

## Oceanography

# Ocean-continent transition Transition océan-continent

### Avant-propos

Au mois de septembre 2007, un congrès sur la transition océan–continent (TOC) dans les marges passives a été organisé à Paris. Le but de cette rencontre était de faire le point sur les données géophysiques et géologiques acquises dans les marges profondes, de mettre en évidence les principales questions scientifiques liées à la rupture continentale et de promouvoir des collaborations transdisciplinaires en vue de favoriser l'échange d'informations entre la communauté scientifique, l'industrie et les institutions gouvernementales travaillant sur le droit de la mer. La réunion a été parrainée par le CNRS–Insu, l'Ifremer, le BRGM, BP, ExxonMobil, Petrobras, Shell, Statoil, Total, l'IFP et soutenu par l'institut océanographique, la Société géologique de France et l'Académie des sciences. Des données provenant du monde entier ont été présentées et discutées au cours de la réunion, ce qui a permis de faire le point sur les principales questions débattues aujourd'hui dans l'étude des marges passives. Ce fascicule thématique des Comptes Rendus de l'Académie des sciences est issu des présentations orales et des discussions animées conduites au cours de la réunion. L'objectif de ce numéro spécial est de faire le point sur les connaissances acquises sur les TOC en mettant l'accent sur l'architecture, la formation et l'évolution des zones de rift continental et des marges passives.

### *Origine et but du fascicule thématique*

L'une des questions majeures encore en suspens en sciences de la terre est celle de savoir comment les

### Foreword

A workshop dedicated to the “ocean–continent transition” (OCT) in rifted margins has been organized in September 2007 in Paris. The aim of this workshop was to review the geophysical and geological data acquired on deep rifted margins, to highlight the major scientific questions related to continental breakup, to promote transdisciplinary collaborations and to foster the exchange of information between the scientific community, industry and governmental institutions working on the law of the sea. The meeting was sponsored by CNRS–Insu, Ifremer, BRGM, BP, ExxonMobil, Petrobras, Shell, Statoil, Total, IFP and supported by the institut océanographique, the Société géologique de France and the Académie des sciences. Data sets from all around the world have been presented and discussed during the meeting, which enabled to make the point on the major questions debated today in the study of rifted margins. This thematic issue directly rose after the oral contributions and animated discussions led during the meeting. The purpose of the special issue is to make the point on the knowledge acquired on OCTs focused on the architecture, formation and evolution of continental rift zones and rifted margins.

### *Origin and purpose of the thematic issue*

One of the major questions still in suspense in Earth Sciences is how continents rift and eventually break apart leading to the formation of continental rifted margins and oceanic basins. Rifted margins, and in particular OCTs, represent the locus that archives the

continents sont étirés au cours du *rifting* et comment ces processus mènent à la formation de marges continentales passives et de bassins océaniques. Les marges passives, et en particulier les TOC, représentent le lieu archivant les mécanismes complexes qui conduisent à la formation de rides d'accrétion océanique. La compréhension de la formation et de l'évolution géologique de ces objets reste donc un grand défi scientifique.

Afin de contraindre et d'analyser les processus géologiques liés à la déchirure continentale, les scientifiques disposent de différentes techniques d'imagerie géophysique et de méthodes de forage dans les océans actuels, mais aussi de cartographie géologique sur les rifts et ophiolites fossiles à terre. Les données acquises directement sur les marges (actuelles et fossiles) permettent d'appuyer et de tester différents modèles conceptuels, analogiques ou numériques proposés pour expliquer et quantifier les processus de *rifting*. Bien que les modèles archétypes de cisaillement pur et de cisaillement simple dominant toujours les débats, des modèles plus avancés et plus complexes sont également utilisés pour expliquer les observations. Le principal moteur de la recherche actuelle dans les marges profondes provient de l'industrie pétrolière. La découverte de réservoirs importants dans les marges profondes a, en effet, permis d'augmenter le nombre d'acquisitions de données et de financer de nombreuses études scientifiques.

