

Précession climatique et excentricité dans le « Calcaire de Tournai » (Tournaisien supérieur, Carbonifère inférieur), Belgique

Michel Hennebert

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 322, série II a,
p. 445 à 452,
1996

Géologie Fondamentale et Appliquée,
Faculté Polytechnique,
rue de Houdain, 9, B-7000 Mons,
Belgique.

Résumé Le « Calcaire de Tournai », d'âge Carbonifère inférieur, présente une succession épaisse et monotone de calcaires micritiques. Cette série semble fournir un bon enregistrement des fluctuations orbito-climatiques. En effet, l'alternance de *gros bancs séparés par des interbancs épais* et de *petits bancs séparés par des interbancs minces* rappelle la modulation en amplitude de la précession climatique par les variations de l'excentricité de l'orbite terrestre. Cependant, comme le suggèrent les observations de terrain et comme le confirment les spectres de Fourier, le groupement des bancs montre que le rapport de la période de 100 ka de l'excentricité à la précession climatique moyenne est de 7,25, ce qui est nettement plus élevé que les valeurs calculées par Berger et ses collaborateurs pour la même période géologique : environ 5,2.

Mots-clés : Milankovitch, Précession climatique, Excentricité, Spectres de Fourier, Carbonifère inférieur, Belgique.

Abstract **Climatic precession and eccentricity in the Tournai Limestone
(Upper Tournaisian, Lower Carboniferous, Belgium)**

The Lower Carboniferous Tournai Limestone shows a thick uniform micritic series. This deposit seems to have recorded well the orbito-climatic variations. So, the alternation between *thick beds-thick interbeds* and *thin beds-thin interbeds*, reminds us of the amplitude modulation of the climatic precession by the Earth's orbit eccentricity variations. However, as the field work shows and the Fourier spectra confirms, the ratio of the 100 ka eccentricity period upon the mean climatic precession is 7.25. This is higher than Berger and co-workers' results for the same geological period: circa 5.2.

Keywords: Milankovitch, Climatic precession, Eccentricity, Fourier spectra, Lower Carboniferous, Belgium.

**Abridged
English
Version**

THE Upper Tournaisian Tournai Limestone (figs. 1 and 2) shows a thick series of uniform, rather deep-water micrites. The lower part (Tournai Formation) is rich in macrofossils: crinoids, bryozoans, brachiopods, rugose and tabulate corals, gastropods, trilobites, etc. The upper part (Antoing Formation) is mainly unfossiliferous, apart from

small rugose corals and brachiopods, nautiloids, goniatites, and *Zoophycos* which is very abundant at certain levels (fig. 2).

The bedding is regular and the bedding pattern seems to record well the orbito-climatic variations. The alternation between both *thick beds-thick interbeds couplets* and *thin beds-thin interbeds couplets*, appears to correspond to

Note

présentée par
Jean Dercourt.

remise le 7 août 1995,
acceptée après révision
le 8 janvier 1996.

the amplitude modulation of the climatic precession by variations in the Earth's orbit eccentricity (figs. 3 and 4). Nevertheless, the classical five fold "bundling" or stratification cycle (i.d. the 100 ka eccentricity/mean precession ratio) seems here to be elevated to 5 to 8 couplets, with an average of about 7.

Fourier spectra have been performed using the bed-by-bed log of Mortelmans (1963). A particularly clear part of this log, named here "section 0" (see fig. 2) has been chosen. It is 110.4 m thick and contains 390 couplets. It has then been split into two equal parts (sections 1 and 2) in order to test the peak stability over the series. The Fourier spectra for Sections 0, 1 and 2 give respectively bundlings of 7.25, 7.35 and 6.80 (fig. 5 and table). These results are higher than the values calculated by Berger *et al.* (1989) and Berger and Loutre (1994) for the same period: circa 5.2. Nevertheless, Schwarzscher (1987) in a study of the Viséan limestones of the Sligo Syncline, N-W Ireland, have found bundlings of 5.9 within the Glencar Limes-

tone and 7.5 within the Dartry Limestone (table), which is much closer to our results.

