

La séquence des inversions magnétiques analysée par ondelettes : un enregistrement de l'histoire tectonique du globe au toit du noyau

The magnetic reversal sequence studied using wavelet analysis: a record of the Earth's tectonic history at the core–mantle boundary

Luc-Emmanuel RICOU¹ et Dominique GIBERT²

¹ *Institut de physique du Globe de Paris, paléomagnétisme et géodynamique, URA CNRS 729, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05 ;*

² *Géosciences Rennes, CNRS Université de Rennes 1, 35042 Rennes cedex, France*

RÉSUMÉ

L'analyse par ondelettes de la séquence des inversions géomagnétiques depuis 160 Ma fait apparaître de brusques variations dans l'évolution de la fréquence d'inversion. Ces singularités correspondent, avec un retard moyen de 3 Ma, aux époques de réorganisation des plaques marquées par la création ou l'abandon de dorsales océaniques. Ce faible délai indiquant un effet mécanique, on fait appel aux changements topographiques que l'interface manteau-noyau, surface de changement de densité, doit subir sous l'influence de la tectonique sus-jacente.

Mots clés : *Ondelettes, Inversions magnétiques, Tectonique des plaques, Couplage noyau-manteau*

ABSTRACT

The wavelet analysis of the magnetic reversal sequence since 160 Ma discloses abrupt discontinuities in the evolution of the reversal frequency. They correspond, with a mean 3 Ma delay, to major plate reorganisations as defined by the formation or demise of ocean spreading ridges. Because the short delay points to mechanical coupling, we propose that topographic changes at the core–mantle boundary took place in response to plate tectonics crises, hence changes in the reversal frequency.

Keywords: Wavelets, Magnetic reversals, Plate tectonics, Core–mantle coupling

Abridged version (see p. 757)

Introduction

Peu après la découverte de la tectonique des plaques, un couplage avec le noyau externe a été proposé en comparant des événements marquants des deux histoires (Vogt, 1975). Le gain de précision acquis depuis permet de mettre en évidence des correspondances indiquant qu'il y a effectivement couplage. Nous traitons ici des évé-

nements majeurs qui, dans les deux enregistrements, se distinguent du bruit sans nécessiter de discussion.

Analyse de la séquence d'inversion

On sait que le rythme des inversions magnétiques n'est pas régulier, et nous renvoyons à Cande et Kent (1992), quant à la méthode utilisée pour en établir la séquence. La

Note présentée par Jean-Louis Le Mouél

Note remise le 27 janvier 1997, acceptée après révision le 17 juin 1997

séquence utilisée ici est celle de Harland et al. (1990), modifiée pour la période postérieure au superchrone crétacé selon Cande et Kent (1995). Elle couvre les derniers 158 Ma et comprend 284 inversions. On admet que la partie jeune, fondée sur un plus grand nombre de données, est la mieux établie. La probable non-identification d'intervalles très courts est une erreur assimilable à un bruit blanc, sans influence dans la recherche des singularités, et moins important que les erreurs sur ce qui est mesuré.

La courbe de fréquence d'inversion (figure 1a) montre des pics aigus de haute fréquence. L'analyse en ondelettes (Meyer, 1990) confirme que ce sont des singularités dans l'évolution générale à diverses échelles de temps et illustre leurs poids relatifs. L'évolution générale est utilisée sous la forme, proche des données, d'une courbe cumulative dont la fréquence est la dérivée. La courbe est échantillonnée tous les 0,05 Ma et analysée avec une ondelette (dérivée première de Gaussienne) particulièrement sensible à sa dérivée (figure 1b). Les singularités qui ont un poids majeur sont celles qui persistent quand on augmente la dilatation, ici de 2^1 à 2^7 . Les faibles dilatations sont sensibles au bruit lié à la marge d'erreur de la séquence utilisée (Alexandrescu et al., 1995). Utilisant le caractère discontinu de l'ondelette de Haar, une différence finie des coefficients d'ondelette, au pas de 0,05 Ma, met en évidence, à toute échelle (figure 1c), la brutalité du changement pour chaque singularité. L'utilisation des trois graphes (figure 1, a à c) permet de distinguer comme majeurs une dizaine de pics ou discontinuités, notés D M26 à D C3B selon le nom du chrone géomagnétique dans lequel elles se situent.