Sur la base d'observations, d'expérimentations et d'approches analytiques et grâce à un nombre croissant de données de qualité (géophysiques/géochimiques et géologiques), de nombreuses questions ont déjà pu être résolues. Toutefois, afin de continuer à progresser, il devient évident qu'une compréhension globale des systèmes d'extension et des processus associés ne peut être obtenue que si modélisateurs, observateurs et expérimentateurs coordonnent leurs activités et collaborent, afin de développer des projets de recherche multidisciplinaires. Nous pensons que l'approche interdisciplinaire est la clé pour continuer à progresser pour répondre aux questions relatives au *rifting* à la déchirure continentale et à la formation des océans. Le congrès « transition océan–continent » et ce fascicule thématique de la série *Geoscience* ont été organisés dans cette perspective.

#### *Contenu du fascicule thématique*

Les contributions présentées dans ce fascicule thématique aident à résumer l'état des connaissances acquises sur diverses questions majeures toujours en suspens dans la communauté des marges.

complex mechanisms leading to the formation of oceanic spreading centres. Therefore, understanding the formation and evolution of these geological objects remains a major scientific challenge.

To constrain and analyze the geological processes related to continental breakup, scientists dispose of different geophysical image techniques and drilling methods in present-day oceans, and geological mapping of ancient rifts and ophiolites on land. The data directly acquired on margins (present and fossil) enable to support or test the various conceptual, analogue or numerical models proposed to explain and quantify rifting processes. Although the archetype pure and simple shear models still dominate the discussions, more advanced and complex models combining pure and simple shear are used to explain the observations. The major driving force in the present investigation of deep margins comes from the hydrocarbon industry. The discovery of major reservoirs in deep margins enhanced data acquisition and scientific studies of deep margins financed by oil companies.

Based on observational, experimental and analytical approaches and thanks to an increasing number of good quality data (geophysical/geochemical and geological) numerous questions could be answered in the past. However, to continue advancing, it becomes obvious that a global understanding of extensional systems and related processes can only be obtained if modellers, observers and experimentalists coordinate their activities, collaborate and develop multidisciplinary research projects. We believe that the interdisciplinary approach is the key to progress and answers the questions related to how continents break apart and oceans form. The “ocean–continent transition” workshop and this thematic issue of the series *Geoscience* have been organized in this perspective.

#### *Content of the thematic issue*

The contributions presented in this special issue help summarize the state of knowledge acquired on various major unanswered questions.

In a review contribution, Bernoulli and Jenkyns [1] provide a careful historical overview of the concepts that have been developed to explain the OCT genesis. The authors summarize the evolution of concepts and ideas from before the advent of plate tectonics dealing with the geosyncline hypothesis and to the Steinmann trinity and subsequent modern models.

Important discoveries have been made in the 1980s when the margins of Galicia Bank, offshore Portugal, and of Vøring, offshore Norway, have been drilled

Dans une revue historique, Bernoulli et Jenkyns [1] fournissent un aperçu historique minutieux des concepts qui ont été développés au cours du temps, pour expliquer la genèse du concept des TOC. Les auteurs résument ainsi l'évolution des connaissances et des idées d'avant l'avènement de la tectonique des plaques en traitant l'hypothèse du géosynclinal, la trinité de Steinmann et finissant par les modèles modernes proposés récemment dans la littérature.

D'importantes découvertes ont été faites dans les années 1980, lorsque les marges du Banc de Galice, au large du Portugal, et de Vøring, au large de la Norvège, ont été forées au cours des *legs ocean drilling program* (ODP) 103 et 104. Si la rupture continentale (« *breakup* ») le long de la marge norvégienne se caractérise par un volcanisme abondant, le *rifting* le long de la marge de Galice est presque amagmatique et se distingue par l'exhumation du manteau sous-continental. Sur la base de ces études conduites sur deux marges archétypes, il est devenu évident, pour la communauté scientifique, que les modèles classiques utilisés pour définir les marges passives sont trop simplistes pour décrire correctement toutes les observations. Les forages ont notamment révélé que les croûtes continentale et océanique ne sont pas strictement juxtaposées dans la marge profonde. Les processus de *rifting* ne conduisent pas à l'accrétion océanique directement après l'amincissement et la rupture de la croûte continentale. Un domaine transitionnel existe entre les deux types de croûte, nommé transition océan–continent (TOC). Malgré les efforts importants entrepris au cours des 20 dernières années, sa composition et sa formation sont toujours débattues. Quelles que soient les données considérées (sismique réflexion, sismique réfraction, magnétisme, gravimétrie), toutes les mesures géophysiques indiquent que ce domaine ne correspond ni à de la croûte continentale, ni à de la croûte océanique.

