

Présentation au colloque:

"EVENEMENTS RAPIDES, INSTABILITES, CHANGEMENTS CULTURELS AU QUATERNAIRE"

Aix-en-Provence

**“ Evolution morphologique et culturelle humaine :
l’apport des modèles fractals ”**

par

Pierre Grou, Laurent Nottale et Jean Chaline

*Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, 47 Bd. Vauban, 78280 Guyancourt, France

**Laboratoire Univers et Théories, CNRS, Observatoire de Paris, Section de Meudon, 5 Place J. Janssen, 92195 Meudon Cedex, France

***Laboratoires de Biogéosciences (UMR CNRS 5561) et Paléobiodiversité et préhistoire de l'EPHE, Université de Bourgogne, Centre des Sciences de la Terre, 6 Bd. Gabriel, 21000 Dijon, France.

Résumé : Les événements rapides, les instabilités et les changements culturels au Quaternaire sont très nombreux (climat, évolution des espèces et des sociétés). L'utilisation de lois non-linéaires de type fractal se révèle tout à fait adaptée à leur étude. Un comportement log-périodique descriptible par des dimensions fractales complexes s'applique non seulement aux phénomènes inorganiques (tremblements de terre, krachs boursiers, etc...), mais aussi aux phénomènes organiques comme l'évolution biologique (chronologie des sauts évolutifs majeurs des rongeurs, dinosaures, primates, équidés, échinodermes). Nous appliquons cette approche à l'analyse des séquences temporelles des crises économiques des sociétés occidentales et précolombiennes. Les premiers tests effectués renforcent l'universalité du modèle log-périodique dans la description des phénomènes d'évolution temporelle critique et suggère l'existence de lois plus profondes.

Abstract : Rapid events, instabilities and cultural changes are numerous during the Quaternary (climates, species evolution, socio-economic systems). Non-linear laws of fractal type are well adapted to their analyze. A log-periodic behavior described by complex fractal dimensions can be applied to inorganic phenomena (earthquakes, stock market crashes), but also to organic phenomena such as biological evolution (chronology of major evolutionary leaps of rodents, dinosaurs, equids, primates, echinoderms). We apply this type of model to the acceleration observed in the economic crisis / no-crisis pattern in Western and pre-Columbian civilizations. The first tests reinforce the universality of the log-periodic model in the description of critical temporal evolutionary phenomena and suggest the existence of vaster underlying laws.

1. Introduction

Les systèmes qui évoluent présentent deux types de modalités, une évolution de type continu ou graduelle et une évolution discontinue ou par saut discret (ponctuelle). Ce débat entre le continu et le discontinu remonte au XIXe siècle a fait l'objet de nombreux travaux. L'un des plus récents débats a concerné l'évolution des espèces avec la fameuse controverse du punctualisme *versus* le gradualisme phylétique (Gould et Eldredge, 1977 ; Chaline, 1983). En fait comme l'a montré l'un d'entre nous (Chaline, 1993), ces deux aspects de l'évolution co-existent dans ces systèmes évolutifs, mais ils interviennent à des moments distincts et à des échelles souvent

différentes. C'est ce qui a entraîné des confusions. Tous les phénomènes qui ont été étudiés sont exclusivement descriptifs et empiriques et aucune théorie explicative n'a encore été proposée.

Depuis les années quatre-vingt on a commencé à prendre en compte un certain nombre de phénomènes physiques, comme les tremblements de terre, qui ne répondent pas aux lois de structuration linéaire de la physique classique, mais procèdent de lois particulières dites "de puissance". On regroupe ces phénomènes sous le titre de "dynamique non-linéaire" qui exprime l'existence de structurations particulières dites "fractales", une découverte de B. Mandelbrot (1975).

Plusieurs chercheurs de l'Institut de Physique du Globe ont montré que des structurations fractales existaient dans de nombreux phénomènes des sciences de la Terre. Ces phénomènes : tremblements de terre (Allègre et al., 1982, Sornette et Sammis, 1995), éruptions volcaniques, répartition des fissures des roches et des failles, etc... (Dubois, 1995) impliquent des lois de puissance dans leur description.

J. Dubois de l'I.P.G. a proposé à J. Chaline de tester sur les données de la radiation quaternaire (s.l.) des rongeurs campagnols (Arvicolidae, Rodentia) l'existence possible de telles structures. Alors que les tests d'une évolution, strictement liée au hasard bénin (courbes de survie et hypothèse de la reine rouge, distribution de Poisson) ne rendaient absolument pas compte de la répartition des apparitions et extinctions d'espèces par bouquets, ces données se répartissaient de façon cohérente en utilisant des lois de puissance dans un diagramme log-log (Dubois et al., 1992). Le modèle utilisé alors était le système triadique de Cantor. La conclusion était claire : les apparitions et les extinctions d'espèces de campagnols au Quaternaire ne se font pas uniquement au hasard bénin, mais suivent des lois plus complexes du type des lois de Lévy du hasard sauvage, avec des sauts majeurs qui relèvent de structurations fractales. De nombreux exemples ont été présentés depuis sur divers aspects de l'évolution des espèces qui ont confirmé l'existence de telles structures (Bradbury and Reichelt, 1983 ; Basillais, 1997, 1998 ; Minelli et al., 1991 ; Plotnick & MacKinney, 1993 ; Newman, 1996 ; Patterson & Fowler, 1996 ; Benton, 1997 ; Solé et al., 1997).

