



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 1101–1107



Surface Geosciences

## Transferts de matière à la surface de la Terre

### Material transfers at the Earth's surface

#### Avant-propos

«Une science a l'âge de ses instruments», annonçait Bachelard. Courte phrase d'une profonde réflexion, qui s'est avérée vérifiable dans bien des cas au cours de l'histoire des sciences. À cela, il faut ajouter le génie des hommes de sciences et surtout de certains hommes novateurs, qui sont apparus très vite comme des chefs d'école. L'étude de l'altération des roches n'y a pas échappé. Elle a connu ses maîtres et ses progrès internationaux. Ce court avant-propos n'a pas la prétention d'être exhaustif, mais de rendre hommage à certains d'entre eux, qui ont marqué leur temps par leurs idées novatrices, par les risques qu'ils ont pris, alors que le siècle passé exigeait que l'on se penchât sur des sciences et des techniques plus appropriées au développement industriel de nos sociétés. L'étude de l'altération des roches était regardée avec amusement, même par les géologues, géochimistes et géophysiciens, qui avaient trop à faire à essayer de comprendre la formation et le fonctionnement de notre planète. Seuls les géographes s'y complaisaient, car ils y percevaient un lien direct avec la forme des paysages, les modelés de nos continents. Ainsi, les géomorphologues traitaient-ils de l'environnement, de nos modelés, de nos fleuves et de nos rivières. Tout scientifique qui a vécu le demi-siècle dernier et qui lit ces lignes, peut se souvenir que la géographie enseignée à l'école et au lycée traitait exclusivement de tels sujets.

Hommage peut être rendu aujourd'hui où toutes les sciences, et pas qu'elles d'ailleurs, veulent s'intéresser à l'étude de l'environnement et du développement durable de notre Terre. Les journées consacrées par

#### Foreword

“Each science is dated by its instruments”, according to Bachelard. Short sentence with great thought, which was confirmed in many cases all along the history of sciences. Added to that the genius of scientists and above all of some innovators who appeared rapidly as leaders. So had rock weathering its ‘masters’ as well as its international improvements. This short foreword has no other purpose but paying homage to some of the scientists who have marked their time, by their innovating conceptions, the risks they took, whilst the past century has been devoted to sciences and techniques more adapted to the industrial development of our societies. The study of rock weathering was considered as done for fun even by geologists, geochemists and geophysicists, much more concerned with the formation and working of our planet. Only geographers were interested, since according to them a direct relation existed between rock weathering and landforms of our continents. The studies of geomorphologists were thus dealing with environment, landforms and rivers. Every scientist who has lived in the last half-century and who reads this text remembers surely that in schools and high schools, geography was exclusively devoted to these topics.

Homage may be done today, when all of the sciences – and not only sciences – are devoted to the study of environment and sustainable development. The Colloquium dedicated by the French Academy of Sciences to *Material Transfers at the Earth's Surface* concerned at once rock weathering and all the complex implications that proceed from this phenomenon. Be-

l'Académie des sciences aux transferts de matière à la surface de la Terre, traite à la fois de l'altération des roches et des implications complexes qui en sont déduites. Avant d'en donner introduction, ou tout au moins à travers les contributions de ceux qui ont bien voulu que les propos exposés dans l'enceinte de l'Académie des sciences soient inscrits dans ce volume, il m'a paru utile d'introduire ceux qui ont été à la base de l'étude des altérations des roches.

L'altération des roches par les eaux météoriques conduit à la formation d'une véritable peau qui recouvre une grande partie des continents, qui constitue les sols et les altérites, encore appelés « regoliths », ou « manteau d'altération », ou « couverture pédologique ». Interface entre lithosphère, atmosphère et biosphère, elle est le siège de volumineux transports de matière entre continents et océans. C'est là où l'observation du manteau d'altération était la plus évidente, c'est-à-dire dans les pays tropicaux, que les premières études se sont portées. Ce manteau, dont l'épaisseur peut varier de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres sous les tropiques, est appelé « latérite ». La latérite peut parfois résulter de la concentration de minéraux utiles, les bauxites par exemple, et attirer ainsi l'intérêt d'instituts géologiques chargés de prospecter des gisements utiles au développement industriel.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les études pionnières se portaient sur l'Afrique, l'Australie, l'Asie du Sud-Est, là où les latérites recouvraient une grande partie des territoires. On remarque les études de Arsandeaux [1, 2], de Chautard [6], de Dixey [8], de Holland [17], de Simpson [22], de Woolnough [23]. Mais ce sont les observations pétrographiques de Lacroix [18] qui ont été déterminantes pour la compréhension de la dégradation des roches ignées et métamorphiques en minéraux secondaires de très petite taille (cristaux inférieurs à quelques microns).

