



## Minéralogie environnementale

### *Environmental mineralogy*

#### Avant-propos

La Minéralogie est une des disciplines les plus anciennes, tirant ses origines des premières observations naturalistes ainsi que de l'importance des minéraux dans le développement des civilisations. Et pourtant, comme le montrent les domaines couverts lors du colloque international consacré à la Minéralogie environnementale, à partir duquel ce volume thématique des *Comptes Rendus Geoscience* a été conçu, les connaissances se sont spectaculairement étendues vers de nombreux domaines impliquant l'environnement, l'énergie, la santé humaine et les processus élémentaires qui sont responsables, à l'échelle moléculaire, des phénomènes globaux qui régissent l'évolution de la surface de la Terre. La Minéralogie environnementale est étroitement liée à la Géochimie de basse température, l'Hydrologie et l'Écologie microbienne, utilisant les instruments et outils théoriques les plus récents de la Chimie, de la Biologie moléculaire et de la Physique du solide. On dispose maintenant d'informations à l'échelle atomique et moléculaire sur les matériaux de la surface de la Terre et leurs interactions avec l'Hydrosphère, l'Atmosphère et la Biosphère, offrant une vision renouvelée sur ce qui est parfois appelé la « Zone Critique ». À des aspects fondamentaux sur la façon dont fonctionne la surface de la Terre et qui concernent les processus d'altération et érosion, la formation des sols, l'évolution des bassins versants et de façon plus générale les grands cycles biogéochimiques, s'ajoute un intérêt pour la façon dont les activités anthropiques vont amener des forçages perturbant ce système, notamment en relation avec l'exploitation et l'utilisation des ressources terrestres. Il convient, en effet, de maîtriser les bases scientifiques qui permettent de gérer les défis environnementaux et énergétiques majeurs qui impactent la Zone Critique et ses 7 milliards d'habitants. On peut citer la gestion des ressources fragiles que sont les sols et les eaux, qui servent à l'alimentation de l'humanité, l'extraction des ressources

#### Foreword

Mineralogy is one of the oldest scientific fields because of its origins in the earliest studies of natural science and the importance of minerals in the development of civilization. However, as illustrated by the topics covered at the international meeting devoted to Environmental Mineralogy, on which this thematic issue of *Comptes Rendus Geoscience* is based, this field has been extended considerably to exciting new areas involving the environment, energy, human health, and molecular-scale processes responsible for global phenomena that drive the evolution of Earth's surface. Environmental Mineralogy is closely linked to low-temperature geochemistry, hydrogeology, and microbial ecology, and makes use of the experimental and theoretical methods of physical chemistry, molecular biology, and condensed matter physics, particularly those that provide atomic- and molecular-scale information about natural materials at Earth's surface and their interactions with the Hydrosphere, Atmosphere, and Biosphere in what is sometimes referred to as the "Critical Zone". In addition to providing fundamental understanding of Earth surface processes, which include weathering and erosion, dynamics of soils and sediments, functioning of catchment areas, and, more generally, global biogeochemical cycles, Environmental Mineralogy is concerned with the impact of anthropogenic activities on the global ecosystem, particularly those that exploit the use of natural resources and generate chemical contaminants and pollutants. There is a clear need for better scientific understanding of how to manage the major environmental and energy challenges that are increasingly impacting the Critical Zone and its 7 billion human inhabitants. These challenges include sustainable management of fragile resources such as soils and waters, the need to provide sufficient food and clean water for Earth's inhabitants, an extraction of mineral and energy

minérales et énergétiques de façon à minimiser ses impacts environnementaux, ou encore la maîtrise des processus de pollution des milieux et la gestion des déchets. Pour faire connaître ces travaux, l'Académie des sciences a organisé un colloque international à l'Institut de France les 14 et 15 septembre 2009. Le programme a été défini par le comité scientifique auquel participaient Jean Dercourt, Zdenek Johan, Ghislain de Marsily, Georges Pedro, Gordon E. Brown, Jr., Georges Calas et Adrien Herbillon.

