciations nettement distinctes espacées de 15 ma environ (Dinkins, 1996). Quoi qu'il en soit, un inlandsis (ou

deux si on considère deux périodes de glaciation) s'est alors développé sur le Gondwana, dont la taille a augmenté par rapport à l'Ordovicien par l'adjonction d'autres masses continentales. Les sédiments glaciaires connus ainsi que les grands dépôts de charbon laissent supposer des contrastes climatiques importants entre les différentes régions du globe à cette période. Cette glaciation devait être très différente de celle qui affecte actuellement le Quaternaire, bien plus que celle de l'Ordovicien supérieur. Actuellement les contrastes climatiques entre les différentes régions du globe terrestre sont relativement importants, mais ils tendent à disparaître lors des avancées glaciaires, comme il semble que ce fût aussi le cas lors de la glaciation ordovicienne (Legrand, 1983). Lors de cette glaciation un certain nombre d'alternances transgression/régression sont connues (DiMichele et *al.*, 1996). Sont-elles liées à des modifications du volume des glaces ?

### Présence ou absence de cycle interne ?

Il est difficile de penser qu'au cours de 15 ma, voire de 80 ma, il n'y ait pas eu la moindre fluctuation de ces glaciers. Des études sur différents types de sédiments tels que les évaporites du Permien texan ainsi que les flyschs à Helminthoïdes d'âge Crétacé supérieur-Tertiaire ont montré que la période de précession ou d'excentricité y est enregistrée (Foucault, 1993). Elles ont aussi été enregistrées dans des sédiments Cambriens (Vennin, com. pers).

Ces cycles astronomiques existent donc depuis le Cambrien, et certainement depuis que le système solaire présente son aspect actuel. Des variations du volume des glaces au cours de ces deux glaciations en fonction des paramètres de l'orbite terrestre sont donc fort probables. Seulement il est délicat de le démontrer car deux conditions, difficiles à remplir, sont nécessaires. Tout d'abord il faut être en possession d'une chronologie présentant une bonne résolution. Cela pose évidemment un problème pour ces périodes géologiques car la précision est de l'ordre du million d'années, dans le meilleur des cas, alors que les cycles astronomiques sont de l'ordre de 100 000 ans. Comme nous l'avons vu plus haut une chronologie précise a pu être obtenue pour des sédiments permien très particuliers, mais pour des périodes plus anciennes, comme le Paléozoïque inférieur, cela est plus délicat car la précision diminue rapidement. Ensuite il faut corrélérer un phénomène continu, lié aux fluctuations glaciaires, avec cette échelle chronologique. La difficulté réside à trouver un enregistrement continu de la variation du volume des glaces dans des terrains aussi anciens. Cependant, le Carbonifère présentant un développement très important de la vie, on peut espérer que l'on découvrira des marqueurs continus sur de très longues périodes de temps, comme les isotopes de l'oxygène ou encore les molécules du type alcénone. Le problème majeur est d'être certain que les familles de molécules choisies dépendent bien d'un facteur climatique tel que la température. De plus, il faut aussi déterminer dans quelle mesure la diagenèse affecte ces familles moléculaires. Ce problème semble plus délicat pour la glaciation ordovicienne car la vie aérienne était quasi inexistante à cette époque et l'importance des dépôts terrigènes peut rendre difficile la découverte de marqueurs moléculaires, voire même de marqueurs de type protozoaires. De surcroît, l'âge encore plus ancien de cet étage par rapport au Carbonifère diminue d'autant les probabilités de déterminer ce type de marqueur.

Pour des périodes aussi reculées, il semble difficile de trouver un enregistrement continu des variations glaciaires. Cependant, des études sédimentologiques précises ont montré que la glaciation fini-ordovicienne a comporté deux à quatre phases glaciaires accompagnées par autant d'interglaciaires (Elmi et *al.*, 1996). Quoi qu'il en soit la perte d'information sera toujours importante car « *les dépôts glaciaires n'enregistrent qu'une partie très réduite de l'histoire climatique (...), celle des maximums ; le reste correspond à des lacunes* » (Chaline, 1986 ; p 64).

Il est possible d'affirmer sans trop de risque que la glaciation ordovicienne a subi des fluctuations, au moins quatre, et qui très certainement devaient répondre à un contrôle astronomique. De même, la glaciation carbonifère a dû elle aussi subir le même type de régulation et donc des phases d'avancées et de reculs glaciaires. Cependant il faut faire attention, car si le contrôle astronomique

existe certainement depuis très longtemps, les périodes de ces différents paramètres peuvent avoir beaucoup changé au cours du temps. Par exemple il semble que la révolution terrestre durait 420 jours environ (Legrand, 1983), au paléozoïque inférieur, soit pratiquement deux mois de plus qu'aujourd'hui.