Par la suite, les travaux de Fox [10], de Harrassowitz [16] et de E. de Chetelat [7] marquent de gros progrès sur la compréhension de l'altération latéritique et des modelés qui en découlent. L'article de Goldich [15] dans le *Journal of Geology* est une référence qui fait date dans l'altération différentielle des minéraux des roches ; il est toujours cité dans les synthèses traitant de l'altération des roches.

Au fur et à mesure que les techniques d'investigation des minéraux de petites tailles se mettent au point, des progrès décisifs prennent jour sur la consti-

fore introducing the different items discussed and particularly through the contributions of participants who accepted to write their oral presentation at the Colloquium of the French Academy of Sciences, I would like to introduce the initiators of the rock weathering study.

Weathering of rocks by meteoric waters lead to formation of a real 'skin' that covers a large part of continents and constitutes soils and alterites, also named 'regoliths', or 'weathering mantle' or 'pedologic cover'. At the interface between lithosphere, atmosphere and biosphere, this skin is the vector of huge material transfers between continents and oceans. The first studies have concerned tropical areas, where the observations of the weathering mantle are the most convenient. This mantle, whose thickness varies from some metres to some hundreds of metres, is denominated 'laterite'. Sometimes, laterite may generate from concentration of useful minerals, for example bauxites, and thus draw the interest of geological organisms in charge of prospecting ore deposits with the aim of industrial development.

At the beginning of the 20th century, pioneer studies were applied to Africa, Australia, and southeastern Asia, where laterites are widespread. Such are the studies by Arsandeaux [1,2], Chautard [6], Dixey [8], Holland [17], Simpson [22], Woolnough [23]. However, the petrographic observations of Lacroix [18] were decisive to understand the degradation of igneous and metamorphic rocks into very small-sized secondary minerals (crystals lower than some microns).

Later on, the understanding of lateritic weathering and of resulting landforms was greatly improved by Fox [10], Harrassowitz [16] and de Chetelat [7]. The paper of Goldich [15] on the differential alteration of rock minerals is a pioneering date that all the syntheses on rock weathering still refer to.

As soon as new techniques permitted the thorough study of small-sized minerals, decisive improvements on crystallographic and mineralogical composition of soils and alterites took place. In the 1950s and the beginning of 1960s, numerous new results lead to a better understanding of the genesis of these formations and to the geochemical approach of the phenomena. According to me, the most eminent scientists in this period were Z.S. Altschuler, T.F. Bates, P. Bayliss, G.W. Brindley, C.W. Correns, C. DeKimpe, J. Delvigne, M.-C. Gastuche, E.C. Harder, D. Hendricks,

tution cristallographique et minéralogique des sols et des altérites. Dans les années cinquante et le début des années soixante du siècle dernier, une foison de résultats nouveaux permettent de comprendre la genèse de ces formations et ouvrent la voie à l'approche des mécanismes géochimiques. Les scientifiques les plus marquants de cette période ont été à mes yeux Z.S. Altschuler, T.F. Bates, P. Bayliss, G.W. Brindley, C.W. Correns, C. DeKimpe, J. Delvigne, M.C. Gastuche, E.C. Harder, D. Hendricks, S. Hénin, M.L. Jackson, W.D. Keller, F.C. Loughnan, R. Maignien, A.J. Melfi, K. Norrish, H.B. Owen, R.L. Pendleton, J.A. Prescott, P. Ségalen, U. Schwertmann, R.M. Taylor, C. Tchoubar, L.D. Whittig, J. Wyart.

