



HAL
open science

Le Sédiment, conteur de la Terre

Marina Rabineau

► **To cite this version:**

Marina Rabineau. Le Sédiment, conteur de la Terre. Stratigraphie. Université de Brest, 2014. tel-03908160

HAL Id: tel-03908160

<https://hal.univ-brest.fr/tel-03908160v1>

Submitted on 20 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le Sédiment, Conteur de la Terre

The Sediment, Storyteller of the Earth



HABILITATION à DIRIGER des RECHERCHES / présentée par
UNIVERSITE DE BREST Marina RABINEAU
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

Mention Sciences de la Terre
Ecole Doctorale des Sciences de la Mer

Préparée à l'Unité Mixte de recherche (n°6538)
Institut Universitaire Européen de la Mer
Domaines Océaniques

Thèse soutenue le 2 Juin 2014, 14h30
devant le jury composé de :

Christian GORINI
Professeur UPMC, Istep
Cécile ROBIN
Maître de conférence, HDR, Université de Rennes 1
Francois ROURE (IFP)
Chercheur IFP, Professeur associé
Sierd CLOETINGH
Professeur, Université d'Utrecht, Netherlands
Rémi ESCHARD
Expert TOTAL, HDR, Paris
Christophe DELACOURT
Professeur, Université de Brest
Laurence DROZ
Chercheur CNRS, HDR, UMR6538, Brest
Gilles LERICOLAIS
Chercheur IFREMER, HDR, Brest



*Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches,
Juin 2014*

**LE SEDIMENT,
CONTEUR DE LA TERRE**

RABINEAU MARINA

CNRS-UMR6538

IUEM, 1 place N. Copernic
29280 Plouzané

marina.rabineau@univ-brest.fr

02-98-49-87-28

02-98-22-42-39

Préambule

Ce Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches résume l'ensemble de mon activité de chercheur CNRS à Brest au laboratoire « Domaines Océaniques » depuis l'obtention de ma thèse de Doctorat de l'Université de Rennes1-IFREMER-IFP, en 2001. Il présente aussi les orientations de mon activité que je souhaite développer dans les années à venir.

Le mémoire est organisé en deux volumes : le premier rassemble mon CV, liste de travaux et tirés à part des publications ; le second est lui-même divisé en deux grandes parties : une partie Bilan et une partie Perspectives, le tout suivi d'une Conclusion et d'un Epilogue.

Le Sédiment, Conteur de la Terre

La place des sédiments est singulière à plus d'un titre dans le monde des géosciences : issus de l'érosion, et résultat de la combinaison des variations paléoclimatiques et des variations du relief, ils sont liés au réseau fluvial, aux intempéries, aux glaciers, qui autorisent leur érosion puis leur transport, et, lorsqu'ils se déposent, permettent l'enregistrement de l'eustatisme et des mouvements tectoniques, celui de la formation des marges et des océans et de leurs mouvements associés, de la dynamique des processus profonds enfin. De la cime de la montagne à la fosse des océans, le sédiment est le compteur de la géodynamique : même son absence est riche d'informations. En place, il conserve tout autant les traces de son origine, des échanges chimiques que celles des vies passées ou présentes. Ainsi, c'est en **Mémoire de la Terre** que je souhaite aborder cet objet géologique tout aussi singulier qu'uniformément répandu.

La première phase de mes travaux sur l'architecture sédimentaire visait ainsi à reconstituer les variations glacio-eustatiques centrées sur les derniers 500,000 ans et ce, essentiellement dans le Golfe du Lion. Ces travaux nous ont permis de démontrer que les séquences de dépôt représentaient l'enregistrement des cycles climatiques de 100,000 ans. Nous avons ensuite proposé de quantifier l'amplitude de variation du niveau marin lors des 5 derniers maxima glaciaires à partir de l'observation directe des paléorivages en corrigeant les profondeurs actuelles de la subsidence post-dépôt. Dans une seconde phase, j'ai étendu mon activité vers des problématiques plus larges et plus diversifiées à la fois dans le temps et dans l'espace ainsi que vers de nouvelles disciplines abordées autour de thématiques complètement nouvelles : de receptacle, le Golfe du Lion - et plus généralement le bassin Liguro-Provençal et ses bassins coalescents - est devenu l'objet d'étude, le grimoire où apprendre à déchiffrer les mouvements de la Terre. L'étude du remplissage sédimentaire a ainsi été élargie à l'échelle du Pliocène, du Messinien et du Miocène (soit les 23 derniers Millions d'années). Le couplage des enregistrements sédimentaires en Mer aux études de Géochimie et de Géomorphologie à terre a permis pour la première fois la quantification des érosions, des flux sédimentaires et de leurs compositions géochimiques du bassin versant du Rhône jusque dans le bassin Liguro-Provençal. L'architecture des bassins sédimentaires a ensuite été étendue jusqu'aux stades initiaux de la formation des marges ce qui a permis de confronter les observations sédimentaires aux travaux de cinématique et de structuration profonde des marges de mes collègues géodynamiciens à l'échelle de la Méditerranée Occidentale, mais aussi en Atlantique Sud, et en particulier sur les marges Brésiliennes. Enfin, mon insertion dans la structure de l'IUEM a favorisé la mise en oeuvre d'une collaboration en géo-microbiologie sur les sédiments du Golfe du Lion, avec mes collègues microbiologistes du LM2E qui nous a permis de mettre en évidence la variabilité d'enregistrement des communautés de bactéries et d'archées en fonction des conditions paléoenvironnementales.

C'est ce cheminement, et les résultats récoltés tout au long, qui constituent la colonne vertébrale du projet de forage GOLD (Gulf Of Lions Drilling), projet éminemment trans et pluridisciplinaire, que nous avons déposé le 1^{er} Avril 2014 à l'IODP :

Probing connections between deep earth and surface processes in a land-locked ocean basin transformed into a giant saline basin: Mediterranean DREAM-GOLD.

C'est aussi ce cheminement, cette **méthodologie holistique** construite tout au long de ce parcours et testée sur le Golfe du Lion, qui me conduira demain, je l'espère, vers d'autres zones géographiques et vers une intégration de nouvelles collaborations interdisciplinaires.

VOLUME 2

LE SEDIMENT, CONTEUR DE LA TERRE

PARTIE 1- BILAN DES RECHERCHE SCIENTIFIQUES

Chapitre I.....	15
Les sédiments : archives des variations Glacio-eustatiques dans le Golfe du Lion.....
1 Etat des lieux au moment des travaux.....	15
2 Quantification des niveaux marins Quaternaires : cycles de 100,000 ans	16
Apports à la paléoclimatologie.....	20
3 Le dernier cycle glaciaire interglaciaire.....	22
4 Fonctionnement des canyons sous-marins.....	24
5 Extension au glacis et à la plaine abyssale.....	27
6 Mise en place des glaciations au cours du Pliocène-Quaternaire	29
ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :	32
AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :.....	33
Chapitre II.....	37
Les sédiments : archives des Flux sédimentaires, Bilan Erosion-Dépôt-Provenance	37
1 Problématique et état des lieux au début des travaux	37
2 Les Bilans de Dépôt dans le Golfe du Lion	39
2-1 Flux au Plioquaternaire.....	39
2-2 Flux au Messinien.....	42
3 Les Bilans de Dépôt dans le Golfe de Valence.....	44
4 Les Sources de sédiments: apports de la géochimie sédimentaire.....	47
5 Lien Terre-Mer : apports de la géomorphologie.....	49
ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :	51
ARTICLES SOUMIS OU EN PREPARATION en rapport avec ce chapitre :.....	52
AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :.....	52
Chapitre III	55
Les sédiments : archives de la Géodynamique, Enseignements sur la formation et l'évolution des bassins et des marges (mouvements verticaux)	55
1 Problématique et état des lieux au moment des travaux	55
2 L'exemple de la Méditerranée Occidentale	58
2-1 Le Sédiment, marqueur paléobathymétrique :.....	58
2-2 Le sédiment, marqueur des mouvements verticaux :.....	60
2-3 Le sédiment, marqueur de la rhéologie :.....	63
ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :	66
ARTICLES EN PREPARATION en rapport avec ce chapitre :.....	66
AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :.....	67
Chapitre IV.....	69
Les sédiments : archives de la vie souterraine !	69

1	Problématique et état des lieux au moment des travaux	69
2	Premières études sur les sédiments du Golfe du Lion et du Var.....	70
	ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :	73
	AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :.....	73

PARTIE 2- PERSPECTIVES

Chapitre V	81
Construction d'une Histoire Géologique et Dynamique d'une marge, l'exemple d'Actions-Marges et du Labex Mer.....	81
1 Lien Profond-Superficiel : Constat et Programme établi dans le cadre de l'action Marge	81
2 Transferts Terre-Mer : Constat et Programme établi dans le cadre du Labex Mer	84
Theme I –Quantification des produits de l'érosion	86
Theme II – Transferts sédimentaires: processus et facteurs de contrôles	86
Theme III- Tracage des sources à partir des sédiments marins : stratigraphie haute résolution, géochimie et paléoenvironnements.....	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES de ce chapitre :	88
Chapitre VI.....	89
La nécessité d'un forage en Méditerranée Occidentale :	89
1 Origine du projet.....	89
2 Projet IODP DREAM-GOLD : Probing deep-earth & surface connections)	117
Chapitre VII	117
Vers une « Action-Marge » au Brésil, collaboration franco- brésilienne à long terme, la suite du Colloque de Buzios	117
1 Le système de l'Amazone : des Forêts jusqu'à la Mer (Amazone Verte et Bleue).....	119
2 Paleoclimat : variabilité Climatique and Paleoceanographie.....	120
3 Des montagnes aux Abysses.....	121
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES de ce chapitre :	123
Chapitre VIII.....	125
Autres pistes de Recherche	125
Description du projet:.....	125
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES de ce chapitre :	128
CONCLUSION	129
Evolution inter-disciplinaire de mes travaux.	129
EPILOGUE	131
Qu'est-ce que diriger des recherches ? Comment ?.....	131

Le devoir d'éthique et de déontologie du chercheur et du directeur de Recherche	131
1) La déclaration sur l'intégrité en Recherche	131
2) La pratique scientifique vise à la connaissance objective.....	132
3) Le problème des publications	132

Préambule : Dans tout ce volume « Bilan et perspective » les références relatives à **nos travaux** sont indiquées **en bleu** tandis que les autres références restent en noir.

LE SEDIMENT, CONTEUR DE LA TERRE ?

La place des sédiments est singulière à plus d'un titre dans le monde des géosciences : issus de l'érosion, et résultat de la combinaison des variations paléoclimatiques et des variations du relief, ils sont liés au réseau fluvial, aux intempéries, aux glaciers, qui autorisent leur érosion puis leur transport, et, lorsqu'ils se déposent, permettent l'enregistrement de l'eustatisme et des mouvements tectoniques, celui de la formation des marges et des océans et de leurs mouvements associés. De la cime de la montagne à la fosse des océans, le sédiment est le compteur de la géodynamique, et même son absence est riche d'informations. En place, il conserve tout autant les traces de son origine, des échanges chimiques que celles des vies passées ou présentes !

Ainsi, c'est en Mémoire de la Terre que je souhaite aborder cet objet « sédiment » tout aussi singulier qu'uniformément répandu.

L'étude sédimentaire des marges vise donc à une meilleure compréhension de l'organisation et des mécanismes de dépôt en 4 dimensions, dans l'espace et dans le temps. Pourquoi et quand a-t-on dépôt ? Quels sont les processus ? Qu'est-ce qui est enregistré et préservé ? Où, sous quelle forme et avec quelle géométrie ? Quelle relation avec la subsidence et la tectonique ? Quelle est l'évolution au cours du temps ? Quels sont les facteurs de contrôle ? Quel est la signification locale, régionale ou globale de ces paramètres et quel est leur effet sur le système sédimentaire (mouvements de la ligne de rivage, érosion, transport, instabilités...) ? Quel est l'impact de ces variations sur la Biosphère (Eucaryotes et Procaryotes) ?

C'est en fait l'histoire géologique que l'on cherche à reconstituer tout en déterminant l'importance relative des différents paramètres (tectonique, climatique, eustatique et hydrodynamique) ayant contrôlé la sédimentation et la préservation des sédiments.

Notons enfin, que ces questions fondamentales sont récurrentes à toutes les échelles de temps et d'espace.

La première phase de mes travaux sur l'architecture sédimentaire visait ainsi à reconstituer les variations glacio-eustatiques centrée sur les derniers 500,000 ans et ce, essentiellement dans le Golfe du Lion. Ces travaux nous ont permis de démontrer que les séquences de dépôt représentaient l'enregistrement des cycles climatiques de 100,000 ans. Nous avons ensuite proposé de quantifier l'amplitude de variation du niveau marin lors des 5 derniers maximums glaciaires à partir de l'observation directe des paléorivages en corrigeant les profondeurs actuelles de la subsidence post-dépôt.

Dans une seconde phase, en 2007, j'ai **étendu mon activité** vers des problématiques plus larges et plus diversifiées à la fois dans le temps et dans l'espace ainsi que vers de nouvelles disciplines abordées autour de thématiques complètement nouvelles : de receptacle, le Golfe du Lion - et plus généralement le bassin Liguro-Provençal et ses bassins coalescents - est devenu l'objet d'étude, le grimoire où apprendre à déchiffrer les mouvements de la Terre.

L'étude du remplissage sédimentaire a ainsi été élargie à l'échelle du Plioquaternaire, du Messinien et du Miocène. Le couplage des enregistrements sédimentaires en Mer aux études de Géochimie et de Géomorphologie à terre a permis pour la première fois la quantification des érosions, des compositions géochimiques et des flux sédimentaires du bassin versant du Rhône jusque dans le bassin Liguro-Provençal. L'architecture des bassins sédimentaires a ensuite été étendue jusqu'aux stades initiaux de la formation des marges ce qui a permis de confronter les observations sédimentaires aux travaux de cinématique et de structuration profonde des marges de mes collègues géodynamiciens à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (Golfe du Lion, Valence, Algérie, Maroc), mais aussi à l'Atlantique Sud, et en particulier sur les marges Brésiliennes. Enfin, mon insertion dans la structure de l'IUEM a favorisé la mise en oeuvre d'une collaboration en géo-microbiologie sur les sédiments du Golfe du Lion, avec mes collègues microbiologistes du LM2E qui a permis de mettre en évidence la variabilité d'enregistrement des communautés de bactéries et d'archées en fonction des conditions paléoenvironnementales.

C'est ce cheminement, et les résultats récoltés tout au long, qui constitue la colonne vertébrale du projet de forage GOLD (Gulf Of Lions Drilling) que nous avons déposé le 1^{er} Avril 2014 : *Probing connections between deep earth and surface processes in a land-locked ocean basin transformed into a giant saline basin: Mediterranean DREAM-GOLD* (Rabineau *et al.*, 2014)

UN LABORATOIRE D'EXCEPTION : LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE

Du fait de sa situation géographique et politique, la Méditerranée Occidentale représente un espace clef dont l'exploration doit et peut permettre des avancées cruciales sur l'étude des marges. La méditerranée représente ce qu'on peut appeler **un laboratoire naturel**, c'est-à-dire un site où peuvent se tester des hypothèses et des modèles d'intérêt fondamental pour les Sciences de la Terre (et non seulement d'intérêt régional) tant sur la formation et l'évolution des marges, l'enregistrement sédimentaire, l'influence de l'héritage tectonique et celui du flux sédimentaire sur les mouvements verticaux.

La Méditerranée Occidentale est, en effet, unique pour plusieurs raisons :

- elle est facilement accessible
- c'est une fenêtre ouverte sur la structuration de différents types de bassins très jeunes et en même temps, c'est un jalon indispensable entre l'ouverture de l'Atlantique et l'évolution de la Téthys : les Pyrénées, qui tiennent un rôle-clef dans la reconstruction des marges atlantiques au niveau de l'Ibérie, ne peuvent se passer de l'interprétation de leur segment languedocien
- La Méditerranée Occidentale comprend un ensemble de marges et de bassins suffisamment divers pour que quantité de processus spécifiques puissent y être étudiés et comparés aussi bien en ce qui concerne les études sédimentaires, paléo-climatiques ou géodynamiques. Elle comprend des marges passives et des marges actives du point de vue sismique et soumises à des contrastes climatiques importants. Les grands deltas (Rhône, Ebre) constituent aussi des zones économiques majeures
- un événement géodynamique majeur, caractérisé par la chute brutale du niveau marin en Méditerranée, a eu lieu lors de la crise de salinité messinienne (~6 Ma). Il nous fournit de formidables repères géologiques et chronologiques, aussi bien en mer qu'à terre, permettant une approche « *source to sink* » afin d'étudier les relations entre érosion, sédimentation et mouvements verticaux associés.
- on peut se fonder sur une base de données universitaire et industrielle extraordinairement riches, et envisager ainsi des collaborations efficaces et des avancées rapides sur des questions déjà bien cernées.

La Méditerranée Occidentale permet d'aborder, dans un périmètre réduit, des thèmes fondamentaux, dans un registre très large et pluridisciplinaire, comme l'a montré l'action *Golfe du Lion* du GDR Marges (2000-2007), dont j'ai été coresponsable avec Christian Gorini de 2004 à 2007). Dans le nouveau Programme Action Marges, nous avons voulu élargir les actions menées sur le Golfe du Lion et appliquer les méthodologies mises au point dans ce chantier à l'ensemble de la Méditerranée Occidentale (2008-2011 et 2012-2016 ; **Figure 0**).

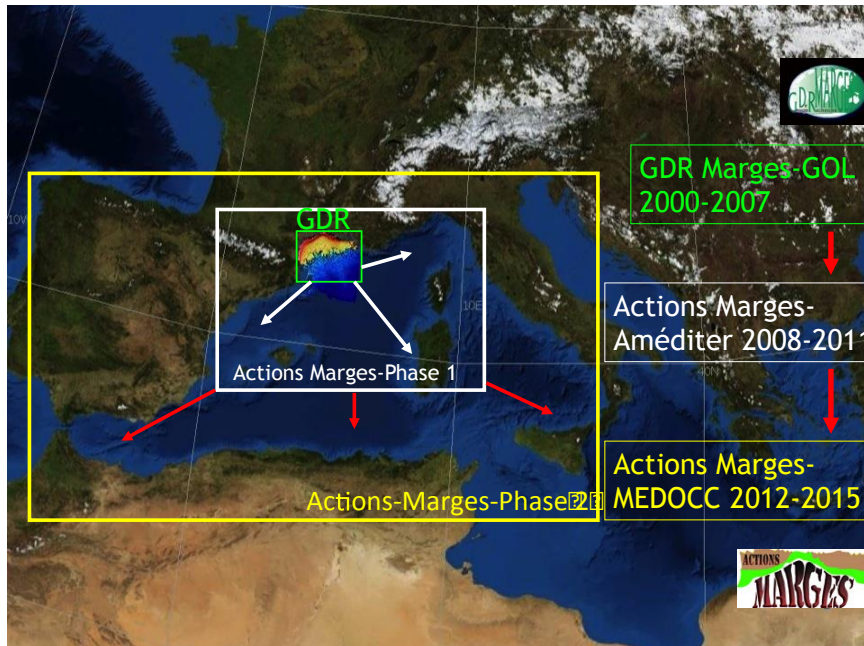


Figure 0 : le Golfe du Lion et la Méditerranée Occidentale dans le GDR Marges et l'Action Marges

Ce bilan de mes travaux 2001-2014 sera présenté dans la partie 1 en quatre chapitres :

- **Chapitre I Les sédiments : archives des variations Glacio-eustatiques dans le Golfe du Lion**
- **Chapitre II Les sédiments : archives des Flux sédimentaires Bilan Erosion-Dépôt-Provenance**
- **Chapitre III Les sédiments : archives de la Géodynamique Enseignements sur la formation et l'évolution des bassins et des marges (mouvements verticaux)**
- **Chapitre IV Les sédiments : archives de la vie souterraine !**

PARTIE 1- BILAN DES RECHERCHE SCIENTIFIQUES

L'ENREGISTREMENT SEDIMENTAIRE SUR LES MARGES : ARCHIVE DES VARIATIONS EUSTATIQUES, DES FLUX, DES MOUVEMENTS VERTICAUX, ET DE LA VIE SOUTERRAINE L'EXEMPLE DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE

Quantify. If whatever it is you're explaining has some measure, some numerical quantity attached to it, you'll be much better able to discriminate among competing hypothesis.

(Carl Sagan, 1996, The Demon Haunted World. Science as a Candle in the Dark)

CHAPITRE I

LES SÉDIMENTS : ARCHIVES DES VARIATIONS GLACIO-EUSTATIQUES

Le Golfe du Lion reçoit les apports du Rhône et des rivières pyrénéo-languedociennes qui drainent les sédiments issus de l'érosion des glaciers montagneux des Alpes et des Pyrénées (**Figure I-1**). Or, ces glaciers montagneux répondent aux phénomènes climatiques d'ordre global (réchauffement- refroidissement). Les variations de l'érosion et les quantités de sédiments transportés par les fleuves sont donc le reflet des variations climatiques globales. Par ailleurs, la plate-forme du Golfe du Lion est une plate-forme à énergie faible à modérée (en comparaison de l'Atlantique par exemple) l'érosion et les remaniements liés aux phénomènes hydrodynamiques (courants tidaux, géostrophiques...) y sont donc limités ; par contre la plate-forme est dominée par les vagues (ce qui va induire des géométries et des faciès particuliers). Enfin, la marge du Golfe du Lion est une marge passive non-orogénique récente (Oligocène), ce qui favorise *a priori* le maintien d'un taux de subsidence non négligeable et constant (et donc la création d'espace pour l'accumulation des sédiments au cours du temps).

1 Etat des lieux au moment des travaux

L'analyse des dépôts quaternaires sur les plateformes en général et sur celle du Golfe du Lion en particulier n'était pas nouvelle au démarrage de ma thèse. Cependant deux modèles principaux bien distincts étaient proposés, donnant lieu à de vifs débats dans la communauté ; ils divergeaient à la fois sur les processus et les périodes de dépôt et sur la durée des séquences de dépôt en jeu.

- J-C. Aloïsi [1986] avait décrit, dans son mémoire de thèse d'Etat, l'organisation et l'empilement sur la plate-forme **languedocienne** de 4 séquences déposées de la côte au rebord de plate-forme pendant une chute progressive du niveau marin relatif. Les séquences sont constituées par les dépôts de « haut à bas niveau » ; les corps sableux littoraux de bordure de plate-forme correspondraient aux rivages des plus bas niveaux. Aloïsi a ainsi proposé d'associer les surfaces d'érosion sommitales des séquences aux grandes phases glaciaires Mindel, Riss et Würm. La période de temps associée à chacune de ces séquences est donc de l'ordre de 100 000 ans.
- M. Tesson et collaborateurs, à partir des années 1990 et jusqu'en 2000, avait ré-interprété les séquences de la plate-forme **rhodanienne** à partir du concept de « *shelf perched lowstand wedges* ». Les séquences sont constituées par des dépôts de chute mais les maxima de bas niveau marin ne sont pas déposés sur la plate-forme ; par ailleurs, les corps sableux de bordure de plate-forme sont interprétés comme des rivages intermédiaires déposés pendant la remontée du

niveau marin relatif. L'ensemble des 5 ou 6 séquences préservées représenterait un seul cycle glaciaire/interglaciaire de 100 000 ans. La période de temps associée à chacune des séquences est donc considérée comme très courte (de l'ordre de 20 000 ans).

A quoi correspondent donc les séquences enregistrées dans le Golfe du Lion ?

Peut-on les rattacher aux cycles glacioeustatiques ?

Quelle est la durée représentée par chaque séquence ?

Ce sont les questions qui se posaient au début de ma thèse, sur la marge du Golfe du Lion en particulier mais en fait aussi sur quasiment toutes les marges du monde.

2 Quantification des niveaux marins Quaternaires : cycles de 100,000 ans

Sur l'ensemble du Golfe du Lion, la zone occidentale languedocienne située sur la plate-forme externe (**Figure I-1**) est la zone la plus favorable à l'enregistrement stratigraphique le plus complet des effets des glaciations et des cycles climatiques successifs car :

- c'est la zone du golfe où la plate- forme est la plus large (de l'amont à l'aval),
- elle se situe à l'aplomb du graben central Oligocène ce qui est favorable, *a priori*, au maintien d'une subsidence non négligeable,
- la subsidence prend la forme d'un basculement vers le large,
- c'est une zone éloignée de la source principale d'apport constituée par le Rhône, ce qui favorise l'enregistrement de la totalité du cycle (le remplissage est plus lent, l'espace n'est pas « immédiatement » comblé, les plus bas niveaux des cycles glacioeustatiques (autour de -100 m) peuvent être enregistrés,
- sa position en bordure de plate- forme permet d'étudier les relations plate- forme—pente et les mécanismes de transferts de sédiments vers le large.

L'analyse des géométries 3D nous a permis de dégager un motif élémentaire de dépôt qui sert à la hiérarchisation des unités sismiques en grandes séquences de dépôt. Ce motif est typiquement constitué par la juxtaposition des deux types de prismes, l'un déposé en amont (PI), l'autre déposé en aval (PII) entre 40 et 70 km par rapport à la côte actuelle.

Le motif de dépôt PI/PII est donc un motif « horizontal » (**Figure I-2**) ([Rabineau et al. 2005](#)). Pour chaque séquence, le prisme PI correspond aux dépôts de « moyen niveau marin relatif » du cycle glacioeustatique. Les prismes PII représentent les dépôts associés à la phase ultime de chute et de plus bas niveau marin (maximum glaciaire).

L'analyse fine des géométries en trois dimensions permet une hiérarchisation des unités sismiques et la reconnaissance du motif de dépôt. Cinq séquences de dépôt majeures (S1 à S5) de 20 à 50 m d'épaisseurs sont ainsi mises en évidence (cycle haute fréquence). Ces 5 séquences sont délimitées par des surfaces d'érosion majeures exprimées de la plate-forme interne à la plate-forme externe et nommée dans l'ordre stratigraphique : D30, D40, D50, D60 et D70 (**Figure I-2**). L'empilement vertical des séquences correspond à un « cycle » basse fréquence lié au basculement de la marge vers le large.

L'analyse stratigraphique fine semblait ainsi montrer une corrélation claire entre la géométrie des dépôts et les cycles de 100 000 ans et valider l'hypothèse d'Aloisi. Il restait à valider ces résultats par une étude de modélisation stratigraphique de la zone. L'hypothèse de Tesson devait être aussi soumise au même test de réfutation.