La constitution du groupe de travail de P. Grou, L. Nottale et J. Chaline en 1995 allait permettre d'aller plus loin dans l'analyse de ces phénomènes. J. Chaline proposait à L. Nottale de rechercher si les grands événements de l'histoire des primates, c'est-à-dire l'apparition des grands plans d'organisation "prosimiens, simiens, singes supérieurs, australopithèques et hommes" ne suivaient pas une loi de puissance comme les campagnols. La réponse fut étonnante. L. Nottale montra que la répartition des événements eux-mêmes (pas seulement leur distribution statistique) pouvait être ajustées, avec une haute signification statistique, par une loi d'accélération log-périodique caractérisée par une époque critique de convergence T_C qui dépend de la lignée considérée (Chaline et al., 1999). L'existence d'une telle loi d'accélération évolutive avait été pressentie par Meyer (1947, 1954) et Cailleux (1971), mais sous une forme purement descriptive trop simplifiée qui ne prenait pas en compte les temps critiques, ni l'analyse de leur variabilité statistique, ni l'existence de décélérations.

En se basant sur les données publiées par différents auteurs sur l'ensemble de la radiation des rongeurs (Hartenberger, 1988), celle des dinosaures (Wilson et Sereno, 1998 ; Sereno, 1999), des équidés fossiles d'Amérique du Nord (Devillers, inédit) et des échinodermes (David et Mooi, 1999), des tests ont confirmé l'existence de cette loi de structuration (Nottale et al., 2001).

Dans un premier article, nous avons insisté sur le caractère arborescent de l'arbre de la vie, qui nous a mené à privilégier une interprétation des lois log-périodiques obtenues en termes de structures fractales auto-

similaires. Mais nous concluons en précisant que "l'arbre de la vie dans tous ses détails pourrait se révéler plus complexe qu'un arbre végétal".

En effet, le modèle physique sous-jacent à l'apparition de telles lois est celui des phénomènes critiques. Un comportement log-périodique, descriptible par des dimensions fractales complexes, a été initialement découvert (Nauenberg, 1975; Jona-Lasinio, 1975) comme correction aux lois de puissance dans les solutions des équations du groupe de renormalisation appliquées à la physique statistique des transitions de phase critiques (Wilson, 1971). On peut également montrer qu'un tel comportement est solution d'équations "covariantes d'échelle" (Nottale, 1997). Une telle approche a été appliquée d'une part à des structures spatiales biologiques (voir par exemple Schlesinger et West, 1991 sur la structure bronchique des mammifères). Elle a également été appliquée, comme nous l'avons déjà dit, à des phénomènes d'évolution temporelle des sciences de la terre (tremblements de terre : Sornette et Sammis, 1995), mais aussi à des phénomènes financiers comme les krachs boursiers (Sornette et al., 1996 ; voir sur ce sujet l'article de revue Sornette, 1998).

Or le comportement critique, qu'il s'agisse de loi de puissance ou de fluctuations log-périodiques autour de cette loi, est a priori symétrique autour de la valeur critique de la température (du temps dans le cas d'un phénomène d'évolution temporelle) car il ne dépend que de la valeur absolue de l'écart à cette valeur critique. On s'attend donc à observer aussi bien des accélérations log-périodiques vers l'époque critique ("précurseurs") que des décélérations à partir d'elle ("répliques"). L'un de nos anciens résultats (Nottale et al., 2000) est précisément la mise en évidence d'une telle décélération pour la lignée des échinodermes, à partir d'une époque critique qui s'identifie à leur date d'apparition.

La même méthode est appliquée ici à l'analyse de l'évolution des sociétés, vue d'un point de vue global sur de grandes échelles de temps. On peut remarquer en effet que cette évolution procède d'une façon similaire à celle dont les principaux groupes animaux se sont succédé et ont dominé la Terre au cours des temps géologiques, par un rythme crises/non crises (Grou, 1987), avec des changements de lieux de domination qui se relaient. Ces déplacements de foyers de domination économique sont à l'origine de bifurcations qui prennent la forme des grandes crises économiques de l'histoire et qui permettent d'assimiler le schéma évolutif des sociétés à un arbre. Nous montrons en effet dans deux cas (sociétés occidentales et précolombiennes) que les séquences temporelles des crises économiques peuvent être décrites par des lois d'accélération log-périodiques avec une haute signification statistique.