La pédologie, plutôt encline à cette époque à classer les sols, laisse la voie aux minéralogistes, aux cristallographes et aux géochimistes pour aborder une autre étape de l'étude des altérations des roches, celle de l'intégration des résultats et de la compréhension des mécanismes physico-chimiques. Deux ouvrages marquent alors leur temps : *La Géologie des Argiles* de Millot, paru en 1964 [20] et *Solutions, Minerals and Equilibria* de Garrels et Christ, en 1965 [12]. Deux ouvrages différents, mais si complémentaires si l'on veut comprendre le fonctionnement des systèmes géochimiques de la surface.

Derrière eux s'animent de véritables écoles, qui approchent de façon moderne, quantitative, des processus qui règlent le fonctionnement et l'évolution du manteau d'altération. Les réactions eau-roche, les transferts à toutes les échelles, leur sens d'évolution, les précipitations, les dissolutions, sont abordés au travers de la géochimie des éléments majeurs, des traces, des isotopes stables, radiogéniques, cosmogéniques, des modélisations thermodynamiques de l'équilibre, du déséquilibre, des modélisations numériques, du magnétisme des oxydes et oxyhydroxydes de fer... Des vitesses d'altération, des datations des grandes étapes d'altération sont proposées. Le grand absent, la prise en compte de la végétation dans son fonctionnement actuel, mais aussi dans sa dimension historique, est enfin intégré et permet désormais de considérer le rôle de l'altération des roches dans le fonctionnement des systèmes globaux. Ainsi, le début du XXI<sup>e</sup> siècle voit une moisson de résultats qui renouvelle un pan de l'étude de l'altération des roches et ouvre une nouvelle voie vers la compréhension des paléoclimats.

S. Hénin, M.L. Jackson, W.D. Keller, F.-C. Loughnan, R. Maignien, A.J. Melfi, K. Norrish, H.B. Owen, R.L. Pendleton, J.A. Prescott, P. Ségalen, U. Schwertmann, R.M. Taylor, C. Tchoubar, L.D. Whittig, and J. Wyart.

Soil Science, rather dedicated in that time to soil classification, gave way to mineralogists, crystallographers and geochemists to introduce another stage in the rock weathering study, i.e. the integration of results and of physicochemical mechanisms' understanding. Two handbooks particularly left a mark, *La Géologie des Argiles* by Millot (1964) [20] and *Solutions, Minerals and Equilibria* by Garrels and Christ (1965) [12]. These two different handbooks are quite complementary if one would like to understand how geochemical systems work on the Earth's surface. Following G. Millot and R.M. Garrels, two genuinely different schools have approached in a quantitative way the processes governing the formation and evolution of weathering mantles. Water-rock interactions, transfers on all scales, sense of evolution, precipitation, dissolutions are studied through geochemistry of major and trace elements, of stable, radiogenic and cosmogenic isotopes, through digital models, magnetism of iron oxihydroxides... Weathering rates, dating of the main weathering stages are proposed. The role of vegetation in the present-day and past development of weathering, unknown for a long time, makes it now possible to consider rock weathering in the framework of global systems.

This thematic issue of the *Comptes rendus Geoscience* on the Material Transfers at the Earth's Surface was written on the invitation of Jean Dercourt, Permanent Secretary of the French Academy of Sciences, who gave us the opportunity to bring a glance on what has been performed in the domain of surficial geosciences. The different contributions are dealing with still actual or past phenomena, role of weathering on palaeoclimates versus role tectonics, importance of vegetation on material balances and on CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> cycles.

Montgomery [21] studies the functional relationships between erosion rate and topography, which are central to the understanding of both global sediment flux and of the potential for feedback between tectonics, climate and erosion in shaping landforms. In order to improve modelling of erosional processes, he defines an erosion index based on the general form of

Ce volume thématique des *Comptes rendus Geoscience* sur les « Transferts de matière à la surface de la Terre » paraît à l'instigation de Jean Dercourt, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. Il nous permet ainsi de donner un aperçu du chemin parcouru en géosciences de la surface. Les différentes contributions traitent des phénomènes passés et de ceux qui sont encore actifs, du rôle de l'altération sur les paléoclimats *versus* le rôle de la tectonique, de l'importance de la végétation sur les bilans de matière et sur les cycles de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>.