Ce volume thématique des *Comptes Rendus Geoscience*, dédié à la Minéralogie Environnementale, a été réalisé à la suite de ce colloque, à l'instigation de Jean Dercourt, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. Il est l'occasion d'offrir une vision d'ensemble des approches expérimentales et théoriques qui permettent la caractérisation des variations structurales et compositionnelles des matériaux de l'environnement, à des niveaux de détail qui n'étaient pas accessibles il y a seulement quelques décennies. On peut ainsi suivre l'évolution des minéraux dans un milieu complexe où ils se forment, se dégradent, contribuent à contrôler les grands cycles biogéochimiques, mais aussi sont des acteurs majeurs du développement durable. Ce volume se situe dans la continuité de plusieurs volumes thématiques des *Comptes Rendus Geoscience* consacrés aux sciences de l'Environnement : « Transferts de matière à la surface de la Terre » (Nahon, 2003), « Le Callovo-Oxfordien du bassin de Paris » (Trouiller, 2006), « Histoire climatique des déserts d'Afrique et d'Arabie » (Lézine, 2009), « Hydro-géophysique » (Auken et al., 2009). Ce volume regroupe en quatre parties les communications présentées, chaque partie permettant de décrire des processus fondamentaux et de nouveaux concepts de la Minéralogie environnementale, tout en montrant des implications environnementales et sociétales majeures des minéraux.

L'article introductif (Brown et Calas, 2011 dans ce numéro) est l'occasion de présenter les principaux concepts de la Minéralogie environnementale et ses relations avec les Sciences de l'Environnement à l'échelle moléculaire. L'accent est mis sur les processus chimiques et biologiques qui permettent la libération des contaminants/polluants dans la Zone Critique et sur l'importance de la spéciation des éléments chimiques à l'échelle moléculaire dans le contrôle de leur mobilité, toxicité et biodisponibilité potentielle. Ce domaine est relativement nouveau. Il a progressivement émergé depuis une quinzaine d'années (Brown et al., 1995 ; Muller et al., 1995), démontrant que les interactions entre surfaces minérales, solutions aqueuses, matière organique naturelle et organismes microbiens jouent un rôle-clé dans la composition des environnements de la surface de la Terre, y compris dans la concentration et la spéciation des contaminants et polluants métalliques. Cet article discute également du rôle des minéraux dans les cycles biogéochimiques des éléments, ainsi que du rôle des nanoparticules dans l'environnement. Des exemples-clés concernent quelques éléments dont l'impact sur l'environnement est reconnu (Hg, As, U).

resources from Earth in a manner that minimizes environmental and human health impacts or the control of contamination processes and the management of the wastes generated by our societies. In order to address some of these issues, the French Academy of Science organized an international meeting held on September 14 and 15, 2009 at the Institut de France in Paris. The program was defined by the scientific committee consisting of Jean Dercourt, Zdenek Johan, Ghislain de Marsily, Georges Pedro, Gordon E. Brown, Jr., Georges Calas, and Adrien Herbillon.

This thematic issue of *Comptes Rendus Geoscience*, dedicated to Environmental Mineralogy, is the result of this international meeting that was instigated by Jean Dercourt, Perpetual Secretary of the French Academy of Sciences. It provided the opportunity to review some of the most modern instrumental methods and theoretical modeling tools that allow characterization of the structural and compositional variations of complex environmental samples at unprecedented levels of detail not possible several decades ago. These analytical and theoretical tools make it possible to follow the evolution of minerals in complex environments, including their degradation, and the roles they play in major biogeochemical cycles and in the sustainable development of human activities. This thematic issue complements several other issues of *Comptes Rendus Geoscience* devoted to environmental science topics, including "Transfers of Matter at the Earth's Surface" (Nahon, 2003), "The Callovo-Oxfordian of the Paris Basin" (Trouiller, 2006), "Climatic History of the African and Arabian Deserts" (Lézine, 2009), and "Hydrogeophysics" (Auken et al., 2009). The present issue gathers the communications presented at the Paris meeting, arranged in four sections, each of which discusses fundamental processes and new concepts in Environmental Mineralogy, as well as some of the major environmental and societal impacts of minerals.