2. Méthodologie

Rappelons que la loi d'accélération ou de décélération log-périodique éprouvée ici s'écrit:

$$T_n = T_c + (T_0 - T_c) g^{-n} \quad (1)$$

ou g est le rapport d'échelle entre intervalles de temps successifs et où T_c est l'époque critique de convergence (ou de divergence). Comme c'est une loi à deux paramètres, trois dates (c'est-à-dire deux intervalles de temps) suffisent pour calculer $g = (T_2 - T_1) / (T_3 - T_2)$ et $T_c = (g T_2 - T_1) / (g - 1) = (T_2^2 - T_1 T_3) / (2 T_2 - T_1 - T_3)$, si

bien que le modèle permet une prédictibilité au-delà de trois dates. Ainsi, connaissant g , T_C et une date T_1 , la date suivante attendue $T_2 = [(g - 1) T_C + T_1] / g$ s'en déduit.

L'analyse statistique de l'adéquation entre le modèle log-périodique et les données est effectuée de la manière suivante. On détermine les valeurs de g et T_C à partir des séquences de données observées, par un ajustement numérique (méthode des moindres carrés). On utilise comme estimateur statistique la variable t de Student associée au coefficient de corrélation dans le diagramme [rang n de l'événement, $\log(T_C - T_n)$]. Pour chaque valeur de T_C , on calcule les valeurs de g et de t et on construit la courbe $t(T_C)$. Les valeurs optimisées de g et T_C correspondent alors au pic de cette courbe. Les rangs des événements étant *a priori* classés dans l'ordre chronologique, le niveau de signification statistique associé à une valeur donnée de t n'est pas celui d'une étude de corrélation ordinaire. Des simulations Monte-Carlo ont donc été effectuées pour calibrer cet estimateur en appliquant la même analyse à des dates choisies au hasard et triées par ordre chronologique. Les niveaux de probabilité donnés dans la suite sont déduits de cette méthode (voir tableau 1 et figure 1). On trouve que les seuils de probabilité de 1/1000 (≈ 3 sigma) et de 1/100 (2.3 sigma) correspondent respectivement aux valeurs suivantes du pic de la variable t de Student, suivant le nombre de dates:

n	5	6	7	8	9	10	12	14	16
$t(0.1\%)$	100	50	46	42	37	38	44	50	52
$t(1\%)$	34	28	27	27	26	30	32	37	40

Tableau 1 : Niveaux de probabilité des simulations Monte-Carlo associées à la valeur de la variable t de student.

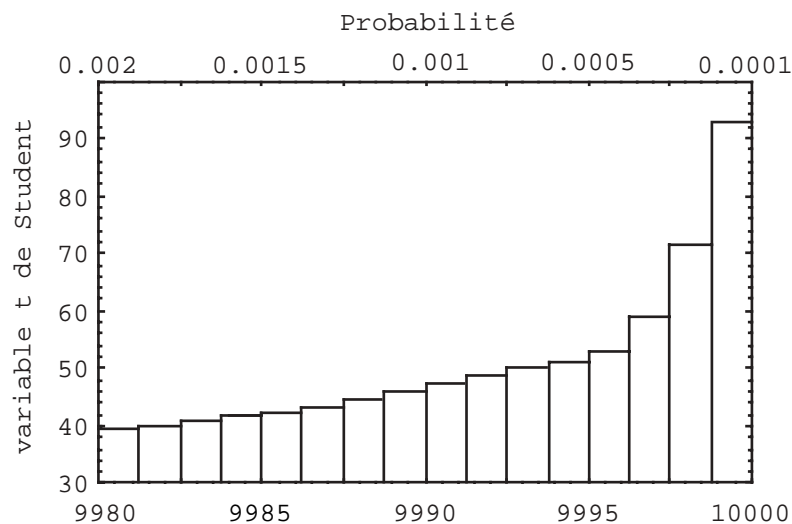


Figure 1. Niveau de probabilité associé à la valeur de la variable t de Student, pour un nombre de dates $n = 7$. Ce diagramme a été établi à l'aide de 10000 simulations "Monte Carlo" dans lesquelles des dates ont été tirées au hasard puis rangées par ordre chronologiques.

Probability level associated to the value of Student's variable, for a number of dates $n=7$. This diagram results from 10000 Monte Carlo simulations in which the dates have been drawn at random then sorted by chronological order.

3. Application à l'évolution des sociétés

3.1. Sociétés occidentales

Nous allons tenter maintenant d'appliquer la même méthode aux grands événements de l'histoire des sociétés humaines. L'existence d'une accélération des événements de l'histoire a déjà été remarquée par de nombreux auteurs. En ce qui concerne le rythme crise - non crise, elle a été discutée en détail par Grou (1987). Nous allons en faire ici une analyse quantitative en éprouvant le modèle d'accélération log-périodique.

Le Tableau 2 donne les dates médianes des grandes périodes de crise économiques de l'histoire (telles que répertoriées par Grou, 1987) en années par rapport à J.C. (colonne 2), suivies (colonne 3) de l'estimation du rapport de base g de la loi (pour la valeur ajustée de $T_c = +2080$) à partir des événements pris deux à deux. On trouve que les valeurs calculées de ce rapport se regroupent autour de deux valeurs, $g \approx 1.3$ dans la plupart des cas et son carré $g \approx 1.7$ dans trois cas. Ce résultat nous conduit à l'attribution des rangs reportés tableau 2 et figure 2. On constate en particulier que depuis l'antiquité (≈ -900) on trouve un rapport quasi-constant, ce qui implique qu'aucun événement ne manque, sauf entre 1400 et 1650.