Montgomery [21] aborde la question des relations fonctionnelles entre vitesses d'érosion et topographie, qui sont au centre de la compréhension, à la fois, du flux global de sédiments et du potentiel de rétroaction entre tectonique, climat et érosion. Pour améliorer les modèles sur les processus d'érosion, il définit un nouveau concept d'indice d'érosion, basé sur la forme générale d'une loi qui intègre les modèles spatiaux de précipitation, de drainage et de pente, pour prédire les processus d'érosion à l'aide d'une modélisation numérique d'altitude. L'application aux Andes et à l'Himalaya montre que les montagnes actives s'ajustent aux vitesses de soulèvement, tout d'abord par une modification dans la fréquence des glissements de terrain, plutôt que par une raideur des pentes, rendant ainsi difficile de déduire les vitesses d'érosion à long terme de l'analyse directe de l'inclinaison des reliefs.

L'Himalaya sert encore de modèle à France-Lanord et al. [11] pour étudier l'importance relative de l'altération, des flux particuliers à l'océan, avec enfouissement sédimentaire de matière organique, et du dégazage du CO<sub>2</sub>, processus en relation avec les conditions tectoniques et climatiques. Les flux de matières en suspension annuels sont comparés aux flux dissous et aux sédiments marins détritiques, qui préservent à l'aval l'essentiel de la matière organique. Sur le système himalayen, le flux d'enfouissement de C organique apparaît dominant en termes de consommation de C. Le flux de dégazage de CO<sub>2</sub> estimé expliquerait une part significative du flux d'alcalinité des rivières, réduisant ainsi d'autant l'altération des silicates en tant que puits de C atmosphérique. À long terme, ces flux semblent avoir été effectifs depuis environ 30 Ma.

Dupré et al. [9] utilisent les données quantifiées sur les éléments dissous transportés par les grands fleuves du monde, ainsi que sur de petits bassins versants monolithiques, pour proposer une loi générale qui relie

an erosion law; this index integrates spatial patterns of precipitation, drainage area and slope to predict erosional processes by digital elevation models. Application of this index to the Andes and the Himalayas shows that active mountain ranges adjust to high rates of rock uplift first by changes in the frequency of land sliding rather than hillslope steepness. And this makes it difficult to derive long-term erosion rates directly from analysis of hillslope steepness. The Himalayas are also the model chosen by France-Lanord et al. [11] to determine the relative importance of weathering, of particulate fluxes toward ocean, with sedimentary burial organic matter and CO<sub>2</sub> degassing, all processes in relation with tectonic and climatic conditions. Annual suspended-particles fluxes are compared with dissolved fluxes and with detrital marine sediments that maintain the most part of organic matter downstream. On the Himalayan system, the flux of organic C burial is predominant in terms of C consumption. The estimated flux of CO<sub>2</sub> degassing should explain a significant part of the alkalinity flux in rivers, which thus reduces proportionately the silicate weathering as sink of atmospheric C. On long term, these fluxes seem to have been efficient since about 30 Myr.

Dupré et al. [9] use the quantitative data on dissolved elements transported by major world rivers and on small monolithic river basins to propose a general law, coupling chemical and mechanical erosions. Likewise, they show the fundamental role of basalt weathering on CO<sub>2</sub> cycle and of organic C cycle in mountainous areas, where organic C is stocked for the most part in sediments downstream. From all these studies, the effects of great geological phenomena on the Earth's climate can be quantified. And so the great periods where huge basalt volumes were set influenced climate evolution on the million-year scale. Last, the authors demonstrate the primary role played by the formation of the Andes and of the Himalayas in the decrease of the Earth's temperature since Cainozoic times.

Brown et al. [4] propose a quantification of denudation and soil moving (landsliding, collapse, creeping, bioturbation) rates by using in situ-produced cosmogenic nuclides. In soils and alterites of tectonically stable areas, they provided a quantitative description of <sup>10</sup>Be production as a function of depth (exponential decrease). And so, they can infer whether exposure of landforms has or has not been disturbed by transports and deposition of sediments reworked along slopes.

érosion chimique et érosion mécanique. De même, ils montrent le rôle crucial de l'altération des basaltes sur le cycle du CO<sub>2</sub> et celui, important, que joue le cycle du carbone organique dans les régions montagneuses, où il est en grande partie stocké dans les sédiments aval. À partir de tous ces travaux, ils peuvent quantifier les effets des grands phénomènes géologiques sur le climat de notre planète. Ainsi, les grandes périodes de mise en place d'énormes volumes de basaltes influencent sur l'évolution du climat à l'échelle du million d'années. Enfin, les auteurs montrent que la formation des Andes et de l'Himalaya a joué un rôle primordial sur la diminution de la température de la Terre depuis le Cénozoïque.