The introductory article (Brown and Calas, 2011) discusses some of the major concepts of Environmental Mineralogy and its close relationship to Molecular Environmental Science. The focus is on chemical and biological processes that release contaminants and pollutants in the Critical Zone and on the importance of molecule-level speciation in controlling their mobility, toxicity, and potential bioavailability. This field is relatively new, having developed over the past 15 years (Brown et al., 1995; Muller et al., 1995) in response to the growing recognition that interactions among mineral surfaces, aqueous solutions, natural organic matter, and microbial organisms play critical roles in determining the composition of Earth's near-surface environment, including the concentration and speciation of inorganic contaminants and pollutants. This article also discusses the role of minerals in the biogeochemical cycling of elements as well as the role of mineral nanoparticles in the environment. Also presented, are brief overviews of the environmental mineralogy of mercury, arsenic, and uranium, all of which have significant environmental impacts.

### *Interfaces minéral-solutions : de la réactivité aux processus de pollution*

Les articles de Jolivet et al. (2011 dans ce numéro) et Charlet et al. (2011 dans ce numéro) présentent les processus élémentaires qui régissent la réactivité des minéraux au travers de leurs surfaces et interfaces, en relation, notamment, avec l'Hydrosphère et la Biosphère. Le premier article (Jolivet et al., 2011 dans ce numéro) présente une revue sur le comportement de l'aluminium en solution aqueuse et dans les minéraux, issue de la table ronde que J.P. Jolivet avait animée pendant le colloque sur la Minéralogie environnementale, sur les relations entre processus chimiques et processus minéralogiques (du laboratoire au terrain). Cet article montre l'importance des polycations ainsi que des nanophases présentes en solution, permettant d'expliquer l'originalité du comportement de l'aluminium par rapport au silicium et au fer ferrique, trois des plus importants constituants des minéraux d'altération à la surface de la Terre. L'article souligne également l'importance des conditions de formation, non seulement sur la nature des phases mais également sur la taille et la morphologie des particules minérales et sur le rôle essentiel que ces modifications exercent sur la réactivité des minéraux dans l'environnement. L'article de Charlet et al. (2011 dans ce numéro) décrit certains des mécanismes à l'origine de la pollution environnementale et du piégeage des éléments lourds, en présentant le cas particulier de l'arsenic. Ces auteurs montrent en quoi la catastrophe environnementale du Bangladesh et des deltas d'Asie du Sud-Est – qui affecte plus de 100 millions de personnes – a comme origine des réactions largement contrôlées par les minéraux des sédiments et des sols, au travers de processus d'absorption ou de précipitation de As. Ces auteurs discutent également du rôle majeur joué par les nanophases à base de Fe(II) et Fe(III), dans le piégeage et la libération de As, au travers du couplage entre les équilibres redox de l'arsenic et du fer, assisté par une médiation microbienne. Un aspect particulièrement important de cet article est de montrer que ces études minéralogiques ouvrent la voie à de nouvelles approches pour la remédiation des sols et le traitement de l'eau.

### *Interaction entre les minéraux et l'activité biologique*

Des avancées spectaculaires ont été faites pour comprendre les liens étroits qui existent entre activité biologique, matière organique générée par cette activité et minéralogie et géochimie des éléments impliqués dans les processus de basse température. La contribution de Vaughan et Lloyd (2011 dans ce numéro) illustre ces liens étroits, en utilisant le fer comme exemple pour montrer l'importance de cette activité biologique dans l'accélération des réactions d'oxydation, notamment dans le cas des sulfures et arséniures de fer, si importants dans la formation des drainages miniers acides. Au contraire, d'autres microorganismes favorisent la réduction des oxyhydroxydes de Fe(III). Cette activité biologique s'accompagne de la formation de biofilms bactériens, qui génèrent des microenvironnements amenant la précipitation de minéraux spécifiques. Les processus de biominéralisation sont