Le rapport moyen est $\langle g \rangle = 1.32 \pm 0.018$ (à partir de 11 valeurs). L'accord entre la valeur de ce rapport et ceux obtenus dans le cas de l'évolution des espèces (1.32 ou son carré 1.73) est notable.

Crise/pôle économique dominant	date médiane	$g (T, n, n+1)$	$T_c(1, n)$
1 Néolithique	- 6500		
3 Egypte	- 3000	1.69	1780
5 Egypte	- 900	1.70	1900
6 Grèce	- 100	1.36	2070
7 Rome	+ 400	1.29	2044
8 Byzance	+ 800	1.31	2051
9 Expansion arabe	+1100	1.30	2050
10 Europe sud	+1400	1.44	2129
12 Hollande	+1650	1.58	2068
13 G-B	+1775	1.38	2093
14 G-B	+1830	1.22	2066
15 G-B	+1885	1.28	2068
16 G-B	+1935	1.30	2075
17 E-U	+1975	1.32	2080

Tableau 2. Dates médianes des grandes crises économiques (deuxième colonne), d'après Grou (1987). La première colonne identifie le pôle économique dominant à l'époque, soumis à la crise considérée. La troisième colonne donne le rapport g calculé à partir de deux événements contigus et de l'époque critique T_c , choisie égale à sa valeur optimisée, $T_c = 2080$. La quatrième colonne donne la valeur de l'époque critique calculée à partir des époques 1 (Néolithique) et n .

En ce qui concerne l'événement manquant, il ne serait pas inattendu que la crise de la fin du Moyen-Age, par son ampleur, ait en partie affecté localement la loi. En effet les rapports g pour des événements qui se suivent fluctuent beaucoup autour de cette époque : $g(19,20)=1.44$, $g(20,22)=1.26$, mais ils retrouvent leur stabilité sur une plus longue échelle : $g(19,22)=g(20,23)=1.32$.

On peut également estimer la valeur de l'époque critique une fois ce rapport fixé à partir des couples de rang (m, n) . En colonne 4 sont reportées les valeurs obtenues en prenant comme événement de base le néolithique (-6500). La valeur de l'époque critique se révèle stable depuis ≈ 2000 ans (avec une incertitude diminuant au cours du temps et une convergence finale vers $T_c = 2075 \pm 5$ à partir des 6 derniers événements).

Le résultat est visualisé figure 2. La même prédictibilité que pour l'évolution des espèces se rencontre ici, mais dans ce cas sur des échelles de temps plus courtes qui permettent d'envisager sa vérification directe. Les dates prévues pour les pics des crises suivantes (points blancs figure 2) sont : 1995-2000, 2015-2020, 2030-2035..., etc..., et pour l'époque critique, $T_c = 2080 \pm 30$.

Il convient néanmoins de remarquer que les points de crise récentes (1975, 2000) ne sont pas séparés et semblent déjà correspondre à un même processus. Ce constat pourrait signifier qu'une simultanéité crise - non crise (phénomène de, concomitance et d'apparition de dimensions nouvelles, voir Grou 1987) serait déjà en train de se manifester.