La stabilité de la solution ne dépend pas (dans l'échelle des chronos) de la séquence utilisée, comme on le vérifie en utilisant la séquence de Wei (1995), dont le calage peut différer jusqu'à 1,37 Ma de celui de Cande et Kent (1995). On vérifie que la méthode employée par les auteurs n'est pas susceptible d'introduire de fausses ruptures, procédant au contraire par lissage. La partie de la séquence antérieure au superchrone, fondée sur un plus petit nombre d'observations, a sans doute une moins bonne précision et nous mettons l'accent, par un grisé, sur les deux groupes de pics qui sont les constituants majeurs de cette partie du signal. Les ruptures ne sont pas périodiques ; ce résultat est en accord avec l'étude récente de Gallet et Courtillot (1995).

La méthode permet aussi de caractériser le type des singularités par la pente des fonctions d'arête associées au graphe b (Alexandrescu et al., 1995). Cette pente est stable pour les dilatations supérieures à 2^4 (6 Ma) et vaut $0,73 \pm 0,08$. On vérifie que des fonctions de la forme $k(t - t_0)^{0,73}$ rendent en effet compte de l'évolution du signal de part et d'autre des singularités (figure 2). En revanche, cette forme type ne rend pas compte des transitions vers le superchrone, ce qui exclut celui-ci du régime général.

Corrélation avec l'histoire tectonique des plaques

L'histoire des plaques a pour caractère majeur l'opposition entre longues périodes d'évolution progressive et réorganisations brutales. On identifie ces réorganisations d'après l'histoire des dorsales océaniques, parce qu'elle est plus précisément établie que celle des subductions et parce qu'elle peut être considérée comme un enregistrement passif des changements de régime dont la cause est cherchée dans le phénomène de subduction. Pour définir les changements majeurs, ceux qui se distinguent sans ambiguïté du bruit, nous retenons les formations ou abandons de dorsales ayant une longueur supérieure à 2 000 km. De tels événements ont été en général accompagnés de changements de direction sur d'autres dorsales, dans le même océan ou dans un autre, ce qui souligne leur caractère global. Ils sont quelquefois datés d'un chrone précis de l'échelle géomagnétique (chrones 18 et 24), ou plus souvent post-datés, simplement par la plus vieille anomalie associée à une nouvelle dorsale ; nous prenons le chrone correspondant comme le plus ancien témoignage du nouveau régime. Le catalogue des réorganisations s'établit alors comme suit (figure 1, à droite) :

- **A** : la formation, post-datée par M22 (Ségoufin, 1981), de la dorsale Somalie-Mozambique qui a séparé sur 8 000 km le Gondwana en deux ; on peut ajouter, avec réserve parce qu'il n'en est préservé qu'environ 1 000 km, la formation (pré-M25) de la dorsale d'Argo au nord de l'Australie (Fullerton et al., 1989) ; ce second événement sera classé majeur sans réserve, si la plus vieille anomalie identifiée (M25) pour la frontière Pacifique-Phoenix (Cande et al., 1978) se révèle dater l'initiation de cette frontière ; les deux anomalies post-datant ces deux événements sont synchrones (figure 1) des discontinuités géomagnétiques D M22 et D M26 ;
- **B** : la formation (pré-M12 et pré-M10) des dorsales de l'Atlantique sud (Nürnberg et Muller, 1991) et de Wharton (Powell et al., 1988) qui ont séparé le Gondwana en quatre ; les deux anomalies qui post-datent ces deux événements sont synchrones à moins de 5 Ma des discontinuités géomagnétiques D M10 et D M6 ;
- **C** : le remplacement de la frontière Pacifique-Izanagi par la frontière Pacifique-Kula (Mammerickx et Sharman, 1988) ; cet événement est mal daté parce qu'il a eu lieu pendant le superchrone, sans les repères que fournissent les anomalies magnétiques ; il ne lui est associé aucune discontinuité géomagnétique ; il apparaît pourtant aussi important que les autres réorganisations ; nous reviendrons sur ce contre-exemple ;
- **D** : l'abandon de la dorsale proto-Caraïbe (Klitgord et Schouten, 1986 ; Pindell et al., 1988 ; Ross et Scotese, 1988), la formation des dorsales de l'Atlantique nord (Srivastava et Tapscott, 1986 ; Rowley et Lottes, 1988) et de la mer de Tasmanie (Weissel et al., 1977) ; cette réorganisation est post-datée par l'anomalie C33n qui est synchrone, à 5 Ma près, de la discontinuité géomagnétique D C32 ;