In conclusion, as calculated by Berger and co-workers for the geological past, both the slowing down of the Earth's spin rate and the correlative Moon recession are responsible for a longer mean climatic precession period. Nevertheless, the Lower Carboniferous results are rather higher from the astronomically predicted figures. Following the table, if we take the present day mean climatic precession (21.7 ka) at 100%, then the predicted Berger and Loutre (1994) figure for the age of the Tournai Limestone is 88.7%, and the figure obtained for the Tournai Limestone itself is 63.6%. Further similar studies have, of course, to be performed within Palaeozoic strata to confirm the discrepancy.

This type of geological approach could be valuable: to get to know the evolution of the Milankovitch frequencies, to better understand the Earth and the Solar system dynamics and to help future high-resolution stratigraphic studies.

INTRODUCTION

À la suite des travaux de Milankovitch, et plus récemment de ceux de Berger et de son école (Berger, 1977), on a pris conscience du fait que les variations du climat, sur des échelles de temps de l'ordre de la dizaine à plusieurs centaines de milliers d'années, étaient largement influencées par les variations cycliques des paramètres de l'orbite terrestre. Ce lien orbito-climatique a été très étudié pour le Quaternaire et son influence ne peut plus être mise en doute pour les dépôts plus anciens (Weedon, 1993; Schwarzscher, 1993; de Boer et Smith, 1994). Les calculs des fréquences de Milankovitch pour les temps géologiques, tenant compte du ralentissement de la rotation terrestre et de l'éloignement corrélatif de la lune (Berger *et al.*, 1989; Berger et Loutre, 1994), doivent encore être confrontés aux données géologiques. Outre l'intérêt de cette approche

pour la compréhension des paléoclimats et pour celle de la dynamique du système solaire, celle-ci pourrait servir, à l'avenir, de fondement à une stratigraphie de très haute résolution.

CADRE GÉOLOGIQUE

Le « Calcaire de Tournai » a été entamé par de nombreuses carrières, situées dans le triangle : Tournai - Antoing - Gaurain-Ramecroix (fig. 1). Quatre carrières en activité montrent ce calcaire sur presque toute son épaisseur (Formations de Tournai et d'Antoing; fig. 2). Les coupes du Tournaisien ont servi jadis à la définition de l'étage Tournaisien. Actuellement, le terme correspond à une série, groupant deux étages : l'Hastarien et l'Ivorien. Le Calcaire de Tournai correspond à l'ensemble de l'Ivorien, et peut-être aussi à la base de l'étage local Moliniacien (base du Viséen).

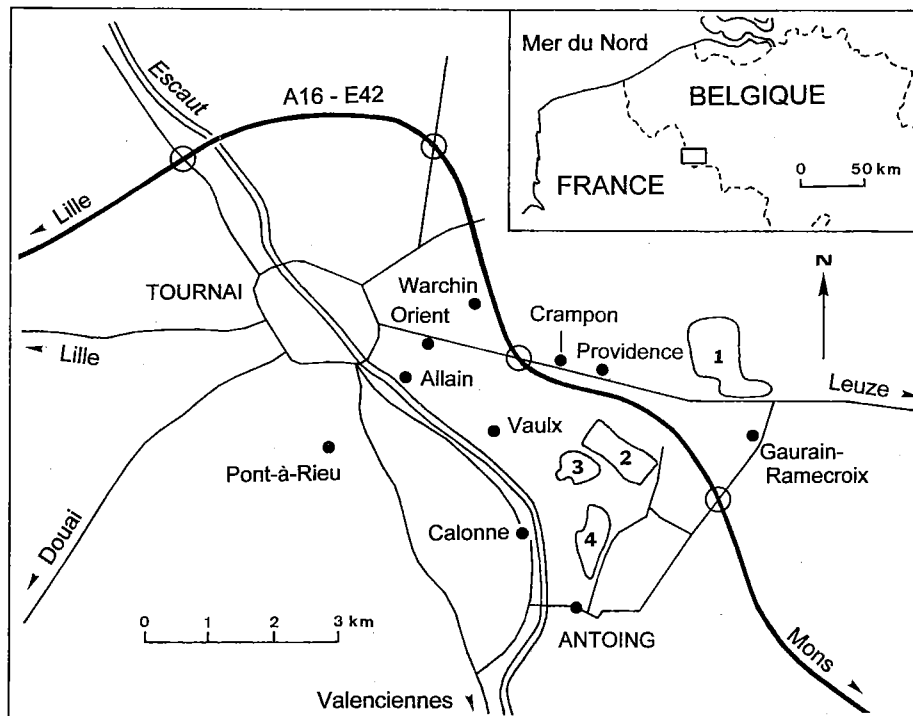


Fig. 1 Situation de la région étudiée. Les carrières en activité sont : (1) CCB, (2) Milieu, (3) Lemay, et (4) Antoing.