### Les glaciations : cycles ou crises ?

Pour l'instant on n'explique toujours pas l'absence de glaciations entre l'Ordovicien supérieur et le Carbonifère supérieur, bien que le Gondwana coïncidait toujours avec le pôle sud (fig. 2). Il y eut cependant, un fort refroidissement à la limite Frasnien / Famennien (Dévonien supérieur) (Vennin, com. pers). Quoi qu'il en soit, le contrôle astronomique ainsi que le positionnement d'un continent à l'un des pôles, bien que nécessaires, ne sont pas suffisants pour amorcer une glaciation, et d'autres facteurs doivent donc être recherchés. Quels sont-ils ? Sont-ils cycliques ? Pour des périodes récentes, l'obliquité de la terre a relativement peu variée, et en cela ne rentre pas dans les calculs de l'ensoleillement du globe pour les 2 ou 3 derniers millions d'années. Cependant le comportement du système solaire est chaotique (Foucault, 1993), et il est impossible de déterminer la valeur des paramètres orbitaux sur de très longues périodes de temps. Il n'est pas impossible que cette obliquité ait varié, de manière significative, au cours des temps géologiques, d'autant plus que les courants de convection du manteau semblent pouvoir décaler l'axe de rotation de la terre (Bonatti, 1998). Selon cet auteur, les régions de la lithosphère affectées par des courants de convections mantelliques descendants, plus froids et plus denses que les courants ascendants, et/ou par les descentes des plaques lithosphériques dans les zones de subduction sont « alourdies ». Cela a pour effet de déplacer l'équateur vers les masses denses (fig. 3), car « la Terre, comme tout objet en rotation, se placerait dans un état qui minimise son énergie potentielle » (Bonatti, 1998 : p 19). Il serait intéressant de déterminer si l'obliquité de la Terre a beaucoup fluctué pendant la période de temps qui sépare le Paléozoïque inférieur du Quaternaire. Les variations importantes de l'obliquité de la Terre en fonction de la localisation des zones froides de la lithosphère semblent être un facteur intéressant pour expliquer le développement acyclique des glaciations au cours des ères géologiques. Ce phénomène ne semble pas répondre à des contraintes de cyclicité.

De même la circulation marine, bien qu'elle n'ait pas de rôle direct dans l'amorçage des glaciations, présente tout de même une influence notable sur le climat. La disposition des continents sur le globe terrestre a beaucoup varié au cours de l'histoire de la Terre, et la circulation océanique a certainement été très différente de ce qu'elle est actuellement. Le rôle des courants marins a-t-il toujours eu la même importance dans la régulation des climats que de nos jours ? La disposition des continents actuels montre une morphologie très éclatée et favorise les échanges océaniques Nord-Sud. A l'Ordovicien, et encore plus au Carbonifère, les continents tendent à se regrouper, ce qui influe notablement sur les échanges océaniques. Quelle était l'importance de la régulation climatique par les échanges océaniques ? Était-elle comparable à ce qui existe actuellement ? Ces facteurs vont évidemment intervenir sur l'aspect de crise ou de cyclicité des glaciations.

Comme nous l'avons vu pour le Quaternaire, à l'échelle du million d'années, il est possible de considérer les glaciations comme un phénomène cyclique. Cela semble se retrouver au moins pour la glaciation fini-ordovicienne. En outre, il est difficile d'imaginer des périodes de plusieurs millions d'années sans que la Terre subisse de modifications.

Au contraire, à des échelles de temps plus petites ou plus grandes, l'aspect cyclique disparaît totalement. Nous avons vu pour le Quaternaire que sur une période de 100 000 ans les glaciations peuvent être interprétées comme des crises. Cependant, comme déjà signalé dans l'introduction, il existe des cyclicités de très courte période, une dizaine d'années environ. De même, à l'échelle des ères géologiques, les glaciations apparaissent comme des crises, car les deux glaciations du Paléozoïque sont espacées d'une centaine de millions d'années environ, alors qu'entre la glaciation du Carbonifère supérieur et la glaciation du Quaternaire il y a plus de 300 ma. En outre chaque glaciation