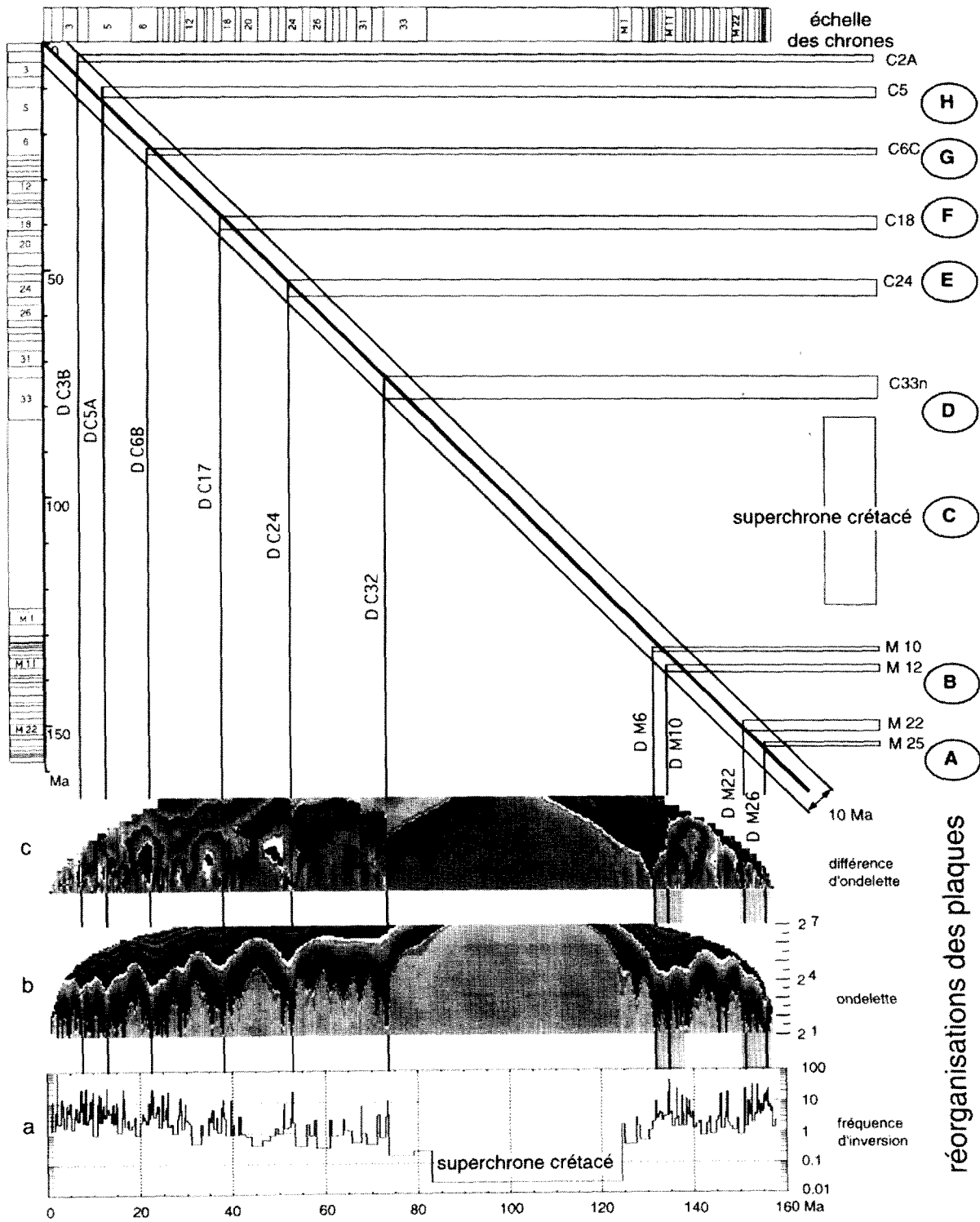


Figure 1. Corrélation entre les réorganisations majeures des plaques depuis 160 Ma et les singularités majeures dans la séquence d'inversions magnétiques.

Correlation between major plate reorganizations since 160 Ma and major singularities in the magnetic reversal series.