Brown et al. [4] approchent la quantification des taux de dénudation et des mouvements de surface des sols (glissement, *collapse*, *creeping*, bioturbation) grâce à l'utilisation des nucléides cosmogéniques produits in situ. À partir d'altérites et de sols de régions tectoniquement stables, ils ont obtenu les relations quantifiées de <sup>10</sup>Be en fonction de la profondeur (décroissance exponentielle). Ainsi peuvent-ils déduire si la surface des modèles a été ou non perturbée par des transports et dépôts de sédiments remaniés le long des pentes. Les pertes de matière dues à l'érosion et de leurs nucléides produits in situ peuvent limiter l'usage de ces derniers à des fins de datation.

Berner [3] souligne dans son article le rôle accélérateur des plantes vasculaires dans l'altération des roches silicatées calciques et magnésiennes et, se servant de la modélisation théorique du cycle du carbone, montre que ce rôle de consommation du CO<sub>2</sub> conduit à une chute du CO<sub>2</sub> atmosphérique, qui joue, à son tour, sur un refroidissement et un ralentissement de l'altération contrebalançant le premier effet, le tout conduisant à une stabilisation du CO<sub>2</sub> à des niveaux beaucoup plus bas. D'autres effets de la croissance des plantes vasculaires depuis le Dévonien sont la production de lignine résistante à la biodégradation, permettant ainsi leur enfouissement en plus grande quantité dans le sédiment et donc une production excessive d'O<sub>2</sub> pendant le Permo-Carbonifère. Ainsi, le Permo-Carbonifère a-t-il connu de grands dépôts de charbon et une extension glaciaire par chute du CO<sub>2</sub>.

Gitz et Ciais [14] présentent aussi un article sur le cycle du CO<sub>2</sub> et de son importance dans le système climatique, mais pour des périodes très récentes. Depuis deux siècles, l'utilisation des énergies fossiles

Losses of material and of its in situ-produced nuclides through erosion may limit the use of the latter for dating purposes.

Berner [3] emphasizes the accelerative role of vascular plants on weathering of calcic and magnesian silicate rocks; by using the theoretical carbon cycle modelling, he shows that this role of CO<sub>2</sub> consumption results in a decrease of atmospheric CO<sub>2</sub>, which interacts in its turn on greenhouse cooling and the deceleration of weathering, counterbalancing the acceleration of weathering by plants and leading to a stabilization of CO<sub>2</sub> at much lower levels. Other effects of the rise of trees since the Devonian were the production of microbially resistant lignin, leading to the increased burial of organic matter in sediments and consequently an excessive production of atmospheric O<sub>2</sub> during Permo-Carboniferous times. And so this period was characterized by vast coal deposits and extensive continental glaciation due to low CO<sub>2</sub>.

The paper by Gitz and Ciais [14] is dealing with the CO<sub>2</sub> cycle and its importance in the climatic system, but for very recent periods. Since two centuries, the use of fossil energies and the destruction of forests resulted in an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> by 30%, which increases the principal risk of climate change in the future decades. The regional distribution of natural and anthropic CO<sub>2</sub> fluxes is presented and the underlying bio-geochemical processes are inferred. The authors show all of the uncertainties related to the prediction of the future evolution of atmospheric CO<sub>2</sub> and consequently to possible feedback on climate change.

Meunier [19] also describes the role of plants on basalt weathering in La Réunion Island, particularly on the Si cycle. Studying basaltic flows of different ages, he shows the ability of plants to accumulate up to several percents of silicon in their biomass, without the biomass Si stock being a linear function of time. In soils, as plants degrade, Si is restored in the form of phytoliths being markers of climate changes. And so in Brazil, in the upper part of laterites, the average age of phytolith assemblages permits to draw savannah-forest evolutions in an Amazonian country (Salitre).