La contribution de Minshull [4] met en évidence ce fait et décrit les signaux géophysiques qui caractérisent le socle transitionnel dans les TOC. Par exemple, les TOC sont caractérisées par des anomalies magnétiques de faible amplitude et désorganisées dont l'interprétation reste controversée. Les variations de vitesses d'onde P avec la profondeur diffèrent également des modèles classiques des croûtes continentale ou océanique. Par conséquent, selon les auteurs, les TOC correspondent soit à de la croûte océanique issue d'une accrétion lente, soit à de la croûte continentale étirée, découpée et affectée par des intrusions magmatiques ou encore à un domaine d'exhumation du manteau. Minshull montre que les valeurs des vitesses d'onde P communément observées dans les TOC sont cependant bien expliquées, par des

during legs ocean drilling program (ODP) 103 and 104. If breakup along the Norwegian margin is characterized by abundant volcanism, rifting along Galicia Bank is almost amagmatic and distinguished by exhumation of subcontinental mantle. On the basis of the studies led on these two archetype margins, it became obvious for the scientific community that the classical models used to define passive margins are too simplistic to describe all the observations. Drilling notably revealed that continental and oceanic crusts are not strictly juxtaposed in deep oceans. Rifting does not lead to direct oceanic accretion after thinning and disrupting continental crust. A transitional domain exists between the two types of crust, named ocean–continent transition (OCT). Despite the major effort undertaken in the last 20 years, its composition and formation is still debated. Whatever the regarded data (seismic reflexion, seismic refraction, magnetism, gravimetry), all geophysical measurements indicate that this domain does not strictly correspond to continental or oceanic crust.

Minshull's contribution [4] highlights this fact and describes the geophysical signals which characterize the transitional basement in the OCT. For instance, the OCT is characterized by low amplitude, disorganized magnetic anomalies whose interpretation remains controversial. The observed P wave velocity variations with depth also differ from classical models of oceanic or continental crust. Hence, depending on the authors, the OCT corresponds to either slow-spreading accreted oceanic crust or to continental crust stretched, cut and intruded by magmatic materials or to a domain of mantle exhumation. Minshull shows that the P wave velocities values commonly observed in the OCTs can be best explained by variously serpentized exhumed mantle associated or not with underplated mafic rocks.

Likewise, rifting has long been described by a monophasic extensional process. However, classic end-member models such as pure and simple shear are often not adequate to account for the observed complexity. Recent studies along the Iberia–Newfoundland, the Norwegian or the South Atlantic margins proved that, on the contrary, rifting is a complex polyphase and polyprocesses mechanism. However, the different phases of extension, their evolution, succession and potential interaction in the rift system are still not fully constrained. Based on the Iberia margin characteristics, Fletcher et al. [3] investigate the processes involved in the final rifting evolution. They aim to test two major numerical models, the upwelling divergent flow and the pure shear models, to better explain the genesis of a wide zone of continental mantle exhumed without significant magmatism in the Iberia OCT. If the

niveaux de roches mantelliques, serpentinisées de façon variable, et associées ou non avec des roches mafiques sous-plaquées.

De même, le *rifting* a longtemps été décrit comme correspondant à un processus d'extension lithosphérique monophasé. Cependant, les modèles classiques extrêmes, tels que cisaillement pur et cisaillement simple, ne sont pas suffisants pour tenir compte de la complexité observée. Des études récentes le long des marges conjuguées Ibérie et Terre-Neuve, de la marge norvégienne et des marges de l'Atlantique Sud ont prouvé que, au contraire, le *rifting* est un mécanisme complexe polyphasé et polyprocessus. Toutefois, les différentes phases d'extension, leur évolution, leur succession et leurs interactions potentielles dans le système de rift ne sont pas encore contraintes. Sur la base des caractéristiques de la marge Ibérique, Fletcher et al. [3] étudient les processus impliqués dans l'évolution finale du *rifting*. Afin de mieux expliquer la genèse d'une vaste zone de manteau exhumé sans magmatisme notable dans la TOC Ibérique, Fletcher et al. testent deux principaux modèles numériques (*upwelling divergent flow* et cisaillement pur). Si les auteurs n'excluent pas l'influence des mécanismes de cisaillement pur, ils montrent que les processus de flux ascendant divergeant doivent également jouer un rôle important au cours de l'extension lithosphérique.