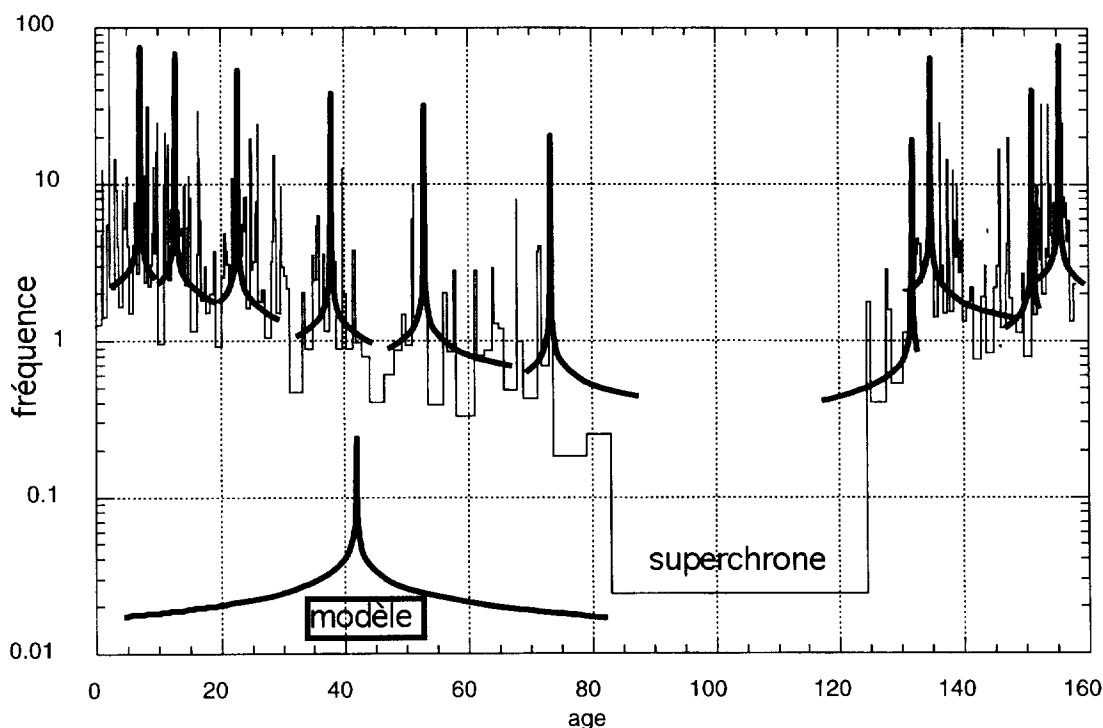


Figure 2. Modèle en loi puissance appliqué à la fréquence d'inversion autour des singularités majeures.

Power law model applied to reversal frequency around major singularities.

– **E** : la formation de la dorsale Norvège-Nansen qui s'étend de l'Atlantique nord à l'Arctique (Srivastava et Tapscott, 1986 ; Rowley et Lottes, 1988) et l'abandon de celle de la mer de Tasmanie (Weissel et al., 1977) ; leur est associée dans le Pacifique la cassure de la plaque Farallon qui a créé la plaque de Vancouver (Rosa et Molnar, 1988 ; Atwater, 1989) ; cette réorganisation est datée de l'anomalie C24 qui est synchrone à moins de 4 Ma de la discontinuité géomagnétique D C24 ;

– **F** : l'abandon des dorsales Pacifique-Kula (Lonsdale, 1988) et de Wharton (Patriat et Ségoufin, 1988), cette dernière étant remplacée dans l'océan Indien par la dorsale Australie-Antarctique ; cette réorganisation est datée de l'anomalie C18 qui est synchrone, à moins de 4 Ma, de la discontinuité géomagnétique D C17 ;

– **G** : la formation de la dorsale Galapagos divisant l'ancienne plaque Farallon en Cocos et Nazca (Hey, 1977) ; cette réorganisation est post-datée par l'anomalie C6C qui est synchrone, à 2 Ma près, de la discontinuité géomagnétique D C6B ;

– **H** : la formation de la dorsale golfe d'Aden-mer Rouge (Cochran, 1981) ; cette réorganisation est post-datée par l'anomalie C5 qui est synchrone, à 2 Ma près, de la discontinuité géomagnétique D C5A.

On peut ajouter à ce catalogue la formation de la dorsale du golfe de Californie (Atwater, 1989), mais avec réserve, parce que l'événement est trop jeune pour vérifier s'il s'agit d'un écart temporaire ou de l'initiation d'un nouveau régime ; il est post-daté par l'anomalie C2A, qui est synchrone, à moins de 5 Ma près, de la discontinuité

géomagnétique D C3B. D'autres corrélations possibles (C10, M20 par exemple) ne sont pas retenues, parce que s'extrayant mal du bruit.

