



Les dynamiques de la Terre

The Earth's Dynamics

Avant-Propos

Les sciences de la Terre ont vécu depuis quelques décennies des moments exceptionnels. La double révolution de la tectonique des plaques et de l'exploration des planètes a apporté une moisson d'observations et d'idées neuves [1]. Les géosciences sont sorties de leur division exagérée en sous-disciplines qui depuis trop longtemps s'ignoraient, elles ont compris leur profonde unité d'objet et d'étude, elles sont aussi sorties d'une vision fixiste de notre planète, pour désormais la comprendre comme un objet complexe, dynamique, vivant, replacé avec ses particularités mais aussi ses nombreux aspects communs dans le cortège des planètes telluriques, domaine enrichi par l'observation de la surface des satellites des planètes géantes. Une première génération de chercheurs et de travaux a construit le cadre, qui reste aujourd'hui le nôtre, de la cinématique des plaques, qui décrivait la structure fondamentale de la lithosphère et les mouvements relatifs, en général constants sur de longues périodes de temps, de ses grands fragments rigides. Mais, assez rapidement, le besoin s'est fait sentir de passer des mouvements aux forces, des vitesses aux accélérations, de la cinématique à la dynamique. L'importance des états transitoires est alors apparue, et de nombreux programmes de recherche se sont focalisés sur les lieux emblématiques de notre planète où naissent et meurent les frontières de plaques : notamment les stades initiaux de la déchirure des continents et la propagation de ces déchirures lithosphériques dans la région de l'Afar et de la corne de l'Afrique, ou les stades finaux de la plus grande collision continentale en Himalaya et au Tibet. De nombreuses publi-

Foreword

The last decades have been an exceptional time for the Earth Sciences. Two major revolutions, plate tectonics and space exploration of planets, have assembled a large harvest of observations and put forward new ideas [1]. The geosciences have emerged from a period of excessive division into subdisciplines that had ignored each other too long; they have come to understand how deeply united they are in both the objects and the methods they should pursue; they have abandoned a fixist view of our planet and now envision it as a complex and dynamic object, with its appropriate standing among the terrestrial planets (and many of the satellites of the giant planets). A first generation of researchers built the main frame of plate kinematics, which to this day remains ours: they described the fundamental structure of the lithosphere, and the relative motions of its large rigid fragments, generally considered to have been in uniform relative motion over long periods of time. However, it soon became apparent that one had to evolve from motions to forces, from velocities to accelerations, from kinematics to dynamics. The importance of transient stages became apparent, and many research programs focused on the emblematic loci where plate boundaries are born or die: such was the case for the early stages of continental break-up and lithospheric rift propagation in the Afar and the eastern horn of Africa, or the final stages of the largest continental collision in the Himalayas and Tibet. Many publications describe the discoveries, observations and most recent progress that these concerted efforts undertaken by geologists, geochemists and geophysicists have yielded, at many scales in both time and space,

cations décrivent les découvertes, les observations et les progrès les plus récents que les attaques concertées menées par les géologues, les géochimistes et les géophysiciens ont permis, à toutes les échelles de temps et d'espace, et à toutes les profondeurs, de la surface, avec ses interactions avec l'océan et l'atmosphère, à la graine de fer solide qui poursuit lentement, mais sûrement, sa croissance au cœur de la planète. Deux fascicules récents dans cette même collection [2,13] ont ainsi illustré les progrès de notre vision des failles et des séismes, témoin s'il en est des dynamiques dont la Terre est le siège. Je suis particulièrement reconnaissant à Jean Dercourt, directeur de la publication des *Comptes rendus Geoscience*, de m'avoir invité à concevoir un nouveau numéro thématique en me donnant carte blanche. C'était à la fois une opportunité merveilleuse et un défi à relever, avec toujours le risque de décevoir. À travers le prisme forcément déformant de mes propres travaux et de mes intérêts scientifiques, j'ai conçu ce fascicule autour du thème de la pluralité des dynamiques dont la Terre est en permanence l'objet. Profondément persuadé de l'unité des géosciences et de l'importance pour tous les spécialistes de travailler ensemble, je suis cependant conscient d'avoir abouti à un ensemble, que j'espère à la fois cohérent et divers, mais dans lequel sont encore insuffisamment représentées les disciplines capitales que sont la géologie et la géochimie.