### *Mineral-water interfaces: from reactivity to pollution processes*

The articles by Jolivet et al. (2011) and Charlet et al. (2011) present overviews of the basic processes that govern mineral reactivity with a focus on the nature of their surfaces and interfaces and with special attention to the Hydrosphere and Biosphere. The contribution by Jolivet et al. (2011) presents a review of the behavior of aluminum in aqueous solutions and minerals. It results from the roundtable that J.P. Jolivet chaired at the Environmental Mineralogy meeting on the relationships between chemical and mineralogical processes (from laboratory to field). This article shows the importance of polycations and nanophases in aqueous solutions, the presence of which explain the peculiar behavior of aluminum relative to silicon and ferric iron, three of the most important elements incorporated into weathering products at Earth's surface. This article also discusses the importance of formation conditions on the types, sizes, and morphologies of minerals and the key roles these variations play in the reactivity of minerals in the environment. The article by Charlet et al. (2011) describes some of the mechanisms responsible for the release of environmental pollutants as well as processes responsible for their sequestration, using arsenic as the main example. They discuss the environmental disaster caused by arsenic in groundwater in Bangladesh and South-East Asia deltas, which affects more than 100 million persons in this region, and point out that the problem originates from chemical reactions largely controlled by As adsorption/precipitation processes involving minerals in sediments and soils. These authors also discuss the role played by the Fe(II) and Fe(III)-bearing nano-phases in As sorption and release as a result of the coupling between the redox equilibria of arsenic and iron, mediated by microbial organisms. A particularly important aspect of this article is that these mineralogical studies have resulted in new approaches for soil remediation and water treatment.

### *Interaction between minerals and biological activity*

Spectacular headway has been made in understanding the close links that exist between biological activity, the organic matter generated by this activity, and the mineralogy and geochemistry of the elements involved in low-temperature processes. The article by Vaughan and Lloyd (2011) illustrates these close links, using iron as an example to show the importance of biological activity in accelerating iron oxidation reactions in iron sulphides and arsenides, which are important sources of acid mine drainage. In contrast, other microorganisms favor the reduction of Fe(III) in Fe-oxyhydroxides. This biological activity leads to the formation of bacterial biofilms, which can generate microenvironments that result in precipitation of specific minerals. The mechanism of biomineralization is the subject of the article by Benzerara et al. (2011), who discuss how such minerals can sequester heavy metals. Biological activity can influence many aspects of mineral formation, from the solution to the kinetics of crystal growth. The studies reviewed by

traités par Benzerara et al. (2011 dans ce numéro) qui discutent le rôle de ces minéraux dans la séquestration des métaux lourds. L'activité biologique peut influencer de nombreux aspects de la formation des minéraux, depuis la solution jusqu'à la cinétique de croissance cristalline. Les études présentées par Benzerara et al. (2011 dans ce numéro) montrent l'importance potentielle de la diversité génétique des populations microbiennes responsables de la biominéralisation, particulièrement dans les conditions extrêmes de concentration en polluants. Enfin, l'article de Bottero et al. (2011 dans ce numéro) discute l'influence des nanoparticules sur l'activité biologique d'une grande variété d'êtres vivants. La spécificité de l'impact des nanoparticules provient de mécanismes variés, comme les phénomènes redox et les processus photochimiques, produisant des espèces actives d'oxygène qui peuvent être génotoxiques. Cependant, la diversité des nanoparticules d'origine anthropique, ainsi que les difficultés de connaître leurs effets sur une espèce donnée rendent nécessaire une évaluation plus systématique des impacts des nanoparticules dans les écosystèmes, par exemple, en suivant leur toxicité le long de la chaîne trophique.