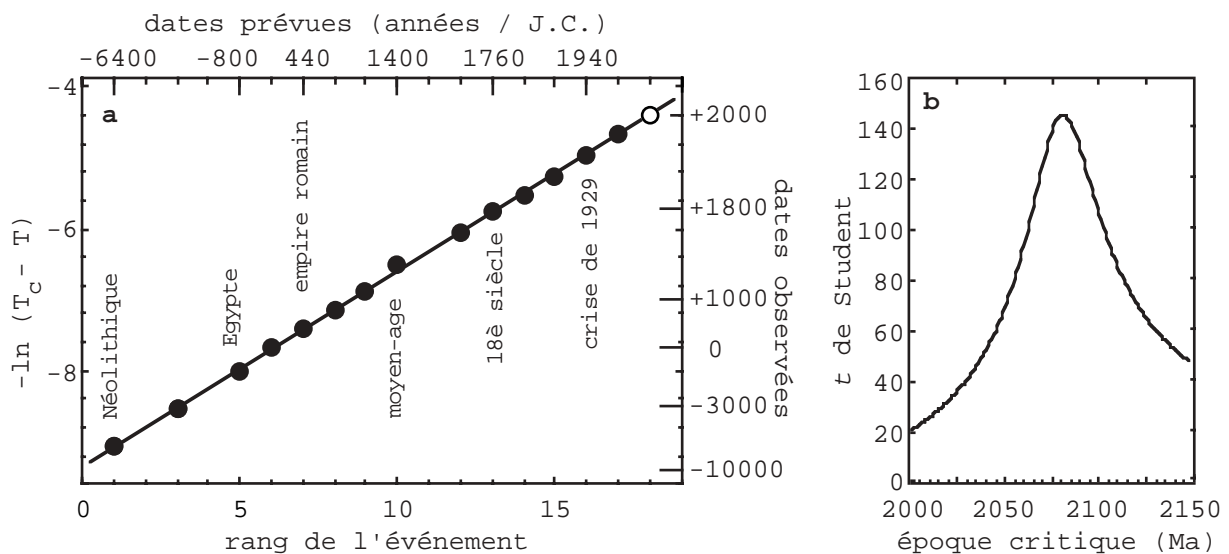


Figure 2. Comparaison des dates médianes des grandes crises économiques de l'histoire à une loi log-périodique de $T_c = 2080$ et $g = 1.32$ (figure a). La nature de quelques-uns des événements a été reportée pour fixer les idées (voir Tableau 2 pour la liste complète). Le dernier point blanc, prédit à partir des précédents, correspond à l'époque actuelle (≈ 2000), la crise suivante étant prédite en 2015-2020. La figure b montre la détermination de l'époque critique à l'aide de l'optimisation de la variable t de Student. Ce résultat est statistiquement significatif (la probabilité est $P < 10^{-4}$ d'obtenir un pic aussi haut par hasard).

Comparison of the median dates of the main economic crises of history with a log-periodic law characterized by $T_c = 2080$ and $g = 1.32$ (figure a). The identification of some of the events have been given in order to be more specific (see Table 2 for the complete list). The last (white) point, which is predicted from the previous ones, corresponds to the present epoch (≈ 2000), while the following crisis is predicted to occur in 2015-2020. Figure b exemplifies the determination of the critical date from the optimization of Student's t

variable. This result is statistically highly significant (the probability to obtain so high a peak by chance is $P < 10^{-4}$).

On peut donc considérer, si l'on admet la validité de la loi, que nous sommes dès maintenant entrés dans la phase finale critique (figure 2). D'une part la date de 2080 ± 30 n'est qu'une date butoir théorique, le vrai pic de crise devant se produire forcément avant en raison des effets de seuil. D'autre part, cette "super-crise" correspond à une autre échelle de temps que celle des crises individuelles qui la définissent, et ne doit donc pas être considérée comme une époque précise, car elle n'est en fait rien d'autre que le processus d'accélération des crises lui-même dont nous voyons d'ores et déjà les effets actuellement. Il faut également rappeler, pour éviter toute fausse interprétation, que l'époque critique est un point de convergence aussi bien pour les époques de crise que pour celles de non-crise, qui deviennent ainsi concomitantes dans cette phase de transition...

3.2. Amérique précolombienne

De même qu'en ce qui concerne l'évolution des espèces, il paraît important de pouvoir éprouver la loi obtenue sur d'autres systèmes, les événements choisis dans la séquence étudiée ci-dessus étant essentiellement occidentale. La dynamique des dates en notre disposition concernant l'Afrique et l'Asie s'est révélée insuffisante, par contre une étude est possible en ce qui concerne l'Amérique.

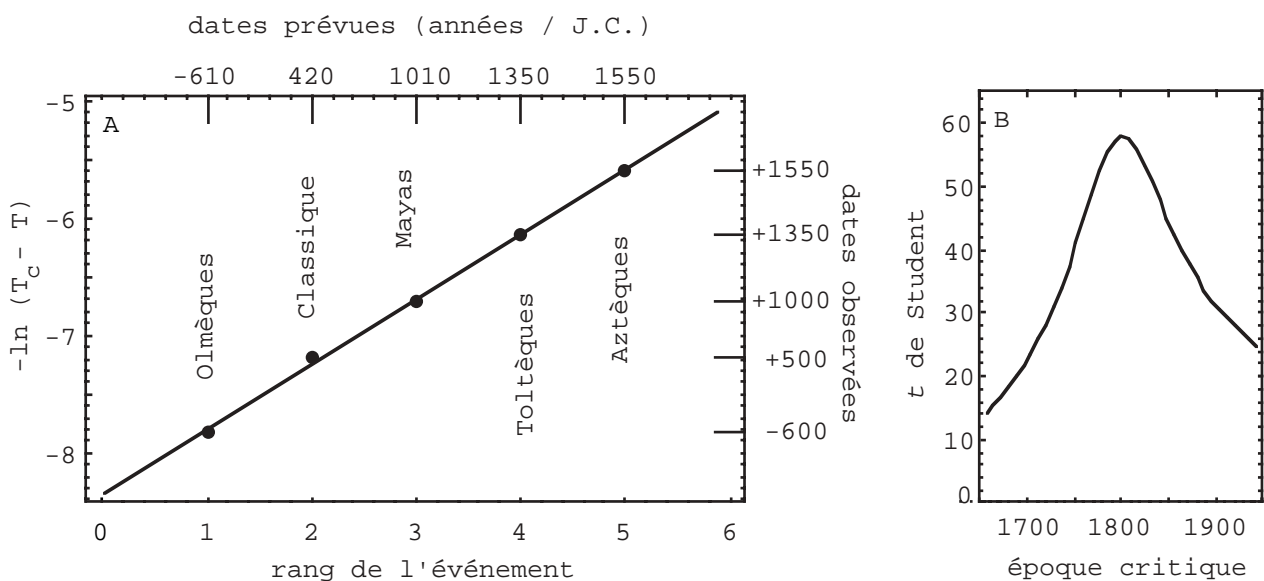


Figure 3. Ajustement des dates de crises économiques chez les Précolombiens (figure A) par une loi log-périodique de rapport d'échelle $g = 1.73$ et d'époque critique $T_c = + 1800$. La figure B montre la détermination de l'époque critique à l'aide de l'optimisation de la variable t de Student.