La correspondance temporelle entre les réorganisations majeures des plaques et les singularités majeures de l'histoire magnétique est remarquable, même si l'on ne retient pour la partie ancienne, moins fiable, que les deux bandes grisées de la figure 1. L'absence de discontinuité correspondant à la réorganisation C (Pacifique-Kula remplaçant Pacifique-Izanagi) en est d'autant plus frappante. La correspondance est donc claire, mais non systématique.

Discussion et conclusion

Les connaissances actuelles sur le magnétisme terrestre suggèrent fortement que les changements sur l'interface noyau-manteau induisent les changements du rythme d'inversion (Loper, 1992). S'agissant du couplage entre le noyau et les enveloppes sus-jacentes, c'est le plus important de ces changements, le superchrone créacé, qui a attiré l'attention. Certains auteurs ont proposé de l'associer à un départ de panache depuis l'interface, mais l'identification du panache concerné pose problème (Courtilot et Besse, 1987 ; Larson et Olson, 1991 ; Anderson, 1994). D'autres ont récemment proposé d'y voir l'arrivée d'une avalanche mantellique, mais cette avalanche n'est pas identifiable indépendamment (Gallet et Hulot, 1997). Ici, nous retrouvons la relation proposée par Vogt (1975) entre réorganisations des plaques et événements géomagné-

ques, sur une base plus large et plus précise d'événements identifiés indépendamment et quasi synchrones. Nous avons donné les écarts en Ma à l'exact synchronisme, mais c'est dans l'échelle des chronos que les événements des deux types sont calibrés. Les écarts sont donc réels quoique petits, montrant un retard moyen de $3,12 \pm 1,7$ Ma du signal magnétique pour les six données centrales, retard contredit par les bords, qui sont moins fiables. Nous n'avons aucune raison de penser que l'un des phénomènes soit la cause de l'autre. Nous devons les considérer comme deux effets d'une même cause, quasi synchrones parce qu'ayant des temps de réponse similaires. L'absence de périodicité permet d'écarter l'hypothèse d'une corrélation biaisée entre événements nettement distincts dans le temps, mais qui apparaîtraient en synchronisme par décalage de phase. Le quasi-synchronisme interdit d'interpréter la corrélation par un signal thermique qui serait transmis à travers le manteau à la vitesse, bien trop lente, de la convection mantellique. Nous proposons donc un couplage mécanique.

On admet que la dérive des plaques est essentiellement contrôlée par la traction de subduction, phénomène susceptible de changements brutaux, tant à cause de l'hétérogénéité du matériel composant les plaques que par effet de seuil. Cela rend compte du caractère discontinu des réorganisations de dorsales. D'un autre côté, la circulation des plaques modifie la distribution des hétérogénéités latérales de masse au toit et au sein du manteau supérieur, et probablement dans tout le manteau, puisque des zones sismiquement rapides paraissent prolonger, dans le manteau inférieur, la ceinture de subduction péri-Pacifique (Grand et al., 1977). Cette modification de la distribution des masses, dont la vitesse est liée à celle des plaques et qui peut évoluer rapidement lors des réorganisations, en-

traîne des changements de forme de la surface de changement de densité sous-jacente entre manteau solide et noyau liquide. Ce changement de topographie, qui d'ailleurs modifie les hétérogénéités de température et de conductivité à l'interface noyau-manteau, change les conditions aux limites pour la géodynamo et peut donc rendre compte des crises observées dans la séquence des inversions.

Le temps de réponse au phénomène moteur commun, un changement du régime de subduction, est lié à la viscosité du manteau supérieur pour la réorganisation des dorsales, à celle du manteau inférieur pour le changement de forme de l'interface manteau-noyau. La plus grande viscosité du manteau inférieur rend compte du sens du retard observé. Alors, le superchrone créacé correspondrait à une forme imposant une stabilité exceptionnelle, d'où l'absence de signal géomagnétique correspondant à la réorganisation C, Pacifique-Izanagi-Pacifique-Kula. Il a déjà été noté (Ricou, 1995) une correspondance dans le long terme entre les superchrones permio-carbonifère et créacé et deux réorganisations exceptionnelles des plaques. En associant une stabilité géomagnétique exceptionnelle à une configuration des plaques exceptionnelle, cela reste dans la logique de la corrélation observée pour le régime général.