Geographical setting of the studied area. The worked out quarries are: (1) CCB, (2) Milieu, (3) Lemay, and (4) Antoing.

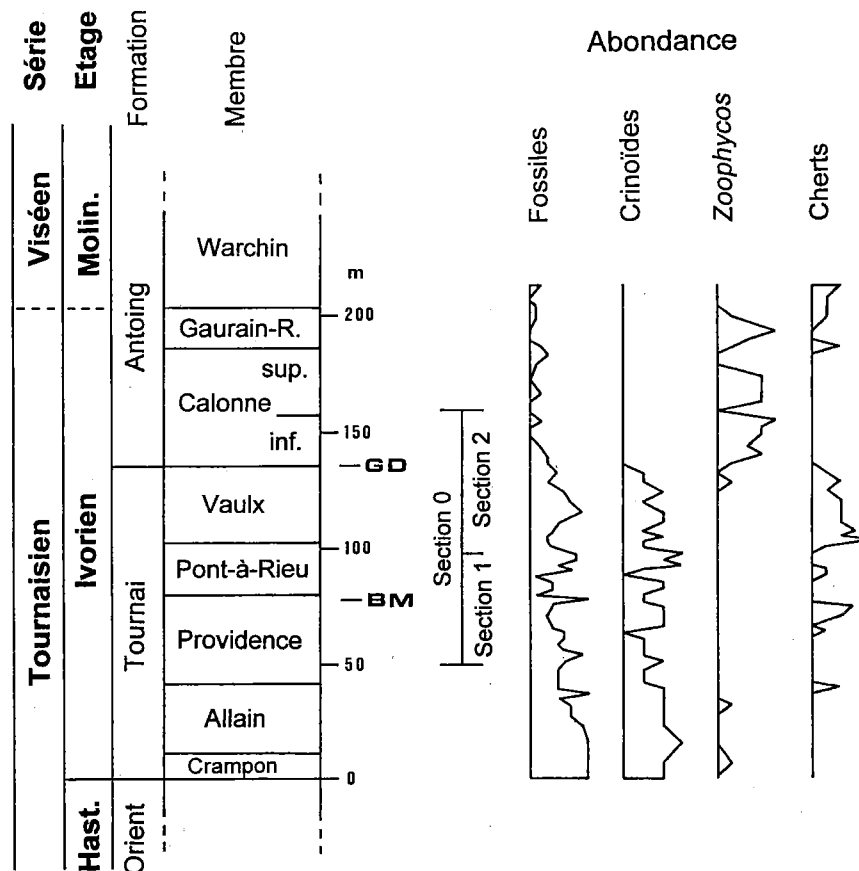


Fig. 2 Stratigraphie du « Calcaire de Tournai » (Formations de Tournai et d'Antoing). BM = « Banc à moules », GD = « Gras délit ». Les parties de la colonne stratigraphique analysées sont dénommées sections.

Stratigraphy of the Tournai Limestone (Tournai and Antoing Formations). The parts of the analysed log are named sections.

Du point de vue sédimentologique, le Calcaire de Tournai se divise en deux ensembles contrastés, les Formations de Tournai et d'Antoing, séparés par la discontinuité du « Gras délit » : une passée argileuse, épaisse de 5 à 20 cm, qui constitue un excellent niveau repère (GD sur la figure 2).

L'ensemble inférieur (Formation de Tournai) est micritique et fossilifère. Il est peu argileux, sauf à la base (Membres du Crampon et d'Allain), où s'opère le passage d'une sédimentation à prédominance argileuse (Formation de l'Orient) vers une sédimentation calcaire (Membres de la Providence, de Pont-à-Rieu et de Vaulx). Les restes d'organismes résultent de la dissociation sur place d'une communauté à crinoïdes, bryozoaires et brachiopodes, auxquels s'ajoutent : rugueux, tabulés, gastéropodes, bivalves, nautiloïdes et trilobites, ainsi que des restes d'algues calcaires (paléobéreselles et spongiostromides).