Un premier ensemble d'articles s'attache à illustrer combien notre compréhension de la dynamique du manteau a fait d'avancées au cours de la dernière décennie. Barbara Romanowicz [9] montre que les techniques de la tomographie, nées en sismologie bien avant d'être connues du grand public par le biais de la médecine, nous donnent des images de plus en plus fines de la structure tridimensionnelle profonde du manteau. Les anomalies de vitesse de propagation des ondes sismiques et de leur atténuation peuvent être traduites en termes de variations latérales de la composition chimique ou de la température : elles font apparaître plaques froides plongeantes et « superpanaches » chauds et profonds. Norm Sleep [10] nous montre comment le géodynamicien, spécialiste de mécanique des fluides, peut interpréter en termes simples de convection ces observations tomographiques. Anne Davaille et ses collaborateurs [4] décrivent d'ingénieuses expériences au laboratoire, grâce auxquelles

and at all depths: from the surface of the Earth, with interactions between oceans and atmosphere, to the solid iron inner core, which steadily pursues its growth at the heart of our planet.

Two recent special issues of the *Comptes rendus* [2,13] have illustrated advances in our understanding of faults and earthquakes, witnesses of the dynamic phenomena that have Earth as their source. I am particularly thankful to Jean Dercourt, Editorial Director of the *Comptes rendus Geoscience*, for having invited me to elaborate a new thematic issue, with essentially no strings attached. This was both a marvellous opportunity and a challenge, with the risk of disappointing readers. Through the unavoidable deforming prism of my own scientific work and specific interests, I have built this special issue around the general theme of the diversity of the dynamics that have Earth as their seat. With a deep belief in the overall unity of the geosciences and in the need for all specialists to work jointly as a team, I propose this ensemble of papers, which I hope the reader will find coherent (even though I am aware that some essential branches of the geosciences, mostly geology and geochemistry, are not sufficiently represented here).

A first group of papers illustrates how much our understanding of mantle dynamics has advanced in the last decade. Barbara Romanowicz [9] shows that tomographic techniques, which emerged in seismology long before they became popular through their medical applications, provide us with ever-finer images of the deep three-dimensional structure of the mantle. Anomalies in the propagation velocity and attenuation of seismic waves can be understood as lateral variations in chemical composition or temperature: they reveal the cold plunging plates and the deep and hot 'superplumes'. Norm Sleep [10] demonstrates how the geodynamicist, using the tools of fluid mechanics, can interpret these tomographic observations in terms of simple convection models. He indicates to what extent present tomograms resolve the gross features of the lower mantle, with thickening down-going slabs and warmer regions, from which rare, unresolved starting plumes might ascend. Anne Davaille and co-authors [4] describe ingenious laboratory experiments in which they succeed to model thermochemical convection in a realistic way, reproducing the two main sources of variations in seismic velocities. Their work leads them to observe two distinct modes

on peut désormais modéliser (de façon qui semble réaliste) la convection thermochimique, et dans lesquelles justement les deux principales sources de variation des vitesses sismiques sont reproduites. Ce travail a conduit à l'observation de deux régimes distincts de convection, avec la formation de dômes oscillants et de panaches thermochimiques de longue durée de vie, qui sont une source d'inspiration pour l'interprétation de la structure sismique du manteau. Ce travail, et celui de Philippe Machetel [8] sur la possibilité que se produisent épisodiquement de gigantesques avalanches de matériau froid dans le manteau inférieur, nous permettent de suivre l'évolution d'un débat actif, vif et encore en partie inabouti, au sein de la communauté des géosciences sur la division en une ou deux couches du manteau et sur l'interaction passée, actuelle, permanente ou épisodique de ces grands ensembles.