#### *Minéraux, témoins de la formation et de l'évolution des sols*

Les connaissances sur les conditions de formation et d'évolution des sols ont progressé avec le développement des méthodes analytiques et numériques permettant de déterminer la spéciation des éléments et la nature des défauts dans les minéraux – y compris dans des phases mal cristallisées – et de quantifier les variations de composition isotopique. Balan et al. (2011 dans ce numéro) montrent la complémentarité des approches analytiques et numériques dans la caractérisation des minéraux de la famille de la kaolinite et des oxyhydroxydes de Fe/Al fréquemment associés dans les sols et qui sont particulièrement importants dans les latérites. Ils montrent également la possibilité de suivre les mécanismes de transformation des minéraux dans les environnements de base température, en étudiant les modifications des propriétés cristalochimiques des minéraux le long des profils d'altération. Il est également possible d'obtenir des âges de formation de minéraux d'altération, ce qui amène des contraintes importantes sur les paléo-environnements. L'article de Fritsch et al. (2011 dans ce numéro) présente une synthèse régionale du bassin amazonien, montrant la formation et la dégradation spectaculaire des sols amazoniens, au travers de processus qui représentent un cas d'école des interactions entre les fleuves et les sols dans un environnement emblématique. Une analyse combinant l'étude systématique de profils d'altération, où l'étude minéralogique est couplée à la détermination de la spéciation de Fe et Al permet de suivre ces éléments non seulement dans le sol mais aussi dans les eaux de surface, où ils peuvent se trouver sous forme de complexes organo-métalliques. Cette approche multi-échelle permet de mieux comprendre l'histoire récente du bassin amazonien au travers d'un modèle intégré adapté, à l'évolution des sols en milieu tropical humide. L'article de Stucki (2011) dans ce numéro montre comment utiliser les données précises sur les propriétés redox du fer dans les sols et les sédiments, pour

Benzerara et al. (2011) show the potential importance of genetic diversity of the microbial populations responsible for biomineralization, particularly under extreme conditions resulting from high concentrations of pollutants. Finally, the article by Bottero et al. (2011) discusses the influence of nanoparticles on the biological activity of a diversity of living organisms. The specificity of the impact of nanoparticles results from various mechanisms such as redox and photochemical processes, producing reactive oxygen species that can be genotoxic. However, the large diversity of nanoparticles of anthropogenic origin and the lack of knowledge about their effects on a given organism illustrate the need for a more systematic evaluation of the impacts of nanoparticles in ecosystems, which could be achieved by following their toxicity along the whole trophic chain.

#### *Minerals, witnesses of the formation and evolution of soils*

Knowledge of the formation and evolution conditions of soils has progressed with the development of analytical and theoretical tools that provide information on the speciation of elements and the nature of the defects in minerals – including poorly crystalline phases – and allow the quantification of variations of isotopic composition. Balan et al. (2011) show the complementarity of analytical and numerical approaches in characterizing kaolinite minerals and associated Fe/Al oxyhydroxides, which are particularly important in lateritic soils. They also show the possibility of following the mechanisms of transformation of minerals in low temperature environments by studying the modifications of crystal-chemical properties of minerals along soil profiles. It is also possible to obtain absolute formation dates of soil minerals, which places important constraints on paleoenvironments. The article by Fritsch et al. (2011) presents a regional synthesis of the Amazon Basin, discussing the formation and spectacular degradation of Amazonian soils through processes that clearly illustrate the diversity of interactions between rivers and soils in an environment of major interest. An analysis combining a systematic study of weathering profiles and the determination of Fe- and Al-speciation provides a way to follow these elements not only in the soils but also in surface waters, where they can be transported as organo-metallic complexes. This multi-scale approach provides unique information on the recent history of the Amazonian Basin with an integrated model adapted to the evolution of soils in wet tropical environments. The article by Stucki (2011) discusses Fe redox properties in soils and sediments, which can lead to better understanding of past and present-day environmental processes. Here also, the activity of micro-organisms is a major parameter, resulting in reduction/oxidation reactions that can cause major modifications of the functioning of soils. The nature of the interactions between redox reactions and biological activity directly affects the reversibility of these reactions and thus raises the possibility of redox cycles that modify soil functions. In the article by Cismasu et al. (2011), new data are presented on the structure and compositional variations of natural ferrihydrites, which are ubiquitous, poorly crystalline phases, the structure of which is based

mieux comprendre les processus environnementaux passés et présents. Ici aussi, l'activité des micro-organismes est un paramètre majeur, aboutissant à des réactions de réduction/oxydation qui causent des modifications majeures du fonctionnement des sols. La nature des interactions entre des réactions redox et l'activité biologique conditionne la réversibilité de ces réactions et donc souligne la possibilité de cycles redox qui vont modifier le fonctionnement des sols. L'article de [Cismasu et al. \(2011 dans ce numéro\)](#) présente des données nouvelles sur la structure et les variations de composition des ferrihydrites naturelles, phases ubiquistes mal cristallisées, dont la structure est basée sur des nano-oxydes de fer hydratés. La combinaison de données obtenues par la diffraction des rayons X de haute énergie utilisant le rayonnement synchrotron, la spectroscopie XANES et la microscopie X en transmission par balayage montre le rôle important que jouent les impuretés sur la taille des particules et leur désordre structural. Ces impuretés peuvent d'ailleurs aussi modifier la réactivité de surface des ferrihydrites naturelles.