L'ensemble supérieur (Formation d'Antoing) est micritique, souvent argileux. Les éléments figurés y sont encore présents à la base, mais tendent à disparaître plus haut : petits rugueux, brachiopodes inarticulés, petits chonétoïdes, crinoïdes dissociés. A divers niveaux se rencontrent des nautiloïdes et des goniatites. *Zoophycos* peut être abondant et des pseudomorphoses de gypse sont parfois présentes.

SÉDIMENTOLOGIE ET PALÉOENVIRONNEMENTS

L'environnement de dépôt

Les calcaires sont représentés par des « mudstones » et « wackestones », parfois par des « packstones ». Les foraminifères pluriloculaires sont très rares dans la Formation de Tournai et absents dans celle d'Antoing, alors qu'ils sont habituellement abondants dans les milieux peu profonds du Carbonifère inférieur (Mamet, 1977). Les algues sont quasi absentes. Seuls des spongiostromides et des paléobéreselles apparaissent à certains niveaux dans la Formation de Tournai. Cela indique des conditions de dépôt subphotiques pour la plus grande part de la

Formation de Tournai et aphotiques pour la Formation d'Antoing (Hennebert et Lees, 1991). L'abondance de *Zoophycos* dans la Formation d'Antoing, ainsi que la présence de céphalopodes nectiques, va aussi dans le sens d'un dépôt assez profond. La Formation de Tournai doit correspondre à un environnement proche du niveau inférieur d'action des tempêtes (environ 100-150 m) ; celui de la Formation d'Antoing devait se situer en dessous.

La stratification

Les bancs sont réguliers, parfois onduleux. Leur épaisseur va de 10 cm à plus de 1 m. La moyenne est d'environ 30 à 35 cm. Les interbancs sont argileux ou marneux, d'épaisseur variable, allant de quelques millimètres à quelques centimètres. Un examen précis révèle l'intervention d'un phénomène de dissolution différentielle et reprécipitation : un cœur de calcaire dur, peu compacté, est encadré par deux croûtes de calcaire argileux fissilé présentant des micro-joints de dissolution (Bathurst, 1987). Les stylolites sont absents.

Les bancs eux-mêmes sont le plus souvent symétriques : présentant un sommet et une base identiques. Les bases de bancs érosives, les granoclassements et les stratifications entrecroisées sont rares. Les niveaux d'accumulation de coquilles ou de crinoïdes (tempestites) sont le plus souvent minces, allant de un à trois centimètres. Leur épaisseur est ainsi beaucoup plus faible que celle des bancs eux-mêmes.

Ceci semble confirmer le dépôt, sur la partie profonde, d'une rampe carbonatée, où l'influence des tempêtes est assez faible et où les oscillations orbito-climatiques peuvent commander l'organisation des futurs bancs au sein d'un dépôt dominé par les boues hémipélagiques.

LA CYCLICITÉ ORBITALE

Cyclicité visible à l'affleurement

A l'affleurement, on note fréquemment l'alternance de *gros bancs séparés par des inter-*