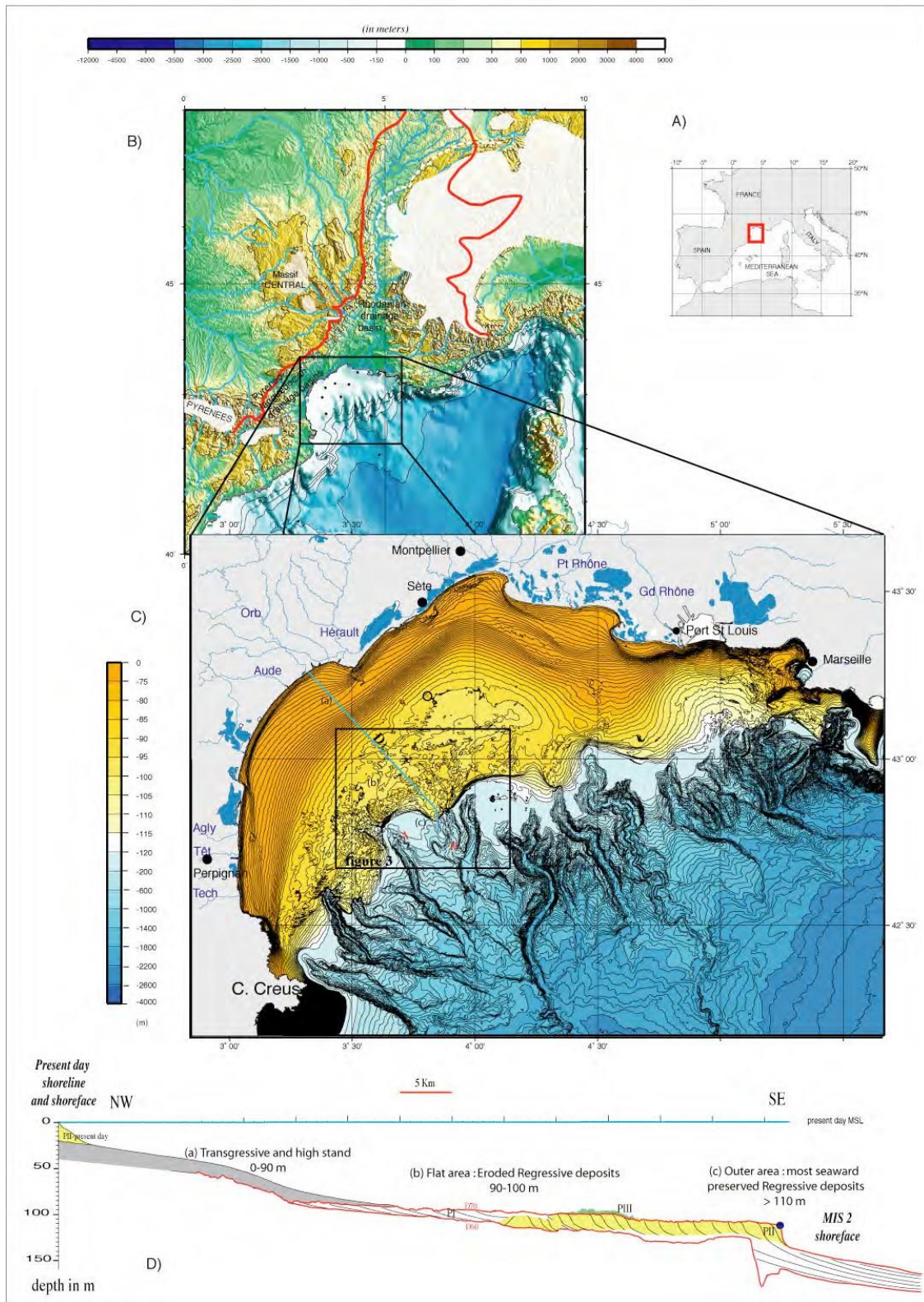


Figure I-1 Le Golfe du Lion (in Rabineau et al., 2006)

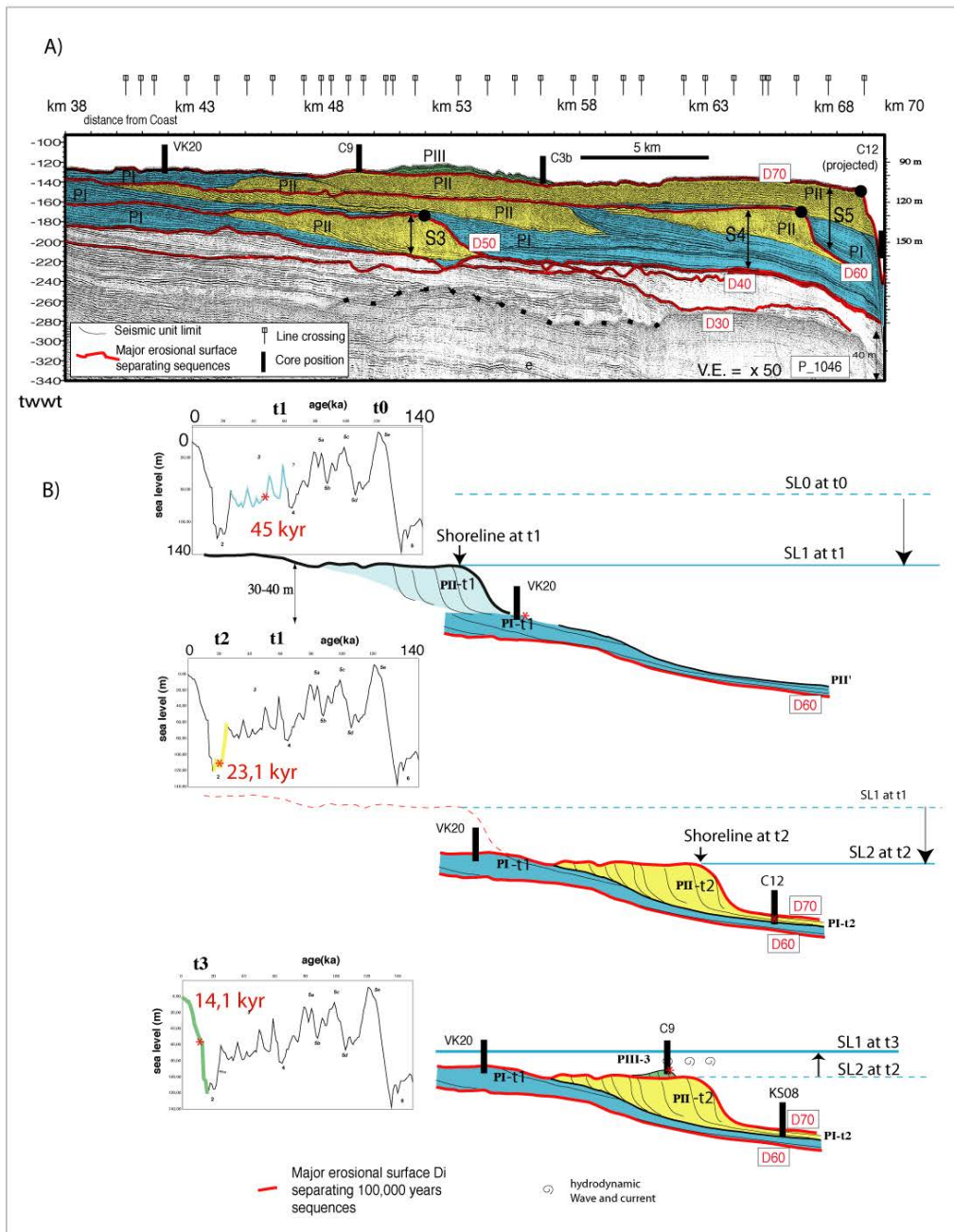


Figure I-2 Enregistrement des séquences sur la plate-forme externe du Golfe du Lion, et mécanisme de formation proposé (Rabineau *et al.*, 2006).

Les simulations stratigraphiques ont pour but de reconstituer les processus de transport et de dépôt des sédiments au cours du temps. Elles sont apparues dans notre approche comme un outil puissant permettant de tester plusieurs scénarios et hypothèses sur les datations des séquences. L'interprétation des séquences comme des cycles de 20 000 ans (Tesson *et al.*) implique un taux de subsidence de plus de 2000 m/Ma (à 70 km de la côte), ce qui n'est pas acceptable dans le contexte d'une marge passive de ce type ; les simulations ont montré, de plus, que cette interprétation ne reproduisait pas les géométries observées. A l'opposé, les simulations réalisées en considérant des cycles de 100 000 ans nous ont permis de reproduire de manière satisfaisante l'architecture de dépôt associée à une subsidence moyenne (totale) de 255 m/Ma (à 70 km de la côte) (**Figure I-3** à comparer avec la **Figure I-2**). Les séquences sédimentaires reconnues correspondent donc, chacune, à un cycle de 100 000 ans. **Les**

surfaces d'érosion D30, D40, D50, D60 et D70 correspondent donc aux maximums glaciaires MIS12, MIS10, MIS8, MIS6, et MIS2 respectivement. L'ensemble des séries examinées remonte donc à environ 500 000 ans pour une épaisseur maximale de 200 m.

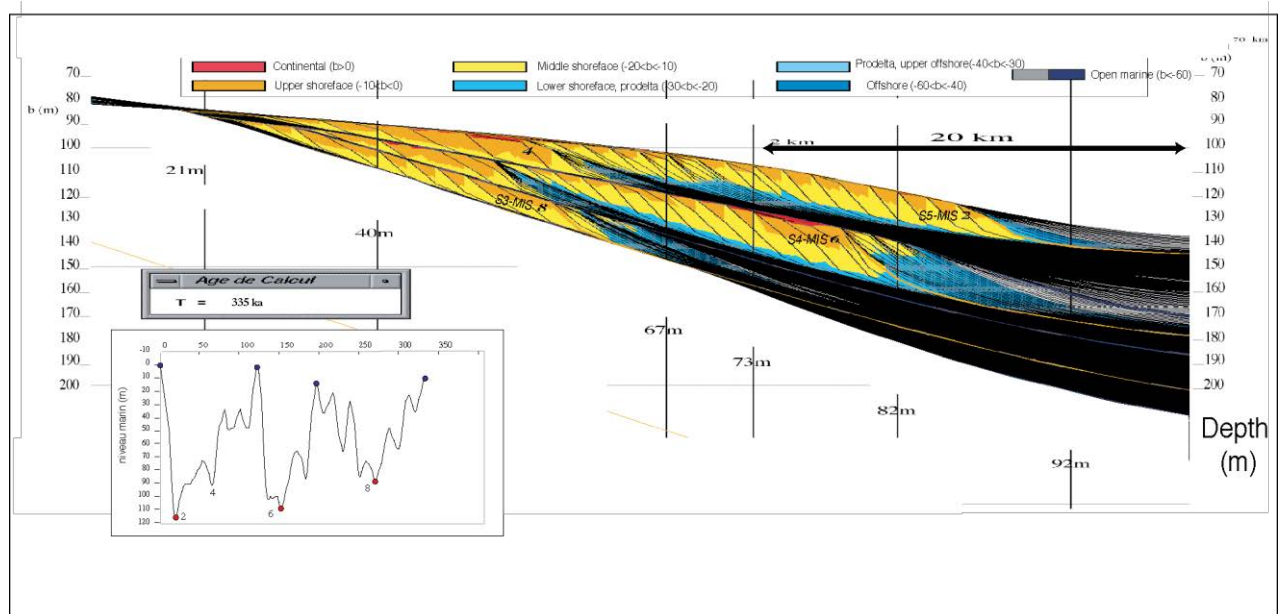


Figure I-3 Simulation stratigraphique des séquences de dépôt associées aux 3 derniers cycles de 100 000 ans (Rabineau et al., 2005)

L'étude d'une zone réduite (30 x 30 km) située dans la zone la plus favorable du Golfe du Lion : la plate-forme externe et le haut de pente de la zone occidentale languedocienne (Figure I-1) (Rabineau, 2001) nous a permis ainsi de démontrer que les séquences de dépôts de la plate-forme correspondaient aux cycles climatiques de 100,000 ans (Rabineau et al. 2005), résolvant ainsi la controverse datant des années 1990 (Tesson vs Aloïsi,).

Apports à la paléoclimatologie

Ces résultats constituent à la fois une validation des courbes eustatiques issues des données isotopiques $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et une voie permettant leur calibration. En effet, en combinant une analyse géométrique 3D détaillée de données sismiques très haute résolution et l'utilisation des simulations stratigraphiques nous pouvons valider, globalement, les courbes eustatiques isotopiques.

Bien au delà, c'est un véritable calage de certains points clefs des courbes eustatiques que nous avons proposé (en l'occurrence, la valeur des minima) (Figure I-4).

En effet, puisque nous visualisons la position des paléo-lignes de rivage et leur basculement au cours du temps dû à la subsidence. Nous pouvons mesurer la profondeur de cette ligne de rivage, la corriger de la subsidence et ainsi obtenir la valeur du niveau marin au moment du dépôt de cette ligne de rivage.

Nous avons ainsi proposé une **évaluation du niveau marin** lors des 5 derniers maxima glaciaires à partir de l'observation directe des paléorivages en corrigeant les profondeurs

actuelles de la subsidence. Nous trouvons, contrairement au consensus admis (mais non démontré), que le **niveau marin est descendu, non pas à 120m, mais à -102 +/- 6m voire moins pendant les trois dernières glaciations (MIS2, MIS6, MIS8) mais qu'il a atteint -150 m +/- 10m pendant les glaciations antérieures (MIS 10 and MIS12) à environ 340 et 434 ka BP (Rabineau *et al.*, 2006). Ce changement d'amplitude pourrait ainsi correspondre à un cycle de 400 000 ans de Milankovich (Rabineau *et al.*, 2006 EPSL) mais il faudrait un enregistrement plus long pour pouvoir le démontrer.**

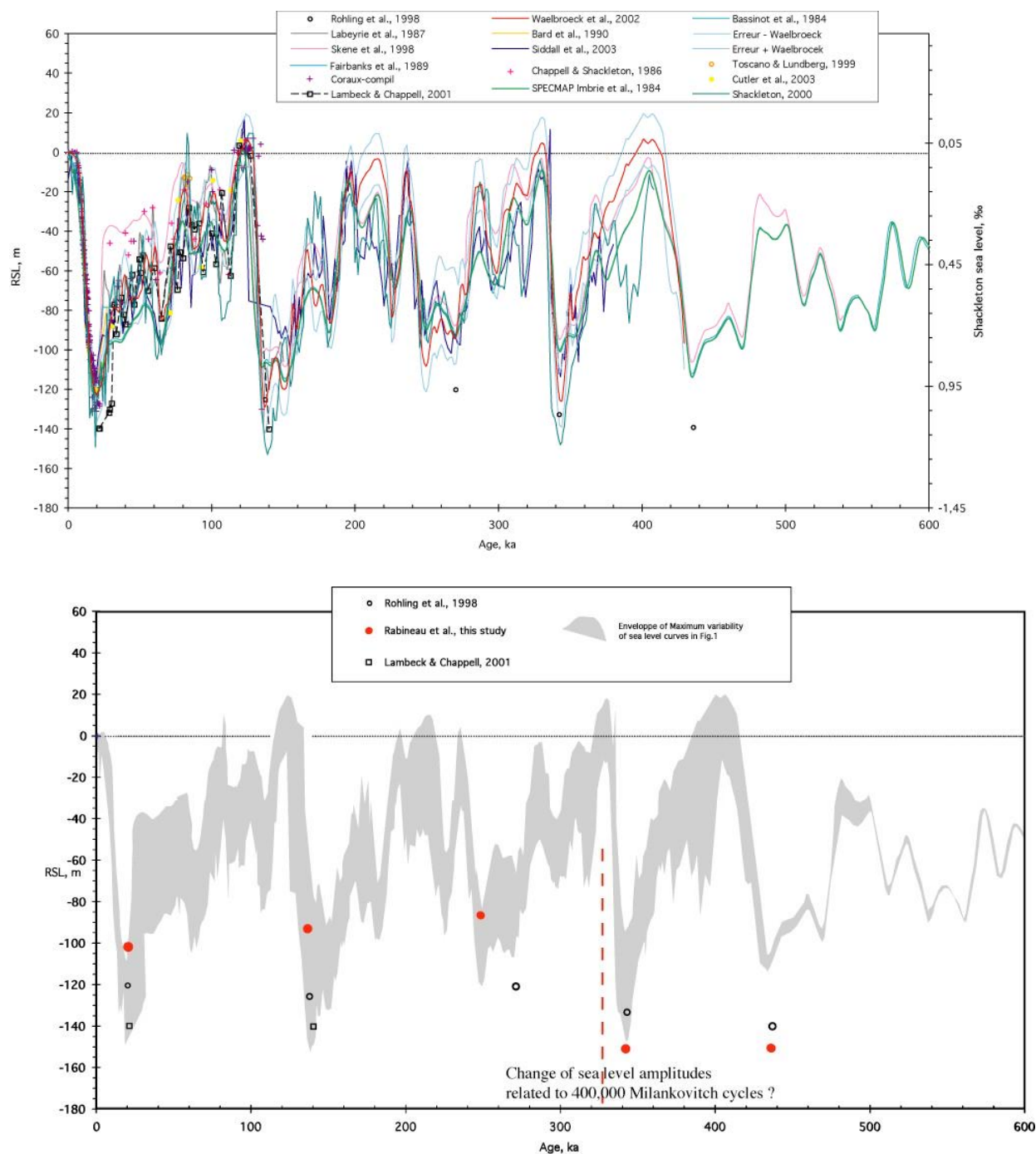


Figure I-4 En haut, synthèse des courbes de variabilités climatiques et eustatiques. En bas : Evaluation de l'amplitude des bas-niveaux marins des cycles successifs (Rabineau *et al.*, 2006)

3 Le dernier cycle glaciaire interglaciaire

Un zoom à une échelle plus fine, en intégrant les informations détaillées fournies par le chirp a été réalisé pendant le DEA puis la thèse de [Gwénaél Jouet](#) (2003, 2007) sur la dernière séquence de 100 000 ans et la dernière remontée transgressive. Ces études ont bénéficiées de plusieurs carottages « longs » obtenus en 1999 dans le Golfe du Lion (Campagne Marion-Dufresne Image V-leg5, chef de mission S. Berné) qui ont fait l'objet d'analyses détaillées (thèse en palynologie : C. Beaudoin, 2003 ; analyse des foraminifères : J-A. Flores ; analyses isotopiques à Gif/Yvette ; paléomagnétisme au Cerege : N. Thouveny ; datation C^{14}) et ont montré la faisabilité d'une reconstitution paléoclimatique détaillée grâce à l'abondance des foraminifères, de nannoplancton et des pollens. ([Rabineau et al., 2005](#), [Beaudouin et al., 2005](#), [Jouet et al., 2006](#), thèses de [Gaudin, 2006](#) et de [Jouet, 2007](#), [Bassetti et al., 2006](#), [Gaudin et al., 2006](#)).

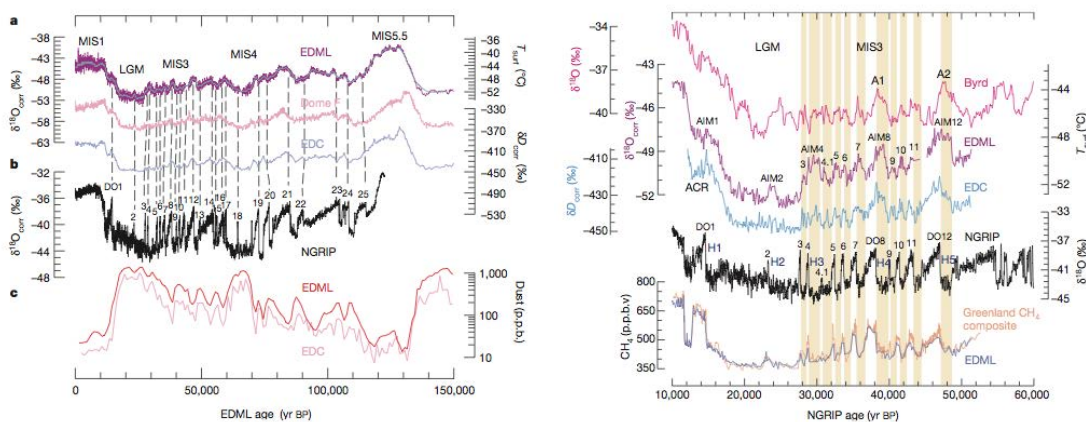
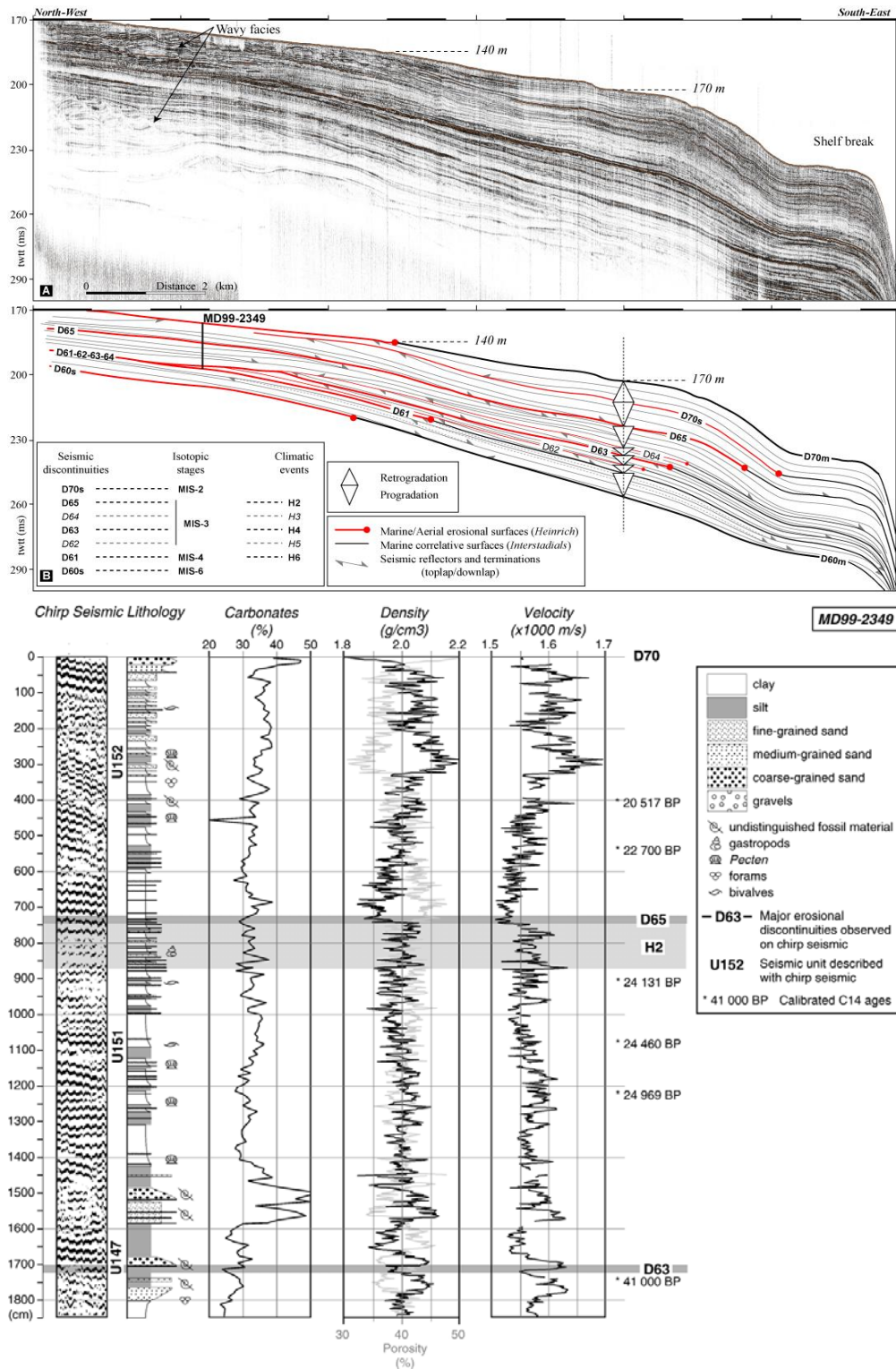


Figure I-5 Zoom sur le dernier cycle glaciaire (EPICA, 2006). A gauche : Variabilité du Climat au cours du dernier cycle Glaciaire/interglaciaire (Courbes isotopiques δO_{18} et δDA des carottes de glaces de l'Antarctique a) et du Groënland (NGRIP, 2004). A droite : Courbes isotopiques EDML (EPICA, 2006) ; EDC (Röthlisberger et al., 2002), Byrd (Blunier & Brook, 2001) et NGRIP, 2004) synchronisées par les mesures de CH_4 qui montrent que les périodes de réchauffement en Antarctique sont synchrones avec les stades froids au Groënland (rectangles oranges).

Le dernier cycle glaciaire-interglaciaire est le mieux connu de tous puisque c'est le plus récent, le plus accessible et le mieux préservé. Les courbes de variations climatiques sont très détaillées en particulier grâce à l'analyse des carottes de glaces (**Figure I-5**) (EPICA, 2006). Les courbes de variations du niveau marin commencent à être bien validées grâce à l'existence de données indépendantes (Coraux, Pollen, etc...) (Labeyrie, 1987 ; Bard, 1990 ; Waelbroeck et al., 2002 ; Chappell et al., 2002 ; Cutler et al., 2003 ; Lisiecki & Raymo, 2005 ; Hughes et al., 2013 entre autres). D'un autre côté, l'acquisition récente de profils Très Haute Résolution (données *chirp* et 2,5 kHz) a permis d'analyser en détail les géométries de cette dernière séquence et de les combiner aux observations lithologiques (carottes sédimentaires) (DEA [G. Jouet, 2003](#)). Gwénaél Jouët a ainsi été démontré que l'interfluve Aude-Hérault présentait les caractéristiques d'un prodelta soumis à l'action érosive des dépôts des vagues de tempêtes durant le Dernier Maximum Glaciaire et que plusieurs ordres de variations cycliques au sein des dépôts de la dernière séquence permettait de diviser le cycle de 100 ka en plusieurs sous-séquences emboîtées ([Jouet et al., 2006](#)) (**Figure I-6**). La combinaison des résultats sismiques et de carottages a montré qu'une périodicité de 5 ka était enregistrée et attribuée à des fluctuations du niveau de la mer, permet à Jouet de proposer une courbe eustatique locale basée sur les enregistrements sédimentaires. Cette dernière apporte des arguments en faveur d'oscillations haute fréquence du niveau de la mer pendant la phase

régressive de la fin du stade isotopique 3 (MIS3) à l'apogée du maximum glaciaire (MIS2) (Jouet *et al.*, 2006) (Figure I-6). Ces cycles pourraient correspondre aux cycles de Bond (Bond et al., 1993). Un cycle de Bond correspondant à plusieurs événements Dansgaard/Oeschger (oscillations rapides d'une durée de 1 à 3 ka (Dansgaard et al., 1993) successifs jusqu'à un événement de Heinrich (événements de refroidissement marqués par des décharges d'IRD) (Ruddiman, 1977, Heinrich, 1988).



La vérité-terrain permise par l'analyse sédimentologique fine des carottes a été complétée depuis à l'échelle des derniers 500,000 ans grâce aux deux forages PROMESS réalisés en juillet 2004 sur la plate-forme du Golfe du Lion (Berné *et al.*, 2004, projet européen PROMESS, Bassetti *et al.*, 2008, Sierro *et al.*, 2009) qui ont permis globalement de confirmer les résultats de nos travaux antérieurs et de valider notre méthodologie.

4 Fonctionnement des canyons sous-marins

Les canyons représentent un élément fondamental des pentes continentales. Bien que les canyons sous-marins soient connus et étudiés depuis longtemps dans tous les océans du globe (Dana, 1863), leur origine et leurs mécanismes d'évolution restent toujours mal compris. Dans le Golfe du Lion, depuis les premiers travaux de synthèse (Bourcart *et al.*, 1948) jusqu'à la dernière carte morpho- bathymétrique (Berné *et al.*, 2002), les informations s'accroissent mais des questions demeurent (Baztan *et al.*, ASF - 2003, Baztan *et al.*, 2005).

Une étude détaillée de l'interface plate-forme—pente était donc indispensable pour déterminer l'ampleur et la chronologie des remobilisations et des transferts sédimentaires vers la pente, le glacis et la plaine abyssale. La relation de la plate-forme avec la partie distale du système par le biais des canyons devait être étudiée avec plus de détails. Quelles sont leurs modalités, leur périodes de fonctionnement ? Pourquoi trouve-t-on de tels éléments érosifs entaillant la pente continentale du Golfe du Lion ?

Une avancée majeure a été réalisée sur la compréhension du fonctionnement des canyons pendant la thèse de Juan Baztan, 2004 ; Baztan *et al.*, 2005) avec la mise en évidence de deux éléments érosifs de dimensions très différentes:

(a) l'incision axiale (dimensions : 75m*700m*100km),

(b) la vallée majeure (700m*5000m*100km), qui constitue le canyon *stricto sensu*.

- L'incision axiale, correspond à une vallée sur-creusée pendant le dernier maximum glaciaire (DMG) par des courants de turbidité quand les fleuves continentaux étaient connectés aux têtes des canyons sous-marins. Le surcreusement du fond du canyon provoque déformations et glissements dans les sédiments environnants. Ce phénomène se poursuit, jusqu'à atteindre les flancs de la vallée majeure. Les courants de turbidité, à l'origine de l'incision axiale, sont les agents d'évacuation (pendant les périodes de connexion) des sédiments vers le bassin profond (**Figure I-7**) (Baztan *et al.*, 2005).
- La vallée majeure ne peut pas être le résultat d'un unique épisode érosif. Elle présente des dimensions cinq fois supérieures à l'incision des systèmes canyon-chenal des plus grands appareils turbiditiques du monde. On conclut que la vallée majeure est le résultat de la succession des épisodes d'activité de l'incision axiale, liés aux périodes de bas niveau marin équivalents au DMG (Baztan *et al.*, 2005).

Le cadre stratigraphique établi permet de contraindre nos observations et de décrire le fonctionnement des canyons sous-marins au cours des cycles glacioeustatiques successifs (**Figures I-7 et I-8**).