Annie Souriau et ses collègues [11] nous emmènent ensuite au sein de la graine. Ils discutent les apports récents de la sismologie sur sa structure interne, son degré d'anisotropie et sur une éventuelle forte « sur-rotation », dont ils pensent que les données actuelles infirment l'existence. Jean-Pierre Valet et Emilio Herrero-Bervera [14] dressent une synthèse des caractéristiques fines de ces remarquables instabilités que sont les inversions du champ magnétique terrestre. Les données sont encore trop rares, soulignant l'importance de travaux de terrain complémentaires, et la vision que nous avons des enregistrements magnétiques portés par les laves est fortement affectée par le caractère épisodique et irrégulier des éruptions. Mais les auteurs montrent que les processus magnétohydrodynamiques qui se déroulent dans le noyau, si complexes soient-ils, conduisent à une géométrie de premier ordre assez simple du champ, dans laquelle la composante dipolaire de « l'aimant terrestre » s'écroule, pour laisser apparaître un champ non dipolaire plus complexe, mais en fait très semblable à celui que, depuis deux siècles, enregistrent les observatoires distribués autour du globe. Stéphane Labrosse et Mélina Macouin [7] rapprochent observations magnétiques, raisonnement géomagnétique et modèles thermiques pour explorer la façon dont la mesure de l'intensité du champ géomagnétique dans les temps (archéens et protérozoïques) les plus reculés pourrait nous renseigner sur la date de la première apparition de la graine de fer solide au sein d'un noyau auparavant entièrement liquide.

of convection, one in which large domes oscillate and the other in which long thermochemical plumes rise through the mantle. This should be a source of inspiration when attempting to interpret the seismic structure of the mantle. This work, together with that of Philippe Machetel [8] on the occurrence of large episodic avalanches of cold subducted plate material in the lower mantle, allows us to follow the active and lively debate unfurling in the geosciences community, as to whether the present or past mantle have formed one or been divided in two layers, and if there has been a permanent or an episodic interaction between the corresponding reservoirs.

Annie Souriau and co-authors [11] next take us inside the inner core. They discuss recent findings of seismology on its internal structure, anisotropy and possible 'super-rotation', which they believe current data invalidate. Jean-Pierre Valet and Emilio Herrero-Bervera [14] synthesize the fine details of the remarkable instabilities demonstrated by magnetic field reversals. Data are still too scarce, underlining the importance of further fieldwork, and our vision through magnetic recordings in lava is necessarily biased by the episodic and irregular character of volcanic eruptions. However, the authors show that the magneto hydrodynamic processes that affect the core, however complex they may be, lead to a rather simple first-order geometry, in which the dipolar component of the Earth's 'magnet' collapses, letting a more complex non-dipole field appear: this non-dipole field may be quite similar to the historical one, which magnetic observatories have recorded around the globe for nearly two centuries. Stéphane Labrosse and Mélina Macouin [7] bring together magnetic observations, geomagnetic reasoning and thermal models in order to explore the way in which measuring the Earth's field intensity over the most remote geological past (Archean and Proterozoic time) could constrain the first appearance of the solid inner core within a previously entirely molten core.

The third and last part of this issue dwells upon various aspects of the many and complex couplings between the vast shells of the core and mantle, of their couplings with the more superficial layers, the crust and lithosphere, and also the fluid envelopes and the biosphere. David Stevenson [12] uses the tools of comparative planetology to demonstrate how different potential styles of mantle convection will influence the