Cependant, comme Fletcher et al. le remarquent dans leur contribution, si la localisation et la partition des contraintes au cours du *rifting* caractérisent la plupart des histoires de *rifting*, les facteurs qui influent sur ces caractéristiques de déformation ne sont pas encore contraints ; par exemple, sont-ils liés à des structures héritées, à des profils rhéologiques spécifiques, à des faiblesses préexistantes, à des structures de déformation, à du magmatisme synrift, etc. ?

De plus, les « marges appauvries en magma » ont longtemps été décrites comme non volcaniques, avec une frontière nette entre un domaine continental déformé de façon uniforme et un domaine océanique. Cette vue classique s'est révélée être fautive. Ces marges présentent en fait un certain volume de roches magmatiques et leurs domaines profonds sont caractérisés par des zones de transition qui évoluent progressivement vers l'accrétion océanique. Ces observations soulèvent un certain nombre de questions concernant les forces motrices de l'extension lithosphérique et les mécanismes responsables de ces architectures, le rôle de la croûte inférieure dans le contrôle de la déformation, le calendrier et le style de dénudation du manteau et la transition de l'exhumation mantellique à l'accrétion océanique. La contribution de Cannat et al. [2] vise à examiner les principaux concepts et questions concernant l'accrétion lente et ultralente au

authors do not exclude the influence of pure shear mechanisms, they show that the upwelling divergent flow may also play a significant role during lithospheric extension.

However, as Fletcher et al. also note in their contribution, if strain localization and partitioning throughout rifting have been proved to characterize most of the rifting histories, the factors which influence these deformation characteristics are still not constrained; for example, are they related to inherited structures, to specific rheologic profiles, to preexisting weaknesses, to the deformation structures (high angle, detachment and/or rolling hinge faults), to synrift magmatism, etc?

Furthermore, magma-poor margins have long been described as nonvolcanic, with a sharp boundary between a uniformly deformed continental domain and an oceanic one. This classical view has been proved to be wrong. These margins show evidences of a certain volume of magmatic material and their deep domains are characterized by transitional zones evolving gradually into slow-spreading oceanic environment. These observations raise a number of unanswered questions concerning the driving forces and extensional mechanisms responsible for such architectures, the role of the lower crust in controlling deformation, the timing and style of mantle denudation and the transition from mantle exhumation to slow-seafloor spreading. Cannat et al. [2] contribution aims to review key concepts and questions concerning slow and ultraslow ridges. The review highlights the importance of transdisciplinary collaborations and gives some keys which help better constrain the complex rift to drift transition. The authors propose a four-thermal stages evolution, which permits the transition from rifting to accretion.

More specifically, based on the Woodlark Basin, the Alula-Fartak and Cape Range Fracture Zones, Taylor et al. [5] investigate the nucleation of the transform faults, which connect the oceanic spreading centers. Contrary to the classical definition that states that these structures are inherited from offsets generated at final rifting or breakup time, Taylor et al.'s contribution highlights that the transform zones do not propagate into the deep margins structure. Instead, they are restrained to the oceanic domains and form during or after oceanic spreading begins.

#### Acknowledgements

The authors of this thematic issue are gratefully thanked. Their contributions are of much interest. The reviewers also helped improve the issue with their thoughtful and constructive comments. We also thank

niveau des dorsales. Leur revue des connaissances met en évidence l'importance de l'approche transdisciplinaire et donne quelques clés qui aident à mieux comprendre la complexité de la transition du rift à la dorsale. Les auteurs proposent notamment une évolution thermique en quatre étapes qui permet la transition du *rifting* à l'accrétion océanique.