#### *Minéralogie et stratégie de stockage des déchets*

Le stockage des déchets radioactifs ainsi que la nécessaire séquestration à long terme du carbone ont ouvert de nouveaux domaines de recherche en Sciences de l'Environnement. En raison des longues périodes de temps nécessaires pour évaluer la stabilité des matrices et des produits de réaction ainsi que les processus géochimiques dans les sites de stockage, il est important de comparer les matrices de stockage de déchets radioactifs ou les produits des réactions de carbonatation avec des analogues naturels. [Ewing \(2011 dans ce numéro\)](#) discute l'importance de la gestion des actinides mineurs, notamment le plutonium. L'immobilisation de ces éléments peut être effectuée en utilisant des minéraux de la famille des pyrochlores, pouvant être également utilisés pour fabriquer des combustibles nucléaires. Des progrès majeurs ont été accomplis dans la compréhension de la stabilité des matrices en comparant échantillons naturels et échantillons artificiellement irradiés. Ewing montre que certaines compositions peuvent être stables sous de fortes doses de rayonnements alpha, ce qui optimise le choix des matrices de stockage spécifiques pour le plutonium et les autres actinides mineurs. L'utilisation de données minéralogiques pour définir de nouvelles matrices de stockage de déchets radioactifs est aussi présentée par [Montel \(2011 dans ce numéro\)](#). En utilisant les principes cristalochimiques pour prédire les phases minérales stables vis-à-vis de l'altération et de l'irradiation, Montel discute des choix possibles pour de nouvelles céramiques qui pourraient accommoder de façon plus stable les déchets radioactifs. Les contraintes liées au milieu géologique permettent d'écartier des minéraux qui ne seraient pas stables dans les conditions d'un stockage géologique profond. Dans une autre contribution relative aux matrices de stockage de déchets nucléaires, [Libourel et al. \(2011 dans ce numéro\)](#) montrent l'intérêt des analogues naturels pour comprendre la stabilité des verres sur des durées historiques, archéologiques ou géologiques. Si les compositions des verres sont éloignées des matériaux technologiques, les durées des processus d'altération

on hydrated iron nano-oxides. The combination of data obtained by synchrotron-based high energy total X-ray diffraction and pdf (partial radial distribution function) analysis, XANES spectroscopy, and scanning transmission X-ray microscopy demonstrates the major role played by impurities (Al, Si, C) on particle size and structural disorder. These impurities can also modify the surface reactivity of natural ferrihydrites.

#### *Mineralogy and strategy of storage of the waste*

The storage of the radioactive waste as well as the need for long-term carbon sequestration is a new field of investigation in Environmental Mineralogy. Comparison of synthetic radioactive waste forms and the products of mineral carbonation reactions with natural analogues provides new research directions for Environmental Mineralogy because of the importance of long time periods in assessing the stability of waste matrices and products and the geochemical processes in a geological storage site. [Ewing \(2011\)](#) discusses the importance of the management of the minor actinides, in particular plutonium. The immobilization of these elements can be accomplished by using minerals of the pyrochlore family, which can also be used to design new nuclear fuels. Major progress has been achieved in understanding matrix stability by comparing natural samples and artificially irradiated samples. Ewing shows that certain compositions may be stable under high alpha-radiation doses, which optimizes choices of specific storage matrices for plutonium and other minor actinides. The use of mineralogical data to define new matrices for radioactive waste storage is also presented by [Montel \(2011\)](#). Using crystal chemical principles to predict minerals that are resistant to alteration and irradiation, Montel discusses possible choices for new ceramics that could stably accommodate radioactive waste. Major constraints are provided by careful examination of the geological context, which allows elimination of minerals that are not stable in a deep geological repository. In another contribution related to nuclear waste matrices, [Libourel et al. \(2011\)](#) discuss the use of ancient analogues to understand the stability of glasses on historic, archaeological, and geological time scales. If the compositions of glasses are far from those encountered in technological materials, the duration of alteration processes are often comparable to those of geological storage predicted by safety assessments studies. The investigation of old glasses provides a unique test of the robustness of the models predicting long-term stability of nuclear glasses. In the final contribution, [Guyot et al. \(2011\)](#) discuss the role of environmental mineralogy in the geologic storage of CO<sub>2</sub>. Here also, a rigorous comparison of experimental data with observations on natural systems is necessary to identify mineral carbonation processes with acceptable reaction kinetics and to avoid the generation of unwanted byproducts. The pilot sites recently instrumented should allow the acquisition of original data that will facilitate this effort.