Fit of the dates of precolombian economic crisis (figure A) by a log-periodic law of scale ratio $g = 1.73$ and of critical date $T_c = + 1800$. Figure B shows how the critical date is determined from the optimization of Student's t variable.

L'évolution historique de l'Amérique précolombienne, par son isolation du reste du monde et la disparition de cette civilisation *dans le passé*, nous offre une occasion intéressante de tester l'universalité de la loi postulée.

Un bon accord est obtenu entre les dates médianes des crises économiques de ces sociétés (-600, 500, 1000, 1350, 1550) et une loi log-périodique de facteur 1.76 ± 0.02 et d'époque critique $T = 1800 \pm 80$ ($t = 58$, $P < 5 \cdot 10^{-3}$; voir figure 3). Là encore, on retrouve une (rétro) - prédiction de la loi : il pourrait être intéressant à comparer les dates supplémentaires comprises entre 1550 et 1800 aux événements historiques de cette période transitoire. Ce qu'il faut remarquer, c'est qu'au moment de l'invasion espagnole, ces peuples étaient proches de leur T_C , alors que les occidentaux en étaient éloignés de plus de 5 siècles ($2\ 080 \pm 30$)... L'évolution des populations précolombiennes conduit à un T_C propre à ces civilisations. Mais ici un élément purement contingent, est venu interférer avec cette évolution locale. La proximité du T_C , exprimant la limite de capacité d'évolution de ces groupes, peut avoir favorisé la disparition de ces civilisations.

4. Discussion

Nous avons discuté de tous les biais possibles dans les précédents articles (Chaline et al. 1999, 2000). Il faut savoir que l'existence d'une loi d'échelle ainsi que la valeur de ses paramètres essentiels (aux incertitudes près), ne dépendent ni des variations des valeurs des dates, ni de leur choix. Dans la version la plus simple de loi que nous avons considérée comme une première approximation, qui satisfait à une invariance d'échelle discrète, les paramètres essentiels se ramènent en fait à la seule valeur de l'époque critique T_C . En effet, le rapport d'échelle g , quant à lui, n'a rien d'absolu, car il est relié à la densité du nombre d'événements considérés. Aussi un changement de choix sur le caractère majeur ou non d'événements changera la valeur de g . C'est ainsi que si un auteur incorpore, par exemple, deux fois plus d'événements, g sera simplement remplacé par sa racine. Par contre, dans l'hypothèse où l'accélération (ou la décélération) log-périodique observée représente bien une structuration réelle d'une lignée évolutive donnée, l'époque critique doit être spécifique de cette lignée et ne pas dépendre du seuil appliqué au choix des événements (toujours en tenant compte, naturellement, des barres d'erreur). Il en est bien ainsi jusqu'à maintenant en ce qui concerne les données étudiées pour lesquelles nous avons considéré plusieurs choix différents possibles (rongeurs, sauropodes, primates).

Le principal résultat de cette note est l'adéquation du modèle log-périodique dans la description de l'accélération du rythme des crises économiques depuis la préhistoire. On peut tenter d'étendre l'analyse vers le passé et le futur:

*Nous avons pris comme dernière date de crise celle de ≈ 1975 . Si l'on ajoute comme date de la crise suivant l'époque actuelle (≈ 2002), on trouve un temps critique qui reste en accord statistique avec la détermination précédente: $T_C = 2084 \pm 20$.

*Vers la préhistoire, si l'on n'a plus d'informations directes concernant les crises économiques à des époques très reculées, nous disposons par contre d'estimations des dates d'apparition des anciennes industries. Nous pouvons alors utiliser l'existence d'une corrélation entre pics d'innovation technologiques et périodes de crise économique (Grou, 1987) pour inclure dans l'analyse les dates des industries préhistoriques, telles que répertoriées par Leroi-Gourhan et al. (1996): Mésolithique (-9.5 Ka), Magdalénien (-16), Solutrén (-19), Aurignacien-Périgordien (-33). En incluant également la date d'apparition de l'homme moderne (-180 \pm 20 Ka), on obtient encore un résultat stable et compatible avec les déterminations précédentes: $T_C = 2080 \pm 20$.