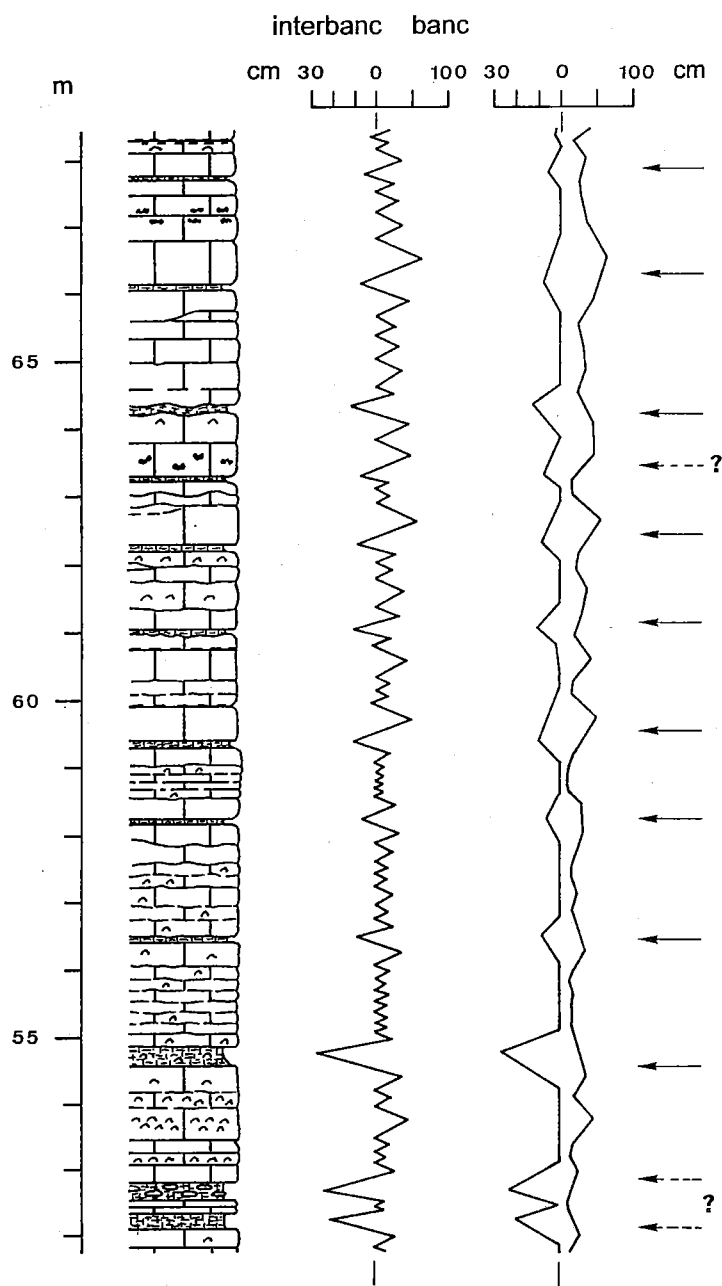


Fig. 3 Exemple d'interprétation d'une partie du Membre de la Providence en terme de cyclicité (levé lithologique d'après Mortelmans, 1963). L'échelle métrique correspond à la base de la Formation de Tournai. La première courbe interprétative est obtenue en portant les épaisseurs des interbancs marneux vers la gauche et celles des bancs calcaires vers la droite. La seconde courbe est la courbe enveloppe de la première. Les flèches indiquent les épaississements de la courbe enveloppe.

Interpretation of a part of the Providence Member in term of cyclicity (from the log of Mortelmans, 1963). The metric scale belongs to the base of the Tournai Formation. The first curve is obtained by plotting the marly interbed thicknesses on the left and those of the limestone beds on the right. The second curve is the first's envelope. Arrows indicate the thickenings of the envelope curve.

bancs épais et de petits bancs séparés par des interbancs minces. Le binôme (ou doublet) « gros banc-interbanc épais » est toujours bien net, alors que pour le binôme « petit banc-interbanc mince », la délimitation des bancs et de leurs interbancs est moins évidente.

Le Calcaire de Tournai a été levé banc à banc, sur presque toute son épaisseur, par Mortelmans (1963). Nous avons utilisé le

levé de cet auteur, tout en faisant, de place en place, des vérifications sur le terrain. La figure 3 montre une partie de la séquence étudiée. On y retrouve aisément l'alternance citée ci-dessus. Un traitement graphique simple met en évidence l'existence d'une cyclicité faisant alterner les deux types de binômes. Pour l'ensemble de la série, on observe le plus souvent des groupements