In conclusion, we wish to thank the Meeting Management Service of the French Academy of Science for their exemplary handling of this international meeting, as well as the scientific committee and all who made scientific

potentiels sont souvent comparables à celles prévues dans les calculs de sûreté. L'étude de verres anciens permet ainsi de tester les modèles qui prédisent la stabilité à long terme des verres nucléaires. Dans la dernière contribution, Guyot et al. (2011 dans ce numéro) discutent le rôle de la minéralogie environnementale sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Ici aussi, une comparaison rigoureuse entre des données expérimentales et l'observation des systèmes naturels est nécessaire pour identifier les processus de minéralisation du carbone possédant des cinétiques acceptables ou pour éviter la génération de sous-produits non désirés. Les sites pilotes récemment installés devraient permettre l'acquisition de données originales qui rendront possible cette comparaison.

Pour terminer, nous souhaitons remercier le service des Colloques de l'Académie des Sciences pour la gestion exemplaire de ce colloque international ainsi que le Comité Scientifique et tous ceux qui ont fait des présentations scientifiques à ce colloque pour leurs contributions. La qualité des discussions pendant cette réunion a certainement influencé les manuscrits présentés dans ce numéro spécial. Nous remercions les auteurs pour la rédaction d'articles synthétiques qui prolongent l'exposé pour lequel ils avaient été invités. Nous sommes particulièrement reconnaissants au service des Comptes Rendus, à Hélène Paquet et Arlette Soulacroup, pour leur aide qui a permis d'assurer la production éditoriale de ce volume thématique. Enfin, nous remercions les organisations suivantes pour le soutien financier de ce colloque international, qui était placé sous le Parrainage de Madame la Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche : le Commissariat général au Développement durable, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (Ademe), l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (Andra), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (Cea), le Centre National de la Recherche scientifique (Cnrs) et l'Institut National des Sciences de l'Univers (Insu), l'Institut National de la Recherche Agronomique (Inra) et l'Institut de Recherche pour le Développement (Ird).