Ce résultat a été confirmé récemment de manière remarquable dans une analyse par Johansen et Sornette (2001) de l'évolution de plusieurs indices financiers et économiques remontant à deux siècles ainsi que de la population mondiale depuis 2000 ans. Ils ont trouvé que ces données variées, totalement indépendantes de celles que nous avons utilisées, sont toutes compatibles avec une loi d'accélération log-périodique vers la date critique $T_C = 2052 \pm 10$. Cette date est en accord statistique, en tenant compte des barres d'erreur, avec celle que nous avons obtenue (Nottale et al. 2000)

Ces résultats, s'ajoutant à ceux des tremblements de terre (Sornette et Sammis, 1995), des krachs boursiers (Sornette et al., 1996) et de l'évolution des espèces (Chaline et al. 1999) renforce l'universalité du modèle log-périodique dans la description des phénomènes d'évolution temporelle critique. Cette universalité, par laquelle ce type de loi s'applique à des phénomènes purement physiques comme ceux de rupture, de transition rapide, indique que ce comportement n'est en rien spécifique du seul vivant, mais bien de l'évolution vers, ou à partir d'une crise, quelle que soit sa cause. L'existence d'une telle structure globale suggère la présence de lois plus profondes que les théories d'échelle fondamentales permettront peut-être d'élucider (Nottale, 1997, 2001; Queiros-Condé 2000).

On peut faire la conjecture que sa mise en place, dans les cas que nous avons étudiés, est liée à un processus de mémoire intégrée semblable à ceux qui interviennent dans les phénomènes d'agrégation limitée par la diffusion (DLA)(Gouyet, 1992). En effet, chaque crise se produit sur une structure ayant intégré les changements de structure précédant (les noyaux apparaissent dans des cellules, les pluricellulaires sont formés de cellules à noyaux, les exosquelettes apparaissent chez des pluricellulaires, etc...).

5. Conclusion

Les événements rapides, les instabilités et les changements culturels au Quaternaire sont très nombreux. Ils touchent des domaines aussi variés que les changements abrupts de climat, les apparitions et les extinctions d'espèces (au moins chez les rongeurs), le développement des complexes industriels préhistoriques, l'évolution des complexes économiques post-néolithiques et les grandes étapes de certaines civilisations.

La recherche d'une quantification de ces processus à l'aide des lois mathématiques du domaine linéaire a été un échec car elles ne peuvent pas rendre compte de l'évolution de ces phénomènes, qui présentent des accélérations ou des décélérations et des changements abrupts de pente. Par contre l'utilisation des lois du domaine non-linéaire de type fractal se révèle tout à fait adaptée à leur étude. Les premiers tests que nous avons effectués dans les domaines de la paléontologie et de l'évolution économique, dont les résultats ont été depuis confirmés par des études indépendantes, complétés par ceux déjà mis en œuvre pour les tremblements de terre et les krachs boursiers, renforce l'universalité du modèle log-périodique dans la description des phénomènes d'évolution temporelle critique. Cette universalité, par laquelle ce type de loi s'applique à des phénomènes purement physiques comme ceux de rupture, indique que ce comportement n'est en rien spécifique du vivant, mais bien de l'évolution vers, ou à partir d'une crise, quelle que soit sa cause. L'existence d'une telle structure globale suggère la présence de lois plus profondes.

Remerciements: Ce travail est une contribution au thème "Signal morphologique de l'évolution" de l'UMR CNRS 5561 "BIOGEOSCIENCES-DIJON".

Bibliographie

- ALLEGRE, C.J., LE MOUËL, L. et PROVOST, A. 1982. Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction. *Nature*, 297: 47-49.
- BASILLAIS, E. 1997. Coral surfaces and fractal dimensions : a new method. *C.R.Ac.S., Sc. Vie*, 320, 653-657.
- BASILLAIS, E. 1998. Functional role of the fractal morphology of corals : a full model of the nutrient turbulent diffusion fluxes to a coral reef. *C.R.Ac.S., Sc.Vie*, 321, 295-298.
- BENTON, M.J. 1997. Models for the diversification of life. *Trends Ecol. Evol.*, 12(12), 490-495.
- BRADBURY, R.H. and REICHEL, R.E. 1983. Fractal dimension of a Coral Reef at Ecological Scales. *Marine Ecology, Progress Series*, 10, 169-171.
- BURLETO, B. 1993. The Fractal Geometry of Evolution. *J. theor. Biol.*, 163, 161-172.
- CAILLEUX, A. 1971. Le temps et les échelons de l'évolution. In : *Time in Science and Philosophy. An International Study of Some Current problems*, pp. 135-145. (J. ZEMAN, Ed.). Elsevier, Amsterdam, London, New-York, Czechoslovak Academy of Sciences, Praha.
- CHALINE, J. (Ed.). 1983. *Modalités, rythmes et mécanismes de l'évolution biologique : gradualisme phylétique ou équilibres ponctués ?* Paris, CNRS, 330.
- CHALINE, J. 1995. Vers une nouvelle théorie globale de l'évolution. *Ethique. La vie en question*, Editions Universitaires, 18: 9-18.
- CHALINE, J. LAURIN, B. BRUNET-LECOMTE, P. et VIRIOT, L. 1993. Morphological trends and rates of evolution in Arvicolid (Arvicolidae, Rodentia) at species level : toward a Punctuated Equilibria/Disequilibria Model, in : Chaline J. et Werdelin L. (eds.), *Modes and tempo of Evolution in the Quaternary*, Quaternary International, 19, 27-39.
- CHALINE, J., NOTTALE, L. et GROU, P. 1999. L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ? *Le Point sur... C. R. Ac. Sc., Paris*, 328(IIa): 717-726.
- CHALINE, J., NOTTALE, L. et GROU, P. 1999. Réponse aux commentaires de Eric Buffetaut à la note L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ? *C. R. Ac. Sc., Paris*, 329(IIa):
- COURNOT, A. 1922. *Traité sur l'enchaînement des idées fondamentales dans les Sciences et dans l'Histoire*. Hachette, Paris.
- DAVID, B. & MOOI, R. 1999. Comprendre les échinodermes : la contribution du modèle extraxial-axial. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 170 (1): 91-101.
- DUBOIS, J. 1995. *La dynamique non linéaire en physique du globe*. Masson, Paris, 265p.
- DUBOIS, J., CHALINE, J. et BRUNET-LECOMTE, P. 1992. Spéciation, extinction et attracteurs étranges. *Comptes Rendus Ac. Sc., Paris*, 315(II): 1827-1833.
- GOULD, S.J. et ELDREDGE, N. 1977. Punctuated equilibria: the tempo and mode of evolution reconsidered. *Paleobiology*, 3(2): 115-151.
- GOUYET, J.-F. 1992. *Physique et structures fractales*. Masson, Paris, 234p.
- GROU, P. 1987. *L'aventure Economique, de l'Australopithèque aux Multinationales*. L'Harmattan, Paris, (réédition en 1995), 160 p.
- JOHANSEN A. et SORNETTE D. 2001 Finite-time singularity in the dynamics of the world population, economic and financial indices, *Physica A* 294, 465-502.
- JONA-LASINIO, G. 1975. The renormalisation group: a probabilistic view, *Il Nuovo Cimento* 26B, 99-119
- LEROI-GOURHAN A., BAILLOUD G. CHAVAILLON J. et LAMINY-EMPERAIRE A., *La préhistoire*, PUF 1996.
- MANDELBROT, B. 1975. *Les objets fractals*. Flammarion, Paris, 212p.
- MEYER, F. 1947. *L'accélération évolutive. Essai sur le rythme évolutif et son interprétation quantique*. Librairie des Sciences et des Arts, Paris, 67p.