In ancient laterites from southwestern Australia, subject to present arid to semi-arid Mediterranean climate, Gilkes [13] shows that during the past ca. 1 Myr, pedogenic processes enable surficial precipitation of carbonates, gypsum, halite and silcrete. The highly po-

et la destruction des forêts ont permis une augmentation de 30% du CO<sub>2</sub> atmosphérique, accroissant le risque principal de changement climatique dans les prochaines décennies. Ils abordent la distribution régionale des flux de CO<sub>2</sub> naturels et anthropiques et décrivent les processus bio-géochimiques sous-jacents. Ils montrent toutes les incertitudes qui restent suspendues à la prédiction du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans son évolution future et donc aux rétroactions sur d'éventuels changements climatiques.

Meunier [19] aborde aussi le rôle des plantes dans l'altération des basaltes de la Réunion et notamment sur le cycle du silicium. Se plaçant sur des coulées d'âges différents, il montre que les plantes sont capables d'accumuler jusqu'à plusieurs pour-cent de silice dans leur biomasse, sans pour autant que le stock de silicium dans la biomasse soit une fonction linéaire du temps. Dans les sols, le silicium est principalement restitué sous forme de phytolites lors de la dégradation des plantes, permettant de servir d'indicateurs de changements environnementaux. Ainsi, au Brésil, dans la partie supérieure des latérites, l'âge moyen des assemblages de phytolites permet de tracer les évolutions savane/forêt d'une région d'Amazonie (Salitre).

Dans les vieilles latérites du Sud-Ouest australien, soumises à un climat aride à semi-aride méditerranéen, Gilkes [13] montre, dans le dernier million d'années, les évolutions qui ont permis la précipitation de carbonates, gypse, halite et silcrite près de la surface. Le manteau d'altération, très poreux, essentiellement constitué à l'origine de kaolinite et de sesquioxydes de fer, est très favorable au transfert de nappes chargées en sels, remobilisant les métaux lourds, avec des conséquences dramatiques sur les cultures et la vie animale. De même, certaines eaux de drainage peuvent contenir de fortes concentrations en Al dissous, particulièrement toxiques pour la végétation.

Si l'article de Gilkes montre comment l'héritage de vieilles latérites constituées lors de périodes plus humides influe sur la vie de l'homme et l'environnement, lors d'un changement climatique dans le Récent, Chabaux et al. [5] soulignent, pour une vieille latérite cuirassée du Burkina Faso, que les mobilisations d'éléments et les transferts restent toujours actifs de nos jours. Pour cela, ils mettent en évidence des déséquilibres radioactifs <sup>238</sup>U–<sup>234</sup>U–<sup>230</sup>Th dans tous les niveaux des profils étudiés. L'existence de fractionnements géochimiques récents ne remet pas en cause

rous weathering mantle, originally composed of kaolinite and Fe-sesquioxides, is favourable to transfers of hypersaline groundwaters remobilising heavy metals, which results in dramatic consequences on crops and animals. Likewise, some drainage waters may contain extremely high concentrations of dissolved Al, particularly toxic for vegetation.

Whilst Gilkes shows how the inheritance of ancient laterites, formed under more humid conditions, intervenes on mankind life and environment at the time of a climate change in the Recent, Chabaux et al. [5] emphasize that for an ancient iron-crust laterite from Burkina Faso, elemental mobilization and transfers remain still active nowadays. They point out <sup>238</sup>U–<sup>234</sup>U–<sup>230</sup>Th radioactive disequilibria in all the levels of the studied profiles. The occurrence of geochemical fractionations does not question the ancient history of this laterite, but obviously shows that the 'lateritic skin' is still living.

Finally, I wish to thank the authors who in addition to delivering the invited lecture dedicated their time in writing a revised contribution within the requested deadlines. I thank the reviewers for the time spent. Last, I am very grateful to Hélène Paquet for the scientific editing of this thematic issue.

Daniel Nahon

CEREGE,

University Aix–Marseille-3, BP 80,  
13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

CIRAD,

43, rue Scheffer,  
75116 Paris cedex 16, France

la vieille histoire de cette latérite, mais montre clairement que l'épiderme latéritique vit toujours.

Pour terminer, je souhaite remercier les auteurs qui, au-delà de l'exposé pour lequel ils avaient été invités, ont pris le temps d'en rédiger une version écrite «reviewée» dans les temps impartis. Je remercie les «reviewers» anonymes du temps qu'ils ont consacré à ce travail de relecture. Enfin, tous mes remerciements vont à Hélène Paquet qui a assuré la production éditoriale de ce volume.