La troisième et dernière partie de ce numéro thématique aborde, sous divers aspects, les couplages entre ces grandes enveloppes que sont le noyau et le manteau, mais aussi leurs couplages avec les enveloppes plus superficielles, croûte et lithosphère, les enveloppes fluides et la biosphère. David Stevenson [12] apporte les outils de la planétologie comparée pour nous montrer comment les divers styles possibles de convection influencent l'évolution des différentes planètes (et des satellites des planètes géantes) au cours de leur histoire. Il dissipe à cette occasion un certain nombre d'idées préconçues. De simples lois d'échelle lui permettent de déterminer le taux de refroidissement séculaire d'une planète et la probabilité qu'elle ait un champ magnétique ou du volcanisme. Frédéric Fluteau [5] nous entraîne dans le domaine des changements climatiques, et montre l'importance d'une bonne connaissance de la répartition des continents pour reconstituer les climats du passé. Il montre notamment l'importance de la présence de bras de mers anciens dans l'évolution du climat de vastes régions. Les modèles numériques climatiques (dits « couplés ») de l'atmosphère et de l'océan sont en passe de permettre de résoudre, au moins en partie, des questions anciennes sur la répartition des faunes et des flores et leurs liens avec les paléogéographies. Avec Paul Renne [3], je tente ensuite de passer en revue notre connaissance des âges et des durées précises d'épanchement de ces phénomènes volcaniques exceptionnels que sont les basaltes des plateaux (ou traps). Ces événements brefs et volumineux, manifestation d'instabilités sans doute profondes venues du manteau, forment une séquence d'apparence aléatoire, qui rythme les grandes phases de la déchirure des continents, de l'ouverture des grands bassins océaniques, et qui sous-tend sans doute aussi l'échelle même des temps géologiques. En effet, cette échelle a été fondée au XIX^e siècle sur l'observation par les paléontologues de moments particuliers où les espèces biologiques sont affectées par des extinctions massives. Et les traps témoignent d'un lien entre instabilités du manteau, de la lithosphère et de la biosphère par le biais du climat. Dans un article final volontairement un peu provocateur, et sans doute visionnaire, Joe Kirschvink et Tim Raub [6] mènent plus loin encore cette idée d'un lien fort entre dynamiques de la Terre, du climat et des espèces : ils proposent que la fameuse « explosion cambrienne », cette phase étonnante de di-

future evolution of the various planets (and of the satellites of the giant planets). In the course of his paper, he dispels a number of common misconceptions. Simple scaling laws lead him to determine the secular cooling rate of a planet and the probability that it will develop a magnetic field or volcanic activity. Frédéric Fluteau [5] takes us to the realm of climate change, and shows how important proper knowledge of continental palaeogeography is when one attempts to reconstruct past climates. He shows the significance of large ancient seaways in controlling the climatic evolution of large regions. Numerical codes in which oceanic and atmospheric processes and their interactions are jointly taken into account may be about to resolve a number of nagging questions on the distribution of past faunas and floras, and their links with past geographies. Paul Renne and I [3] next attempt to review our current knowledge of the ages and durations of the exceptional volcanic phenomena known as traps or flood basalts. These brief and voluminous events are most likely the surface manifestation of deeper mantle instabilities; they form an apparently random sequence, and mark the largest phases of continental break-up and opening of large oceanic basins. They also underpin the very scale of geological time. Indeed, this scale was first established in the 19th century, based on the peculiar moments, uncovered by palaeontologists, when mass extinctions of living species occurred. The traps witness a link between mantle and lithosphere instabilities on the one hand, and biosphere instabilities on the other hand, with climate change as the agent of this link. In a voluntarily slightly provocative but probably visionary final paper, Joe Kirschvink and Tim Raub [6] push this idea of a strong link between the dynamics of the Earth, climate and species one step further. They propose that the famous 'Cambrian explosion', an astonishing phase of accelerated diversification of species during which evolution experimented with many new life forms and actually invented the hard skeleton, also had a primarily internal origin. The link uses tumbling of the Earth's rotation axis in successive swings of true polar wander, and the release into the atmosphere of vast quantities of methane that had previously been stored in the deep sediments of the continental slope, a process they call the 'fuse' leading to the explosion.

In closing, I would like to underline the many links and ties between the various pieces of research descri-

versification accélérée au cours de laquelle l'évolution expérimente de nouvelles formes de vie et invente le squelette, serait elle-même d'origine primaire interne à la Terre. Le lien proposé passe par des phénomènes de basculement de l'axe de rotation de la Terre et de relâchement dans l'atmosphère du méthane stocké dans les sédiments profonds des talus continentaux, ce que les auteurs appellent la mèche qui permet l'explosion.