## Références

- Auken, E., Guérin, R., de Marsily, G., Sailhac, P., 2009. Hydrogeophysics-Hydrogéophysique. *C. R. Geoscience* 341, 795–799.
- Balan E., Fritsch, E., Allard, T., Morin, G., Guillaumet, M., Delattre, S., Blanchard, M., Calas, G., 2011. Spectroscopic investigation and theoretical modeling of kaolinite-group minerals and other low-temperature phases. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Benzerara, K., Miot, J., Morin, G., Ona-Nguema, G., Skouri-Panet, F., Férard, C., 2011. Significance, mechanisms and environmental implications of microbial biomineralization. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Bottero, J.Y., Auffan, M., Rose, J., Mouneyrac, C., Botta, C., Labille, J., Masion, A., Thille, A., Chaneac, C., 2011. Manufactured metallic nanoparticles: properties and perturbing mechanisms of their biological activity in ecosystems. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Brown Jr., G.E., Calas, G., 2011. Environmental mineralogy – understanding element behavior in ecosystems. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Brown Jr., G.E., Chianelli, R., Stock, L., Stults, R., Sutton, S.R., Traina, S.J., 1995 (Eds.) *Molecular Environmental Science: Speciation, Reactivity, and Mobility of Environmental Contaminants*, Report of the DOE Molecular Environmental Science Workshop, 1995, Airlie Center, VA, SLAC Publication SLAC-R-95-477, Menlo Park, CA, 125 p.
- Charlet, L., Morin, G., Rose, J., Wang, Y., Auffan, M., Burnol, A., Fernandez-Martinez, A., 2011. Reactivity at mineral-water interfaces, redox processes, and arsenic transport in the environment. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Cismasu, C.A., Michel, F.M., Taciuc, A.P., Tyliczszak, T., Brown Jr., G.E., 2011. Compositional and structural aspects of naturally occurring ferrihydrite. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Ewing, R.C., 2011. Safe management of actinides in the nuclear fuel cycle: role of mineralogy. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Fritsch, E., Balan, E., Do Nascimento, N.R., Allard, T., Bardy, M., Bueno, G., Derenne, S., Melfi, A.J., Calas, G., 2011. Deciphering the weathering processes using environmental mineralogy and geochemistry: Towards an integrated model of laterite and podzol genesis in the Upper Amazon Basin. A model of soil evolution. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Guyot, F., Daval, D., Dupraz, S., Martinez, I., Menez, B., Sissmann, O., 2011. CO<sub>2</sub> geological storage: the environmental mineralogy perspective. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).

- Jolivet, J.-P., Chanéac, C., Chiche, D., Cassaignon, S., Durupthy, O., Hernandez, J., 2011. Basic concepts of the crystallization from aqueous solutions: the example of aluminum oxy(hydroxi)des and aluminosilicates. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Lézine, A.M., 2009. Climatic history of the African and Arabian deserts-Histoire climatique des déserts d'Afrique et d'Arabie. *C. R. Geoscience* 341, 569–574.
- Libourel G., Verney-Carron A., Morlok A., Gin S., Sterpenich J., Michelin A., Neff, D., Dillmann P., 2011. The use of natural and archeological analogues for understanding the long-term behavior of nuclear glasses. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Montel, J.-M., 2011. Minerals and design of new waste forms for conditioning nuclear waste. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Muller, J.P., Manceau, A., Calas, G., Allard, T., Ildefonse, P., Hazemann, J.-L., 1995. Crystal-chemistry of kaolinite and Fe-Mn oxides – relation with formation conditions of low-temperature systems. *Am. J. Sci.* 295, 1115–1155.
- Nahon, D., 2003. Transferts de matière à la surface de la Terre. Material transfers at the Earth's surface. *C. R. Geoscience* 335, 1101–1107.
- Stucki, J.W., 2011. A review of the effects of iron redox cycles on smectite properties. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).
- Trouiller, A., 2006. Le Callovo-Oxfordien du bassin de Paris : du contexte géologique à la modélisation de ses propriétés – The Callovo-Oxfordian of the Paris Basin: from its geological context to the modelling of its properties. *C. R. Geoscience* 338, 815–823.
- Vaughan, D.J., Lloyd, J.R., 2011. Mineral-organic-microbe interactions: environmental impacts from molecular to macroscopic scales. *C.R. Geoscience* 343 (this issue).

Georges Calas\*  
 Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux  
 Condensés (IMPMC), université Pierre-et-Marie-Curie,  
 75232 Paris cedex 05, France  
 Université Paris-Diderot, IPGP, CNRS,  
 Case 115, 4, place Jussieu, 75232  
 Paris cedex 05, France

Gordon E. Brown Jr.  
 Department of Geological and Environmental Sciences,  
 Stanford University, Stanford, CA 94305-2115, États-Unis

Department of Photon Sciences and Stanford Synchrotron  
 Radiation Lightsource, SLAC National Accelerator  
 Laboratory, Menlo Park, CA 94025, États-Unis

\*Auteur correspondant.  
 Email addresses: Georges.Calas@imPMC.jussieu.fr  
 (Georges Calas),  
 gordon.brown@stanford.edu (Gordon E. Brown, Jr.).

Received 4 November 2010

Accepted 3 January 2011