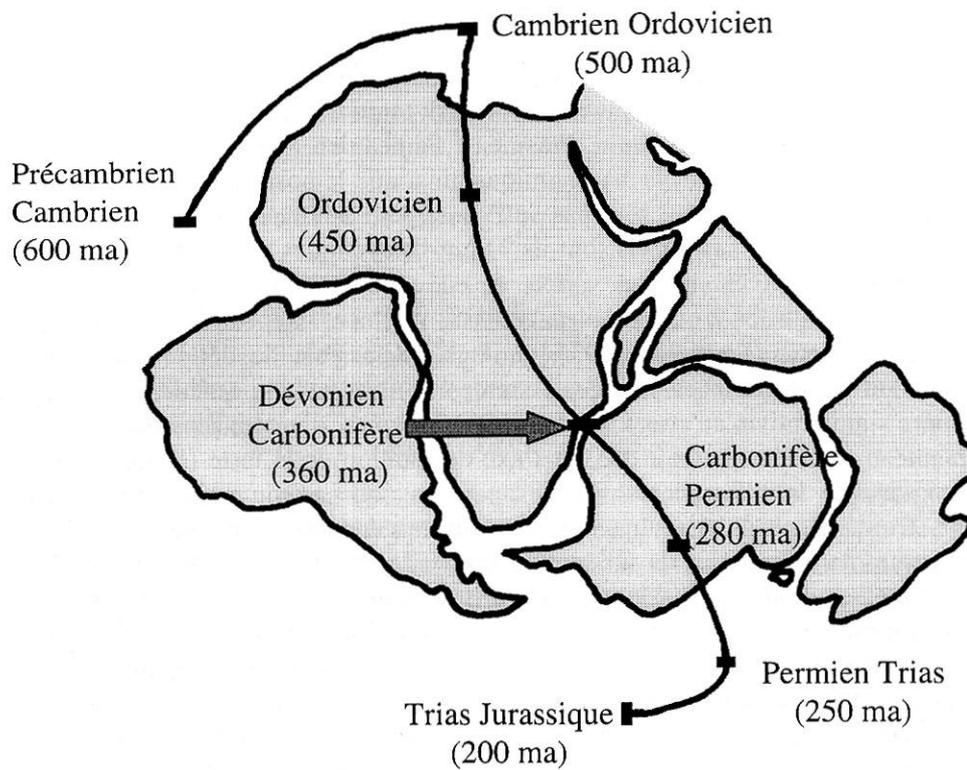
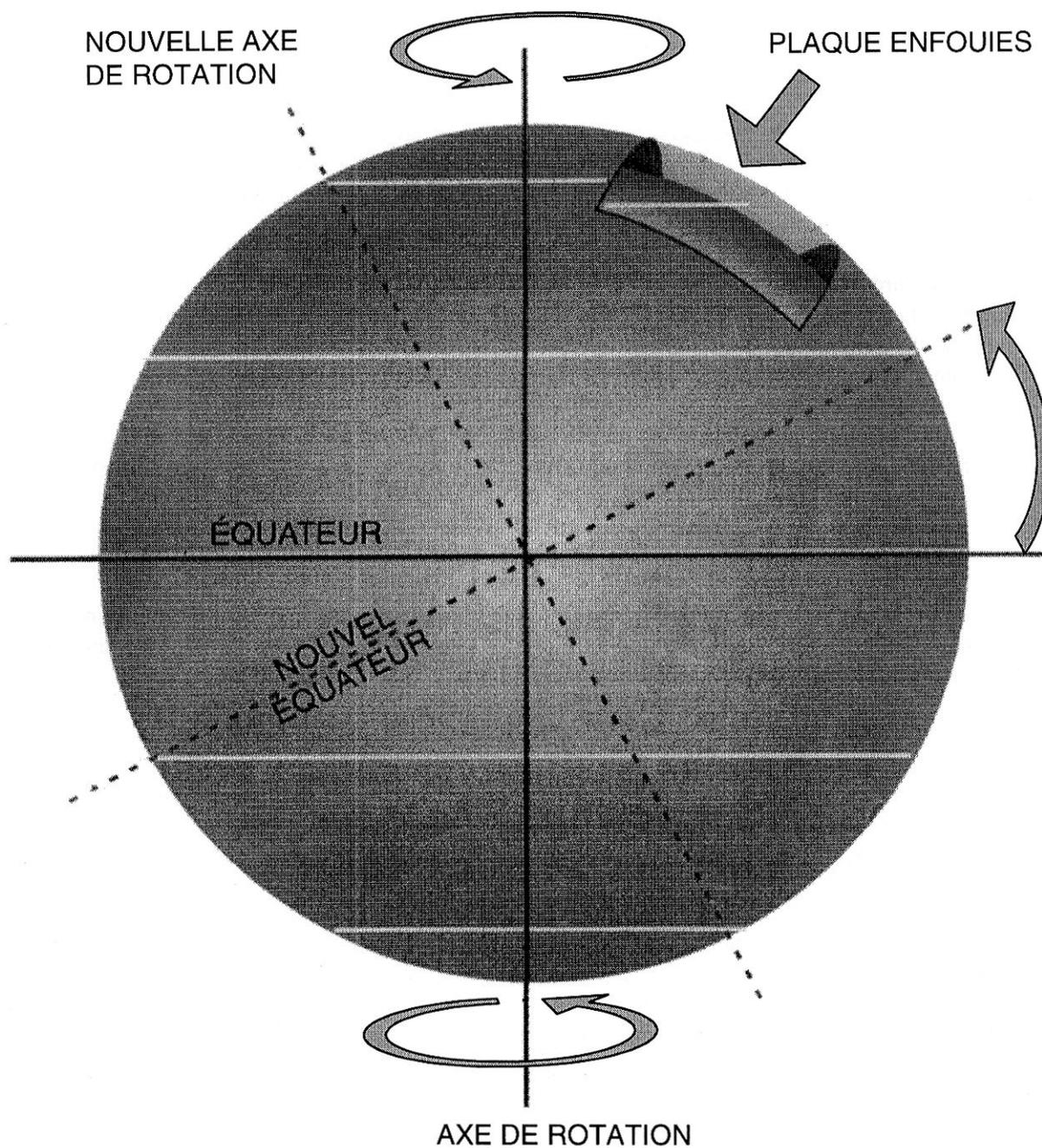