Pour finir, j'aimerais souligner deux des nombreux liens qui sous-tendent les recherches exposées dans ce numéro. Tout d'abord, l'importance, évidente mais parfois un peu oubliée, de la mesure du temps dans les sciences de la Terre, sciences fondamentalement historiques. Ce sont des avancées significatives dans nos capacités de résoudre des intervalles de temps brefs (aux échelles très diverses des phénomènes étudiés) qui ont permis d'aller plus loin dans notre compréhension des problèmes. Soulignons à cet égard l'importance des progrès récents en magnétostratigraphie, en cyclostratigraphie (l'observation et la modélisation des fameux cycles de Milankovic) et en géochronologie (méthodes « potassium-argon », « argon 39/40 », « uranium-thorium-plomb » sur zircons, « rhénium-osmium », etc.). Qu'il s'agisse des sauts de variation séculaire (les *jerks*, à l'échelle temporelle de l'année) ou des inversions (à l'échelle du millier d'années), tous deux situés dans le noyau ; qu'il s'agisse de l'éruption de panaches ou de superpanaches, ou de l'effondrement d'avalanches dans le manteau (de l'échelle du million à celle de la dizaine de millions d'années) ; qu'il s'agisse de l'éruption de traps ou de la déchirure des continents dans la lithosphère (avec les mêmes échelles de temps), ou de la formation des failles et de l'occurrence des séismes (de l'échelle de la seconde à plusieurs millénaires) ; qu'il s'agisse des modifications brutales du climat (des phases de déglaciation à l'échelle des milliers d'années, aux oscillations dites « El Niño » à l'échelle de l'année à la décennie) ; qu'il s'agisse des extinctions en masse d'espèces à des échelles de quelques centaines de milliers d'années... Dans tous ces cas, nous sommes passés de la vision uniformitariste du XIX^e siècle (toujours essentielle et fondatrice des géosciences en tant que sciences quantitatives et rigoureuses), à une vision plus catastrophiste et néanmoins compatible avec les lois de la nature. William Whewell ne disait-il pas, dès 1830 : *Why must we insist upon it, that man has been long enough an observer to obtain the ave-*

bed in this special issue. First and foremost, if sometimes somewhat forgotten, the importance of an accurate measurement of time in all the geosciences, which are fundamentally historical in nature. Major advances in our ability to resolve smaller time intervals (at the many scales encountered in these studies) have been the reason for further understanding of many of these problems. I would like to mention particular recent progress in magnetostratigraphy, in cyclostratigraphy (the observation and modelling of Milankovic cycles), and in radiochronology (the 'potassium-argon', 'argon-39/40', 'uranium-thorium-lead' and more recent 'rhenium-osmium' techniques...). Be it jumps in geomagnetic secular variation (the 'jerks' with a time scale of the order of one year) or magnetic reversals (with a time scale of the order of a thousand years), both originating in the core; be it the eruption of plumes and superplumes or the collapse of avalanches in the mantle (on a time scale on the order millions to tens of millions of years); be it the eruption of traps or the tearing of continents in the lithosphere (with the same time scales), or the formation of faults and occurrence of earthquakes (with a time scale from seconds to millennia); be it sharp changes in the climate (from deglaciation events on a one-thousand-year time scale to El-Niño oscillations on a scale from a year to a decade); be it mass extinctions on the scale of a few hundred thousand years... In all of these occurrences, we have evolved from the rigid uniformitarianist vision of the 19th century (still essential in many ways, and in any case a founding concept of the geosciences as quantitative and rigorous sciences), to a more 'catastrophist' vision, yet fully compatible with the known laws of Nature. As early as 1830, the lone voice of William Whewell so aptly said: "Why must we insist upon it, that man has been long enough an observer to obtain the average of forces which are changing through immeasurable time?" Our own experience as a species has simply not allowed us to sample (using mathematical terms) the whole extent of the spectrum of amplitude variations of natural phenomena. And the observations reported in this issue show that episodically, rarely, yet surely, geological phenomena with an amplitude we (fortunately?) do not know in this day have taken place on Earth. Many natural phenomena appear to be expressed as time series in which long ('normal') phases with only progressive changes are episodically interrupted by far more in-