Daniel Nahon  
CEREGE,  
université Aix-Marseille-3,  
BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

CIRAD,  
43, rue Scheffer,  
75116 Paris cedex 16, France

## Références / References

- [1] H. Arsandeaux, Contribution à l'étude des latérites, C. R. Acad. Sci. Paris 149 (1909) 682–685.
- [2] H. Arsandeaux, Nouvelle contribution à l'étude des latérites, C. R. Acad. Sci. Paris 150 (1910) 1687–1701.
- [3] R.A. Berner, The rise of trees and their effects on Paleozoic atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, C. R. Geoscience 335 (2003) 1173–1177.
- [4] E.T. Brown, F. Colin, D.L. Bourlès, Quantitative evaluation of soil processes using in situ-produced cosmogenic nuclides, C. R. Geoscience 335 (2003) 1161–1171.
- [5] F. Chabaux, O. Dequincey, J.-J. Lévêque, J.-C. Leprun, N. Clauer, J. Riotte, H. Paquet, Tracing and dating recent chemical transfers in weathering profiles by trace-element geochemistry and <sup>238</sup>U–<sup>234</sup>U–<sup>230</sup>Th disequilibria: the example of Kaya lateritic profile (Burkina-Faso), C. R. Geoscience 335 (2003) 1219–1231.
- [6] J. Chautard, P. Lemoine, Sur le phénomène de la latéritisation, Bull. Soc. géol. France VIII (4) (1908) 35–38.
- [7] E. de Chetelat, Le modelé latéritique de l'Ouest de la Guinée française, Rev. Géogr. Phys. géol. Dyn. 21 (1938) 5–120.
- [8] F. Dixey, Lateritization in Sierra Leone, Geol. Mag. (1920) 211–220.
- [9] B. Dupré, C. Dessert, P. Oliva, Y. Goddérès, J. Viers, L. François, R. Millot, J. Gaillardet, Rivers, chemical weathering and Earth's climate, C. R. Geoscience 335 (2003) 1141–1160.
- [10] C.S. Fox, The bauxite and aluminous laterite occurrences of India, Ind. Geol. Surv. Mem. 49 (1923) 1–287.
- [11] C. France-Lanord, M. Evans, J.-E. Hurtez, J. Riotte, Annual dissolved fluxes from Central Nepal rivers: budget of chemical erosion in the Himalayas, C. R. Geoscience 335 (2003) 1131–1140.
- [12] R.M. Garrels, C.L. Christ, Solutions, Minerals and Equilibria, Harper and Row Publication, New York, 1965, 450 p.
- [13] B. Gilkes, S. Lee, B. Singh, The imprinting of aridity upon a lateritic landscape: an illustration from southwestern Australia, C. R. Geoscience 335 (2003) 1207–1218.
- [14] V. Gitz, P. Ciais, Effets d'amplification des changements, d'usage des sols sur le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique, C. R. Geoscience 335 (2003) 1179–1198.
- [15] S.S. Goldich, A study in rock weathering, J. Geol. 46 (1938) 17–58.
- [16] H. Harrassowitz, Laterit, Forsch. Geol. Palaeontol., Berlin 4 (1926) 253–566.
- [17] T. Holland, The constitution, origin, and dehydration of laterite, Geol. Mag. Decade IV X (1903) 59–69.
- [18] A. Lacroix, Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés, Nouv. Arch. Muséum 5 (1913) 255–356.
- [19] J.-D. Meunier, Le rôle des plantes dans le transfert du silicium à la surface des continents, C. R. Geoscience 335 (2003) 1199–1206.
- [20] G. Millot, Géologie des Argiles, Masson, Paris, 1964, 499 p.
- [21] D.R. Montgomery, Predicting landscape-scale erosion rates using digital elevation models, C. R. Geoscience 335 (2003) 1121–1130.
- [22] E.S. Simpson, Notes on laterite in Western Australia, Geol. Mag. 49 (1912) 399–406.
- [23] L. Woolnough (W.G.), The physiographic significance of laterite in Western Australia, Geol. Mag. (1918) 385–393.