En conclusion, l'analyse en ondelettes identifie de brusques changements de rythme dans la fréquence d'inversion. On observe qu'ils sont associés de façon claire mais non systématique, l'époque du superchrone créacé faisant exception au régime général, aux réorganisations des plaques. L'explication proposée est d'ordre tectonique, faisant appel aux changements de forme au toit du noyau liquide.

ABRIDGED VERSION

Shortly after the discovery of plate tectonics, Vogt (1975) proposed a coupling between the upper mantle and the core on the basis of features in their histories corresponding. Benefiting from a now wider and more precise set of data, we intend to show that such a coupling actually exists, through focusing on the events that clearly stand out from noise level in the plate and geomagnetic histories.

We use the reversal time scale of Hardland et al. (1990), modified after Cande and Kent (1995) for the times after the Cretaceous superchron. It covers the last 158 Ma and comprises 284 reversals. The reversal frequency curve (a, figure 1) suggests that abrupt changes correspond to high frequency peaks. Wavelet analysis is particularly adapted to disclose such singularities (Meyer, 1990) and to illustrate their respective weights with respect to the general evolution. This evolution is considered in a cumulative form, whose derivate is the reversal frequency. The applied wavelet is the first derivate of a Gaussian. The obtained graph (figure 1b) confirms that singularities correspond to high frequency peaks and selects the

major singularities as persisting when the dilatation is increased, here from 2^1 to 2^7 , whereas low dilatations remain sensitive to noise. The abruptness of the associated changes is portrayed as finite differences in Haar wavelet coefficients (figure 1c). Figures 1a–c disclose about ten outstanding discontinuities (D M26–D C3B) that punctuate the general evolution. The way the sequence was obtained cannot have created artificial breaks, since their authors followed on the contrary a smoothing approach. Being less confident in the precision of the old part we outline in grey the corresponding two groups of breaks. The breaks are not distributed periodically, a result in agreement with the recent study of Gallet and Courtillot (1995). We positively checked the stability of our results using an alternate reversal scale (Wei, 1995).

The method also discloses the type of the singularities, using the slopes of the ridge functions associated with figure 1b (Alexandrescu et al., 1995). They are stable at dilatations over 2^4 (6 Ma) and amount to 0.73 ± 0.08 . Indeed, expressions of the form $k(t - t_0)^{0.73}$ depict correctly the mean evolution be-

tween singularities (figure 2). The test excludes the superchron from the general rule.

We derive the list of the plate reorganisations from the history of the ocean spreading ridges, not only because it is better known than the history of subduction, but also because spreading is considered as a passive record of changes in plate dynamics, which is mostly governed by slab pull. Formation and abandon of spreading ridges in excess of 2 000 km are thus considered as a record of the major discontinuities in plate tectonic history. Some of them are dated at a precise magnetic chron (chrons 18 and 24). More frequently they are simply post-dated by the oldest anomaly formed at a new ridge, which we consider as the oldest evidence for the new organisation. The list is thus established as follows (figure 1).

- A: The formation, post-dated by M22, of the Somali–Mozambique spreading ridge (Ségoufin, 1981). We may add the formation, post-dated by M25, of the Argo ridge off Australia (Fullerton et al., 1989), but its testimonies are preserved over 1 000 km only, which leads us to question the importance of the event. It will anyhow be considered important if M25, the oldest identified anomaly at the Pacific–Phoenix boundary (Cande et al., 1978), corresponds to the formation of this boundary. The two events correspond to the magnetic discontinuities D M22 and D M26.
- B: The formation of the south-Atlantic (Nürnberg and Muller, 1991) and Wharton (Powell et al., 1988) spreading ridges, post-dated respectively by M12 and M10. The two events correspond to the magnetic discontinuities D M10 and D M6.
- C: The demise of the Pacific–Izanagi and formation of the Pacific–Kula spreading ridges (Mammerickx and Sharman, 1988). The event is poorly dated as it occurred during the Cretaceous superchron and there is an associated lack of ocean magnetic lineation. Noteworthy it has no correspondent in the magnetic discontinuities.
- D: The demise of the proto-Caribbean (Klitgord and Schouten, 1986; Pindell et al., 1988; Ross and Scotese, 1988) and formation of the north-Atlantic (Srivastava and Tapscott, 1986; Rowley and Lottes, 1988) and of the Tasman sea (Weissel et al., 1977) spreading ridges. This event is post-dated by anomaly C33n and corresponds to the magnetic discontinuity D C32.
- E: The demise of the Tasman sea (Weissel et al., 1977) and formation of the Norway–Nansen ridges (Srivastava and Tapscott, 1986; Rowley and Lottes, 1988); in addition, the Vancouver plate became distinct from the Farallon plate (Rosa and Molnar, 1988; Atwater, 1989). This event is dated at chron C24 and corresponds to the magnetic discontinuity D C24.
- F: The demise of the Pacific–Kula (Lonsdale, 1988) and Wharton (Patriat and Ségoufin, 1988) spreading ridges, the later being replaced by the Australia–Antarctic ridge. This event is dated at chron C18 and corresponds to the magnetic discontinuity D C17.