rage of forces which are changing through immeasurable time? Notre expérience, en tant qu'espèce, ne nous a tout simplement pas permis d'échantillonner, pour utiliser des termes mathématiques, toute l'étendue du « spectre » des amplitudes des phénomènes naturels. Et les observations rapportées ici montrent bien que se sont produits, épisodiquement, rarement, des phénomènes géologiques d'une ampleur que nous ne connaissons (heureusement ?) pas aujourd'hui. Bien des phénomènes naturels apparaissent donc comme des séquences temporelles dans lesquelles de longues phases de changements progressifs (« normales ») sont de temps en temps interrompues par des phases beaucoup plus intenses, mais relativement brèves (« catastrophes »). À nouveau en termes mathématiques, on peut dire que la plupart de ces séquences peuvent, en première approximation, être décrites par des fonctions régulières interrompues par des « distributions de Dirac » (ceci étant vrai de la fonction elle-même, ou de l'une de ses dérivées, la troisième par exemple dans le cas des *jerks* magnétiques). En termes plus physiques, c'est simplement la réalisation par les géosciences de l'importance et de l'ubiquité des instabilités, qui résultent de la réponse non linéaire d'un système complexe, couplé, parfois chaotique.

Seconde observation, la profonde unité et le grand dynamisme des géosciences. J'ai parlé de deux révolutions récentes dans les sciences de la Terre. Il en est en fait une troisième [1], qu'on pourrait résumer par le terme d'environnement : la prise de conscience des liens profonds et essentiels entre les dynamiques des diverses enveloppes de notre Globe. Les géosciences demeurent un domaine d'étude passionnant, indispensable pour développer une vraie écologie scientifique.

Les articles rassemblés dans ce numéro thématique ont été traités, comme le veulent les principes éditoriaux des *Comptes rendus*, de la manière la plus rigoureuse, commune à toutes les grandes revues scientifiques internationales. Chaque article a été lu par au moins deux rapporteurs et, bien qu'invité, n'a en général été accepté qu'après révision et prise en compte des remarques des rapporteurs. Je tiens à remercier tous ceux qui ont bien voulu consacrer une part de leur temps à ce travail indispensable : Nick Arndt, Jean Besse, Julie Carlut, Mike Coffin, Anne Davaille, Adam Dziewonski, Frédéric Fluteau, Christian France-Lanord, David Gubbins, Paul Hoffman, Claude Jaupart, Dan MacKenzie, Marc Monnereau,

tense yet relatively brief pulses ('catastrophes'). One could say that, to a first approximation, these can be described through regular functions interrupted by Dirac distributions (this being true either for the function itself or for one of its higher-order derivatives, the third for instance in the case of geomagnetic jerks). In more physical terms, this is simply the understanding by the geosciences that instabilities, which result from the non-linear responses of a complex, coupled, sometimes chaotic system, are both important and ubiquitous.

A second observation I wish to make is about the deep unity and the great dynamism of the geosciences. I have alluded to two recent revolutions in the Earth Sciences. There is actually a third one [1], which can be summarized in the word Environment: the realization of the deep and essential links between the dynamics of the various envelopes of our globe. The geosciences will remain a fascinating research area, unavoidable if one wants to develop a truly scientific ecology.

The articles published together in this special issue have been processed, as required by the editorial policies of *Comptes rendus*, in the most rigorous way, shared by all main international scientific journals. Each article has been reviewed by at least two scientists, and though each paper was indeed originally invited, it was in general accepted only after revision taking into account the reviewers comments. I would like to thank all those colleagues who accepted to spend a part of their time performing this essential task: Nick Arndt, Jean Besse, Julie Carlut, Mike Coffin, Anne Davaille, Adam Dziewonski, Frédéric Fluteau, Christian France-Lanord, David Gubbins, Paul Hoffman, Claude Jaupart, Dan MacKenzie, Marc Monnereau, Dick Peltier, Jean-Paul Poirier, Jerroen Ritsema, Barbara Romanowicz, Bill Ruddiman, Norm Sleep, Annie Souriau, and David Stevenson. It goes without saying that whenever authors were asked to review a paper for this issue, it was not their own! This has allowed some amount of feed-back between authors, has initiated some fruitful debates, and has given the issue some homogeneity. Claude Jaupart has been kind enough to replace me as editor for the paper I co-authored. I would like to dedicate this special issue to my father, Emmanuel Courtillot, a physicist in his career and a naturalist in his heart, who first pointed out to me the then nascent plate tectonic revolution,