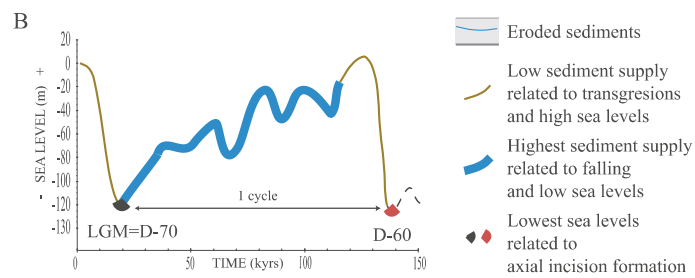
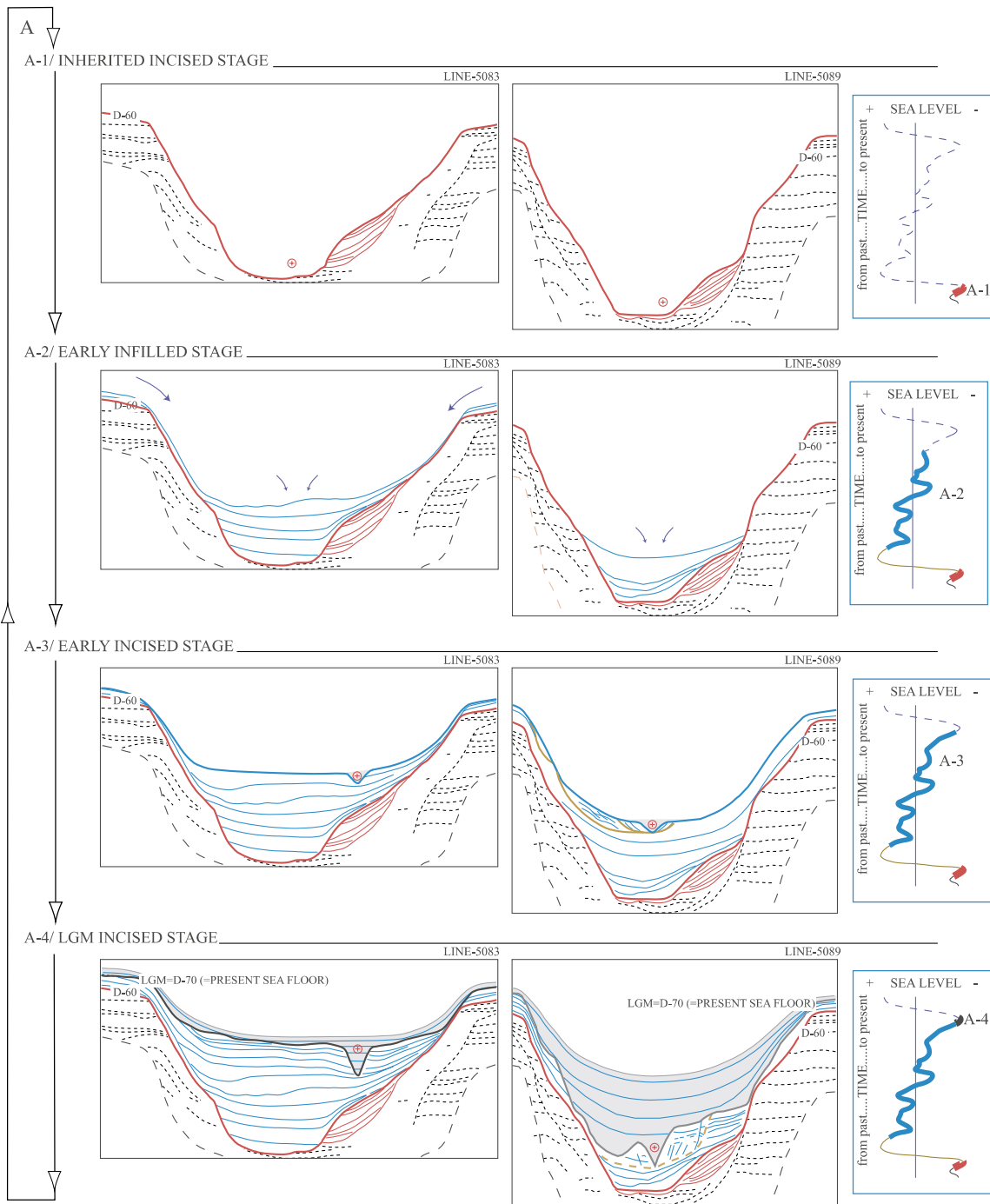
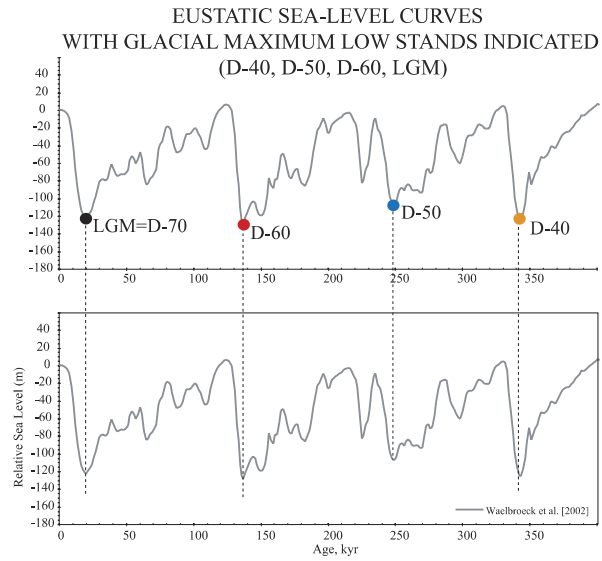


Figure I-7 Fonctionnement du canyon de l'Aude au cours d'un cycle de 100 000 ans (Bazan et al., 2005)

A



MIDDLE CANYON HISTORY (LINE-6024, FROM FIGURE 11-C)

B

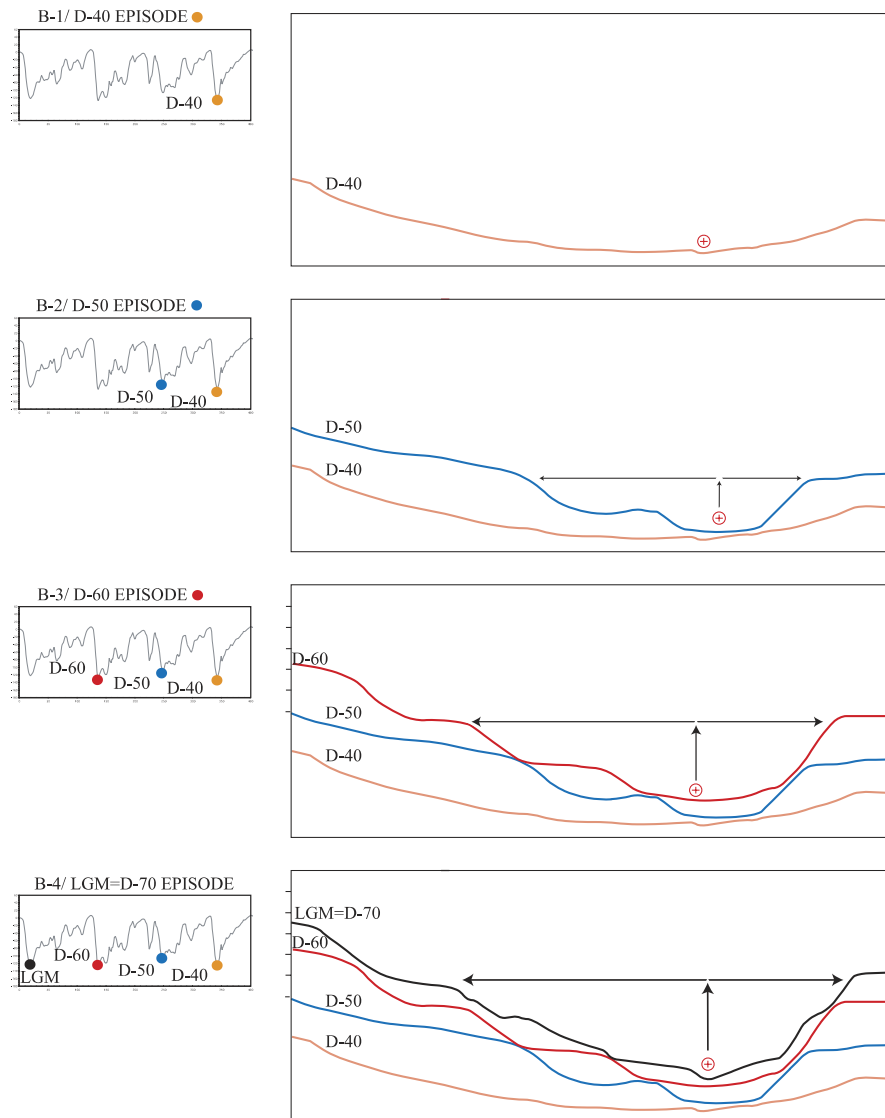


Figure I-8 Evolution du canyon de l'Aude aux cours des 4 derniers cycles climatiques de 100 000 ans successifs (Baztan et al., 2005)

De son côté, [Mathieu Gaudin](#) par l'analyse de données bathymétriques, de carottages, radio-istopiques et courantologiques a mis en évidence que les canyons (Bourcart d'une part et Cap Breton d'autre part) restent actifs en période de haut niveau marin bien qu'ils ne soient pas directement connectés à un réseau fluvial (thèse de [Gaudin, 2006](#) ; [Gaudin et al., 2006](#)). Ce sont les conditions hydrodynamiques et climatiques locales comme les plongées d'eaux denses dans le Golfe du Lion ou les tempêtes dans le Golfe de Gascogne qui permettent le transport et le dépôt de sédiments parfois grossiers dans ces canyons, même si l'ampleur de ces transferts est inférieure à celle obtenue pendant des conditions de bas-niveau marin ([Gaudin et al., 2006](#)).

Depuis ces travaux précurseurs sur les canyons, de nombreuses études se sont développées en particulier en Méditerranée par le groupe de M. Canals (Canals et al., 2006, 2009, Lastras et al., 2007, Amblas et al., 2012, ...).

L'année dernière, une nouvelle thèse, celle de [Marta Payo-Payo](#) a démarré sous la conduite de Ricardo Da Silva et dans laquelle je suis impliquée qui vise à modéliser numériquement les processus de transfert dans les canyons de Méditerranée (en collaboration avec M. Canals).

5 Extension au glacis et à la plaine abyssale

Le système sédimentaire profond déjà relativement bien connu (Droz, 1983, 1991 ; Dos Reis, 2001) a été complété par les données acquises lors de la mission PROGRES, 2003 (chef de mission L. Droz), réalisée dans le cadre des projets européens Eurostrataform et Promess dans le bassin des Baléares. Ces données permettent d'identifier le rôle respectif des différents systèmes sédimentaires profonds du Golfe du Lion (*s.l.*) et des marges sardo-espagnoles ([Droz, Rabineau et al., 2003](#)) (**Figure I-9**).

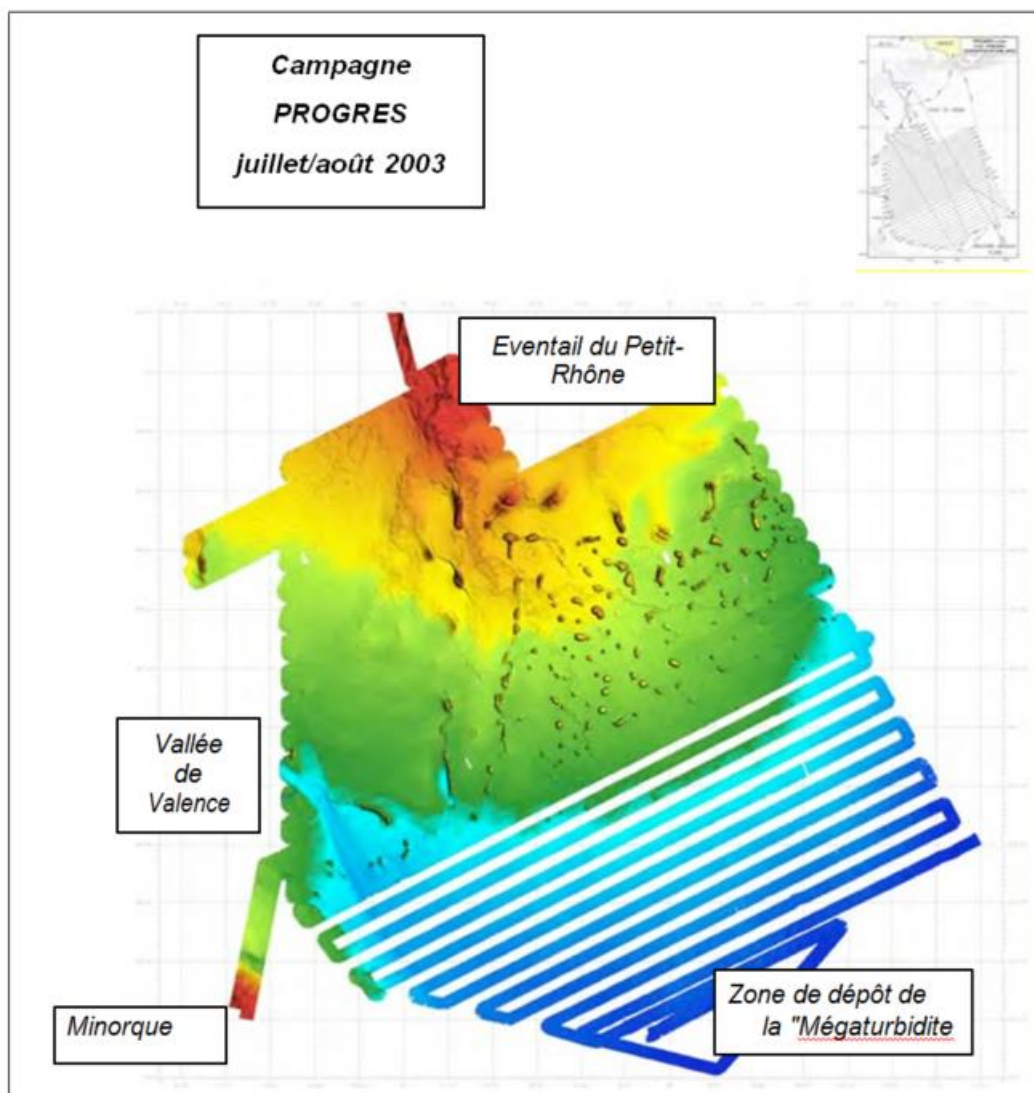


Figure I-9 Carte bathymétrique EM300 de la partie distale des systèmes sédimentaires du Golfe du Lion, de la marge catalane et de la Plaine Abyssale des Baléares et plan de localisation des données acquises lors de la mission PROGRES (Droz, Rabineau et al., 2003).

Ces données ont permis de préciser (1) l'extension de l'éventail du Rhône et son interaction avec la tectonique salifère ; (2) la bordure ouest de l'éventail du Rhône (DEA P. Ferrer, 2004) et (3) l'extension de la mégaturbidite du bassin des baléares. Ces nouvelles données ont donné lieu à une synthèse sur les dépôts turbiditiques quaternaires à laquelle nous avons participé (Droz *et al.*, 2006)

La combinaison des résultats obtenus sur la plate-forme, sur les canyons et sur le glacis vont nous permettre *in fine* ainsi d'appréhender et de quantifier l'ampleur des transferts à la pente, au glacis et jusqu'à la plaine abyssale au cours du temps. On cherchera en particulier à savoir si les surfaces d'érosion majeures peuvent être suivies jusqu'au bassin profond (voir ci-dessous).

6 Mise en place des glaciations au cours du Pliocène-Quaternaire

Un certain nombre d'événements climatiques clefs restent cependant encore mal cernés : quand a lieu le passage des cycles de 40 000 ans aux cycles de 100 000 ans ? Comment se caractérise-t-il ? Quel est l'impact de l'ampleur des variations glacioeustatiques ? Est-il synchrone à l'échelle mondiale ? Quand ont lieu les premiers effets des glaciations ? Quand ont lieu les premières incisions de canyons ?

Au cours des deux derniers quadriennaux, j'ai donc élargi mon programme de recherche à une échelle de temps plus grande qui couvre les séries Plio-Pleistocène (derniers 5,3 Ma), c'est-à-dire depuis la fin de l'événement messinien, où le bassin a été rapidement ré-ennoyé après un quasi- assèchement (chute drastique du niveau marin de 1500m). Cet élargissement s'est accompagné de ma prise en charge de l'animation du GDR Marge « Golfe du Lion » et ACTIONS-Marges atelier Golfe du Lion avec C. Gorini (12 laboratoires et 50 chercheurs).

L'utilisation des profils sismiques multitraces (Marion et LRM (sismique pétrolière), de résolution moindre mais de pénétration supérieure, ont permis de retrouver nos surfaces d'érosion superficielles majeures et d'identifier d'autres surfaces en profondeur. Baztan identifie ainsi deux surfaces D1 et D0 corrélées aux surfaces de la plate-forme et interprétées comme correspondant à deux étapes paléoclimatiques majeures sur l'ensemble du PlioQuaternaire (**Figure I-10**). D1 qui pourrait correspondre à la mise en place des cyclicités de 100,000 ans vers 1 Ma et D0 à la mise en place des glaciations dans l'hémisphère Nord (Rabineau, 2001 ; Baztan, 2004). Ces travaux ont été repris plus récemment lors de la thèse de Leroux, 2012 aboutissant entre autres aux calculs des flux sédimentaires et de subsidence (voir chapitre suivant 2)

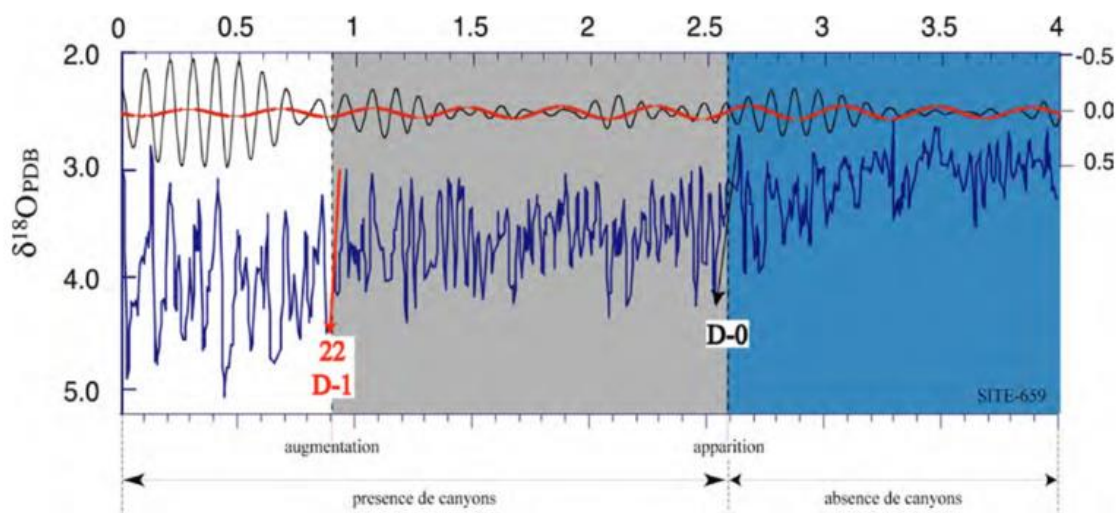


Figure I-10 Courbe de variation du niveau marin du Site 659 (Zachos, 2001) où on peut observer comment les épisodes majeurs (apparition et augmentation des dimensions des canyons sous-marins) coïncident avec les principaux changements d'amplitude du niveau marin. (Baztan, 2004).

Un premier article présentant les géométries de dépôt a été publié (Lofi, Rabineau *et al.*, 2003). Un article de synthèse a été rédigé en collaboration avec L. Droz sur la sédimentation Plioquaternaire du Golfe du Lion (Droz *et al.*, 2006). Puis, un stage de M2 (Leroux, 2008) a été effectué en utilisant la double approche terrain et modélisation.

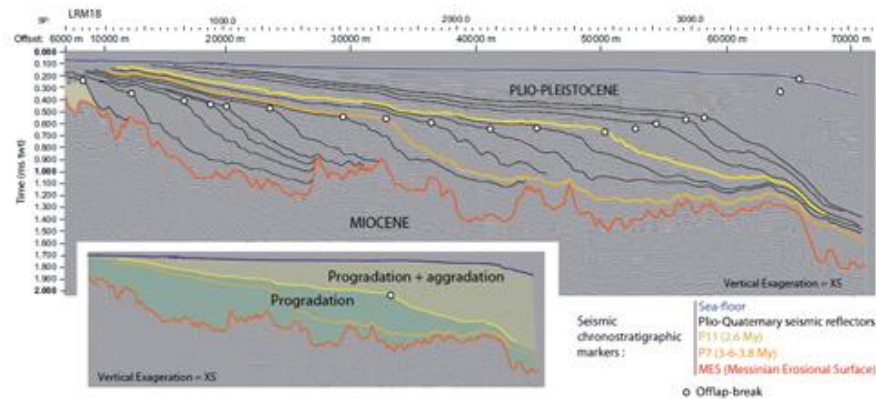


Figure I-11 Interprétation des profils sismiques de la côte (à gauche) vers le large (à droite). La disposition des limites de strates montre que leur empiement (aggradation) n'a eu lieu que dans une deuxième phase (Leroux *et al.*, 2014)

Les profils sismiques (**Figure I-11**) montrent une évolution de l'architecture de progradante à progradant-agradante.

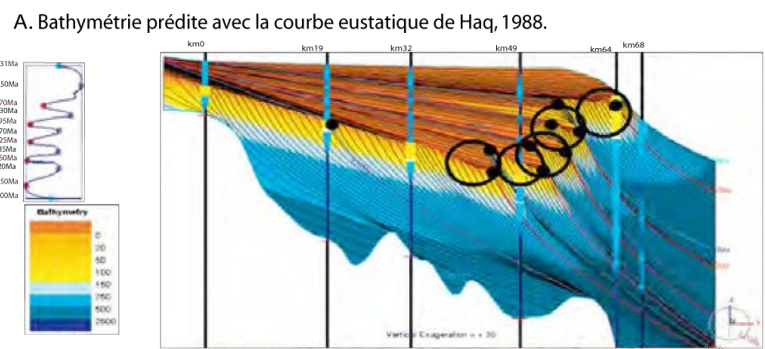
Pour expliquer ce changement, différentes hypothèses portent sur le rythme de subsidence de la marge (1) constant (basculement vers la mer à partir d'un point de rotation situé à terre) (Rabineau, 2001, Rabineau *et al.*, 2014), ou (2) croissant après 2,6 Ma (Duvail *et al.*, 2005).

Estelle Leroux a donc apporté une contribution à ce débat au moyen de modèles stratigraphiques numériques. La comparaison avec les données de sismique permet de valider ou de rejeter des hypothèses. Deux ensembles de simulations ont été menés. Pour étudier le rôle de la variation de subsidence, celle-ci a été simulée avec un taux constant depuis 5,33 Ma (255 mètres par million d'années à 70 km au large) mais aussi avec trois scénarios d'accroissement à partir de 2,6 Ma. Seule la simulation avec subsidence constante reproduit bien les géométries de progradation puis de progradation-agradation ; les hauteurs des surfaces et les positions des ruptures de pente ne sont pas restituées lorsque la subsidence est d'abord très faible ou nulle. Le passage d'une géométrie à l'autre n'est donc pas lié à un changement brusque de subsidence, mais à la combinaison du basculement de la marge et des variations de flux sédimentaires et de niveau marin.

Une deuxième série de simulations pour tester l'influence des variations du niveau de la mer, ont été effectuées avec des courbes différentes (le taux de subsidence et les flux hydrologiques et sédimentaires étant identiques). Ces simulations ont également permis de remettre en question la validité de la courbe eustatique de 3^{ème} ordre de Haq *et al.*, 1987. Une courbe d'ordre supérieur, issue des variations de ^{18}O semble préférable (celle de Lisiecky &

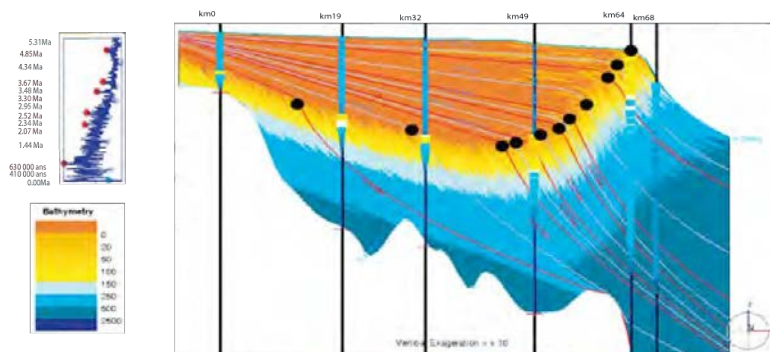
Raymo, 2005 par exemple) : elle permet une meilleure restitution des géométries de nos réflecteurs sismiques (Leroux *et al.*, 2014) (Figure I-12).

A cette échelle de temps, les simulations ont également permis de remettre en question la validité de la courbe eustatique de 3^{ème} ordre de Haq *et al.*, 1987. Une courbe d'ordre supérieur, issue des variations de $\delta^{18}O$ semble préférable (celle de Lisiecky & Raymo, 2005 par exemple) : elle permet une meilleure restitution des géométries de nos réflecteurs sismiques (Leroux *et al.*, 2014) (Figure I-10).



En A, 5 cycles sédimentaires majeurs se distinguent en sortie du modèle. Ces cycles ne correspondent pas au profil sismique.

B. Bathymétrie prédite avec la courbe issue des variations de $\delta^{18}O$ (Lisiecki & Raymo, 2007).



En B, la répartition spatiale des offlap-breaks (alignement) correspond bien au profil sismique.

Figure I-12 Modélisation stratigraphique des dépôts Plioquaternaires sur la plate-forme occidentale du Golfe du Lion avec deux courbes de variations du niveau marin (Haq *et al.*, 1987 et Lisiecki & Raymo, 2005), subsidence constante (250m/Ma) (Leroux *et al.*, Terra Nova, 2014).

A ce stade, plusieurs questions clés demeuraient quant à la sédimentation à grande échelle et au comportement de la marge :

- **Quand et avec quelle ampleur les flux sédimentaires varient-ils ? Quelles en sont les origines ?**
- **Que se passe-t-il au messinien ?**
- **Comment la subsidence évolue-t-elle dans le temps et dans l'espace ?**
- **Quelle a été l'ampleur et la localisation des réajustements isostatiques liés à l'événement messinien ?**

ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :

Au final c'est donc 15 publications (rang A) dont je suis co-auteur qui ont été publiées depuis 2001 autour de la thématique des processus sédimentaires liés aux cycles climatiques du Pliocène et Quaternaire :

1. *Leroux, E., **Rabineau, M.**, Aslanian, D., Granjeon, D., Gorini, C., Droz, L. *et al.* Stratigraphic simulation on the shelf of the Gulf of Lion : testing subsidence rates and sea-level curves during Pliocene and Quaternary, 2014, *Terra Nova*.
2. Reis, A.T.; *Maia, R. M. C.; Silva, C. G.; **Rabineau, M.**; Gorini, C.; Guerra, J. V.; Arantes-Oliveira, R.; Ayres, A.; Simões, I., 2013. Linking drowned seafloor features to the Latest Quaternary shallow stratigraphy along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil, *Geomorphology*, vol. 203, Special Issue, p. 25-45, DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.04.037.
3. Popescu, S., Biltekin, D., Winter, H., Suc, J-P., Melinte-Dobrinescu, MC, **Rabineau M.**, Clauzon, G., Pliocene and Early–Middle Pleistocene vegetation and climate changes at the European scale: long pollen records and climatostratigraphy, 2010 *Quaternary International*, 219, Issue 1-2, Pages 152-167.
4. **Rabineau, M.**, S. Berné, J-L Olivet, D. Aslanian, P. Joseph, F. Guillocheau, 2007 : Unique geological evidence for the calibration of sea level lowstands of the last five climatic cycles (540 000 yr)- Corrigendum (*Earth and Planetary Science Letters*, Volume: 254 Issue: 3-4 Pages: 446-447 DOI: 10.1016/j.epsl.2006.11.050 Published: FEB 28 2007)
5. **Rabineau, M.**, S. Berné, J-L Olivet, D. Aslanian, P. Joseph, F. Guillocheau, 2006 : Paleosea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500 000 yr) (*Earth and Planetary Science Letters*, Volume: 252 Issue: 1-2 Pages: 119-137 DOI:10.1016/j.epsl.2006.09.033 Published: NOV 30 2006.
6. Droz, L., T. Dos Reis, **M. Rabineau**, S. Berné, G. Bellaiche, 2006 : Quaternary turbidite systems on the northern margin of the Balearic Basin (Gulf of Lions, Western Mediterranean): a synthesis (*Geomarine Letters*, Nov 2006, DOI 10.1007/s00367---006---0044---0)
7. *Jouet, G., S. Berné, **M. Rabineau**, Maria Angela Bassetti, P; Bernier, B. Dennielou, F. Sierro, JA Flores, M. Taviani, 2006 : Shoreface migrations at the shelf edge and sea level changes around the last Glacial Maximum (Gulf of Lions, NW Mediterranean) (*Marine Geology*, 234, *Isuues 1-4*, p. 21-42)
8. *Gaudin, M., S. Berné, JM Jouanneau, A. Palanques, P. Puig, T. Mulder, P.Cirac, **M. Rabineau**, P. Imbert, 2006 : Recent sedimentary activity in the Bourcart canyon

head, Gulf of Lion, northwestern Mediterranean Sea) (*Marine Geology*, 234, Issues 1-4, p. 111-128)

9. Bassetti, M.A., G. *Jouet; F. Dufois; S. Berné; **M. Rabineau**; M. Taviani, 2006: Sand bodies at the shelf edge in the Gulf of Lions : De-glacial history processes and deposits in the outer continental shelf of the Gulf of Lions (western Mediterranean) (*Marine Geology*, 234, Issues 1-4, p.93-109)
10. Berné, S., **M. Rabineau**, J-A. Flores, F. Sierro, 2004 : The impact of Quaternary global changes on strata formation: exploration of the shelf edge in the NW Mediterranean Sea (*Oceanography*, Vol17, N°4, December 2004, p.92-103).
11. **Rabineau, M.**, Berné, S., Aslanian, D., Olivet J-L., Joseph, P, Guillocheau, F, Bourillet, J-F., Ledrezen, E., Granjeon, D., 2005 : Sedimentary sequences in the Gulf of Lions : a record of 100,000 years climatic cycles, *Marine and Petroleum Geology*, 22, p. 775-804).
12. *Beaudouin, C., J-P. Suc, N. Acherki, L. Courtois, **M. Rabineau**, J-C. Aloïsi, F. Sierro, C. Oberlin,, 2005 : First Palynological results from the northwestern Mediterranean shelf (Gulf of Lions) : a last climatic cycle vegetation record (*Marine and Petroleum Geology*, 22, 845-863)
13. *Baztan, J., S. Berné, J-L Olivet, **M. Rabineau**, D. Aslanian, *M. Gaudin, J-P. Réhault et M. Canals, 2005 : Axial Incision : the Key To Understand Canyon Evolution (*In Submarine Canyons Of The Western Gulf Of Lions*) (*Marine and Petroleum Geology*, 22, 805-826)
14. Berné, S., **Rabineau, M.**, Flores, J-A., Sierro, F., 2004 : The impact of Quaternary global changes on strata formation: exploration of the shelf edge in the NW Mediterranean Sea (*Oceanography*, Vol17, N°4, December 2004, p.92-103).
15. S. Berné, J. C. Aloisi, J. *Baztan, B. Dennielou, T. Dos Reis, Y. Méar, **M. Rabineau**, 2002 : Notice explicative des cartes morpho-bathymétriques du Golfe du Lion au 1/100 000 Ed. Ifremer.

AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :

- Aloïsi, J. C. (1986). Sur un modèle de sédimentation deltaïque: contribution à la connaissance des marges passives. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Perpignan, 162p.
- Amblas et al., 2012, Survival of a submarine canyon during long-term outbuilding of a continental margin. *Geology*, vol.40, N° 6, p. 543-546
- Bard, E., Hamelin, B., Fairbanks, R. G. et Zindler, A. (1990b). Calibration of the ¹⁴C timescale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from the Barbados corals. *Nature*, **345**, 405-410.
- Bassetti, M.A., Berné, S., Jouet, G., Taviani, M., Dennielou, B., Flores J. A., Gaillot, A., Gelfort, R., Lafuerza, S., Sultan, N., 2008. The 100-ka and rapid sea level changes recorded by prograding shelf sand bodies in the Gulf of Lions (western Mediterranean Sea). *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9, 1-27.
- Blunier, T. & Brook, E. J. Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science* 291, 109–112 (2001).
- Bourcart, J., de la Bernardie, A. and Lalou, C., 1948. Le rech Lacaze-Duthiers, canon sousmarin du plateau continental du Roussillon. *Compte Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences*, 226(20): pp.1632-1633.
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J., Bonani, G., 1993. Correlations between climate records from North atlantic sediments and Greenland ice., *Nature* **365**, 143-147.