– G: The formation of the Galapagos spreading ridge that separated Farallon into Nazca and Cocos (Hey, 1977). This event is post-dated by the magnetic anomaly C6C and corresponds to the magnetic discontinuity D C6B.

– H: The formation of the Aden gulf–Red sea ridge (Cochran, 1981). This event is post-dated by the magnetic anomaly C5 and corresponds to the magnetic discontinuity D C5A.

We may add to the list the formation of the California gulf spreading ridge (Atwater, 1989), but the event is too recent to decide whether it really corresponds to a new organisation or to a temporary change. It is post-dated by the magnetic anomaly C2A and corresponds to the magnetic discontinuity D C3B.

The correspondence between the major events in the reversal history and the major plate reorganisations is clear. It makes all the more striking the lack of correspondence for the Pacific–Izanagi to Pacific–Kula reorganisation (C, figure 1). The correlation is clear but not systematic. There is a quasi-synchronism, with a delay of the magnetic event that amounts to 3.12 ± 1.7 Ma for the part of the analysis that is free from border effect. Having no reason to consider that changes in spreading and changes in magnetic reversal rhythm could be responsible for each other, we consider them to be two effects of a common cause, the quasi-synchronism being due to similar answer times. Quasi-synchronism also hinders the consideration of a thermal signal that should be transmitted across the mantle by the, far too slow, mantle convection.

Reorganisations of plate boundaries modify the distribution of lateral mass heterogeneities at the roof and within the upper mantle. Being a density boundary, the liquid core–solid mantle interface will have its topography altered to equilibrate the changing load distribution. Our knowledge of the dynamo process 'strongly suggests' that changes in reversal frequency are induced by variations at the core–mantle boundary (Loper, 1992). We consequently propose changes in the outer form of the core as the coupling process between plate reorganisations and discontinuities in the magnetic reversal sequence. The Cretaceous superchron would correspond to a peculiarly stable form, allowing an outstanding geomagnetic stability. At the long-term scale, it has already been noted (Ricou, 1995) that the Permo–Carboniferous and Cretaceous superchrons correspond to plate reorganisations with an outstanding character. It matches an exceptional geomagnetic behaviour with an exceptional plate behaviour.

To conclude, the wavelet analysis leads to identification of abrupt changes in the magnetic reversal sequence and results in outlining their clear but not systematic correlation with the major reorganisations in plate tectonics. We propose a tectonic explanation that is based on changes in the form of the outer core.

Remerciements : Les auteurs remercient J.-L. Le Mouél, V. Courfillot, J. Besse et Y. Gallet pour de fructueuses discussions. Contribution IGP N° 1501.