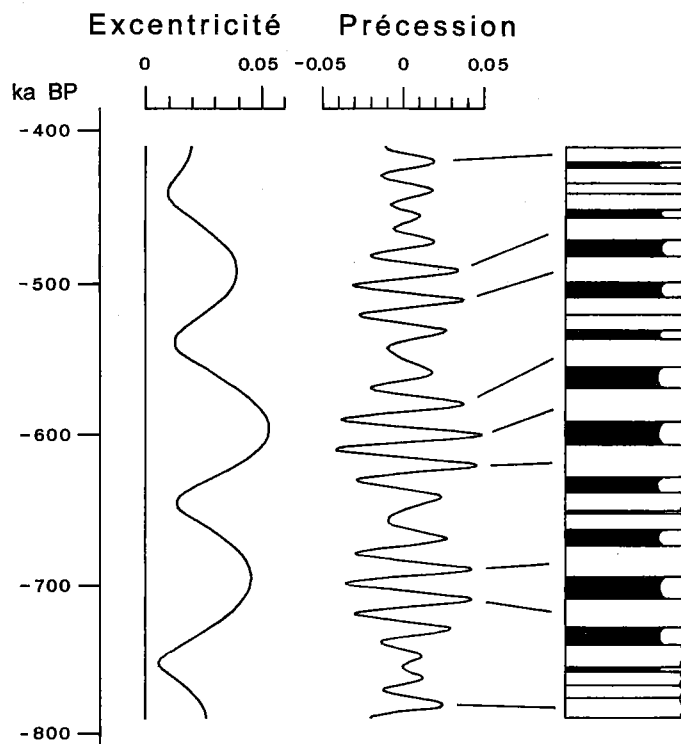


Fig. 4

Fig. 4 Exemple théorique de l'influence des cycles orbitaux sur l'organisation des bancs dans une série marno-calcaire. L'excentricité de l'orbite terrestre et la précession climatique (pour un intervalle de temps choisi arbitrairement) sont tirées de Berger (1984, fig. 9). Si l'excentricité ne présente qu'un impact direct faible sur le climat, elle exerce par contre un contrôle majeur sur l'amplitude de l'indice de précession. La colonne lithologique imaginaire est dessinée en supposant que les valeurs négatives du paramètre de la précession sont plus favorables à la sédimentation argileuse et les valeurs positives, à la sédimentation calcaire.

Theoretical example of the orbital-frequencies influence on the pattern of marl-limestone couplets. The Earth orbital eccentricity and the climatic precession (for an arbitrarily chosen interval) come from Berger (1984, fig. 9).

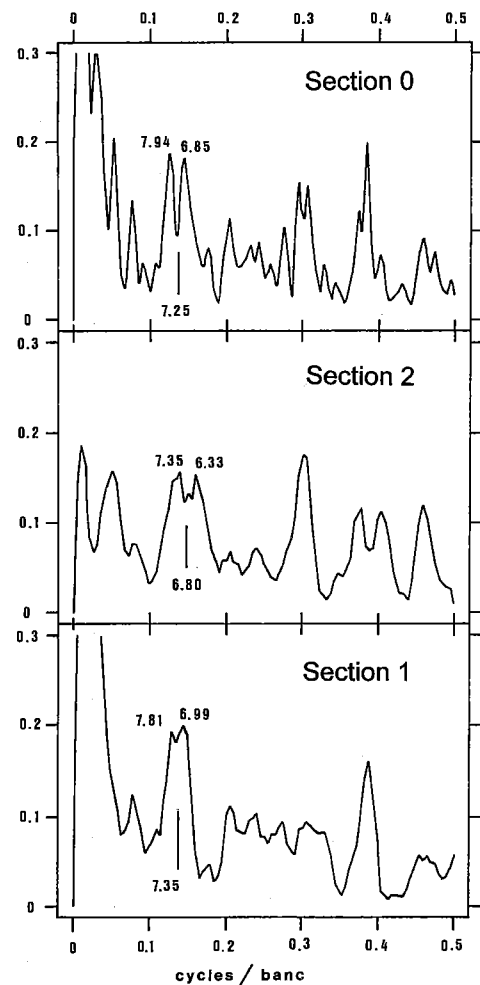


Fig. 5

If the eccentricity exerts only a small direct impact on climate, it plays a major control on the amplitude of the climatic precession. The imaginary lithological log is drawn by supposing that precession negative values are favourable to clay deposition and positive values to limy deposition.

Fig. 5 Spectres de fréquence de Fourier pour les sections étudiées. Les fréquences sont exprimées en cycles par binôme ou en cycles par banc. Les pics de l'excentricité sont indiqués en nombre de binômes par cycle.

Fourier spectra for the studied sections. Frequencies are given in cycle by couplet. The eccentricity pikes are labelled in number of couplets by cycle.

allant de 5 à 8 binômes (banc-interbanc), avec une moyenne située autour de 7.

L'organisation observée peut être interprétée en terme de paramètres orbitaux (fig. 4). Il semble que les binômes correspondent ici au cycle de précession et que leur groupement doive correspondre au cycle de 100 ka de l'excentricité.