- MEYER, F. 1954. *Problématique de l'évolution*. P.U.F., 279p.
- MINELLI, A., FUSCO, G. et SARTORI, S. 1991. Self-similarity in biological classifications. *BioSystems*, 26, 89-97.
- NAUENBERG, M. 1975. Scaling representation for critical phenomena, *J. Phys. A: Math. Gen.* 8, 925-928
- NEWMAN, M.E.J. 1996. Self-organized criticality, evolution and the fossil extinction record. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 263, 1605-1610.
- NOTTALE, L. 1997. Scale Relativity, in *Scale Invariance and Beyond*, eds. B. Dubrulle, F. Graner & D. Sornette, EDP Sciences / Springer, 249-261.
- NOTTALE, L. 2001. Relativité d'échelle et morphogenèse. *Revue de synthèse*, 4(1), 93-116.
- NOTTALE, L., CHALINE, J., GROU, P. 2000. *Les arbres de l'évolution*, Hachette Littérature, Paris, 379 p.
- NOTTALE, L. CHALINE, J. & GROU, P. (in press). On the fractal structure of evolutionary trees. In: "*Fractals 2000 in Biology and Medicine*", Proceedings of Third International Symposium, Ascona, Switzerland, March 8-11, 2000 (G. LOSA, Ed.) Birkhäuser Verlag
- PLOTNICK, R.E. & MCKINNEY, M. 1993. Evidence of self-organization in planktic foraminiferal evolution: implications for interconnectedness of palaeosystems, *Palaios*, 8, 202-212.
- QUEIROS-CONDE, D. 2000. Principle of flux entropy conservation for species evolution. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 330, 445.
- PATTERSON, R.T. et FOWLER, A.D. 1996. Evidence of self organization in planktic foraminiferal evolution: Implications for interconnectedness of paleoecosystems. *Geology*, 24(3), 215-218.
- SCHLESINGER, M.F. ET WEST, B.J. 1991. Complex fractal dimension of the bronchial tree, *Phys. Rev. Lett.* 67, 2106-2108
- SERENO, P.C. 1999. The evolution of dinosaurs, *Science* 284, 2137-2147
- SOLÉ, R.V., MANRUBIA, S.C., BENTON, M. et BAK, P. 1997. Self-similarity of extinction statistics in the fossil record. *Nature*, 388, 764-767.
- SORNETTE, D. 1998. Discrete scale invariance and complex dimensions, *Physics Reports*, 297, 239-270.
- SORNETTE, D. ET SAMMIS, C.G 1995. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: implications for earthquake predictions, *J. Phys. I France* 5, 607-619
- SORNETTE, D., JOHANSEN, A., BOUCHAUD, J.P. 1996. Stock market crashes, precursors and replicas, *J. Phys. I France* 6, 167-175
- WILSON, J.A. et SERENO, P.C. 1998. Early Evolution and Higher-level Phylogeny of Sauropod Dinosaurs, *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2(18), 1-68.
- WILSON, K., 1971, Renormalization group and critical phenomena. *Phys. Rev.*, B4, 3174-3184