Plus spécifiquement, sur la base du bassin de Woodlark, des zones de fracture d'Alula-Fartak et de Cap Range, Taylor et al. [5] étudient la nucléation des failles transformantes qui relient les centres d'accrétion océanique. Contrairement à la définition classique qui indique que ces structures sont héritées de décalages générés à la fin du *rifting* ou au moment du *breakup*, Taylor et al. soulignent que les zones transformantes ne se propagent pas dans la structure profonde des marges. Au contraire, elles sont limitées aux domaines océaniques et se forment pendant ou après le début de l'accrétion océanique.

#### Remerciements

Les participants de ce fascicule thématique sont grandement remerciés. Leurs contributions sont d'un grand intérêt scientifique. Les collègues ayant expertisé les manuscrits ont également contribué à améliorer ce fascicule grâce à leurs commentaires constructifs et pertinents. Nous remercions également les institutions et les entreprises qui ont parrainé la réunion OCT et nous ont aidé à en faire un succès.

Gwenn Péron-Pinvidic\*

*Norges Geologiske Undersøkelse (NGU),  
Geological Survey of Norway, leiv Eirikssons vei 39,  
7491 Trondheim, Norvège*

Philippe Huchon

*Laboratoire tectonique, université  
Pierre-et-Marie-Curie-Paris-6, T 46-0,  
E2, case courrier 129, 4, place Jussieu,  
75252 Paris cedex 05, France*

Gianreto Manatschal

*Centre de géochimie de la surface,  
École et observatoire des sciences de la terre,  
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France*

\*Auteur correspondant.

Adresses e-mail : [Gwenn.Peron-Pinvidic@ngu.no](mailto:Gwenn.Peron-Pinvidic@ngu.no)  
(G. Péron-Pinvidic),  
[philippe.huchon@upmc.fr](mailto:philippe.huchon@upmc.fr) (P. Huchon),  
[manatschal@illite.u-strasbg.fr](mailto:manatschal@illite.u-strasbg.fr) (G. Manatschal).

the institutions and companies who sponsored the OCT meeting which helped us make it a success.

Gwenn Péron-Pinvidic\*

*Norges Geologiske Undersøkelse (NGU),  
Geological Survey of Norway, leiv Eirikssons vei 39,  
7491 Trondheim, Norvège*

Philippe Huchon

*Laboratoire tectonique, université  
Pierre-et-Marie-Curie-Paris-6, T 46-0,  
E2, case courrier 129, 4, place Jussieu,  
75252 Paris cedex 05, France*

Gianreto Manatschal

*Centre de géochimie de la surface,  
École et observatoire des sciences de la terre,  
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France*

\*Corresponding author

E-mail addresses: [Gwenn.Peron-Pinvidic@ngu.no](mailto:Gwenn.Peron-Pinvidic@ngu.no)  
(G. Péron-Pinvidic),  
[philippe.huchon@upmc.fr](mailto:philippe.huchon@upmc.fr) (P. Huchon),  
[manatschal@illite.u-strasbg.fr](mailto:manatschal@illite.u-strasbg.fr) (G. Manatschal).

**Références**

- [1] D. Bernoulli, H.C. Jenkyns, Ophiolites in ocean–continent transitions: From the Steinmann trinity to seafloor spreading, *C. R. Geoscience 341 (2009) 363–381*.
- [2] M. Cannat, G. Manatschal, D. Sauter, G. Peron-Pinvidic, Assessing the conditions of continental breakup at magma-poor rifted margins: what can we learn from slow-spreading midocean ridges? *C. R. Geoscience 341 (2009) 406–427*.
- [3] R. Fletcher, N. Kusznir, M. Cheadle, Melt initiation and mantle exhumation at the Iberian rifted margin: Comparison of pure-shear and upwelling-divergent flow models of continental breakup, *C. R. Geoscience 341 (2009) 394–405*.
- [4] T. Minshull, Geophysical characterisation of the ocean–continent transition at magma-poor rifted margins, *C. R. Geoscience 341 (2009) 382–393*.
- [5] B. Taylor, A. Goodliffe, F. Martinez, Initiation of transform faults at rifted continental margins, *C. R. Geoscience 341 (2009) 428–438*.