Figure 2 : Déplacement apparent du pôle sud par rapport au Gondwana (d'après Foucault, 1993).



**Figure 3** : Déplacement de l'axe de rotation de la terre afin que l'équateur soit proche des zones lithosphériques les plus denses, qui sont essentiellement des zones de subduction (d'après Bonatti, 1998).

entraîne des changements importants à la surface de la planète (diminution des températures, diminution de la teneur en CO<sub>2</sub>, régressions, ...). Existe-il une relation de cause à effet entre la glaciation ordovicienne et la crise biologique qui affecta le sommet de cet étage ? Quoi qu'il en soit la glaciation carbonifère n'est pas associée à des extinctions en masse aussi importantes, et la précision de la chronologie obtenue pour le Quaternaire fausse les comparaisons.

En conclusion, la différence entre cycle et crise dépend essentiellement de l'échelle choisie pour étudier le ou les phénomènes considérés. Autant les termes de crise et de cycle sont relativement bien définis autant il est très facile de passer d'un cycle à une crise et réciproquement selon l'échelle de temps choisie.

De surcroît il serait plus exact de parler de glaciations pour les périodes présentant une ou des calotte(s) glaciaire(s) à l'un des pôles, et de fluctuations (ou pulsions) glaciaires pour les avancées et les reculs glaciaires qui ont lieu au sein d'une même glaciation, comme ceux qui ont caractérisé le Quaternaire.

Des recherches ultérieures sur les différentes glaciations que la Terre a connues pourraient se révéler riches en informations pour comprendre son histoire, ainsi que pour appréhender le futur proche ou lointain de notre planète.

### Remerciements

Cet travail a été réalisé grâce au cours de l'Ecole Doctorale « Paléoenvironnements : cycles ou crise » organisé par Monsieur Patrick de Wever et Madame Emmanuelle Vennin du Laboratoire de Géologie du Muséum National d'Histoire Naturelle, les 2, 3 et 4 février 1999.

### Bibliographie

- Aubouin J., Brousse R. & Lehman J-P.** : 1978, *Précis de géologie, tome 2. Paléontologie, Stratigraphie*, 3<sup>ième</sup> édition, Dunod Université, 697 p.
- Bonatti E.** : 1998, Le manteau de la Terre et l'ouverture des océans, *Dossier hors-série Pour la Science*, p. 12-20.
- Chaline J.** : 1972, *Le Quaternaire, l'histoire humaine dans son environnement*, Doin, Paris, 432 p.
- Chaline J.** : 1986, *Histoire de l'Homme et des climats au Quaternaire*, Doin, Paris, 366 p.
- Dickins J.M.** : 1996, Problems of a Late Paleozoic glaciation in Australia and subsequent climate in the Permian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, n° 125, p. 185-197.
- DiMichele W.A., Pfefferkorn H.W. & Phillips T.L.** : 1996, Persistence of Late Carboniferous tropical vegetation during glacially driven climatic and sea-level fluctuations, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, n° 125, p. 105-128.
- Elmi S. & Babin C.** : 1996, *Histoire de la Terre*, 3<sup>ième</sup> édition, Masson, Paris, 187 p.
- Foucault A.** : 1993, *Climat, histoire et avenir du milieu terrestre*, édition Fayard, 328 p.
- Ganopolski A., Rahmstorf S., Petoukhov V. & Claussen M.** : 1998, Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity, *Nature*, n° 391, p. 351-356.
- Legrand P.** : 1983, Réflexion sur la paléoclimatologie au Paléozoïque inférieur. Un exemple : l'Ordovicien. In *Actes Coll. AGSO Bordeaux, Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux n° 34, et CNRS Cahiers du Quaternaire*, n° spécial, p. 87-113.
- Oberbek et al.**, : 1993, cité dans *Histoire de la Terre*, de Elmi S et al., 1996.