RÉFÉRENCES

- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouél J.-L. et Saracco G. 1995. Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis, *J. Geophys. Res. B*, 100, (B7), 12557-12572
- Anderson D.L. 1994. Superplumes or supercontinents, *Geology*, 22, 39-42
- Atwater T. 1989. Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America, In: *The Geology of North America*, vol. N, *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*, Winterer E.L., Hussong D.M. et Decker R.W. (eds), the Geological Society of America, 21-72
- Cande S.C. et Kent D.V. 1992. A new geomagnetic polarity time scale, *J. Geophys. Res. B*, 94 (B10), 13,817-13,951
- Cande S.C. et Kent D.V. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic, *J. Geophys. Res. B*, 100 (B4), 6093-6095
- Cande S.C., Larson R.L. et Labrecque J.L. 1978. Magnetic lineations in the Pacific Jurassic quiet zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 41, 434-440
- Cochran J.R. 1981. The Gulf of Aden: structure and evolution of a young ocean basin and continental margin, *J. Geophys. Res. B*, 86 (1), 263-287
- Courillot V. et Besse J. 1987. Magnetic field reversals, polar wander, and core-mantle coupling, *Science*, 237, 1140-1147
- Fullerton L.G., Sager W.W. et Handschumacher D.W., 1989. Late Jurassic-Early Cretaceous evolution of the eastern Indian Ocean adjacent to Northwest Australia, *J. Geophys. Res.*, 90, 2937-2953
- Gallet Y. et Courillot V. 1995. Geomagnetic reversal behaviour since 100 Ma, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 92, 235-244
- Gallet Y. et Hulot G. 1997. Stationary and non stationary behaviour in the geomagnetic polarity time scale, *Geophys. Res. Lett.*, 24 (15), 1875-1878
- Grand S.P., van der Hilst R.V. et Widiyandoro S. 1977. Global seismic tomography: a snapshot of convection in the Earth, *GSA Today*, 7 (4), 1-7
- Harland W.B., Armstrong R., Cox A., Craig L., Smith A. et Smith D. 1990. *A geologic time scale*, Cambridge University Press, Cambridge, 263 p.
- Hey R.N. 1977. Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 1404-1420
- Klitgord K.D. et Schouten H. 1986. Plate kinematics of the Central Atlantic. In: *The Geology of North America*, Vogt P.R. et Tucholke B.E. (eds), Geological Society of America, 351-377
- Larson R.L. et Olson P. 1991. Mantle plumes control magnetic reversal frequency, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 107, 437-447
- Lonsdale P. 1988. Paleogene history of the Kula plate. Offshore evidence and onshore implications, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 733-754
- Loper D.E. 1992. On the correlation between mantle plume flux and the frequency of reversals of the geomagnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, 19 (1), 25-28
- Mammerickx J. et Sharman G.F. 1988. Tectonic evolution of the North Pacific during the Cretaceous quiet period, *J. Geophys. Res. B*, 93 (B4), 3009-3024
- Meyer Y., 1990. *Ondelettes*, Hermann, Paris, 215 p.
- Nürnberg D. et Muller R.D. 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present, *Tectonophysics*, 191, 27-33
- Patriat P. et Ségoufin J. 1988. Reconstruction of the Central Indian Ocean., *Tectonophysics*, 155, 211-234
- Pindell J.L., Cande S.C., Pittman III, W.C., Rowley D.B., Dewey J.F., Labreque J. et Haxby W. 1988. A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution, *Tectonophysics*, 155, 121-138
- Powell C.M., Roots S.R. et Veevers J.J. 1988. Pre-breakup continental extension in East Gondwanaland and the early opening of the eastern Indian ocean, *Tectonophysics*, 155, 261-283
- Ricou L.E. 1995. Tethys and Transit plate patterns viewed against long-term periodicity of magnetic field reversals, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 87, 255-265
- Rosa J.W.C. et Molnar P. 1988. Uncertainties in reconstructions of the Pacific, Farallon, Vancouver, and Kula Plates and constraints on the rigidity of the Pacific and Farallon (and Vancouver) Plates between 72 and 35 Ma, *J. Geophys. Res. B*, 93 (B4), 2997-3008
- Ross M.I. et Scotese C.R. 1988. A hierarchical model of the Gulf of Mexico and Caribbean region, *Tectonophysics*, 155, 139-168
- Rowley D.B. et Lottes A.L. 1988. Plate-kinematic reconstructions of the North Atlantic and Arctic: Late Jurassic to Present, *Tectonophysics*, 155, 73-120
- Ségoufin J. 1981. Morphologie et structure du canal de Mozambique, Thèse, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 236 p.
- Srivastava S.P. et Tapscott C.R. 1986. Plate kinematics of the North Atlantic, In: *The Geology of North America*, Vogt P.R. et Tucholke B.E. (eds), Geological Society of America, 385-404
- Vogt P.R. 1975. Changes in geomagnetic reversal frequency at times of tectonic change: evidence for coupling between core and upper mantle processes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 25, 313-321
- Wei W. 1995. Revised age calibration points for the geomagnetic polarity time scale, *Geophys. Res. Lett.*, 22 (8), 957-960
- Weissel J.K., Hayes D.E. et Herron E.M. 1977. Plate tectonic synthesis: the displacements between Australia, New Zealand and Antarctica since the Late Cretaceous, *Marine Geol.*, 25, 231-277