Analyse spectrale

Nous avons choisi, dans le levé de Mortelmans (1963), une section (dénommée ici section 0), où la division en bancs et interbancs était claire et où les épaisseurs, en centimètres, des binômes étaient facilement déterminables. La section 0 forme une série continue de 390 binômes (bancs-interbancs), qui s'étend sur 110,4 m d'épaisseur (de la cote 49,6 m du levé à 160,0 m, la base de la Formation de Tournai étant prise comme référence). Cet intervalle s'étend ainsi de 9,1 m au-dessus de la base du Membre de la Providence, jusqu'à 3,8 m au-dessus de la base du Membre supérieur de Calonne.

Après le traitement par analyse de Fourier des 390 épaisseurs de binômes considérées comme un tout (section 0), la série est divisée en deux parties de même nombre de binômes, afin de vérifier la stabilité des pics de fréquence (sections 1 et 2). La limite entre ces deux sections est située à la cote 98,5 m (c'est-à-dire 3,0 m sous le sommet du Membre de Pont-à-Rieu).

Dans l'analyse de Fourier, les binômes sont considérés comme des « unités de temps ». En effet, on considère que chaque binôme correspond à un cycle de précession. Ainsi, l'abscisse du spectre est exprimée en « cycles par binôme » (= « cycles par bancs ») ou en « cycles par unité de précession ». Elle donne, inversement, le nombre de cycles de précession compris dans un cycle de période plus longue. L'analyse n'est pas totalement rigoureuse, car notre « unité de temps » est variable, le cycle de précession correspondant en fait à une quasi-période.

Le traitement appliqué aux trois sections comprend plusieurs étapes. Les distributions

des épaisseurs (en centimètres) des binômes étant lognormales, nous utilisons les logarithmes des valeurs des épaisseurs, pour éliminer les valeurs extrêmes avant le calcul d'une droite de régression. Une fois les valeurs de la droite de régression soustraites de la série, nous procédons à l'effilage de 10 % du vecteur à chacune de ses extrémités (Weedon, 1991). Le spectre de fréquence est calculé par transformée rapide de Fourier. Comme les ordonnées du périodogramme varient toujours de manière erratique, elles doivent être lissées. Nous avons utilisé ici une moyenne mobile simple sur trois valeurs, en renouvelant l'opération pour obtenir des spectres mieux lissés (Weedon, 1991).

Le groupement d'environ sept binômes signalé plus haut, se retrouve sur les spectres de fréquence (fig. 5). D'autres pics, dont certains peuvent correspondre à l'obliquité, sont aussi présents. Si on compare les sections 1 et 2, on constate que les pics sont assez stables.

Le tableau donne les valeurs exprimées en nombre de binôme par cycle, c'est-à-dire, comme admis plus haut, le rapport de la période de 100 ka de l'excentricité à la précession climatique moyenne. La durée moyenne de la précession est alors déduite et vaut, par exemple, 13 800 ans pour la section 0.

Schwarzacher (1987) a étudié le groupement des bancs dans des calcaires viséens du