Dick Peltier, Jean-Paul Poirier, Jeroen Ritsema, Barbara Romanowicz, Bill Ruddiman, Norm Sleep, Annie Souriau et David Stevenson. Il va de soi que si j'ai eu recours à plusieurs des auteurs invités comme rapporteurs, il s'agissait d'autres articles que le leur ! Ceci a permis une certaine rétroaction entre auteurs, des amorces de débats fructueux, et une certaine homogénéité de ce numéro thématique. Claude Jaupart a bien voulu accepter de me remplacer comme rédacteur pour l'article dont j'étais l'un des auteurs. Je souhaite dédier ce numéro à mon père, Emmanuel Courtillot, physicien dans le civil et naturaliste dans son cœur, qui m'a le premier signalé la révolution en cours de la tectonique des plaques, et à la mémoire d'Allan Cox, qui à Stanford m'en a enseigné les fondements et m'a attiré vers le paléomagnétisme. J'exprime ici ma vive reconnaissance à Claude Allègre et à Jean-Louis Le Mouél, qui ont, de tant de façons différentes, aidé par la suite à modeler la vision des géosciences ici reflétée. Je remercie Hélène Paquet d'avoir assuré la coordination matérielle de la production de ce volume et enfin, à nouveau, Jean Dercourt de son invitation : j'espère que le lecteur aura autant de plaisir à lire ces pages que j'en ai eu à les rassembler.

Paris, le 30 novembre 2002

Vincent Courtillot
Université Paris-7–Denis-Diderot,
Institut de physique du Globe de Paris,
Institut universitaire de France

and to the memory of Allan Cox, who taught me the fundamentals of paleomagnetism and attracted me to the field when I was in Stanford. I also wish to express my deep gratitude to Claude Allègre and Jean-Louis Le Mouél, who in so many diverse ways helped me to shape the vision of the geosciences that is reflected in this issue. I thank Hélène Paquet for efficient coordination in production of this volume and finally, once again, Jean Dercourt for his invitation: I hope the reader will find as much pleasure in reading these pages as I had gathering them.

Paris, 30 November 2002

Vincent Courtillot
Université Paris-7–Denis-Diderot,
Institut de physique du Globe de Paris,
Institut universitaire de France

Références

- [1] C. Allègre, V. Courtillot, Revolutions in the Earth sciences, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 354 (1999) 1915–1919.
- [2] J. Angelier, P. Tapponnier (Eds.), Séismes, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 333 (2001) 1–103.
- [3] V. Courtillot, P. Renne, On the ages of flood basalt events, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 113–140.
- [4] A. Davaille, M. Le Bars, C. Carbonne, Thermal convection in an heterogeneous mantle, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 141–156.
- [5] F. Fluteau, Earth dynamics and climate changes, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 157–174.
- [6] J. Kirschvink, T. Raub, A methane fuse for the Cambrian explosion: carbon cycles and true polar wander, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 65–78.
- [7] S. Labrosse, M. Macouin, The inner core and the geodynamo, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 37–50.
- [8] P. Machetel, Global thermal and dynamic perturbations due to Cretaceous mantle avalanche, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 91–97.
- [9] B. Romanowicz, 3D structure of the Earth's lower mantle, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 23–35.
- [10] N. Sleep, Simple features of mantle-wide convection and the interpretation of lower-mantle tomograms, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 9–22.
- [11] A. Souriau, R. Garcia, G. Poupinet, The seismological picture of the inner core: structure and rotation, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 51–63.
- [12] D. Stevenson, Styles of mantle convection and their influence on planetary evolution, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 99–111.
- [13] P. Tapponnier, J. Angelier (Eds.), Failles et Séismes, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 333 (2001) 477–599.
- [14] J.-P. Valet, E. Herrero-Bervera, Some characteristics of geomagnetic reversals inferred from detailed volcanic records, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 79–90.