- Canals et al., 2006, Flushing submarine canyons, *Nature* 444, p. 454-357
- Canals et al., 2009, Cascades in Mediterranean Submarine Grand Canyons, *Oceanography*, 22(1) : p.26-43.
- Chappell, J. Sea level changes force by ice breakouts in the Last Glacial cycle: new results from coral terraces, *Quaternary Science Review* 21 (2002) 1229-1240.
- Cutler, K.B., R.L. Edwards, F.W. Taylor, H. Cheng, J. Adkins, C.D. Gallup, P.M. Cutler, G.S. Burr and A.L. Bloom, Rapid sea-level fall and deep-ocean temperature change since the last interglacial period, *Earth and Planetary Science Letters* 206 (2003) 253-271.
- Dana, J. D., 1863. A manual of geology. Philadelphia, 798 pp.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220.
- Dos Reis, T. (2001). La Tectonique Salifère et son influence sur l'Architecture Sédimentaire Quaternaire de la Marge du Golfe du Lion—Méditerranée Occidentale. PhD. Thesis, Université de Paris 6, 216 p. +157 pp.
- Droz L (1983) L'éventail sous-marin profond du Rhône (Golfe du Lion): grands traits morphologiques et structure semi-profonde. 3rd Cycle Thesis, University Paris VI, 195 pp.
- Droz, L. (1991). Morphologie, structure et comparaison des deep sea fans du Rhône, de l'Indus et du Var. Mémoire d'habilitation. Université Paris 6, Paris, 254 pp.
- Duvail, C., Gorini, C., Lofi, J., Strat, P.L., Clauzon, G. and Reis, A.D., 2005. Corrélation between onshore and offshore pliocene-quaternary system tracts below the roussillon basin (Eastern Pyrenees, France). *Mar. Petrol. Geol.*, **22**, 747–756.
- EPICA, 2006. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195-198.
- Haq BU, Hardenbol J, Vail P (1987) Chronology of fluctuating sea levels since Triassic (250 million years ago to present). *Science* 235: 1156-116
- Heinrich, H., 1988. Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the Past 130,000 Years. *Quaternary Research* 29, 142-152. Bard, E., Hamelin, B. et Fairbanks, R. G. (1990a). U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130,000 years. *Nature*, **346**, 456-458.
- Hughes, P., Gibbard, P., Ehlers, J., 2013 Timing of glaciation during the last glacial cycle: evaluating the concept of a global 'Last Glacial Maximum' (LGM), *Earth Science Reviews*, 125, p. 171-198.
- Labeyrie, L. D. (1987). Variations in mode of formation and temperature of oceanic deep waters over the past 125 000 years. *Nature*, **327** (6122), 477-482.
- Lastras et al., 2007, A walk down the Cap de Creus canyon, Northwestern Mediterranean Sea : Recent processes inferred from morphology and sediment bedforms. *Marine Geology*, 246, p. 176-192.
- Lisiecki, L. and Raymo, M., 2005. A pliocene-pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- North Greenland Ice Core Project members. High resolution climate record of the northern hemisphere reaching into the last interglacial period. *Nature* 431, 147–151 (2004).
- Röthlisberger, R. et al. Dust and sea-salt variability in central East Antarctica (Dome C) over the last 45 kyrs and its implications for southern high-latitude climate. *Geophys. Res. Lett.* 29, article no. 1963 (2002).
- Ruddiman, W. F., 1977. Late Quaternary Deposition of Ice-Rafted Sand in the Subpolar North Atlantic (Lat. 40°N to 65°N). *Geological Society of America Bulletin* 88, 1813- 1827.
- Sierro F.J., Andersen N., Bassetti M.A., Berné S., Canals M., Curtis J.H., Dennielou B., Flores J.A., Frigola J., Gonzalez-Mora B., Grimalt J.O., Hodell D.A., Jouet G., Pérez-Folgado M., Schneider R., 2009. Phase relationship between sea level and abrupt climate change. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 2867-2881.
- Tesson, M., Gensous, B., Allen, G. P. et Ravenne, C. (1990). Late Quaternary lowstand wedges on the Rhône Continental Shelf, France. *Marine Geology*, **91**, 325-332.

- Tesson, M., Posamentier, H. et Gensous, B. (2000). Stratigraphic organisation of Late Pleistocene deposits of the western part of the Rhone shelf (Languedoc shelf) from high resolution seismic and core data. *A.A.P.G. Bull.*, **84** (1), 119-150.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L. D., Michel, E., Duplessy, J.-C., McManus, J., Lambeck, K., Balbon, E. et Labracherie, M. (2002). Sea level and deep water changes derived from benthic Foraminifera isotopic record. *Quaternary Science Review*, **21** (1-3), 295-305.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K., 2001. Trends, rythms and aberrations in global climate 65 My to present. *Science*, 292, 686–693.

CHAPITRE II

LES SEDIMENTS : ARCHIVES DES FLUX SEDIMENTAIRES

BILAN EROSION- DEPOT-PROVENANCE

1 Problématique et état des lieux au début des travaux

Les flux terrigènes issus du continent représentent le produit de l'érosion des reliefs continentaux qui est influencée par le climat (*via* l'érodabilité du bassin de drainage souvent liée à la pluviométrie) et la tectonique (*uplift* des reliefs en particulier). Cependant, faire la part du rôle respectif du climat ou de la tectonique sur les valeurs de ce flux est loin d'être évident malgré les efforts de synthèse réalisés à diverses échelles de temps sur les marges et les systèmes sédimentaires associés : deltas, pentes, deep-sea-fans, (Walford *et al.*, 2005; Stoker *et al.*, 2010; Guillocheau *et al.*, 2012), du fait de la difficulté à isoler chacun de ces paramètres (Armitage *et al.*, 2011).

Cette question est ainsi au cœur d'une polémique majeure, depuis les années 90, sur l'interprétation de l'augmentation des flux terre-mer observés au cours des 5 derniers millions d'années

- Certains auteurs interprètent cette augmentation comme l'influence directe du climat sur l'érosion (Peizhen *et al.*, 2001).
- Certains, au contraire, suggèrent que cette augmentation serait liée aux phases orogéniques tertiaires dont le refroidissement global ne serait qu'une conséquence résultant du piégeage du CO₂ atmosphérique par les processus d'érosion (Molnar & England, 1990 ; Raymo & Ruddiman, 1992).
- D'autres proposent une amplification, par le climat, des phases tectoniques (e.g. Whipple, 2009).
- Pour d'autres enfin, l'augmentation des flux sédimentaires ne serait qu'un biais d'observation lié à l'âge récent des séries observées (Willenbring & von Blanckenburg, 2010).

Retracer l'évolution des flux sédimentaires sur l'ensemble des marges du globe dans des contextes climatiques et géodynamiques variés, permettant de sortir d'un cadre régional et de différencier les processus locaux de ceux véritablement globaux, représente donc un défi majeur qui devrait, in fine, nous permettre d'appréhender le rôle relatif des paramètres tectonique et climatique.

La quantification de ces flux terrigènes peut s'envisager au travers de trois approches : les mesures actuelles, le bilan d'érosion et le bilan des dépôts.

Les **mesures actuelles** les plus classiquement réalisées sont les mesures dans les rivières (mesure de jaugeage), elles sont importantes car elles nous donnent une mesure précise du flux d'eau et de matières en suspension (à l'aide de turbidimètres) transitant par la rivières pour finalement arriver en mer. Des méthodes nouvelles d'observation sont toujours en développement et utilise en particulier les méthodes de télédétection (imagerie visible, infra-rouge, hyperfréquence...). Cependant même les mesures actuelles posent des problèmes : le flux de matière transporté sur le fond par exemple est en fait encore très mal estimé. Malgré leur degré de résolution, ces mesures peinent encore à l'heure actuelle à représenter l'ensemble des phénomènes naturels à cause de la difficulté à mesurer les phénomènes catastrophiques (crues centennales, tempêtes...)

Par ailleurs, si l'on souhaite détailler les quantités de transport de particules entre les différents compartiments en mer (littoral, plate-forme, pente, canyon), il faudra mettre en oeuvre une instrumentation qui est loin d'être effective sur l'ensemble des marges. En domaine côtier, le suivi des flux et stocks sédimentaires à l'aide de caméras, drones et de sondeur multi-faisceaux petit-fond commence seulement à se développer (voir travaux réalisés dans notre équipe "Transfert Terre-Mer" de LDO). Enfin, notons que si ces mesures fournissent des valeurs extrêmement importantes donnant un ordre de grandeur de référence, elles restent actualistes, et autorisent au mieux un suivi pluri-annuel qui ne permet cependant pas d'évaluer les évolutions passées.

En ce qui concerne les **bilans d'érosion**, les années 2000-2010 ont permis des progrès considérables avec les mesures des changements de topographies (évolution du relief) par les thermochronomètres basse-température — qui donnent des informations sur l'histoire des températures de refroidissement des roches et donc des taux d'exhumation à partir de la température de fermeture à la surface (AFT, Zircon FT, U-Th-Sm/He et AHe) — associées à des modélisations 3D thermocinétique (e.g. Braun, 2002, 2012 ; Valla *et al.*, 2010 ; VanderBeek *et al.*, 2010...) et aux mesures basées sur les nucléides cosmogéniques (e.g. Gosse & Philips, 2001 ; Von Blanckenburg, 2005 ; Farber 2008).

Ces données sont toutefois très éparses et le processus d'échantillonnage-analyse-modélisation relativement long. La review récente proposée par Champagnac *et al.*, 2014 dresse une bonne synthèse sur le sujet.

Quant aux **bilans de dépôts**, ils peuvent être réalisés dans les bassins sédimentaires et sur les marges à partir des données de sismiques et de puits existantes. La caractérisation

sédimentologique des flux dans un bassin sédimentaire est donc tributaire de l'existence de ces données, seul accès à la lithologie des dépôts. Cette information est malheureusement souvent très ponctuelle (voire absente !) et il faudra dans tout les cas la combiner aux données indirectes (géophysiques) pour extrapoler l'information en 3D. C'est en particulier le cas des zones les plus distales, souvent pauvres en données permettant d'évaluer les épaisseurs sédimentaires. Or, c'est bien l'ensemble de la zone en dépôt qui doit être prise en compte de la partie la plus amont du système (parfois à terre) jusque dans sa partie la plus distale du domaine océanique (la plaine abyssale). Guillocheau *et al.*, 2012 ont proposé une approche permettant de tirer le meilleur parti des données parcellaires existants en réalisant des interpolations entre coupes 2D re-évaluées. Malgré l'efficacité de cette méthode d'interpolation, la mise en œuvre nécessite un long travail de synthèse, de mise en base de données ainsi qu'une analyse critique prudente et poussée des interpolations effectuées, ce qui fait que les bilans de flux restent aujourd'hui encore très parcellaires.

Illustration exemplaire de ce problème, et malgré l'abondance de données, et les avancées réalisées au cours des dix années de travaux dans le cadre du GDR Marges et Actions Marges chantier Golfe du Lion et Méditerranée Occidentale, la quantification des flux sédimentaires dans le Golfe du Lion n'était toujours pas réalisée en 2010, comme ne manquait pas de le relever, de façon récurrente et néanmoins fondée, François Guillocheau, de cette litote : « Et les Flux ? »

C'est à cette tâche que nous nous sommes attaqués dans le cadre de la thèse d'Estelle Leroux (2012).

La même thématique a été, et est actuellement également abordée, avec la même méthodologie, dans le bassin de Valence, coalescent du Golfe du Lion, dans le cadre du [post-doc de Marga Garcia](#) et la thèse en cours de [Romain Pellen](#).

Quand et avec quelle ampleur les flux sédimentaires varient-ils ?

Sont-ils compatibles avec les mesures de dénudation ?

D'où viennent-ils ?

2 Les Bilans de Dépôt dans le Golfe du Lion

2-1 Flux au Plioquaternaire

Initiés au cours de ma thèse en 2001 ([Rabineau, 2001](#) ; [Lofi et al., 2003](#)), les travaux sur le Plioquaternaire ont été repris en 2008 sur la plateforme pendant le stage de M2 [d'Estelle Leroux \(2008\)](#) puis finalisés pendant sa thèse ([E. Leroux, 2012](#)).

La première étape fut une approche de modélisation stratigraphique 2D (Master-2 E. Leroux) qui permet de montrer que l'organisation des séquences Plioquaternaires n'était pas

due à une accélération du taux de subsidence comme suggérée par Duvail *et al.*, 2005. Sur la plate-forme, les premières simulations stratigraphiques montrent qu'une subsidence constante d'environ 250m/Ma au Plio-Pleistocène (telle que mesurée par Rabineau *et al.*, 2005 sur les derniers 500,000 ans) permet de restituer correctement les géométries sédimentaires observées sur la sismique (**Figure II-1**). Le passage d'une sédimentation progradante à une sédimentation progradante-aggradante ne nécessite nullement de variation de subsidence. Il est par contre impossible de modéliser ces géométries sédimentaires observées sur la sismique avec une variation de la subsidence importante (Leroux *et al.*, 2014) (voir le chapitre 1 aussi).

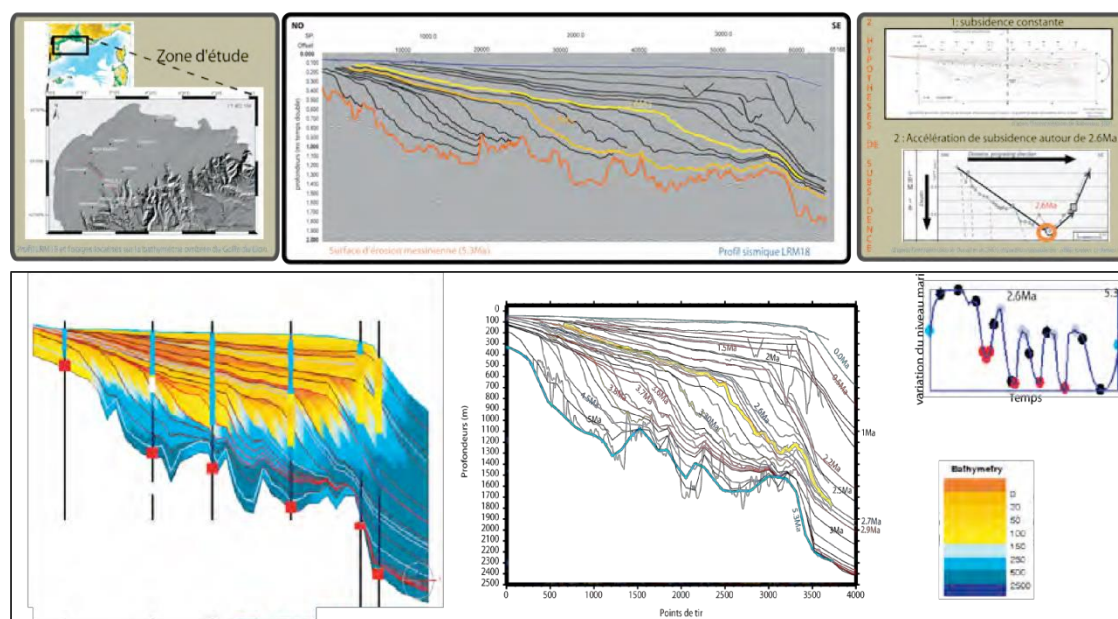


Figure II-1 A) Interprétation sismique et les 2 propositions d'interprétation de la subsidence et B) Modélisation stratigraphique des dépôts Plioquaternaires sur la plate-forme occidentale du Golfe du Lion avec une hypothèse de subsidence constante (250 m/Ma) (Leroux *et al.*, 2014).

L'évolution des flux sédimentaires quant-à elle montre une augmentation significative autour de 3.8 Ma, qui témoigne probablement des premiers signes de refroidissement et de chutes du niveau marin (Rabineau, *et al.*, EPSL, 2014 ; Leroux *et al.*, 2014). Ces résultats ont été corroborés par les études paléoclimatiques que nous avons menés indépendamment et qui ont montré une augmentation des flux sédimentaires à 3.4 Ma (Popescu *et al.*, 2010).

Cette étude a ensuite été étendue à l'échelle de la totalité du bassin (thèse E. Leroux, 2012) : les marqueurs Pliocène-Quaternaires ont ainsi été corrélés sur l'ensemble du Golfe du Lion, de la plate-forme jusque dans le domaine profond offrant une vision complète du remplissage sédimentaire de la marge. Les repères stratigraphiques du Plio-Pleistocène identifiés sur la plate-forme (2.6 Ma, 1.6 Ma, 0.9 Ma et 0.45 Ma) ont ainsi été corrélés jusqu'au pied de pente. Les jalons messiniens, établis lors des travaux précédents (thèse de F. Bache, 2008) ont également été étendus et précisés localement par la mise en évidence d'une nouvelle unité, interprétée comme les résidus de l'abrasion lors de la transgression mettant fin à la crise messinienne (Bache *et al.*, 2012 ; Bache *et al.*, soumis ; Leroux *et al.*, soumis).

Au final, ces travaux ont permis à Estelle Leroux d'établir des cartes isobathes et isochores en second-temps-double jusqu'au bassin profond (**Figure II-2**). Des lois de conversion en profondeurs (métriques) des différentes unités chronostratigraphiques ont ensuite été établies en 3D à partir de l'ensemble des données de forage et de réfraction (ESP et données de la mission Sardinia) et appliquées pour chacune de nos unités. Les profondeurs de l'ensemble des jalons plio-pléistocènes et messiniens ont ainsi pu être cartographiées, ainsi que les épaisseurs de chacune des unités définies depuis le substratum jusqu'à l'actuel (1 au Miocène, 6 au Messinien, 5 au Plio-Pléistocène). Les épaisseurs et volumes sédimentaires déposés ont alors pu être quantifiés sur chaque intervalle stratigraphique. Les séries sédimentaires ont été par la suite décompactées et les volumes "vrais" de dépôts et flux sédimentaires recalculés (Leroux, 2012). L'ensemble de ces cartes est l'objet de la réalisation d'un Atlas financé par le GRI Méditerranée Occidentale.

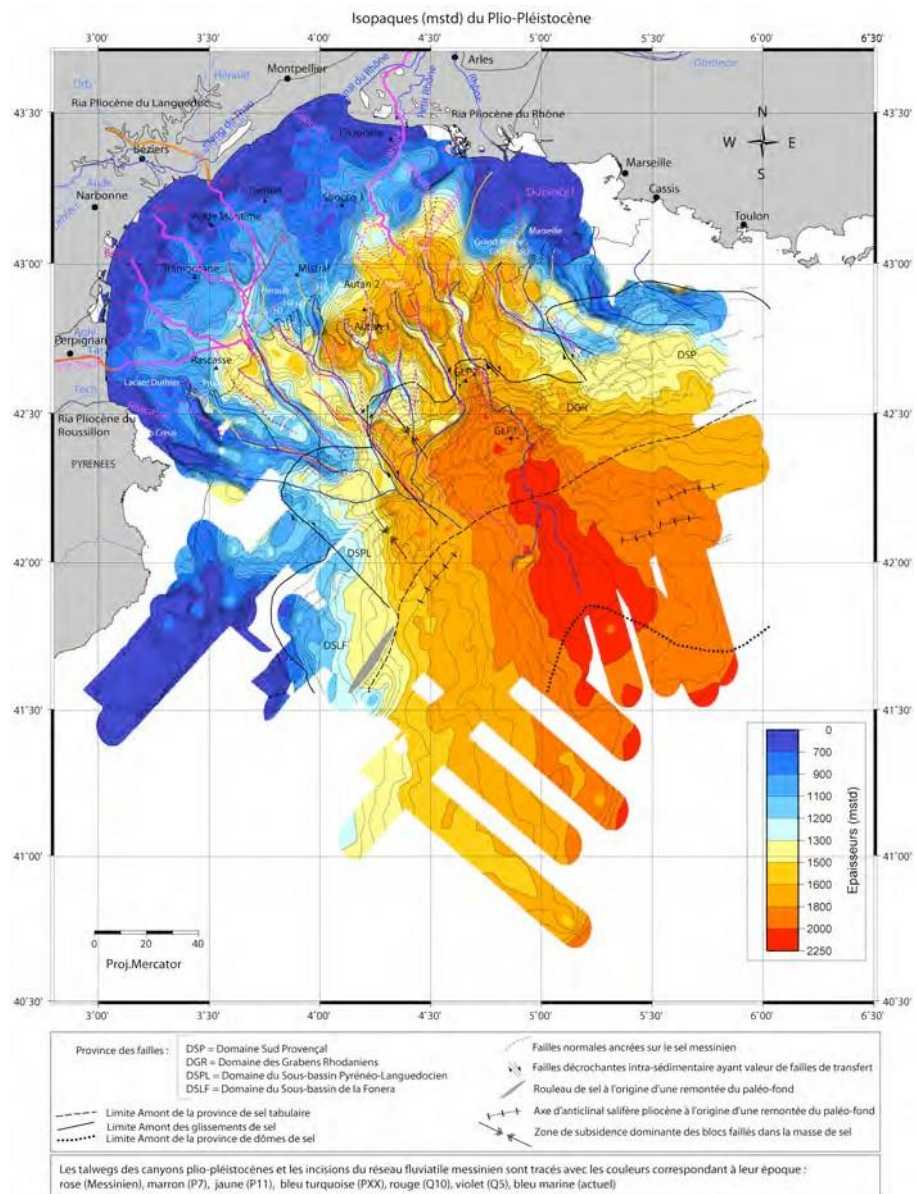
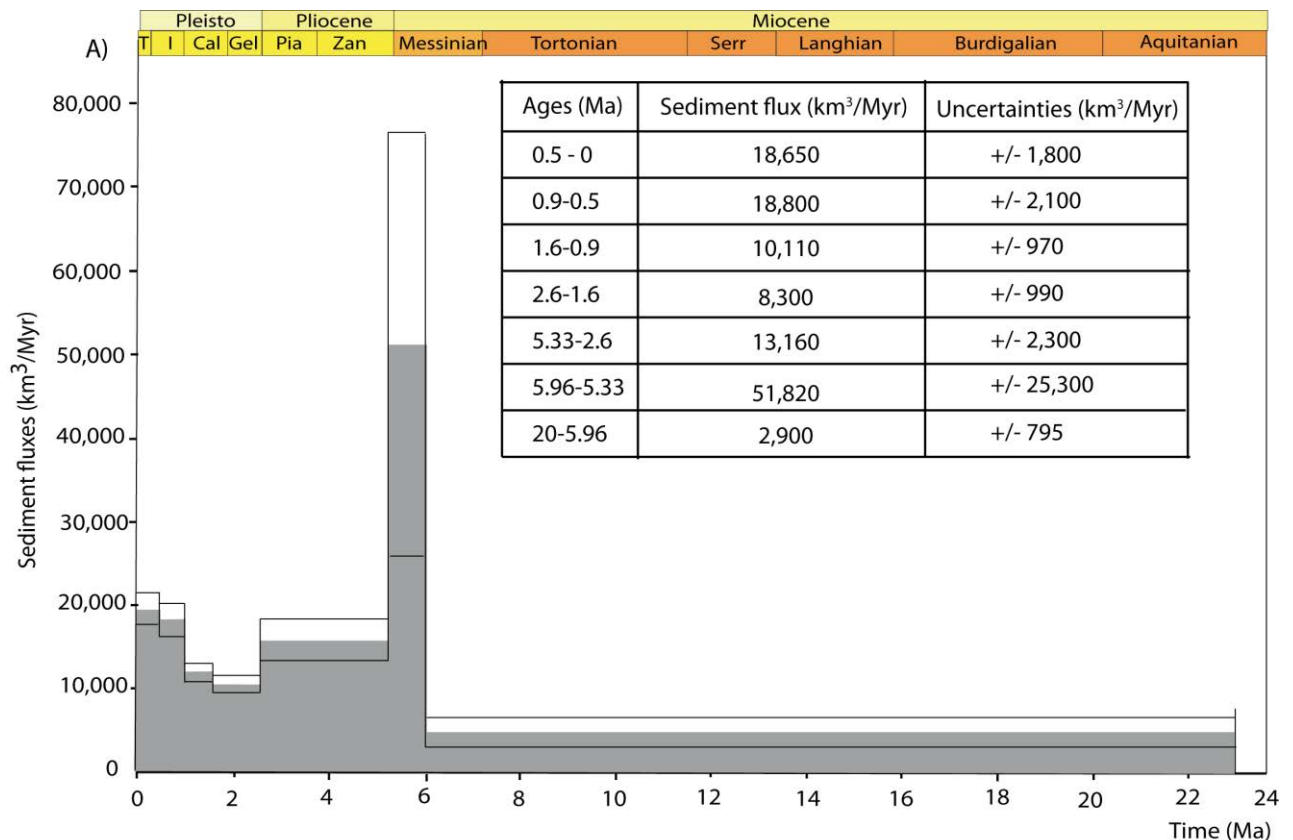


Figure II-2 Carte isochore des épaisseurs (std) des séries Plio-Quaternaires (Leroux, 2012).

L'évolution des flux sédimentaires, pour la première fois être quantifiée en 3D sur cette échelle de temps dans le Golfe du Lion, montre une augmentation très forte (un doublement) des flux détritiques autour de 1 Ma en liaison avec les changements climatiques de la révolution Mi-Pléistocène, également corrélée avec le changement de fréquence et d'amplitude des cycles eustatiques. L'accélération mondiale (par 3) des flux terrigènes il y a 5 Ma est bien confirmée dans notre bassin, même si la crise de salinité messinienne tend à perturber le signal en imprimant un phénomène d'un ordre de grandeur supérieur sur l'évolution général (Leroux, Rabineau *et al.*, soumis à EPSL et **Figure II-3**). On pourrait même suggérer que cette crise puisse être en partie responsable de l'augmentation détritique post-5Ma.



Leroux et al., Figure 4

Figure II-3 Evolution des flux sédimentaires (Leroux, 2012 ; Leroux et al., soumis EPSL).

2-2 Flux au Messinien

L'assèchement de la Méditerranée au Messinien représente une crise sédimentologique, hydrologique, biologique unique dans l'histoire de la Terre. Cette crise « catastrophique », qui correspond à une baisse du niveau de la mer estimée à 1500 m par Clauzon (1982), accompagnée d'une érosion gigantesque sur le continent et le plateau continental, affecte l'ensemble de la Méditerranée et a des conséquences importantes sur le paléoclimat.

Bache, 2008 a montré par l'étude des géométries sédimentaires sur la marge et dans le bassin profond des éléments nouveaux dans la compréhension de la crise messinienne :

- Le premier élément est l'identification, à la transition entre la plate-forme érodée par les fleuves messiniens et le bassin, d'une épaisse série détritique (jusqu'à 1000 m d'épaisseur). La base de cette série érode directement le rebord de la plate-forme miocène et correspond au tout début de l'événement messinien. Cet épisode détritique correspond à la « crise d'érosion messinienne » qui intervient avec l'exondation de la plate-forme du Golfe du Lion avant l'apparition des premières évaporites du bassin. La plate-forme enregistre quant à elle une perte sédimentaire (due à l'érosion) pouvant atteindre 1000 m (Bache *et al.*, 2009). Cette interprétation est radicalement nouvelle puisqu'auparavant sur une petite unité (correspondant à M2) au sommet des unités messiniennes avaient été identifiée (Lofi *et al.*, 2005). Cependant notons que cet aspect fait encore débat dans la communauté messinienne (Bache *et al.*, 2009, 2012 vs Lofi *et al.*, 2008, 2011 par exemple) et ne sera définitivement résolue que par la vérité-terrain d'un forage profond.
- Le deuxième élément important est l'identification, entre l'épisode détritique initial et la halite messinienne bien connue dans le bassin, d'une épaisse série à évaporites inférieures (environ 1500 m). Cette période marque le début de la « crise de salinité messinienne ». Au total, c'est donc près de 3000 m d'évaporites (associées aux dépôts détritiques) qui ont ainsi été déposées en moins de 500 000 ans (Bache *et al.*, 2009). Là encore l'interprétation de Lofi est sur ce point différente puisque ces séries sont attribuées au Tortonien (Lofi & Berné, 2008).
- Un troisième résultat concernait le ré-ennoiement du bassin juste après le dépôt de la halite messinienne avec l'identification inédite d'une surface d'abrasion marine, témoin de la transgression de la ligne de rivage, entre les premiers indices de dépôt de la halite et la surface d'érosion fluviale messinienne. Cette limite d'abrasion marine située à une profondeur constante de 1.6 secondes temps double représente la ligne de rivage juste avant une accélération suffisante de la transgression pour fossiliser la surface d'érosion fluviale messinienne, autour de 5.3 Ma et est en faveur d'un scénario de remise en eau en deux temps (Bache *et al.*, 2012). Cette interprétation remet en question les modélisations de Garcia-Castellanos *et al.*, 2009 qui propose une remise en eau éclair (en moins de 2 ans voire quelques mois !)

Bache identifie donc au total plus de 3000 m de sédiments déposés depuis la « crise d'érosion messinienne » jusqu'au ré-ennoiement du bassin. La plate-forme enregistre quant à elle une perte sédimentaire (due à l'érosion) pouvant atteindre 1000 m. Les modélisations stratigraphiques de la crise messinienne ont permis de confirmer cette l'ampleur des dépôts détritiques issus de l'érosion et du démantèlement de la marge (Leroux *et al.*, soumis N° spécial bSGF).

La chute du niveau marin et l'érosion qui lui est associée entraînent un transfert considérable de sédiments d'amont en aval : les flux détritiques sont ainsi multipliés par plus de 10 pendant le Messinien par rapport au Miocène.

Ces transferts sédimentaires énormes ont des conséquences importantes sur l'évolution de la marge. Les premiers résultats issus d'un backstripping 1D et prenant en considération ces interprétations stratigraphiques suggèrent que le bassin était profond de l'ordre de 3500 m avant la crise messinienne et une première estimation du rebond a été proposée sur la plateforme externe à hauteur des canyons de l'Aude et de l'Hérault (Rabineau *et al.*, 2014). L'étude détaillée des réajustements isostatiques liés à l'événement messinien reste à faire et devrait permettre de mieux comprendre comment réagit la croûte continentale ou transitionnelle à des contraintes de charge (voir chapitre 3).

3 Les Bilans de Dépôt dans le Golfe de Valence

Ces travaux dans le Golfe du Lion ont été étendus à la Marge Catalane dans le cadre du postdoc de Marga Garcia réalisé en collaboration avec Ifremer. Les données industrielles récupérées dans le bassin de Valence dans le cadre de l'Action-Marges nous ont permis là aussi de cartographier et de décrire la surface messinienne (Garcia *et al.*, 2011 ; 2014). Ces deux bassins, Golfe du Lion et Bassin de Valence, montrent la même surface d'abrasion marine, témoin de la transgression de la ligne de rivage. A contrario du modèle en remontée brutale en une phase proposé par Garcia-Castellanos *et al.* (2009), les études stratigraphiques détaillées indiquent que la remise en eau au Zancléen s'effectue en deux phases, de vitesses très différentes, qui produisent deux types de morphologie érosive (Bache *et al.*, 2009 ; Garcia *et al.*, 2011, 2012). L'amplitude de ces deux phases successives est évaluée à 500m pour la première remontée, lente, et 600 à 900m pour la seconde remontée très rapide (Bache *et al.*, 2012).