Tableau Valeurs des rapports de l'excentricité de 100 ka à la précession climatique moyenne. Ages estimés d'après Odin (1994).

~~~~~ Ratios of the 100 ka eccentricity period upon the mean climatic precession. Ages estimated from Odin's chart (1994).

|                                  | Excentricité<br>de 100 ka /<br>précession | Précession<br>moyenne (ka) |
|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| Section 0 (env. 347 Ma) . . . .  | 7,25                                      | 13,8                       |
| Section 1 . . . . .              | 7,35                                      | 13,6                       |
| Section 2 . . . . .              | 6,80                                      | 14,7                       |
| Glencar Lmst (env. 334 Ma) .     | 5,9                                       | 16,9                       |
|                                  | moy. 6,7                                  | moy. 14,9                  |
| Dartry Lmst (env. 330 Ma) ..     | 7,5                                       | 13,3                       |
| Berger et coll. (347 Ma) . . . . | 5,19                                      | 19,25                      |

Synclinal de Sligo, au NW de l'Irlande. Les valeurs obtenues, quoique assez différentes l'une de l'autre, 5,9 pour le Glencar Limestone et 7,5 pour le Dartry Limestone, rappellent fortement celles du Calcaire de Tournai. La moyenne de ces deux valeurs (6,7) est presque égale à la valeur obtenue pour la section 2 (6,8). La valeur calculée d'après les données de Berger et Loutre (1994), pour un âge de 347 Ma (âge estimé d'après Odin, 1994, pour le Tournaisien supérieur), est nettement plus faible : 5,19.

Les valeurs du tableau montrent que, si l'on prend la période actuelle moyenne de la précession climatique (21,7 ka) égale à 100 %, la période calculée par Berger et Loutre (1994), pour l'âge de nos roches, vaut 88,7 %. Les résultats obtenus pour le Calcaire de Tournai lui donneraient une durée de seulement 63,6 %. Cette différence importante entre les calculs astrono-

miques et les observations géologiques devrait, bien sûr, être testée sur d'autres formations du Paléozoïque.

## CONCLUSION

Comme le prévoient les calculs de Berger *et al.* (1989) et Berger et Loutre (1994), pour les temps géologiques, le ralentissement de la rotation terrestre et l'éloignement corrélatif de la Lune, induisent un allongement de la période moyenne de la précession climatique. Toutefois, les résultats obtenus pour le Calcaire de Tournai sont assez différents, en valeur absolue, de ceux prévus par ces auteurs. La compilation des données géologiques de ce type, pour le plus grand nombre possible de périodes géologiques, pourrait éclairer l'évolution des fréquences de Milankovitch, ainsi que la dynamique de la Terre et celle du système solaire.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATHURST, R.G.C., 1987. Diagenetically enhanced bedding in argillaceous platform limestones: stratified cementation and selective compaction, *Sedimentology*, 34, p. 749-778.
- BERGER, A.L., 1977. Support for the astronomical theory of climatic change, *Nature*, 269, p. 44-45.
- BERGER, A.L., 1984. Accuracy and frequency stability of the Earth's orbital elements during the Quaternary. In: *Milankovitch and Climate*, Part I, BERGER, A.L., IMBRIE, J., HAYS, J., KUKLA, G. et SALTZMAN, B., éd., Reidel Publ. Co., Dordrecht, p. 3-39.
- BERGER, A. et LOUTRE, M.F., 1994. Astronomical forcing through geological time. In: *Orbital forcing and cyclic sequences*. DE BOER, P.L. et SMITH, D.G., éd., *Spec. Publs Int. Ass. Sediment*, 19, p. 15-24.
- BERGER, A., LOUTRE, M.F. et DEHANT, V., 1989. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies, *Nature*, 342 (6246), p. 133.
- DE BOER, P.L. et SMITH, D.G., éd., 1994. *Orbital forcing and cyclic sequences*. *Spec. Publs Int. Ass. Sediment*, 19, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 559 p.
- HENNEBERT, M. et LEES, A., 1991. Environmental gradients in carbonate sediments and rocks detected by correspondence analysis: examples from the Recent of Norway and the Dinantian of southwest England, *Sedimentology*, 38, p. 623-642.
- MAMET, B., 1977. Foraminiferal zonation of the Lower Carboniferous: methods and stratigraphic implications. In: *Concepts and Methods of Biostratigraphy*, KAUFFMAN, E.G. et HAZEL, J.E., éd., Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., p. 445-462.
- MORTELMANS, G., 1963. Les calcaires de Tournai. In: DELMER, A., LEGRAND, R., MAMET, B. and MORTELMANS, G., Le Dinantien du Hainaut occidental. *Livret-guide de l'excursion I-J. 6<sup>e</sup> Congr. Int. Sédimentologie, Belgique et Pays-Bas*, 1963, p. 1-22.
- ODIN, G.S., 1994. Geological Time scale, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 318, série II, p. 59-71.
- SCHWARZACHER, W., 1987. The analysis and interpretation of stratification cycles, *Paleoceanography*, 2, p. 75-95.
- SCHWARZACHER, W., 1993. *Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory*, Developments in Sedimentology 52, Elsevier, Amsterdam, 225 p.
- WEEDON, G.P., 1991. The spectral analysis of stratigraphic time series. In: *Cycles and events in stratigraphy*, EINSELE, G., RICKEN, W. et SEILACHER, A., éd., p. 840-854. Springer-Verlag, Berlin, 955 p.
- WEEDON, G.P., 1993. The recognition and stratigraphic implications of orbital-forcing climate and sedimentary cycles. In: *Sedimentology Review*, 1, p. 31-50, WRIGHT, V.P., éd., Blackwell Scientific Publications.