Une thèse a démarrée en Octobre 2012, en collaboration avec le Laboratoire de Géophysique et géodynamique de l'Ifremer et l'UPMC, pour étendre ces résultats à l'ensemble du Golfe de Valence d'une part et à l'Adriatique d'autre part (Thèse R. Pellen : Géodynamique et impact de la crise d'érosion et de salinité Messinienne sur les transferts sédimentaires au sein du bassin de Valence) avec un focus particulier sur l'existence et l'effet des seuils de Méditerranée (Figure II-4).

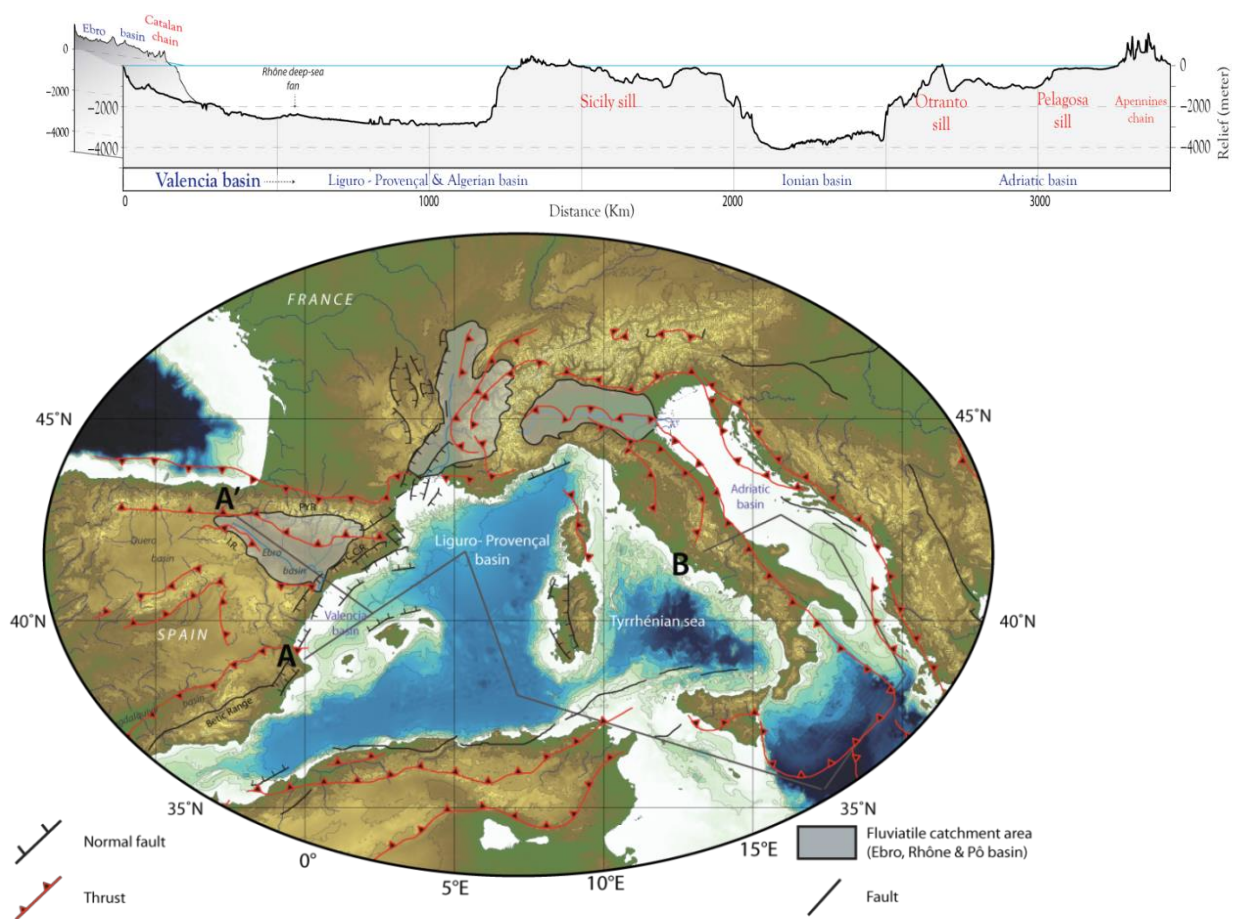


Figure II-4 Coupe topographique allant du bassin surélevé de Valence jusqu'au bassin Adriatique en passant par le seuil de Sicile. Les bassins de l'Ebre et de Valence sont limités et/ou régis par la structure du socle. Ces caractéristiques se devinent par la topographie. (thèse R. Pellen, en cours démarrée 2012, bourse ARED-Labex Mer-IFREMER).

L'estimation des flux sédimentaires est donc en cours dans ce bassin de Valence à partir là aussi d'une large base de données (**Figure II-5**).

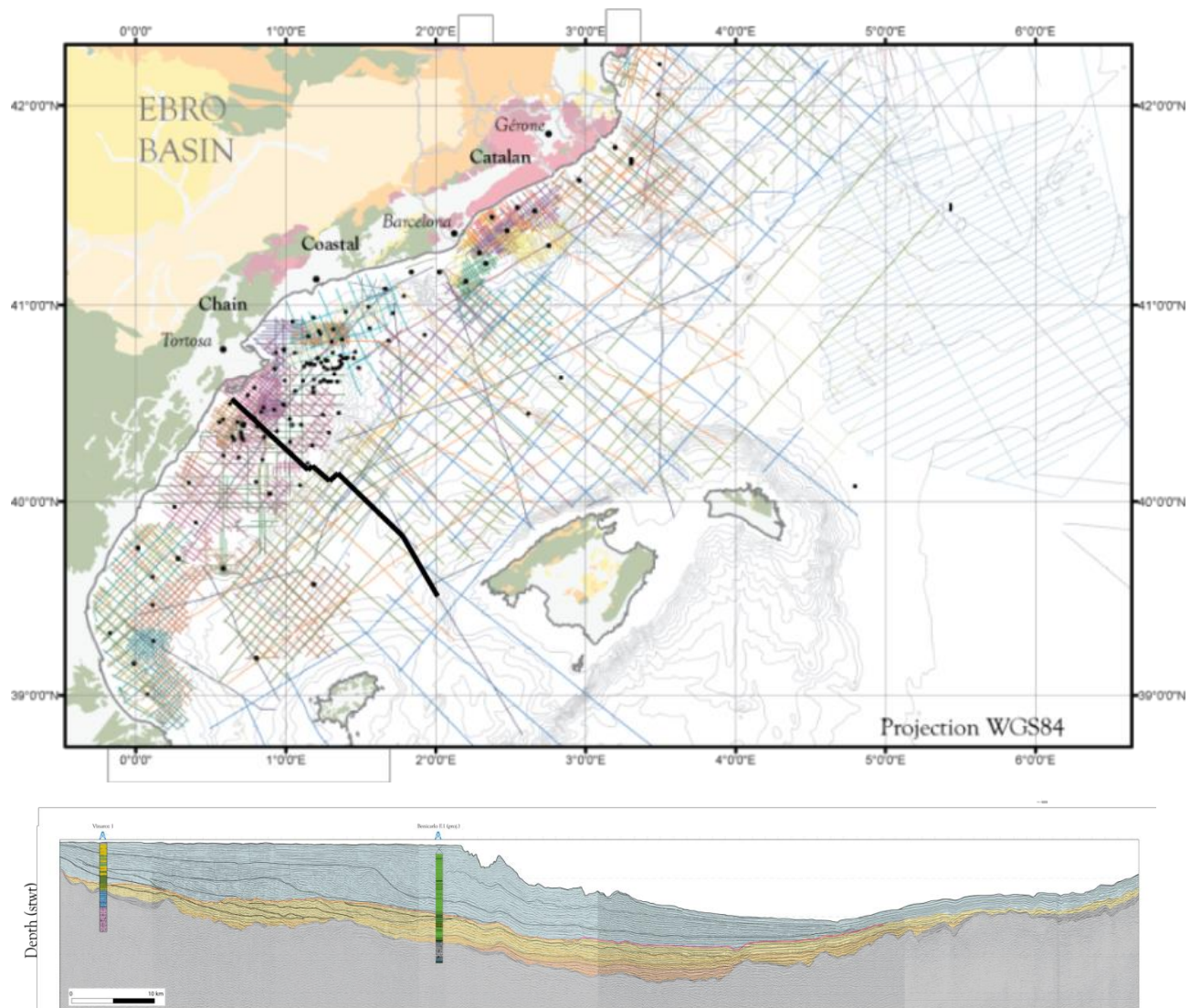


Figure II-5 Base de données Bassin de Valence et profil synthétique (Pellen, 2014)

Un problème particulier est soulevé dans le bassin de Valence, il concerne l'âge et le mode de mise en place du système fluvial de l'Ebre qui ne sont pas clairement établis. Deux principaux modèles proposent une connexion à la Méditerranée soit entre 13.5 Ma et 8Ma (Garcia-Castellanos *et al.*, 2003), soit juste après la crise majeure d'érosion et de salinité messinienne (5.96 Ma- 5.33 Ma) (Babault *et al.*, 2006). Le fait que l'érosion messinienne de l'Ebre ne « remonte » que sur une cinquantaine de kilomètre par rapport à la côte actuelle (alors que le Rhône dont le bassin de drainage est à peu près identique à l'actuel, « remonte » sur plus de 400km par rapport à la côte actuelle) irait plutôt dans le sens de Babault. Cependant, plusieurs études basées sur la morphologie de l'érosion messinienne au niveau de la marge de l'Ebre témoignent de multiples incisions plus ou moins prononcées sur la plate-forme, toutes en lien avec le fonctionnement du système fluvial de l'Ebre (Frey- Martinez, 2004 ; Urgeles *et al.*, 2011), ce qui irait plutôt dans le sens de l'hypothèse de Garcia-Castellanos. Mais ces études sont localisées à une partie de la marge et il n'existe pas de cartographie générale des incisions messiniennes au niveau de la marge de l'Ebre. C'est autour de cette question, qui, nous pensons peut-être résolue par la mesure et la quantification des flux sur la marges. C'est là l'origine de la thèse de [Romain Pellen](#).

4 Les Sources de sédiments : apports de la géochimie sédimentaire

Parmi les outils utilisés pour aborder la problématique des flux sédimentaires, ceux de la géochimie apparaissent comme particulièrement puissants puisqu'ils permettent de reconstituer l'histoire de la composition d'un sédiment depuis sa formation jusqu'à son dépôt. De même, l'utilisation des concentrations et des divers systèmes isotopiques permet d'étudier précisément plusieurs facteurs de contrôle du système : source des sédiments, conditions d'érosion, transport et dépôt. Enfin, c'est un outil intégrateur car elle nécessite une double approche « *downslope ou directe* » (caractérisation du bassin versant) et « *upslope ou indirecte* » (caractérisation des sédiments marins déposés) en parallèle, à la fois à terre et en mer, sur des sédiments modernes et anciens.

J'ai ainsi initié au sein du laboratoire une collaboration avec S. Révillon (chercheur associée au laboratoire, géochimiste) afin de déterminer les sources des sédiments, les conditions de l'érosion, l'influence des processus de transport et de stockages intermédiaires et les conditions de dépôt et de préservation dans le Golfe du Lion.

Dans une première phase, les travaux sur l'Arve et le Rhône lui ont permis de caractériser géochimiquement une partie des sources potentielles du bassin versant du Rhône (approche « *downslope* »). Une analyse bibliographique et l'analyse de quelques échantillons complémentaires lui ont permis de mettre en évidence 4 pôles géochimiques bien marqués : les massifs cristallins, la couverture sédimentaire Crétacé à actuelle, les sédiments *black shales* de la Durance et un pôle africain (sédimentation éolienne).

Dans une deuxième phase, nous avons travaillé sur les sédiments récents déposés dans le Golfe du Lion (approche « *upslope* »). Ceux-ci se positionnent au centre du précédent diagramme et représentent un mélange des trois sources principales : les massifs cristallins (type Mont Blanc), la couverture sédimentaire Crétacé à actuelle (sables, grès, molasse et calcaires) et les marnes noires jurassiques du bassin versant de la Durance (Révillon *et al.*, 2011). L'analyse isotopique couplée de la fraction détritique totale (<63 mm) et des fractions séparées d'argiles (<2mm), de silt fin (2-20mm) et de silt grossier (20- 63 mm) a permis d'affiner l'étude des sources et de mettre en évidence un échantillonnage granulométrique différentiel en fonction de l'érodibilité des roches mères (Révillon *et al.*, 2011). Des analyses complémentaires ont été réalisées récemment (2013), en particulier sur le forage Promess qui ont permis de mettre en évidence des variations de compositions isotopiques des sédiments du Golfe du Lion entre les périodes de bas niveau marin et les périodes de haut niveau (Figure II-6, Révillon *et al.*, in prep.). Ainsi, pendant les périodes glaciaires, les sédiments provenant des bassins versant drainant le Languedoc-Roussillon et les Pyrénées dominent. A l'inverse, pendant les périodes interglaciaires, les sédiments en provenance du bassin versant du Rhône (amont du bassin versant notamment) sont prépondérants dans le mélange sédimentaire. Afin d'expliquer cette variabilité dans la composition du mélange sédimentaire et notamment le fait que les sédiments montrent une influence réduite du Haut Rhône pendant les périodes glaciaires, deux hypothèses peuvent être avancées en fonction du lieu de retention de ces sédiments :

- Pendant les périodes glaciaires, les sédiments du haut bassin versant du Rhône peuvent être stockés sur le continent et ne seraient donc pas transférés vers le bassin et les sédiments produits par l'érosion des bassins versants du Languedoc-Roussillon et des Pyrénées y domineraient. Dans ce cas, la variabilité de composition du mélange sédimentaire aurait une origine climatique.
- Pendant les périodes glaciaires (bas niveau marin), la réorganisation du réseau de drainage du Rhône sur le plateau, liée à l'avancée du trait de côte vers le rebord du plateau, pourrait être telle que les sédiments apportés par le Rhône ne soient pas déposés sur le site de dépôt étudié (forage) mais directement dans l'éventail profond du Rhône via les canyons (du Petit-Rhône, Grand-Rhône ou Marty). Auquel cas, la variation de composition isotopique des sédiments serait liée à un fractionnement volumétrique (par *by-pass*) lié à l'eustatisme.

Ces travaux et résultats prometteurs vont être complétés l'an prochain (analyses de nouveaux échantillons pour obtenir une meilleure résolution) et combinés à des approches géochimiques complémentaires (isotopie stables en particulier) dans le cadre d'une [thèse co-financée](#) par le Labex Mer.

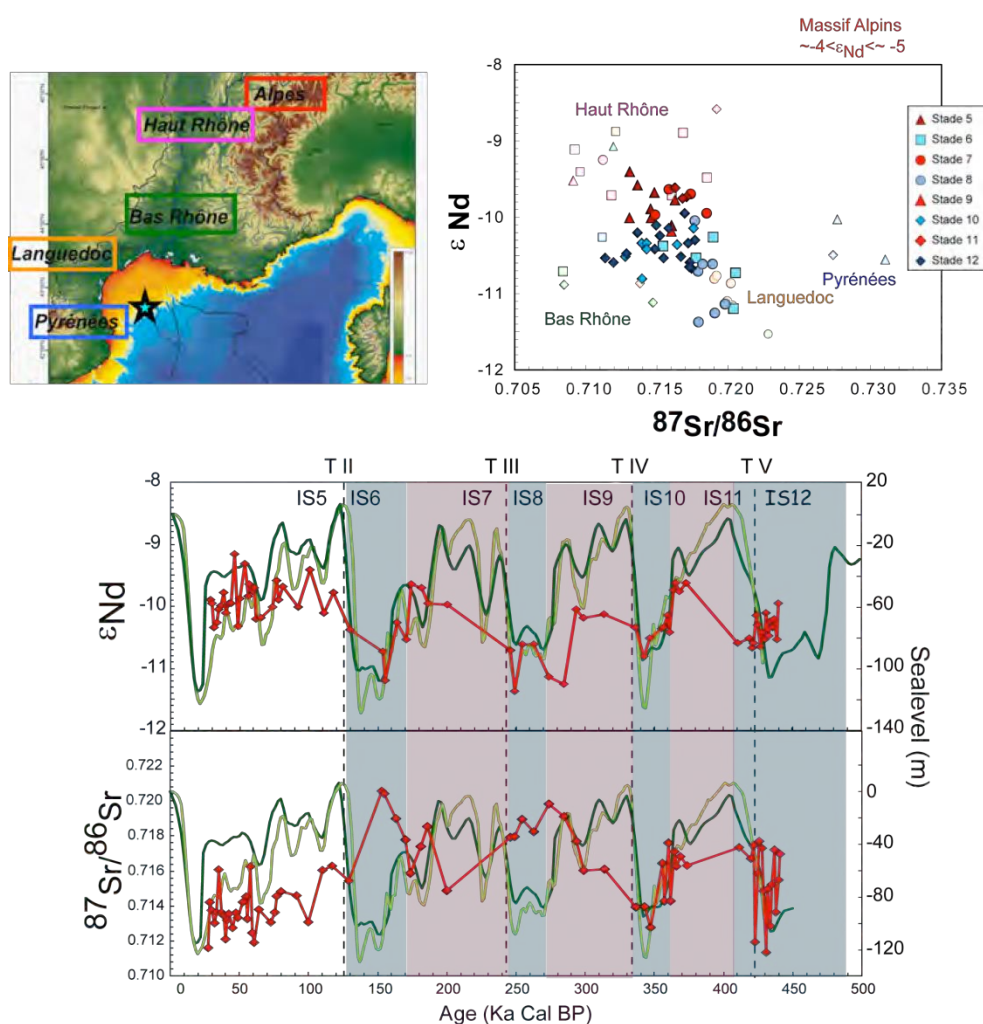


Figure II-6 Compositions isotopiques Sr et Nd acquises dans le Golfe du Lion sur le forage PROMESS PRGLI-4 (graphe du bas) et dans les bassins versant (graphe du haut, symboles vides) (Révillon *et al.*, in prep).

5 Lien Terre-Mer : apports de la géomorphologie

Le lien Terre-Mer a également été abordé au travers de collaboration d'un post-doctorat de 12 Mois avec [Stéphane Molliex](#) en Géomorphologie auprès du Conseil Général du Finistère (CG29) (Janv-Dec 2011) qu'il a poursuivi par un postdoctorat de 18 mois à Ifremer. Les travaux proposés consistaient à améliorer la compréhension du rôle des processus d'érosion dans le développement de la sédimentation et l'évolution géodynamique (en termes de mouvements verticaux) de la marge du Golfe du Lion au cours du Plio-Quaternaire, en comparant les données disponibles en mer avec les données du domaine continental. Ce projet a été soutenu par l'Action Incitative **INSU-SYSTER (EROGOL)** en 2011 et en 2012.

L'approche utilisée a consisté à étudier la morphologie des bassins versants alimentant le Golfe du Lion afin d'essayer de quantifier et de mieux appréhender les paramètres mis en jeu dans les processus d'érosion. Les approches utilisées ont été directes (études pétrographiques des alluvions, mesure de la concentration en nucléides cosmogéniques ^{10}Be produits *in-situ* dans la roche) et indirectes à partir de Modèles Numériques de Terrain (MNT), permettant d'obtenir des paramètres géomorphologiques tels que la reconstruction de profils longitudinaux de rivières, la quantification de volumes érodés, certains paramètres morphologiques des bassins et des rivières, etc...

- Les profils longitudinaux des bassins versants drainant le Golfe du Lion ont tous une allure concave, montrant que le réseau hydrographique est plus ou moins à l'équilibre, c'est à dire que l'érosion compense la surrection tectonique.
- Les taux de dénudation à grande longueur d'onde ont été appréhendés grâce à deux approches différentes : (A) l'approche géomorphologique par l'estimation des volumes érodés et (B) l'approche directe par l'étude de la concentration en nucléides cosmogéniques produit *in-situ* dans les roches. Les premiers résultats donnent des valeurs comparables avec des taux de dénudation moyen de l'ordre de 122 ± 54 mm/ka (méthode A) de 127 ± 61 mm/an (méthode B) et confortent les résultats obtenus sur les flux sédimentaires à partir des volumes déposés par [Leroux, 2012](#) ; [Leroux et al., in prep](#) (voir Chapitre II).

Afin de caractériser les mouvements verticaux de la marge au cours du quaternaire, une synthèse cartographique des terrasses alluviales du Sud de la France a été menée à partir des données de la carte géologique de la France à 1/50000 complétées par les études locales disponibles dans la littérature lorsqu'elles existaient, notamment : [Giret \(1997\)](#) pour l'Agly, [Larue \(2001\)](#) pour l'Aude et [Dubar \(1975\)](#) pour la Durance. Une des difficultés de ce travail a été l'homogénéisation des niveaux de terrasses, dont la notation est souvent très différente d'une carte à l'autre. Globalement, 7 grands niveaux de terrasses ont été déterminés. Les 7 niveaux de terrasses n'ont été retrouvés que sur les rivières importantes, notamment le plus

ancien qui correspond à la surface d'abandon pliocène localement estimé entre 1,8 et 2,6 Ma (Dubar et al., 1998, Clauzon, 1996). Les niveaux de terrasses ont été désignés par les termes T1 à T7, de la plus récente à la plus ancienne, T1 correspondant à la terrasse Holocène (lit mineur actuel). Afin d'estimer la surrection dans le domaine continental aboutissant à l'étagement des terrasses alluviales du SE de la France, nous avons utilisé le plus ancien niveau de terrasse exploitable représenté sur tous les profils de rivières. Il s'agit de la terrasse Riss (T4), qui présente l'avantage d'être bien préservée pour toutes les rivières et d'avoir été datée dans le bassin à différents endroits (Brocard *et al.*, 2003; Molliex *et al.*, soumis). L'abandon de cette terrasse résulte du début de la glaciation Riss il y a 190 ka. Ainsi, nous avons répertorié les lambeaux de cette terrasse le plus en amont possible et avons calculé la différence d'altitude existante entre cette terrasse et la terrasse actuelle. La distance par rapport à l'exutoire a également été calculée, ce qui permet d'obtenir un angle de basculement, en considérant que le point de convergence de toutes les terrasses est au niveau de la côte. Les angles obtenus sont tous du même ordre de grandeur, soit d'environ 0,04°. Le basculement moyen à terre est donc de l'ordre de 0,21°/Ma. Cette valeur est comparable mais dans le sens inverse par rapport au point de basculement à celle trouvée mer, où la subsidence a été récemment étudiée et calculée de l'ordre de 0,19°/Ma (Rabineau *et al.*, 2006 ; Rabineau *et al.*, 2014). L'ensemble de ces résultats sont en cours de publication (Molliex *et al.*, 2011 ; Molliex *et al.*, en cours).

Les résultats de ces travaux vont permettre *in fine* de quantifier les taux de dénudation d'un large bassin de drainage en utilisant 4 méthodes différentes dans une approche « *Source2Sink* » (Molliex, *et al.*, in prep., **Figure II-7**).

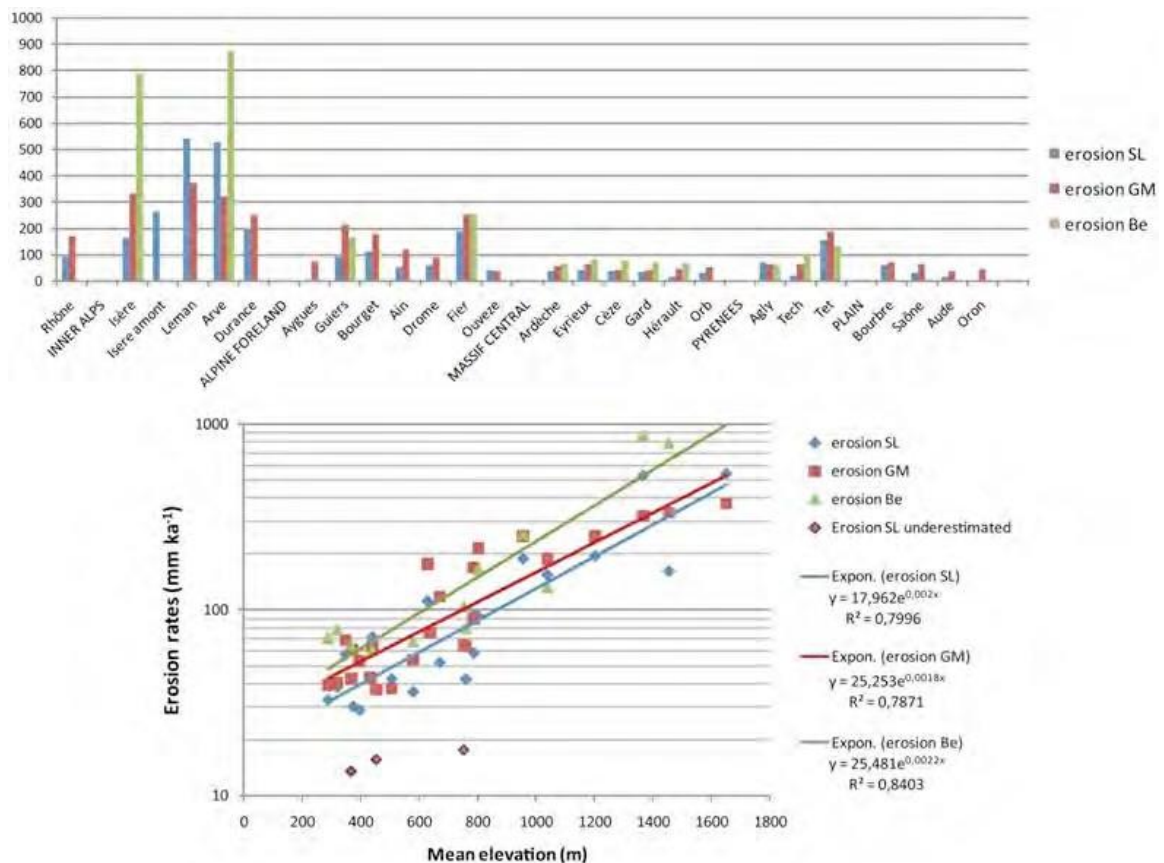


Figure II-7 A) Détermination des taux de dénudation dans le bassin versant du Golfe du Lion en utilisant 2 méthodes indépendantes (volumes érodés en rouge et mesure de concentration cosmogéniques en vert) comparés aux mesures de flux sédimentaires actuels en bleu. B) Répartition des taux de dénudation en fonction l'élévation moyenne. Une relation globalement exponentielle entre les taux d'érosion et l'élévation moyenne est mise en évidence (Molliex, et al., in prep.)

ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :

1. *Leroux, E., **Rabineau, M.**, Aslanian, D., Granjeon, D., Gorini, C., Droz, L. *et al.* Stratigraphic simulation on the shelf of the Gulf of Lion : testing subsidence rates and sea-level curves during Pliocene and Quaternary, 2014, *Terra Nova*.
2. Miller, K.G., Mountain, G.S., Browning, J.V., Katz, M.E., Monteverde, D., Sugarman, P.J., Ando, H., Bassetti, M.A., Bjerrum, C.J., Hodgson, D., Hesselbo, S., Karakaya, S., Proust, J.-N., and **Rabineau, M.**, 2013. Testing sequence stratigraphic models by drilling Miocene clinothems on the New Jersey shallow shelf, *Geosphere*, v. 9, no. 5, p. 1236-1256. doi:10.1130/GES00884.1.
3. Bache, F., Popescu S., **Rabineau, M.** Gorini, C. Suc, J-P, Clauzon, G., *et al.*, 2012. A two-step process for the reflooding of the Mediterranean Basin after the messinian salinity crisis, *BASIN RESEARCH*, Volume: 24 Issue: 2, Pages: 125-153, DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00521.x, Published: APR 2012
4. Révillon, S., Jouet, G., Bayon, G., **Rabineau, M.**, Dennielou, B., Hémond, C., Berné, S., 2011. The provenance of sediments in the Gulf of Lions, Western Mediterranean Sea. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Volume: 12 Article Number: Q08006 DOI: 10.1029/2011GC003523 Published: AUG 10 2011

5. *Garcia, M., Maillard, A., Aslanian, D., **Rabineau, M.**, Alonso, B., Gorini, C., Estrada, F., 2011. The Catalan margin during the Messinian Salinity Crisis, Physiography, morphology and sedimentary Record, *Marine Geology, Volume 284, Issues 1-4, 1 June 2011, Pages 158-174*
6. *Bache, F., Gorini C., Olivet J. L., **Rabineau M.**, *Baztan J., Aslanian D., Suc, J-P. (2009), The Messinian Erosional and Salinity Crisis: view from the Provence Basin (Gulf of Lions, Western Mediterranean): *Earth and Planetary Science Letters, Volume 286, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 139-157.*
7. Lofi, J., **M. Rabineau**, C. Gorini, S. Berné, G. Clauzon, P. De Clarens, Dos Reis, A. T., Mountain, G., Ryan, W. B.F., Steckler, M., Fouchet, C., 2003 : Plio-Quaternary prograding clinoform wedges of the western Gulf of Lions continental margin (NW Mediterranean) after the Messinian Salinity Crisis : *Marine Geology*, 198 : 289-317

ARTICLES SOUMIS OU EN PREPARATION en rapport avec ce chapitre :

- 1- *E. Leroux, **M. Rabineau**, D. Aslanian, S. Molliex, F. Bache, C. Robin, D. Granjeon, C. Gorini, L. Droz, M. Moulin, J.-P. Suc, Post-rift evolution of detrital sediments fluxes in the Provençal basin: relation with climate and/or tectonic, *soumis Avril 2014 to EPSL*
- 2- *Molliex, S., **Rabineau, M.**, *Leroux, E., Bourlès, D., Révillon, S., Aslanian, D., Geomorphological feedback between watershed erosion and marine sedimentation in the Gulf of Lion margin (SE France), *to be submitted to Geomorphology.*
- 3- Bache, F., Gargani, J., Suc, J.-P., Gorini, C., **Rabineau, M.**, Olivet, J.-L., Popescu, S.-M., Leroux, E., Jouannic, G., Do Couto, D., Rubino, J.-L., Clauzon, G., Dos Reis, A.T. & Aslanian, D., Detailed process of the peak of the Messinian Salinity Crisis : Evidences from the Gulf of Lions (NW Mediterranean), *Marine and Petroleum Geology*, Submitted May 2014.
- 4- *Leroux, E., **Rabineau M.**, Aslanian D., Bache, F., Droz, L., Gorini, C., Rubino, J.-L., Guennoc, P., Suc, J.-P., Lofi, J., Molliex, S., Granjeon, D., Dos Reis, T., Moulin, M., Olivet, J.-L., Mauffret, A., Schnurle, P. & l'Action Marges, Atlas sismique des marqueurs stratigraphiques post-rift dans le Golfe du Lion et bassin Provençal, in prep.
- 5- Gorini, C., Montadert, L., **Rabineau, M.**, submitted : the Messinian Salinity Crisis, in prep.
- 6- *Garcia, M., Maillard, A., Aslanian, D., **Rabineau, M.**, Alonso, B., Gorini, C., Estrada, F., in prep. The Catalan margin during the Messinian Salinity Crisis, Physiography, morphology and sedimentary Record, Planche de l'Atlas Messinien, vol. 2, in prep.

AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :

- Armitage, J.J., *et al.* (2011), Transformation of tectonic and climatic signals from source to sedimentary archive, *Nature Geoscience*, 4, 231-235.
- Babault, J., Loget, N., Van den Driessche, J., castellort, S., Bonnet, S., Davy, P., Did the Ebro basin connect to the Mediterranean before the messinian salinity crisis?, *Geomorphology*, 81 1-2, 155-165, 2006.
- Braun, J., 2002. Quantifying the effect of recent relief changes on age-elevation relationships. *Earth Planet. Sci. Lett.* 200, 331-343.
- Braun, J., van der Beek, P., Valla, P., Robert, X., Herman, F., Glotzbach, C., Pedersen, V., Perry, C., Simon-Labric, T., Prigent, C., 2012. Quantifying rates of landscape evolution and tectonic processes by

- thermochronology and numerical modeling of crustal heat transport using PECUBE. *Tectonophysics* 524–525, 1–28.
- Brocard, G.Y., van der Beek, P.A., Bourlès, D.L., Siame, L.L., Mugnier, J.-L., 2003. Long-term fluvial incision rates and postglacial river relaxation time in the French Western Alps from ¹⁰Be dating of alluvial terraces with assessment of inheritance, soil development and wind ablation effects. *Earth Plan. Sc. Lett.*, 209, p. 197-214.
 - Champagnac, J-D., Valla, P., Herman, F., 2013. Late-Cenozoic relief evolution under evolving climate: A review, *Tectonophysics* 614 (2014) 44-65
 - Clauzon (1982). Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du « *dessicated deep-basin model* » [Hsü, Cita, Ryan, 1973]
 - Clauzon, G., 1996. Limites de séquences et évolution géodynamique. *Géomorphologie* 1, p. 3–22.
 - Dubar, M., 1975. Les formations quaternaires de la rive gauche de la Moyenne Durance, des Mées à Oraison (Alpes de Haute Provence). *Géologie Méditerranéenne* 2 (2), 49-58.
 - Dubar, M., Aguilar, J.-P., Chaline, J., Michaux, J., Semah, F., 1998. Données chronologiques (mammifères et magnétostratigraphie) sur les dépôts plio-pléistocènes au toit du bassin de Valensole ; implications morphodynamiques. *Géologie de la France*, p. 57-68.
 - Frey-Martinez, J., Cartwright, J.A., Burgess, P.M., Vicente-Bravo, J., 3D seismic interpretation of the messinian unconformity in the Valencia Basin, Spain, in: Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A.,
 - Lappin, M., Underhill, J.R. (Ed.), *Geological Society, London* 29, 91-100, 2004.
 - Garcia-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernández, M., Verges, J., Vicente, R.D., 2009. Catastrophic flood of the mediterranean after the messinian salinity crisis, *Nature*, 462, 778–781.
 - Giret, A., 1997. L'Agly et ses terrasses dans la traversée du Fenouillèdes. *Quaternaire* 8(4), 409-418.
 - Gosse, J. C., Phillips, F. M., 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20, p. 1475-1560.
 - Guillocheau, F., *et al.* (2012), Quantification and causes of the terrigenous sediment budget at the scale of a continental margin: a new method applied to the Namibia-South Africa margin, *Basin Research*, doi: 10.1111/j.1365-2117.2011.00511.
 - Larue, J.-P., 2001. Tectonique et dynamique fluviale quaternaires : l'exemple de la basse vallée de l'Aude (France). *Quaternaire* 12 (3), 169-178.
 - Lofí, J., Gorini, C., Berné, S., Clauzon, G., Reis, A. D., Ryan, W., Steckler, M., 2005. Erosional processes and paleo- environmental changes in the western gulf of lions (SW France) during the messinian salinity crisis. *Mar. Geol.* 217, 1–30.
 - Lofí, J., Berné, S., 2008. Evidence for pre-messinian submarine canyons on the Gulf of Lions slope (Western Mediterranean). *Mar. Petrol. Geology* 25(8), 804–817.
 - Lofí, J., Sage, F., Déverchère, J., Loncke, L., Maillard, A., Gaullier, V., Thion, I., Gillet, H., Guennoc, P., Gorini, C., 2011b. Refining our knowledge of the Messinian salinity crisis records in the offshore domain through multi-site seismic analysis. *Bulletin Société Géologique de France* 182, 163-180.
 - Molnar, P., et P. England (1990), Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?, *Nature*, 346, 29-34.
 - Peizhen, Z., *et al.* (2001), Increased sedimentation rates and grain-sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates, *Nature*, 410, 891-897.
 - Raymo, M.E., et W.F. Ruddiman (1992), Tectonic forcing of late Cenozoic climate, *Nature*, 359, 117-122.
 - Révillon, S., *et al.* (2011), The provenance of sediments in the Gulf of Lions, western Mediterranean Sea, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, Q08006, doi:10.1029/2011GC003523.
 - Stoker, M.S., *et al.* (2010), Cenozoic post-rift sedimentation off northwest Britain: Recording the detritus of episodic uplift on a passive continental margin, *Geology*, 38(7), 595-598.

- Urgeles, R., Camerlenghi, A., Garcia-castellanos, D., De Mol, B., Garcès, M., vergès, J., Raslamk, T., Rardmank, M., New constraints on the Messinian sea level drawdown from 3D seismic data of the Ebro Margin, western Mediterranean, *Basin Research* 23, 123-145, 2011.
- Valla, P.G., *et al.* (2011), Significant increase in relief of the European Alps during mid-Pleistocene glaciations, *Nature Geoscience*, 4, 688-692.
- Van der Beek, P., Valla, P.G., Herman, F., Braun, J., Persano, C., Dobson, K.J., Labrin, E., 2010. Inversion of thermochronological age-elevation profiles to extract independent estimates of denudation and relief history—II: application to the French Western Alps. *Earth Planet. Sci. Lett.* 295, 9–22.
- von Blanckenburg, F., 2005. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters* 237 (3-4), 462-479.
- Walford, H.L., *et al.* (2005), Solid sediment load history of the Zambezi delta, *Earth and Planetary Science Letters*, 238, 49-63.
- Whipple, K.X. (2009), The influence of climate on the tectonic evolution of mountain belts, *Nature Geoscience*, 2, 97-104.
- Willenbring, J.K., et F. von Blanckenburg (2010), Long-term stability of global erosion rates and weathering during late-Cenozoic cooling, *Nature*, 456, 211-214.

CHAPITRE III

LES SEDIMENTS : ARCHIVES DE LA GEODYNAMIQUE

ENSEIGNEMENTS SUR LA FORMATION ET L'EVOLUTION DES BASSINS ET DES MARGES (MOUVEMENTS VERTICAUX)

1 Problématique et état des lieux au moment des travaux

Depuis les modèles classiques de Dan McKenzie (1978) et Brian Wernicke (1985), la compréhension de la formation des marges continentales passives, c'est-à-dire du processus d'amincissement de la lithosphère continentale qui conduit à la subsidence de la marge et au remplissage sédimentaire, demeure un sujet majeur des Sciences de la Terre. Combinant les deux premières propositions, de nombreux modèles conservatifs, c'est-à-dire qui excluent tout échange entre le manteau et la croûte continentale et donnent un rôle passif au manteau, impliquant polyphasage et processus d'amincissement qui varie avec la profondeur, ont été proposés pour expliquer telle ou telle autre marge. Cependant, la grande variété des morphologies des marges passives questionne en elle-même l'idée de l'unicité d'un processus de formation (**Figure III-1**). D'autre part, ces modèles conservatifs induisent un mouvement horizontal de grande ampleur qui n'est jamais testé par des reconstructions paléogéographiques. Or, du processus d'amincissement des marges passives ou des bassins sédimentaires dépendent la subsidence, l'histoire thermique (crucial dans le domaine pétrolier) et l'évolution du remplissage sédimentaire. Nous verrons que cette évolution du remplissage sédimentaire est aussi, en retour, une fenêtre sur à la rhéologie de la lithosphère.

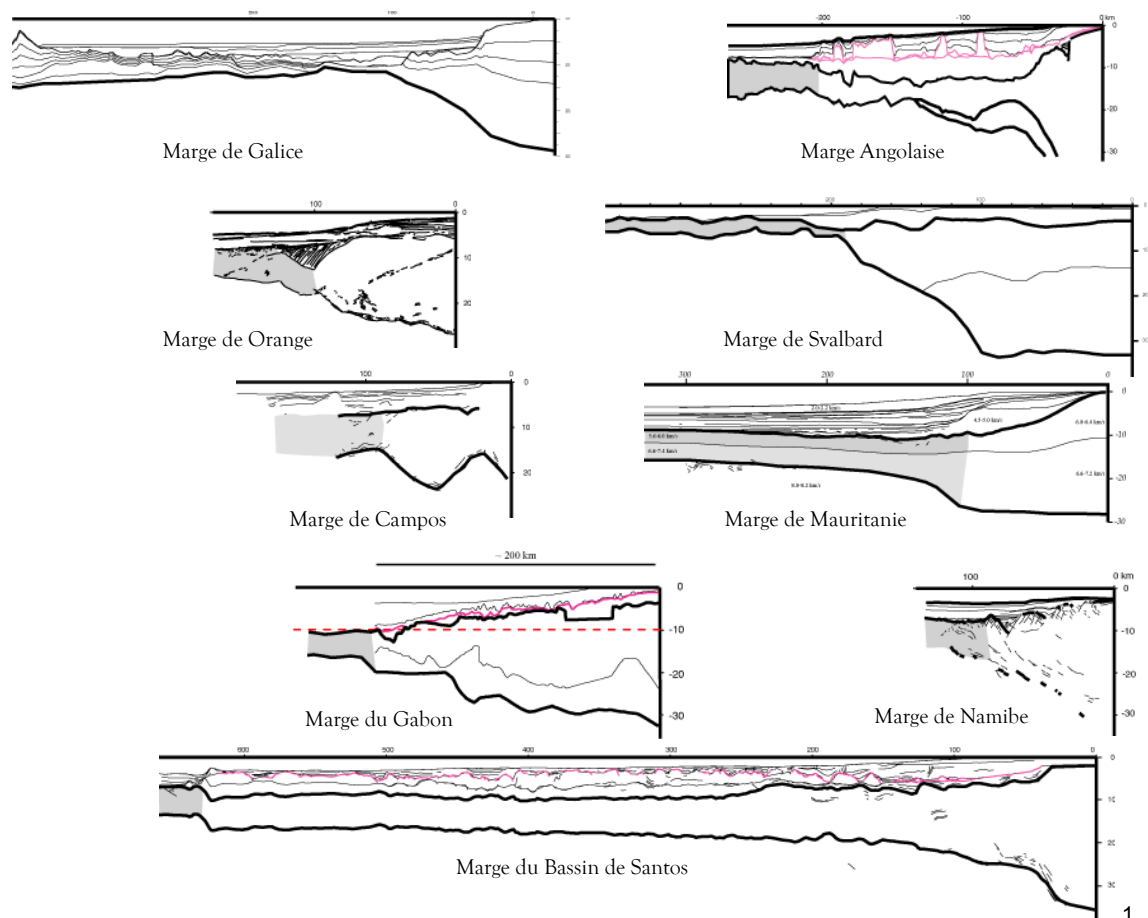


Figure III-1 Exemple de la diversité de la morphologie des marges passives dans l'Atlantique. Toutes les coupes sont aux mêmes échelles, verticale et horizontale, et ont été dessinées avec la côte sur la droite pour un souci de comparaison (Aslanian, Moulin & Rabineau, Unpublished)

Notre approche, et notre collaboration avec l'équipe Marges du Laboratoire de Géophysique et Géodynamique de l'Ifremer, reposent sur trois constatations qui aboutissent à trois règles qui construisent le fil directeur, de notre questionnement sur la genèse des Marges Passives :

- A l'instar des orogènes, les marges passives sont une conséquence de la Dérive des Continents : il est ainsi indispensable de ne pas déconnecter l'étude des marges passives de l'étude des mouvements relatifs des plaques lithosphériques entre elles. Pourtant, il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude de ce type avant l'article fondateur sur le segment central de l'Atlantique Sud (Aslanian et al., 2009) qui a présenté, il y a un lustre, une nouvelle méthodologie qui associe analyses crustale, sédimentaire et cinématique.
- **Règle 1** : Le mouvement horizontal du processus de formation doit être, dans la mesure du possible, contraint afin de donner les bornes limitatives et de tester les

différents modèles (Aslanian & Moulin, 2010 ; 2012) par des études cinématique très précises comme celles à laquelle j'ai participé sur différents segments de l'océan Atlantique (Aslanian et al., 2009 ; Moulin et al., 2012) et de la mer Méditerranée Occidentale (Leroux, Master 1 ; Aslanian et al., submitted). Ces contraintes portent sur la définition de la marge homologue, et donc de la reconstruction du système entier, et sur les mouvements horizontaux possibles, en cohérence avec les données géophysiques et géologiques, terrestres comme marines.

- Réceptacles des produits de l'érosion continentale, les Marges Passives accumulent un enregistrement sédimentaire qui dépend du flux sédimentaire et de l'accommodation liée à la subsidence et aux variations du niveau de la mer. La pile sédimentaire conserve ainsi dans son architecture l'enregistrement des mouvements verticaux de la marge. L'histoire racontée par les sédiments nous renseigne ainsi, outre sur l'érosion et les variations du paléoclimat, sur l'histoire de la subsidence et des événements tectoniques (rebond, déplacement de masses –Moulin et al., 2005 ; Rabineau et al., 2006 ; Aslanian, Rabineau et al., 2012 ; Rabineau et al., 2014 ; Aslanian et al., submitted). Ils sont de plus une fenêtre sur à la rhéologie de la lithosphère (Leroux et al., submitted).
- **Règle 2 :** une attention toute particulière doit être portée à la lecture de l'enregistrement sédimentaire comme témoin des processus profonds. In fine, la modélisation numérique de la formation de cette pile sédimentaire permettra de tester les différentes hypothèses formulées la paléo-bathymétrie de l'encaissant et sur l'histoire de sa subsidence.
- Les Marges passives présentent une grande variété morphologique, surimpression probable d'un processus d'amincissement commun à des histoires et des caractères plus locaux, probablement liées à la structure thermique du manteau sous-jacent et/ou à l'héritage tectonique. Cette variété ne peut être abordée sans des reconstructions de systèmes complets, avec les marges homologues « exactes », dans le cadre d'une Typologie effectuée en utilisant la bibliographie, les images sismiques pétrolières au cours de nos collaborations scientifiques avec ces compagnies et la réalisation de mission océanographique de sismique réflexion et grand angle, dans des régions ciblées répondant à un certain nombre de questions (segmentation, héritage, sag, etc.. Rabineau et al., 2001 ; Moulin et al., 2006, Aslanian et al., 2009 ; Aslanian, Moulin & Sanba Team, 2013, Aslanian et al., Submitted)
- **Règle 3 :** Les études de détail, sur une zone précise comme le laboratoire naturel que représente la Golfe du Lion et la marge Sarde, doivent se nourrir et éclairer cette Typologie qui doit se fonder tout aussi bien sur les marges passives que sur les bassins intracontinentaux.

Enfin, l'histoire de la marge passive ne s'arrêtant pas à la rupture de la croûte continentale, en particulier en ce qui concerne la subsidence – et donc l'enregistrement

sédimentaire - (Aslanian *et al.*, 2009 ; Bache *et al.*, 2010, Moulin *et al.* Submitted), une attention particulière sera portée à l'exacte nature et la formation de la première croûte océanique et aux anomalies magnétiques bordières associées aux domaines intermédiaires.

2 L'exemple de la Méditerranée Occidentale

La subsidence des marges est un prérequis à la préservation des sédiments ; de même, tout mouvement vertical de la marge doit pouvoir être lu, quantifié, daté dans l'enregistrement sédimentaire. Mes collaborations avec mes collègues structuralistes et géodynamiciens, nous ont permis de corréliser les processus de surface aux événements profonds sur différentes marges. Le Golfe du Lion et la marge Sarde, qui forment un bassin quasi fermé, jeune et bien échantillonné, représentent le laboratoire naturel pour mettre au point et tester notre méthodologie.

2-1 Le Sédiment, marqueur paléobathymétrique :

Dans le Golfe du Lion, l'étude des structures de la croûte et de la sédimentation initiale (avec plusieurs surfaces d'érosions majeures identifiées et datées) nous a permis de montrer que la marge restait en position haute jusqu'à l'Aquitaniens (23-20 Ma – Bache *et al.*, 2010, **Figure III-2**) : l'ensemble du substratum, mésozoïque et paléozoïque, paraît largement érodé. Cette érosion affecte l'ensemble de la marge, pratiquement jusqu'à la zone « transitionnelle ». Une position surélevée, aérienne, de cette zone jusqu'à la fin de l'épisode de rifting est mise en évidence. Cette position haute contraste avec la zone camarguaise où un important bassin *synrift* Oligocène est connu et est en contradiction avec les modèles de subsidence les plus employés. A partir de l'Aquitaniens (fin du *rifting*), la rupture semble limitée à une zone étroite d'environ 50Km et l'ensemble du Golfe du Lion s'affaisse alors (Aslanian *et al.*, submitted). Cette position haute, anormale par rapport aux modèles en cours, a été observée sur bien d'autres marges et semble un caractère primordial (Moulin *et al.*, 2005 ; Aslanian *et al.*, 2009 ; Labails *et al.*, 2009 ; Péron-Pinvidic & Manatschal 2009). En Méditerranée, l'événement Messinien représente un autre paléomarqueur bathymétrique important pour la reconstruction de l'évolution (Bache *et al.*, 2010 ; Pellen, These en cours).

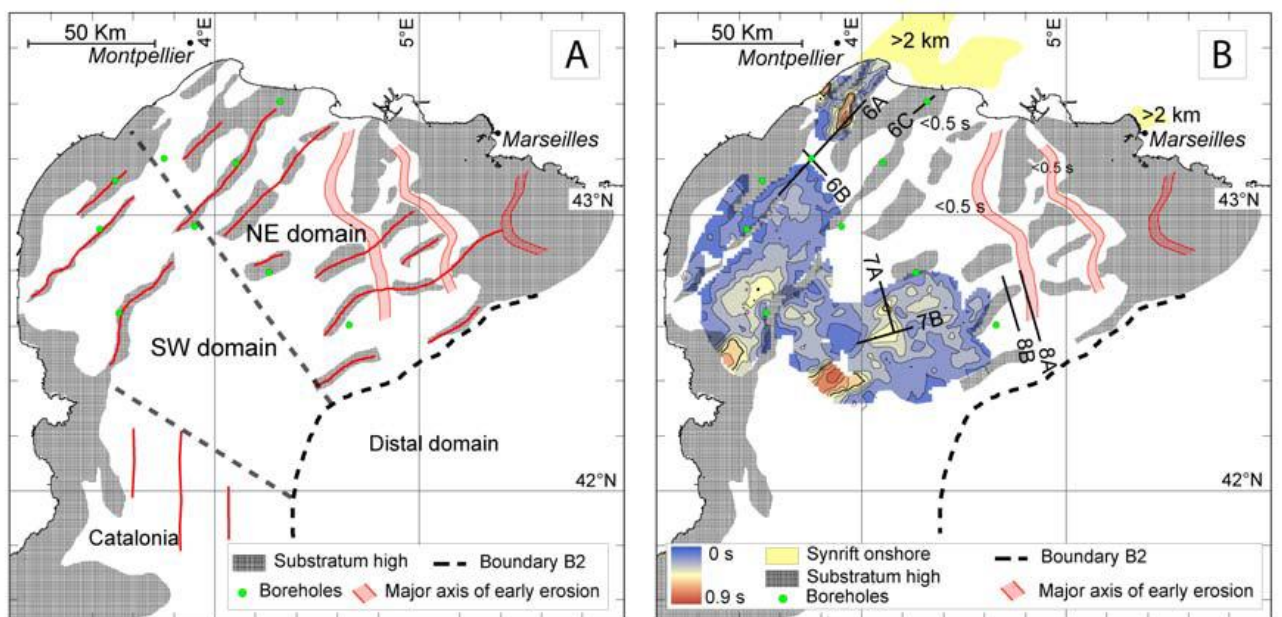
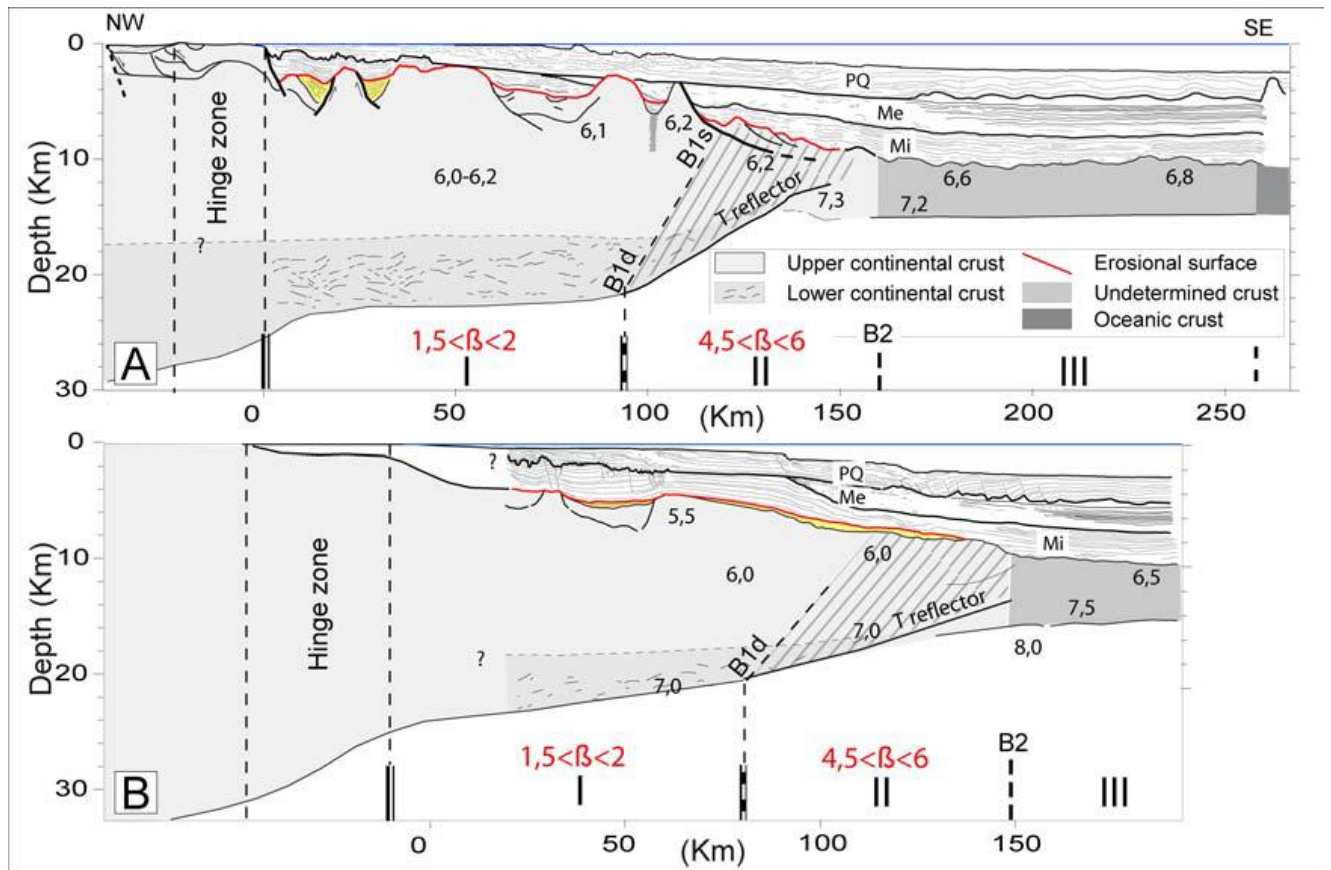


Figure III-2 Mise en évidence d'une surface d'érosion précoce servant de paléomarqueur sédimentaire et indiquant la position haute de la marge jusqu'à l'Aquitainien. En haut : visualisation sur les profils sismiques ECORS ; en Bas : cartographie sur l'ensemble de la plate-forme avec zone en dépôt (SW) et zone en érosion (NE) (Bache et al., 2010).

2-2 Le sédiment, marqueur des mouvements verticaux :

La géométrie des dépôts nous a également fourni de précieux indicateurs des mouvements verticaux ayant affectés les sédiments depuis le rifting. Trois domaines différents de subsidence sont distingués : les domaines de plate-forme, de pente (où la subsidence prend la forme d'un basculement) et le bassin profond (qui s'affaisse de façon purement verticale) (**Figure III-3**). Trois lignes charnières ou hinge-line sont ainsi définies : la première située entre 15 à 20 km en amont du trait de côte actuelle, au début de l'amincissement de la croûte (première remontée du Moho), la deuxième au niveau de la rupture de pente de l'actuel plateau au-dessus à la transition avec un domaine de croûte continentale plus fortement amincie au sein duquel un sous domaine anomalous à fortes vitesses sismiques est observé, la troisième à l'aplomb de la transition entre le domaine à croûte continentale fortement amincie et le domaine à croûte atypique (*Rabineau et al., 2014, Leroux et al., submitted*) (**Figure III-4**).

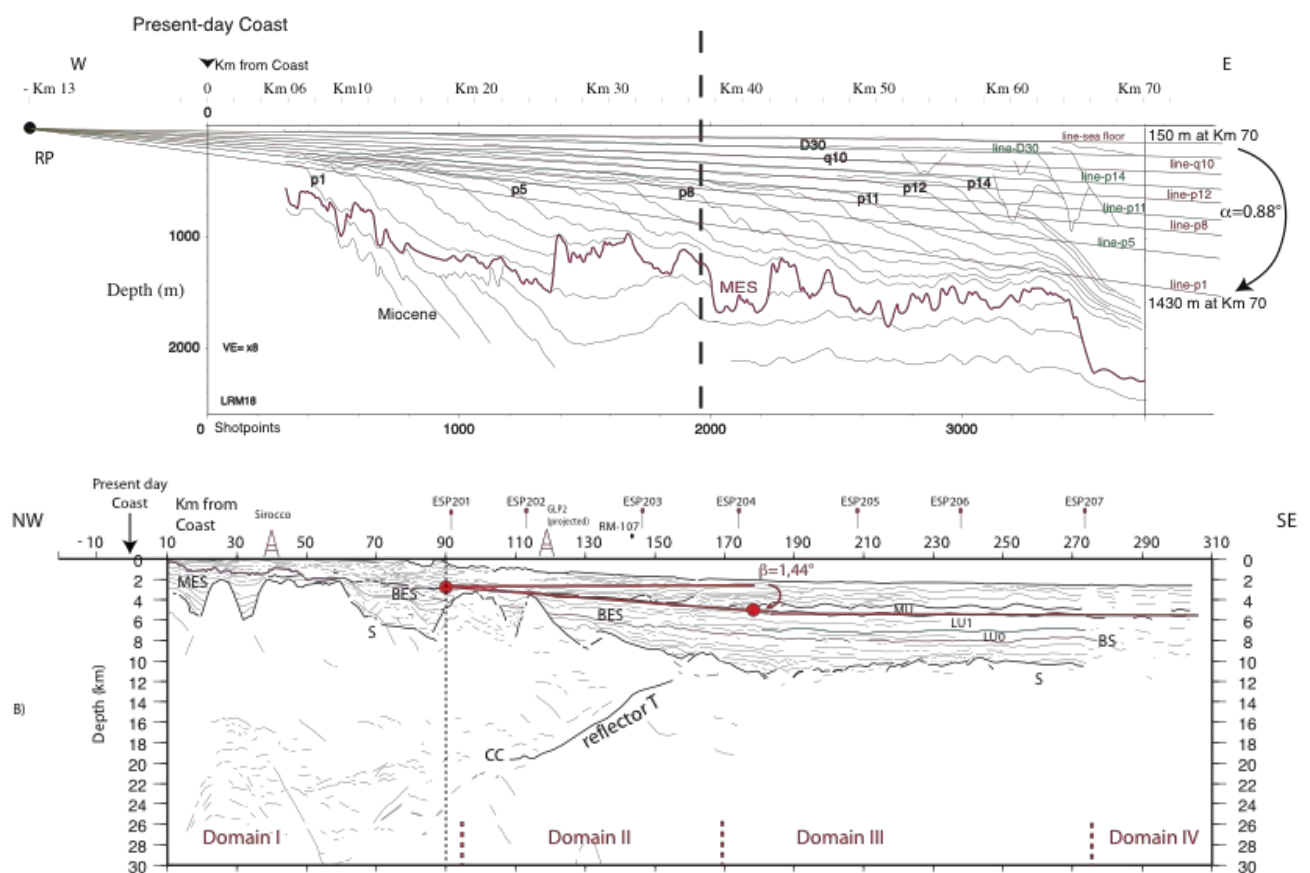


Figure III-3 Mesure de la subsidence à l'aide de marqueurs sédimentaires. En haut : au cours du Pliocène-Quaternaire à l'aide des « topsets » de clinoforme, montrant le « tilt » de la plate-forme. En bas : depuis la base du dépôt du sel, on notera l'allure horizontale de la base du sel qui montre la subsidence purement verticale dans le bassin profond (*Rabineau et al., 2014*).

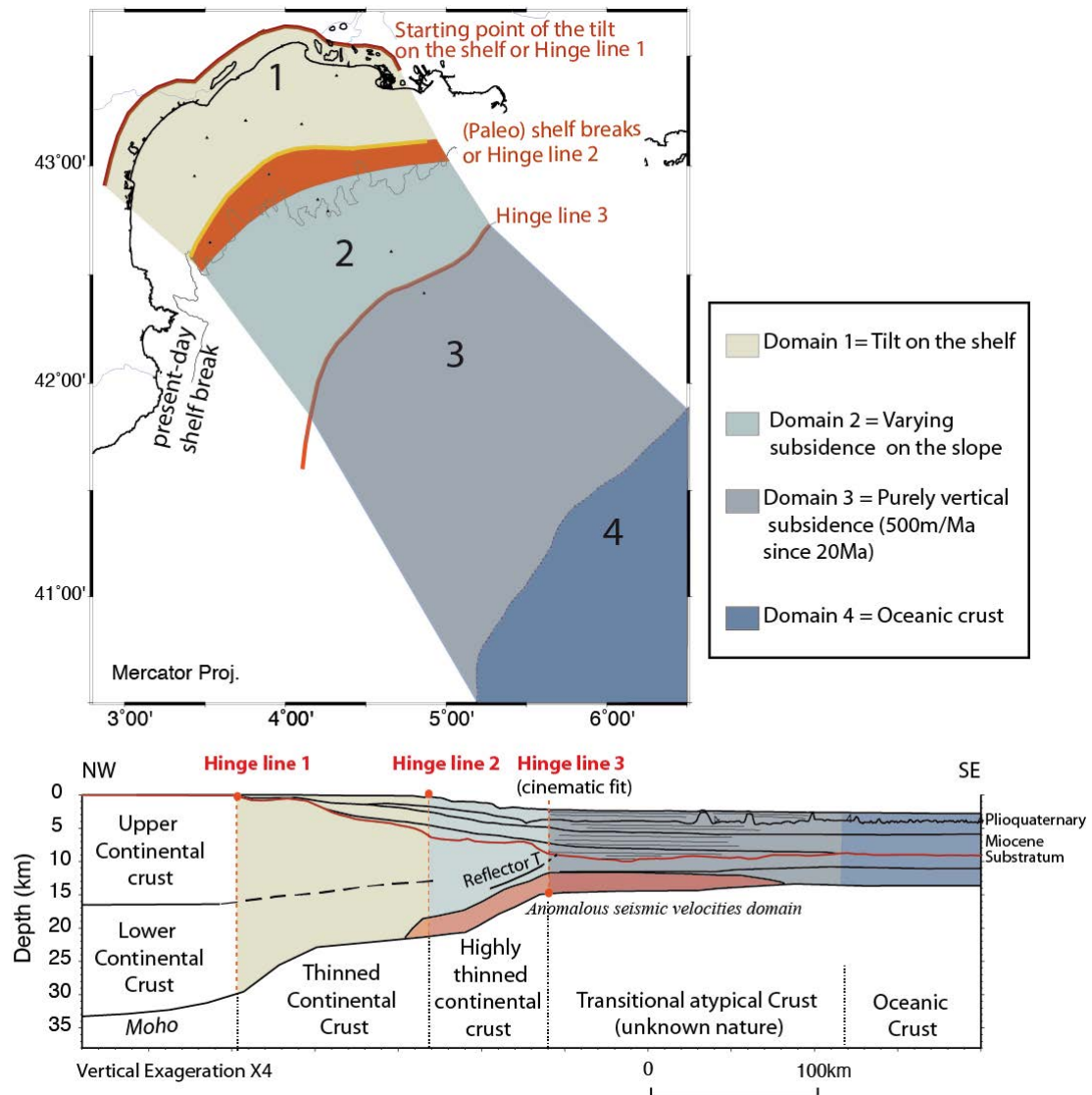
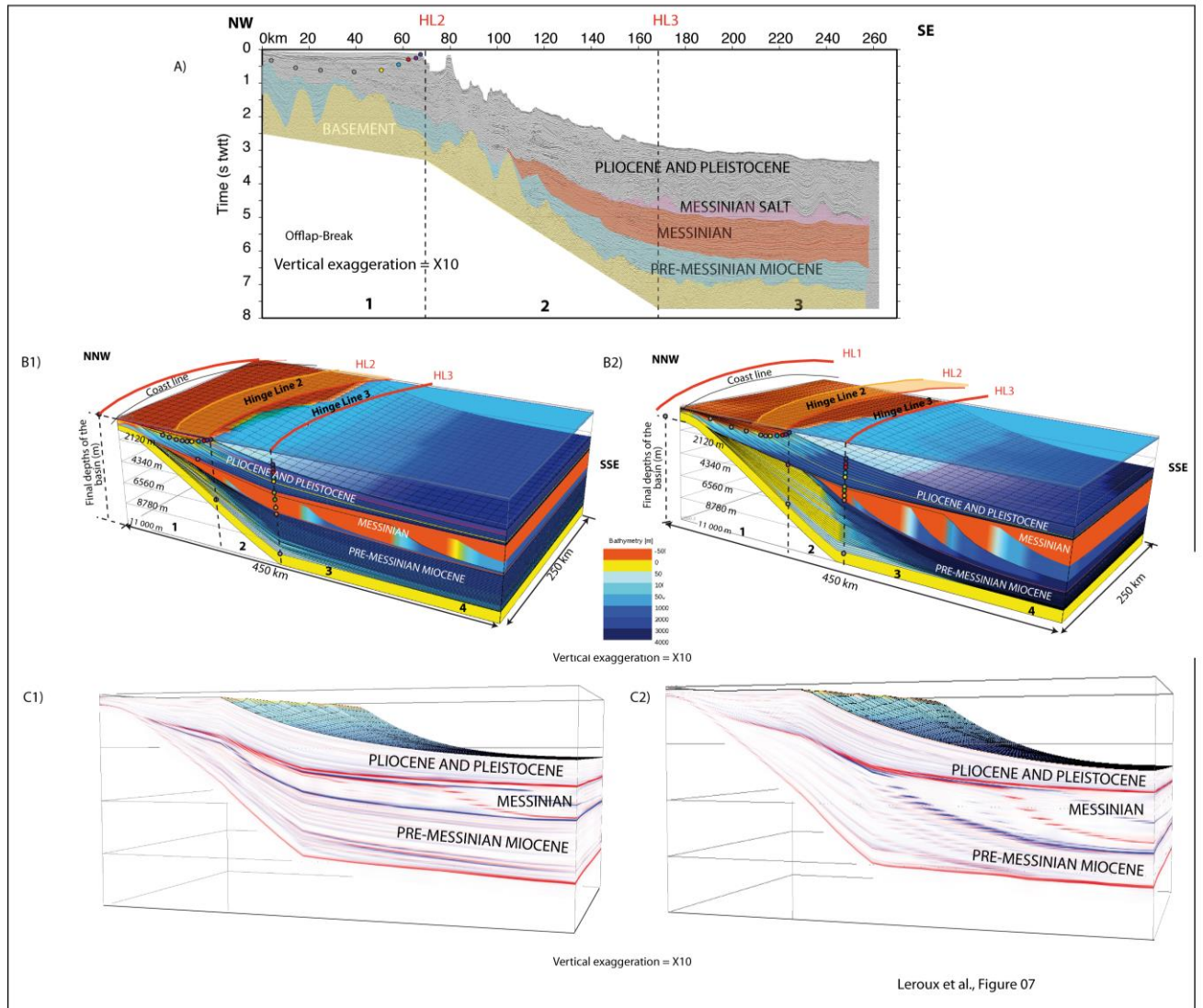


Figure III-4 Mise en évidence des 3 Hinge-Line à partir des paléomarqueurs sédimentaires et leur lien avec la structure profonde des marges (Leroux et al., submitted 2014)

La quantification 3D de la subsidence allée aux quantifications 3D des flux sédimentaires (voir chapitre 2 précédent) nous permet, au final, de réaliser des modélisations 3D à l'échelle du bassin ce qui nous permet de tester un certains nombre d'hypothèses (par exemple variations du niveau marin, nature des sédiments, etc...). C'est ce qui a commencé à être réalisé pendant la thèse d'Estelle Leroux (Figure III-5).



Leroux et al., Figure 07

Figure III-5 Modélisation 3D à l'aide du logiciel Dionisos (IFPEN). A Gauche : modélisation avec la courbe de Haq et al., 1987 ; à Droite : modélisation avec la courbe de Miller et al., 2005 (Leroux et al., in prep.)

L'analyse des marqueurs Miocène sous-jacents à la surface d'érosion messinienne (qui se trouve aujourd'hui à l'horizontale (**Figure III-3**) malgré la subsidence Pliocène-Quaternaire postérieure, nous a permis de proposer, pour la première fois, une quantification du rebond glacio-isostatique sur le rebord de la plate-forme. Celui-ci s'élève à 1.3 km dans cette zone de bordure de plat-forme, soit **1830 m/Ma** d'uplift (en considérant la durée de la crise de 700,000 ans, valeur maximale, CIESM, 2008) (Rabineau et al., 2014). Cette valeur est forte, mais en fait du même ordre de grandeur que celle des rebonds glacio-isostatique Quaternaire (Ehlers & Gibbard, 2004 par exemple). Ces mesures devrait être étendues en 3D et conduire aussi à de nouvelles modélisations isostatiques, sur la base de ces nouvelles quantifications.

2-3 Le sédiment, marqueur de la rhéologie :

La combinaison de ces résultats sur la subsidence et de ceux obtenus par notre équipe sur la géométrie et la nature de la croûte sous-jacente (Pascal *et al.*, 1993 ; Gailler *et al.*, 2010 ; Aslanian, Rabineau *et al.*, 2012 ; Moulin *et al.*, submitted ; Afiladho *et al.*, submitted, Aslanian *et al.* submitted) et sur les reconstruction cinématiques (Olivet *et al.*, 1993) a permis de mettre en exergue l'étroite relation entre la subsidence, même la plus récente, et la structure et la nature de la croûte (Leroux *et al.*, submitted, **Figure III-4**). Ces résultats sont extrêmement similaires à ceux que nous avons ébauchés sur les marges atlantiques (Moulin *et al.*, 2005 ; Aslanian *et al.*, 2009 ; Labails *et al.*, 2009). La nature du substratum en lui-même, et son état thermique, semble aussi influencé les couches superficielles comme la couche salifère qui montre, sur plusieurs marges, une morphologie bien différente suivant les segments crustaux considérés (Moulin *et al.*, 2005 ; Aslanian *et al.*, 2009 ; Ziane, Master 2)

L'étude crustale : les analyses des données de sismique réflexion et grand angle de Sardinia ont permis de mettre en lumière une symétrie de structure entre les deux marges homologues (mais une asymétrie en dimension) qui infirme les hypothèses de formation associée à une grande faille de détachement (Gailler *et al.*, 2010 ; Aslanian *et al.*, submitted). Le domaine transitionnel, loin d'avoir les caractéristiques des serpentinites, semble correspondre à une exhumation de croûte inférieure comme il a été suggéré dans l'Atlantique Sud (Aslanian *et al.*, 2009 ; Aslanian *et al.*, submitted) ; la couche inférieure semble être intrudée par du matériel mantellique. La partie océanique, atypique, montre une grande similitude géophysique avec le domaine intermédiaire mais aussi avec les massifs gabbroïques de l'océan indien.

Sur la marge de l'Atlantique Sud, nous avons pu proposer sur la base des travaux de cinématique, de géophysique et d'analyse sédimentaire, un modèle alternatif aux modèles conservatifs (**Figure III-6**) qui prend en compte la morphologie du système entier et les contraintes paléogéographiques et paléobathymétriques (Aslanian *et al.*, 2009).

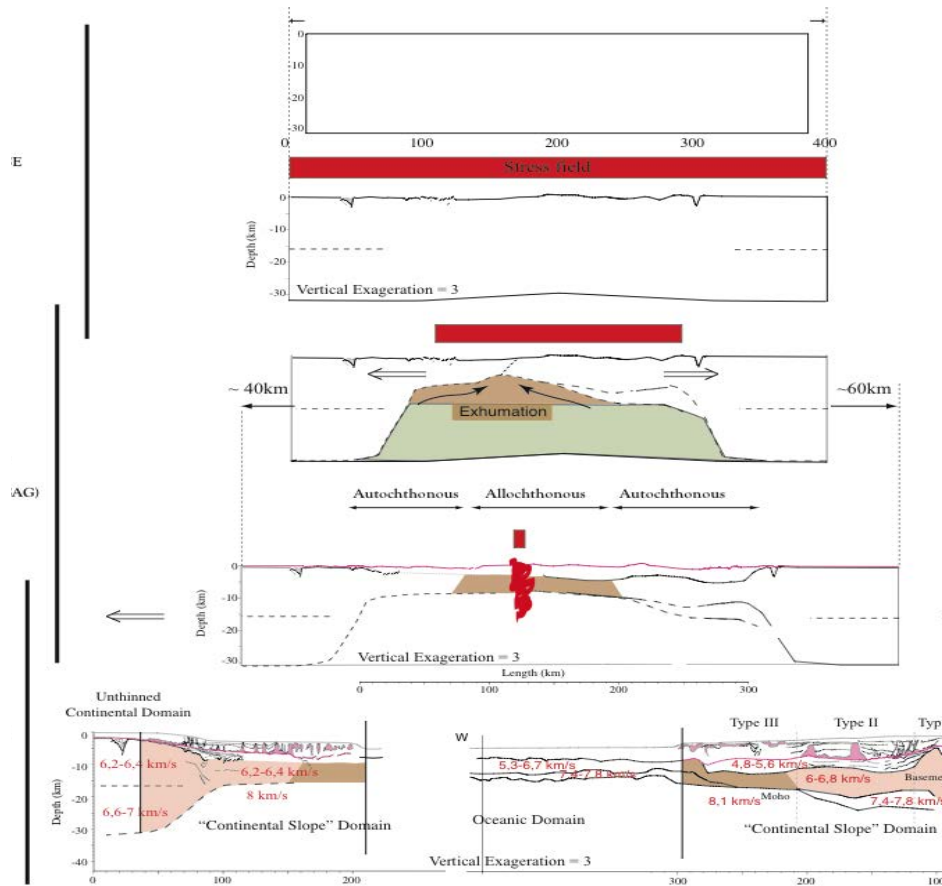


Figure III-6 Modèle de formation des marges passives de l'Atlantique Sud proposé par notre groupe. Il se déroule en trois phases : la phase de rifting, de peu d'ampleur mais concernant un large domaine, la phase d'exhumation, phase principale de l'amincissement qui implique un domaine moins large, et la phase de cassure, concentrée en un secteur très étroit. La partie verte représente la croûte inférieure manquante dans le bilan de volume (Aslanian et al., 2009).

Dans cette hypothèse, l'essentiel de l'amincissement concerne la croûte inférieure, la croûte supérieure ne présentant pas ou peu de structures distensives. Le domaine intermédiaire est lui constitué d'un matériel allochtone (manteau ou croûte inférieure exhumé, intrusions...). Toute l'évolution de la marge s'effectue en position proche du niveau marin, permettant le dépôt d'évaporites ou de carbonates. Les contraintes paléogéographiques impliquent qu'une partie de la croûte inférieure est « manquante », soit par mélange avec le manteau sous-jacent, soit par fluage dans le domaine intermédiaire ou la première croûte océanique (Aslanian et al., 2009).

Récemment, Huissman & Beaumont (Nature, 2011) ont divisé les marges en deux types extrêmes (le type « ibérique » et le type « sud-Atlantique ») et ont modélisé ces deux types en fonction de la rhéologie, faible ou forte, de la croûte inférieure, confirmant notre hypothèse que donne à la croûte inférieure un rôle prépondérant dans la construction de la morphologie du système et l'amincissement de la croûte continentale, la croûte inférieure fluant au centre et aux extrémités du système.

L'ensemble de nos études menées sur les marges semble indiquer que cette hypothèse est la plus commune sur les marges passives, quelque soit le contexte géodynamique et l'âge, et implique un amincissement qui concerne en premier lieu la croûte continentale inférieure, comme on le voit aussi sur les bassins intracontinentaux (Thybo & Nielsen, 2011). En particulier dans le bassin Liguro provençal où nous proposons une histoire de la marge du Golfe du Lion en trois temps : un événement thermique profond maintient la plate-forme exondée pendant l'épisode initial de rifting. Dans un deuxième temps la rupture se fait (Aquitanien supérieur, vers 20 Ma) et le premier socle (zone de transition) se met en place. Le troisième temps correspond à la mise en place de la croûte océanique atypique et avortée au centre du bassin (**Figure III-7**, [Aslanian et al., submitted](#)).

THE GEODYNAMIC HISTORY OF THE LIGURO-PROVENÇAL BASIN

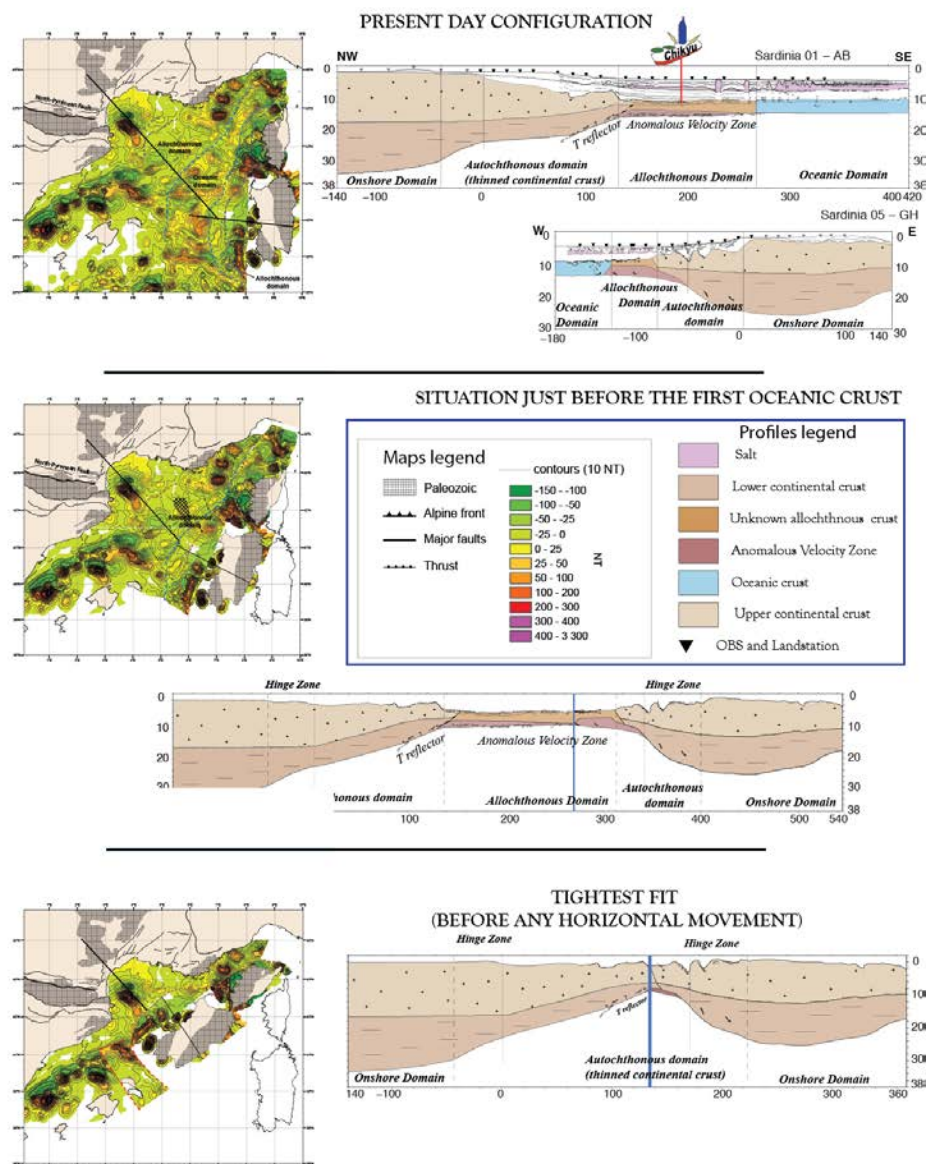


Figure III-7 Modèle d'évolution proposé pour le bassin liguro-provençal (Aslanian et al., Submitted)

Ces résultats seront **étendus et comparés aux travaux entrepris sur d'autres marges, en particulier au Golfe de Valence** dans le cadre de la thèse de R. Pellen, en collaboration avec Ifremer (démarrée en Oct 2012), mais aussi sur les marges brésiliennes (Projets **SANBA** (Dec Janv-Janv-2011-Sept 2013), à la campagne **MAGIC** (Sept-Oct 2012-Sept 014) et à la future campagne **SALSA** (Mai2014-Mai 2016), malgaches et mozambiquaises (projet **PAMELA** 2016-2018). Le but est de réaliser le même type d'étude que dans le Golfe du Lion et arriver d'un côté à des bilans de masse érosion-dépôt et à l'évolution de la subsidence dans le temps.

ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :

- 1- Moulin, M., Aslanian, D., **Rabineau, M.**, Patriat, M., Matias, L., 2013 Kinematic keys of the Santos– Namibe basins, in *Geological Society, London, Special Publications*, 369, *Conjugate Divergent Margins, 2013*, doi:10.1144/SP369.3, p. 91-107
- 2- *Pichot, T., M. Patriat, G.K. Westbrook, T. Nalpas, M.A. Gutscher, W.R. Roest, E. Deville, *M. Moulin, D. Aslanian, **M. Rabineau**, 2012. The Cenozoic tectonostratigraphic evolution of the Barracuda Ridge and Tiburon Rise at the western end of the North America-South America plate boundary zone, *Marine Geology*, volume 303, p.154-171, doi10.1016/j.margeo.2012.02.001.
- 3- *Bache, F., Olivet, J-L, Gorini, C., Aslanian, D., Labails, C., **Rabineau, M.** Evolution of rifted continental margins: the case of the Gulf of Lions (Western Mediterranean Basin), 2010 *Earth and Planetary Science Letters*, 292, 3-4, p.345-356
- 4- Aslanian D, Moulin M, Olivet JL, Unternehr P, Matias L, *Bache F, **Rabineau M**, Nouze H, Klingelhoefer F, Contrucci I, Labails C, 2009 : Brazilian and African passive margins of the Central Segment of the South Atlantic Ocean: Kinematic constraints, *Tectonophysics*, 468, 1-4, p. 98-112
- 5- Aslanian, D., **Rabineau, M.**, Moulin, M., Schnurle, P., Klingelhoefer, F., Gailler, A., Bache, F., Leroux, E., Gorini, C., Droxler, A., Eguchi, N., Kuroda, J., Alain, K., Roure, F. & Haq, Structure and evolution of the Gulf of Lions : the Sardinia seismic experiment and the GOLD (Gulf of Lions Drilling) project, *Leading Edge*, 2012
- 6- Gailler, A., F. Klingelhoefer, J.-L. Olivet, D. Aslanian and The Sardinia scientific party (dont **M. Rabineau**) and Technical OBS team2, 2009 : Crustal structure of a young margin pair: New results across the Liguro–Provencal Basin from wide-angle seismic tomography, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 286, Issues 1-2, 30 August 2009, Pages 333-345.
- 7- Cinthia Labails, Jean-Louis Olivet, Daniel Aslanian, Frauke Klingelhoefer, Maryline Moulin, Patrick Unternehr and the “Geodynamic group“ (dont **M. Rabineau**), Deep crustal structure of the SW-Moroccan margin from wide-angle and reflection seismic data (The DAKHLA experiment). Part B: the tectonic heritage, *Tectonophysics, Special issue: Role of the magmatism*, 2009
- 8- Aslanian D., Moulin, M. & the SANBA team (dont **M. Rabineau**), SANBA CRUISE : Petrobras-Confidential REPORT, Aug. 2013.

ARTICLES EN PREPARATION en rapport avec ce chapitre :

- 1- M. Moulin, F. Klingelhoefer, A. Afilhado, D. Aslanian, P. Schnurle, H. Nouzé, **M.**

- Rabineau**, M.O. Beslier, & A. Feld, Deep crustal structure across an young passive margin from wide-angle and reflection seismic data (The SARDINIA Experiment) - I. Gulf of Lion's margin, Submitted BSGF, ILP Special volume, May 2014.
- 2- A. Afilhado, M. Moulin, F. Klingelhoefer, D. Aslanian, P. Schnurle, H. Nouzé, M. **Rabineau** & M.O. Beslier, Deep crustal structure across an young passive margin from wide-angle and reflection seismic data (The SARDINIA Experiment) - II. Sardinia's margin, Submitted BSGF, ILP Special volume, May 2014
 - 3- Aslanian, D., Moulin, M., **Rabineau, M.**, Klingelhoefer, F., *Bache, F., *Leroux, E., Schnurle, P., Beslier, M.-O., Afilhado, A., Viana, A., The Sardinia experiment in the Gulf of Lion : results and comparison with the Atlantic margins : towards a new paradigm, *to be submitted to Science*
 - 4- *Leroux, E., Aslanian, D., **Rabineau, M.**, M. Moulin, D. Granjeon, C. Gorini, L. Droz, Sedimentary markers: a window to deep geodynamic processes, *submitted Janvier 2014 Geology*
 - 5- Klingelhoefer, F., Evain, M., Afilhado, A., Rigoti C., Loureiro, A., Schnurle, P., Moulin, M., Alves, D., Benhabdelhaoued, M., Baltzer, A., **Rabineau, M.**, Feld, A., Lepretre, A., Viana, A., & Aslanian, D., Imaging proto-oceanic crust off the Brazilian Continental Margin, submitted to GJI, June 2014.
 - 6- Benhabdelhaoued, M., Baltzer, A., **Rabineau, M.**, Aslanian, D., Mohamed Sahabi, Germond, F., Loubrieu, B., Youssef Biari, Bruno Marsset & Frauke Klingelhoefer A new approach of mass movement morphologies on the West African margin (offshore Dakhla) by high-resolution bathymetry and high resolution seismic data, *Marine Geology*, submitted May 2014.
 - 7- Benhabdelhaoued, M., Baltzer, A., **Rabineau, M.**, Aslanian, D., Moulin, M., Viana, A., and the Sanba team, Investigation of the different morphologies: deformed sea floor and Sediment waves on the Santos Basin, Brazilian Margin, submitted to *Marine Geology*, Jan 2014.
 - 8- Evain, M., Afilhado, A., Rigoti C., Loureiro, A., Klingelhoefer, F., Schnurle, P., Moulin, M., Alves, D., Benhabdelhaoued, M., Baltzer, A., **Rabineau, M.**, Feld, A., Lepretre, A., Viana, A., & Aslanian, D., Deep structure of the Santos Basin-São Paulo Plateau System (SSPS), to be submitted to JGR

AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :

- Aslanian, D. & Moulin, M., Comments on « A new scheme for the opening of the south Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt Basin » from Torsvik et al, 2009, *Geophys. J. Int* , Article first published online : 25 AUG 2010, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04727.x
- Aslanian D. & Moulin M., Paleogeographic consequences of conservational models in the South Atlantic Ocean, In: Mohriak, W.U., Danforth, A., Post, P.J., Brown, D.E., Tari, G.C., Nemcok, M. & Sinha, S.T. (eds). *Conjugate Divergent Margins. Geological Society of London, Special Publications*, 369, <http://dx.doi.org/10.1144/SP369.5>, 2012
- Aslanian D., Moulin, M. & the SANBA team, SANBA CRUISE : *Petrobras Confidential REPORT*, Aug. 2013.
- Ehlers, J., Gibbard, P. L. (2004). "Quaternary Glaciations - Extent and Chronology Part I: Europe." Elsevier, Amsterdam.
- Huismans, R.S. & Beaumont, C., 2011. Depth-dependent extension, two-stage breakup and cratonic underplating at rifted margins, *Nature*, 473, 74-78, doi:10.1038/nature09988.
- McKenzie, D., 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*. 40, 1, 25-32.

- Moulin, M., Aslanian, D., Olivet, J.-L., Contrucci, I., Matias, L., Geli, L., Klingelhoefer, F., Nouze, H., Rehault, J.-P. & Unternehr, P., 2005. Geological constraints on the evolution of the Angolan margin based on reflection and refraction seismic data (ZaïAngo project), *Geophysical Journal International*, 162, 793-810.
- Moulin, M., Aslanian, D., Olivet, J.-L. & Unternehr, P., 2006. Typologie des marges - 1ere Partie l'Atlantique Sud, *Rapport Confidentiel, TOTAL*
- Olivet, J.L., 1996. La Cinématique de la plaque Ibérique, *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf Aquitaine*, Pau, France, **20**, 131-195
- Pascal, G.P., Mauffret, A., Patriat, P., 1993. The ocean-continent boundary in the Gulf of Lion from analysis of expanding spread profiles and gravity modeling, *Geophysical Journal International*, 113, 701-726.
- Peron-Pinvidic, G. & Manatschal, G., 2009. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view. *Int. J. Earth Sci.*, doi:10.1007/s00531-008-0337-9.
- Sahabi M., Aslanian D., Olivet, J.-L., Un nouveau point de départ pour l'histoire de l'Atlantique Central, *C. R. A. S.*, 2004
- Thybo, H. & Nielsen, C. A., 2009. Magma-compensated crustal thinning in continental rift zones. *Nature*, **457**, 873- 876, doi:10.1038/nature07688.
- Wernicke, B., 1985. Uniform sense normal simple shear of continental lithosphere. *Can. J. Earth Sci.*, 22, 108-125.

CHAPITRE IV

LES SEDIMENTS : ARCHIVES DE LA VIE SOUTERRAINE !

1 Problématique et état des lieux au moment des travaux

La reconnaissance de communautés microbiennes viables à plusieurs centaines de mètres sous le plancher océanique (Parkes *et al.*, 1994; Schippers *et al.*, 2005; Roussel *et al.*, 2008; Schippers *et al.*, 2010) représente une découverte importante de ces dernières décennies. Les communautés microbiennes des sédiments marins sont très diverses et comprennent de nombreuses lignées phylogénétiques de bactéries et d'archées (Fry *et al.*, 2008). Dans les sédiments marins, les différents paramètres environnementaux ont une influence directe sur l'abondance, la diversité et l'activité des microorganismes. Généralement, l'abondance microbienne diminue exponentiellement avec la profondeur des sédiments (Parkes *et al.*, 2000) notamment en raison d'une diminution de réactivité de la matière organique avec la profondeur (Middelburg, 1989). Toutefois, des augmentations locales de l'activité, des effectifs microbiens et des changements de populations se produisent en réponse à des conditions géochimiques spécifiques (Parkes *et al.*, 1990; Cragg *et al.*, 1992; D'Hondt *et al.*, 2004; Parkes *et al.*, 2005) et plus spécifiquement au niveau des interfaces lithologiques (Inagaki *et al.*, 2003; Parkes *et al.*, 2005). Les contraintes mécaniques des sédiments telles que la taille des pores et la porosité influencent la distribution des micro-organismes (Rebata-Landa and Santamarina, 2006). Dans certains endroits, la composition des communautés microbiennes est corrélée à la source terrigène ou marine et / ou à la biodisponibilité de la matière organique (Nunoura *et al.*, 2009). Les microorganismes des sédiments ont également un impact direct sur leur environnement géologique : ils influent sur l'altération des minéraux à la surface des roches et sur leurs constituants minéralogiques par des processus de dissolution (Rogers and Bennett, 2004 ; Gleeson *et al.*, 2007), modifient la spéciation élémentaire et ionique, conduisant parfois à la précipitation des minéraux et la réactivité des surfaces rocheuses (Gleeson *et al.*, 2007). En ce qui concerne la répartition biogéographique et la diversité des communautés microbiennes dans les sédiments marins de subsurface, les résultats disponibles plaident pour un contrôle de l'environnement sur une séparation géographique (Inagaki *et al.*, 2006; Martiny *et al.*, 2006).

Le lien entre les études de géomicrobiologie et de sédimentologie est donc naturel.

Dans le cas de la mer Méditerranée, la composition et la distribution des communautés microbiennes sont bien documentées pour la colonne d'eau (Danovaro *et al.*, 2010) ou les habitats « extrêmes » telles que les saumures et les volcans de boue. Par contre, très peu d'informations étaient disponibles au sujet des communautés microbiennes des sédiments des marges méditerranéennes jusqu'à la thèse de [M. Ciobanu \(2012\)](#) que j'ai co-encadrée avec

Karine Alain du LM2E (Ciobanu *et al.*, 2012) et qui m'a permis de découvrir ce monde de la Biosphère profonde.

2 Premières études sur les sédiments du Golfe du Lion et du Var

L'étude de la diversité des microorganismes des sédiments marins de la Méditerranée Occidentale et de leurs liens avec le contexte environnemental, a été menée à partir d'échantillons sédimentaires prélevés au niveau de 2 environnements contrastés, la ride du Var et le Golfe du Lion (**Figure IV-1**). Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de M. Ciobanu (Janvier 2012). Il visait à caractériser la structure et la composition des communautés microbiennes de subsurface de Méditerranée au sein de dépôts sédimentaires qui avaient été affectés par des événements climatiques et dont l'architecture reflétait les processus géologiques, eustatiques et climatiques au cours du temps. Nous avons bénéficié pour cela d'un soutien de l'INSU dans le cadre de l'appel d'Offre INTERVIE en 2011- (SEDAMIC I) pour une étude intégrée de microbiologie-géosciences. Les objectifs de l'étude étaient (i) d'analyser la diversité microbienne de subsurface associée à des séquences turbiditiques (ride du Var) et à la partie supérieure d'une pente continentale (Golfe du Lion) en Méditerranée Occidentale, et (ii) d'étudier l'importance potentielle des conditions paléoenvironnementales de dépôt des sédiments et de paramètres purement physiques et lithologiques sur la distribution verticale des espèces microbiennes le long du log sédimentaire.

Les résultats obtenus (en 2011) (analyses moléculaires et culturelles de la diversité microbiennes, analyses sédimentologiques, analyses canoniques) sur la carotte prélevée au niveau de la ride du Var tendent à indiquer que les derniers changements climatiques (Quaternaire tardif) imprimés dans l'environnement de dépôt ont influencé la structure et la composition des communautés microbiennes. La dominance de lignées microbiennes de *Betaproteobacteria* d'origine terrigène (milieu d'eau douce et de sols) est ainsi corrélée avec l'augmentation de l'intensité des turbidites et la fonte des glaces et l'apport terrigène associé (Ciobanu *et al.*, 2012).

Cette étude a été poursuivie en 2012 (SEDAMIC II) et des investigations similaires ont été réalisées au niveau du Golfe du Lion. Pour cet autre site, nous avons également mis en évidence une corrélation entre la diversité des communautés microbiennes et des séquences lithologiques déposées pendant le dernier Maximum Glaciaire, donc également influencées par des apports sédimentaires terrigènes importants (Figures 19 et 20).

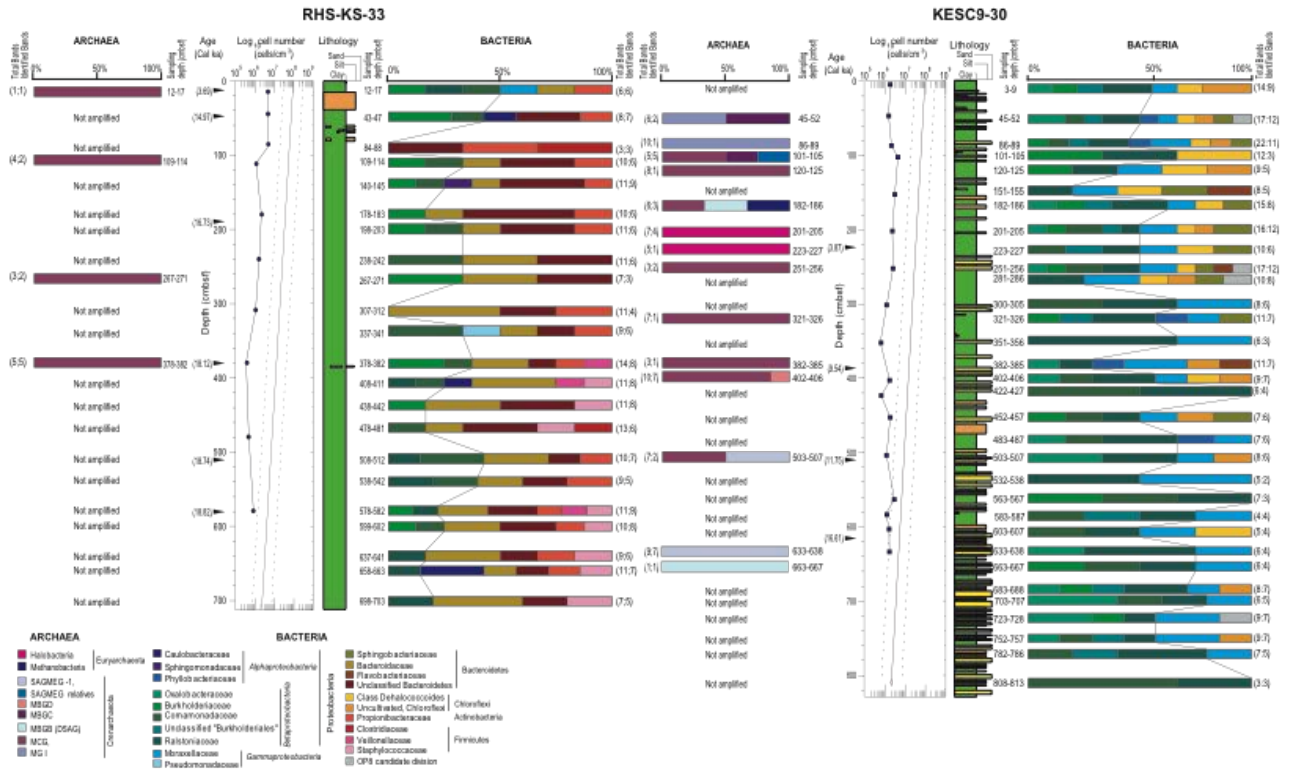


Figure IV-1 Caractérisation de l'environnement sédimentaire et des communautés microbiennes de 2 sites de Méditerranée Occidentale. (Ciobanu et al., 2012, Biogeosciences) RHS-KS-33, Carotte sédimentaire du Golfe du Lion ; KESC9-30, Carotte sédimentaire de la Ride du Var ; TOC, Total Organic Carbon ; SO_4^{2-} , sulfate. En couleurs : Diversité bactérienne mise en évidence par DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis)- séquençage le long du log sédimentaire des 2 carottes. En couleurs vertes : les Betaproteobactéries (typiques des milieux d'eaux douces et de sols). En jaune-orangés : les Chloroflexi ; en bleu clair : les Gammaproteobactéries ; en bleus foncés : les Alphaproteobactéries et en marrons : les Bacteroidetes.

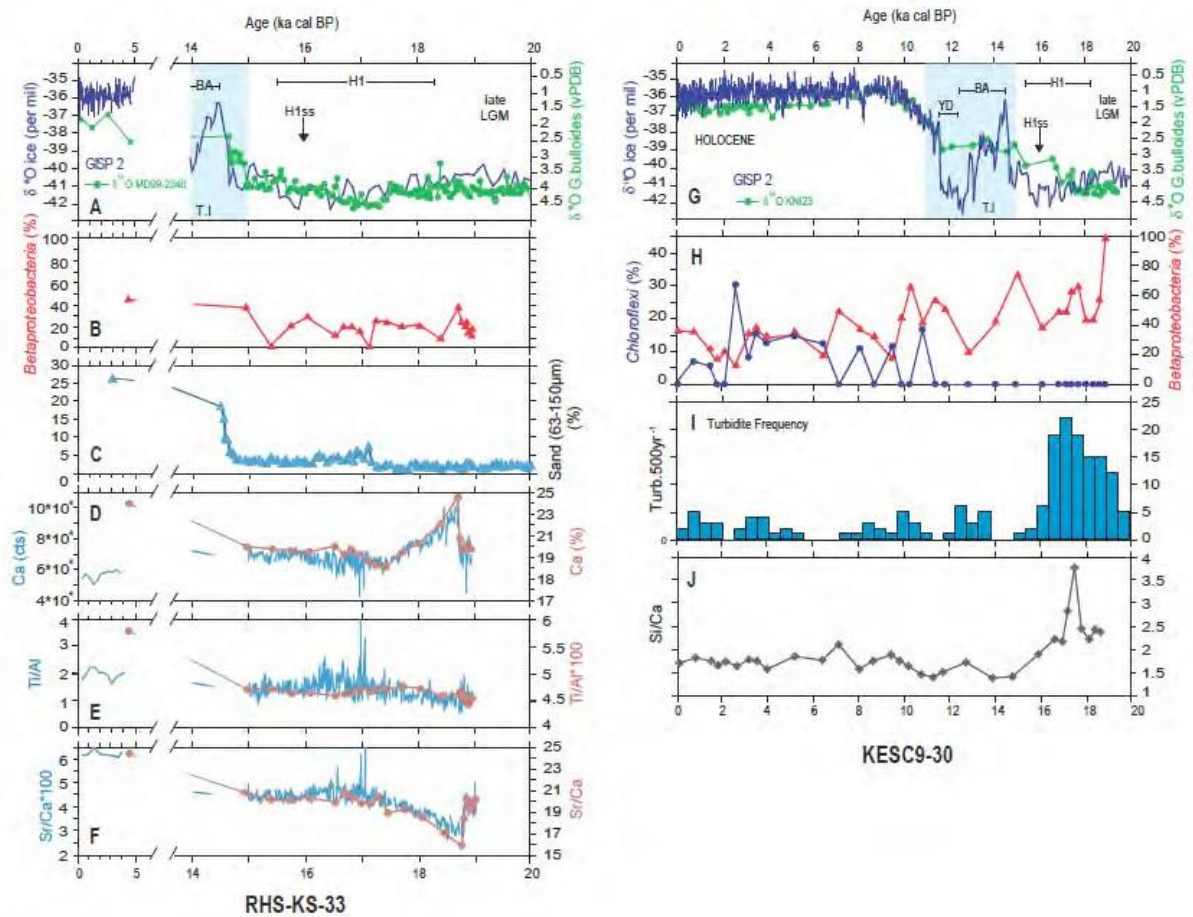


Figure IV-2 Corrélation de la distribution de Bétaproteobacteria pendant le Dernier Maximum Glaciaire (LGM) et l'Holocène avec les variations paléoenvironnementales et paléoclimatiques (in Ciobanu et al., 2012)

Suite à ces résultats extrêmement prometteurs, nous avons déposé et obtenu un financement de postdoctorat IFREMER- Institut Carnot (coll. S. Jorry, M. Rabineau, K. Alain) pour poursuivre ces études sur le haut de pente du Var, sur une carotte prélevée lors de la mission ESSCAR9 (KESC9-14 : bathymétrie 550m) à laquelle nous avons participé. La carotte présente un taux de sédimentation très élevé pour l'Holocène (5 m de dépôt pour les derniers 10 000 ans). Le cadre chronostratigraphique a été établi par analyses C14 et analyse de l'isotopie de l'oxygène sur des spécimens de foraminifères benthiques (*C.pachyderma*) prélevés à une fréquence de 10 cm le long de la carotte. Les analyses de la diversité des microorganismes sont actuellement en cours de finalisation. Les extractions d'ADN sur des échantillons de sédiment prélevés ont été réalisées.

Un nouvel article est en cours de préparation (Ciobanu et al., in prep.)

La découverte de ce monde des microorganismes au sein des sédiments me conduira à promouvoir cette thématique au sein du projet de forage IODP en Méditerranée que je porte (GOLD). Nous en reparlerons dans la troisième partie prospective de ce mémoire.

ARTICLES PUBLIES en rapport avec ce chapitre :

1. *M.-C. Ciobanu, **M. Rabineau**, L. Droz, S. Révillon, J.-F. Ghiglione, B. Dennielou, S.-J. Jorry, J. Kallmeyer, J. Etoubleau, P. Pignet, P. Crassous, O. Vandenabeele-Trambouze, J. Laugier, M. Guégan, A. Godfroy, and K. Alain, 2012. Paleoenvironmental imprint on seafloor microbial communities in Western Mediterranean Sea Quaternary sediments, *Biogeosciences Discuss.*, 9, 253- 310, Discussion Paper, Supplement and Interactive Discussion.
2. *M.-C. Ciobanu, **M. Rabineau**, L. Droz, S. Révillon, J.-F. Ghiglione, B. Dennielou, S.-J. Jorry, J. Kallmeyer, J. Etoubleau, P. Pignet, P. Crassous, O. Vandenabeele-Trambouze, J. Laugier, M. Guégan, A. Godfroy, and K. Alain, *in press*, Sedimentological imprint on seafloor microbial communities in Western Mediterranean Sea Quaternary sediments, Final Paper, *Biogeosciences*, 9, 1– 21, 2012, www.biogeosciences.net/9/1/2012/ doi:10.5194/bg-9-1-2012
3. *M.-C. Ciobanu, **et al.**, *in prep.*

AUTRE BIBLIOGRAPHIE citée dans ce chapitre :

- Cragg, B. A., Harvey, S. M., Fry, J. C., Herbert, R. A., and Parkes, R. J.: Bacterial biomass and activity in the deep sediment layers of the Japan Sea, Hole 798B, *Proc. Ocean Drilling Prog. Sci. Results* 127/128, 761-776, 1992.
- D'Hondt, S., Jørgensen, B. B., Miller, D. J., Batzke, A., Blake, R., Cragg, B. A., Cypionka, H., Dickens, G. R., Ferdelman, T., Hinrichs, K. U., Holm, N. G., Mitterer, R., Spivack, A., Wang, G., Bekins, B., Engelen, B., Ford, K., Gettemy, G., Rutherford, S. D., Sass, H., Skilbeck, C. G., Aiello, I. W., Guerin, G., House, C. H., Inagaki, F., Meister, P., Naehr, T., Niitsuma, S., Parkes, R. J., Schippers, A., Smith, D. C., Teske, A., Wiegel, J., Padilla, C. N., and Acosta, J. L.: Distributions of microbial activities in deep seafloor sediments, *Science*, 306, 2216-2221, 306/5705/2216 [pii] 10.1126/science.1101155, 2004.
- Danovaro, R., Company, J. B., Corinaldesi, C., D'Onghia, G., Galil, B., Gambi, C., Gooday, A. J., Lampadariou, N., Luna, G. M., Morigi, C., Olu, K., Polymenakou, P., Ramirez-Llodra, E., Sabbatini, A., Sarda, F., Sibuet, M., and Tselepides, A.: Deep-Sea Biodiversity in the Mediterranean Sea: The Known, the Unknown, and the Unknowable, *PLoS One*, 5, e11832 10.1371/journal.pone.0011832, 2010.
- Fry, J. C., Parkes, R. J., Cragg, B. A., Weightman, A. J., and Webster, G.: Prokaryotic biodiversity and activity in the deep seafloor biosphere, *Fems Microbiology Ecology*, 66, 181-196, 10.1111/j.1574-6941.2008.00566.x, 2008.
- Gleeson, D., McDermott, F., and Clipson, N.: Understanding microbially active biogeochemical environments, *Adv Appl Microbiol*, 62, 81-104, S0065-2164(07)62004-8 [pii] 10.1016/S0065-2164(07)62004-8, 2007.
- Inagaki, F., Suzuki, M., Takai, K., Oida, H., Sakamoto, T., Aoki, K., Nealson, K. H., and Horikoshi, K.: Microbial communities associated with geological horizons in coastal seafloor sediments from the sea of okhotsk, *Appl Environ Microbiol*, 69, 7224-7235, 2003.
- Inagaki, F., Nunoura, T., Nakagawa, S., Teske, A., Lever, M., Lauer, A., Suzuki, M., Takai, K., Delwiche, M., Colwell, F. S., Nealson, K. H., Horikoshi, K., D'Hondt, S., and Jørgensen, B. B.: Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments on the Pacific Ocean Margin, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103, 2815-2820, 0511033103 [pii]10.1073/pnas.0511033103, 2006.
- Martiny, J. B., Bohannon, B. J., Brown, J. H., Colwell, R. K., Fuhrman, J. A., Green, J. L., Horner-Devine, M. C., Kane, M., Krumins, J. A., Kuske, C. R., Morin, P. J., Naeem, S., Ovreas, L., Reysenbach, A. L., Smith, V. H., and Staley, J. T.: Microbial biogeography: putting microorganisms on the map, *Nat Rev Microbiol*, 4, 102-112, nrmicro1341 [pii] 10.1038/nrmicro1341, 2006.

- Middelburg, J. J.: A simple rate model for organic-matter decomposition in marine-sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 1577-1581, 10.1016/0016-7037(89)90239-1, 1989.
- Nunoura, T., Soffientino, B., Blazejak, A., Kakuta, J., Oida, H., Schippers, A., and Takai, K.: Subseafloor microbial communities associated with rapid turbidite deposition in the Gulf of Mexico continental slope (IODP Expedition 308), *Fems Microbiology Ecology*, 69, 410-424, 10.1111/j.1574-6941.2009.00718.x, 2009.
- Parkes, R. J., Cragg, B. A., Fry, J. C., Herbert, R. A., Wimpenny, J. W. T., Allen, J. A., and Whitfield, M.: Bacterial biomass and activity in deep sediment layers from the Peru Margin, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 331, 139-153, 10.1098/rsta.1990.0061, 1990.
- Parkes, R. J., Cragg, B. A., Bale, S. J., Getliff, J. M., Goodman, K., Rochelle, P. A., Fry, J. C., Weightman, A. J., and Harvey, S. M.: Deep bacterial biosphere in Pacific-Ocean sediments, *Nature*, 371, 410-413, 10.1038/371410a0, 1994.
- Parkes, R. J., Cragg, B. A., and Wellsbury, P.: Recent studies on bacterial populations and processes in subseafloor sediments: A review, *Hydrogeology Journal*, 8, 11-28, 10.1007/pl00010971, 2000.
- Parkes, R. J., Webster, G., Cragg, B. A., Weightman, A. J., Newberry, C. J., Ferdelman, T. G., Kallmeyer, J., Jørgensen, B. B., Aiello, I. W., and Fry, J. C.: Deep sub-seafloor prokaryotes stimulated at interfaces over geological time, *Nature*, 436, 390-394, 10.1038/nature03796, 2005.
- Rogers, J. R., and Bennett, P. C.: Mineral stimulation of subsurface microorganisms: release of limiting nutrients from silicates, *Chemical Geology*, 203, 91-108, 10.1016/j.chemgeo.2003.09.001, 2004.
- Roussel, E. G., Cambon-Bonavita, M. A., Querellou, J., Cragg, B. A., Webster, G., Prieur, D., and Parkes, R. J.: Extending the sub-sea-floor biosphere, *Science*, 320, 1046-1046, 10.1126/science.1154545, 2008.
- Sass, H., and Parkes, R. J.: Sub-seafloor Sediments: An Extreme but Globally Significant Prokaryotic Habitat (Taxonomy, Diversity, Ecology). in: *Extremophiles Handbook*, edited by: Springer, 1013-1041, 2011.
- Savoye, B., Piper, D. J. W., and Droz, L.: Plio-Pleistocene evolution of the Var deep-sea fan off the French Riviera., *Marine and Petroleum Geology*, 10, 550-571, 1993.
- Schippers, A., Neretin, L. N., Kallmeyer, J., Ferdelman, T. G., Cragg, B. A., Parkes, R. J., and Jørgensen, B. B.: Prokaryotic cells of the deep sub-seafloor biosphere identified as living bacteria, *Nature*, 433, 861-864, 10.1038/nature03302, 2005.
- Schippers, A., Koeweker, G., Hoefl, C., and Teichert, B. M. A.: Quantification of Microbial Communities in Forearc Sediment Basins off Sumatra, *Geomicrobiology Journal*, 27, 170-182, Pii 919983461 10.1080/01490450903456798, 2010.

PARTIE 2- PERSPECTIVES

VERS UNE APPROCHE HOLISTIQUE DE L'HISTOIRE GEOLOGIQUE ET DYNAMIQUE DES MARGES

La réalité est plus grande que la somme de toutes ses parties

Comme nous l'avons esquissé dans la partie 1 pendant le bilan des travaux menés, notre constat est que les marges continentales restent des **objets dynamiques extrêmement complexes** résultant du couplage entre les processus internes, profonds mais aussi superficiels et externes.

L'enregistrement sédimentaire sur ces marges, en particulier, traduit ces interactions entre des processus profonds (tectoniques ou thermiques induisant subsidence ou soulèvement) et les processus de surfaces (incluant Climat, Niveau Marin et Hydrodynamique) comme cela est résumé sur la **Figure 1**. L'ensemble de ces processus (superficiels et profonds), leurs origines et leurs conséquences ne sont que très partiellement décrits et compris, ce qui fait que :

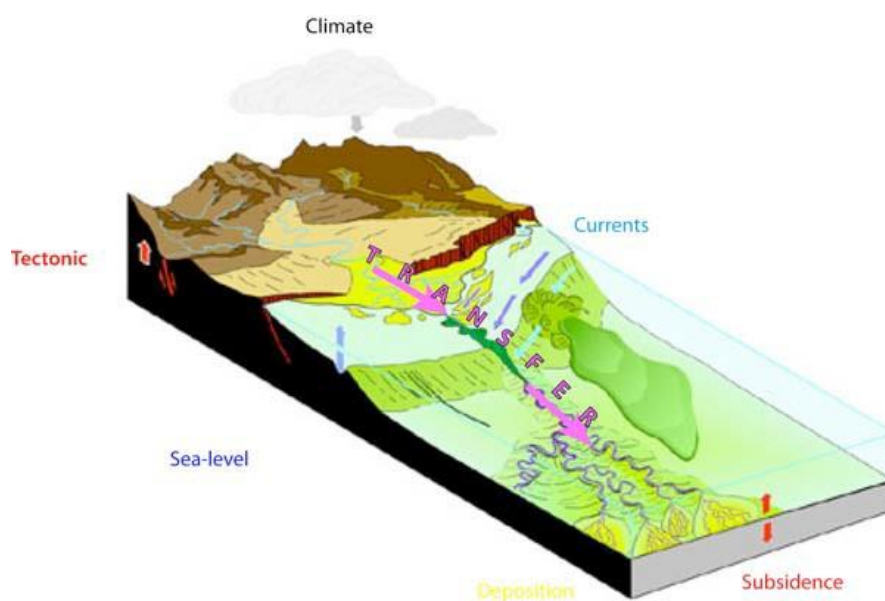


Figure 1 Les différents facteurs influençant les transferts sédimentaires et l'enregistrement sédimentaire

- 1) l'identification du rôle relatif des facteurs est parfois complètement contradictoire entre les auteurs (c'est le cas, par exemple, de l'origine de l'augmentation mondiale des flux au Pliocène-Quaternaire que nous avons évoquée précédemment et qui est attribuée à la Tectonique pour certains et au Climat pour d'autres, ou niée pour certains encore) ;
- 2) les modèles conceptuels globaux cherchant à reproduire les observations de terrains restent encore limités et simplifiés, voire simplistes (Trincardi & Syvitski, 2005; Allen, 2008; Sømme *et al.*, 2009 par exemple) et ne permettent pas toujours de trancher clairement entre les hypothèses proposées ;

3) les travaux sur les marges restent encore largement conduits de manière mono-disciplinaire (étude tectonique des marges d'un côté, étude sédimentologique des marges d'un autre, études cinématique, verticale et horizontale, d'un autre encore, études paléoclimatologiques complètement déconnectées enfin) et parcellaire avec une grande spécialisation au sein d'une même discipline (par exemple étude sédimentologique des plate-formes continentales sans guère de relation avec les études dans les éventails profonds). Ce n'est finalement qu'au cours des dernières dizaines d'années que la nécessité d'une approche « Source-Puits » (« *Source to Sink* »), impliquant des études sur différents objets géologiques, est apparue comme en témoigne la mise en œuvre de grands programmes internationaux tels STRATAFORM (1994-1998), EUROSTRATAFORM (2002-2005) et MARGINS (S2S ; 2001-2010). Ces études se sont focalisées respectivement sur les marges californienne (Nittrouer, 1999), norvégienne, ibérique et ouest-méditerranéenne (Weaver *et al.*, 2006, Canals *et al.* 2006), et sur les systèmes sédimentaires (cortèges transgressifs, systèmes turbiditiques, etc.) des rivières Fly (Papouasie-Nouvelle-Guinée) et Waipaoa (Nouvelle-Zélande) (Nittrouer *et al.*, 2008) mais sur des échelles de temps faibles (Quaternaire supérieur pour la plus part). En parallèle, et à une plus grande échelle de temps, la nécessité d'un lien « Profond-Superficiel » multi-approches, pluridisciplinaires et intégratrice est apparue aussi à l'international avec le programme TOPOEUROPE (Cloetingh *et al.*, 2005, 2007) mais aussi, dans notre communauté nationale comme le montrent les programmes Actions-Marges et Labex Mer par exemple) (Bache *et al.*, 2010, Rabineau *et al.*, 2014, Leroux *et al.*, 2014 par exemple).

Déjà initié au cours des deux derniers lustres (en particulier depuis 2007), c'est vers une approche impliquant de plus en plus de multi-disciplinarité que je souhaite diriger mes recherches car je suis convaincue que nos avancées dans la compréhension globale des marges ne pourra se faire que d'une manière **holistique**, c'est à dire en prenant l'objet « Marge » dans son ensemble et son intégralité spatio-temporelle (de la Terre à la Mer, du Profond au superficiel, sur la totalité de son histoire) et en multipliant les points de vue et les approches non seulement dans les divers disciplines des sciences de la terre (géochimie, géophysique, géodynamique, géologie, géomorphologie, sédimentologie, stratigraphie, paléoclimat et paléocéanographie...) mais aussi des sciences de la vie (géomicrobiologie et biologie) avec qui je suis en train de développer de nouvelles collaborations.

L'étude holistique des marges continentales est un projet d'envergure qui dépasse bien évidemment une personne seule, mais c'est au sein d'une équipe, à la construction de laquelle je participe activement, que je souhaiterais apporter tout du moins une contribution pour permettre à de **nouveaux paradigmes dans différents domaines de la tectonique des plaques, des processus sédimentaires et eustatiques associés et des interactions géobiologiques**, d'émerger avec de fortes implications pour nos connaissances fondamentales et appliquées (frontières de l'exploration pétrolière par exemple).

Mes objectifs scientifiques pour les dix ans à venir sont donc résolument interdisciplinaires et peuvent être résumés (difficilement) en quatre chapitres :

- **Chapitre V- Construction d'une Histoire Géologique et Dynamique d'une marge l'exemple des programmes Actions-Marges et Labex Mer**
- **Chapitre VI- La nécessité d'un forage en Méditerranée Occidentale : projet IODP DREAM-GOLD : Probing deep-earth & surface connections**
- **Chapitre VII- Collaboration franco-brésilienne (et européen-brésilienne) à long terme : la suite du Colloque de Buzios (Nov 2013).**
- **Chapitre VIII- Autres pistes de recherches.**

CHAPITRE V

CONSTRUCTION D'UNE HISTOIRE GEOLOGIQUE ET DYNAMIQUE D'UNE MARGE

L'EXEMPLE D'ACTIONS-MARGES ET DU LABEX MER.

1 Lien Profond-Superficiel : Constat et Programme établi dans le cadre de l'action Marges



Les résultats obtenus sur les marges continentales à partir des campagnes océanographiques, des forages profonds ou des études à terre interpellent toujours notre compréhension de la dynamique du manteau, de la lithosphère et de leurs interactions avec l'hydrosphère et la biosphère et remettent en question certains concepts considérés comme établis. Par exemple, la découverte de zones où le manteau continental ou la croûte inférieure sont exhumés, et où la croûte continentale est amincie à l'extrême, sans failles apparentes, nécessite la conception d'un nouveau modèle de déformation. Dans ces mêmes zones, des sédiments lacustres ou marins se sont déposés sous une faible tranche d'eau tout au long du processus de formation de la marge et donc dans une position encore haute du système entier. Des domaines magmatiques et volcaniques ont été observés à différents stades de l'évolution des marges.

D'un autre côté, l'analyse fine des architectures sédimentaires permet de décrypter à différentes échelles de temps et d'espace, les interactions entre climat, érosion, sédimentation et dynamique des mouvements verticaux sur ces marges et ainsi d'affiner les concepts de l'analyse séquentielle et surtout les reconstructions d'une histoire dynamique des marges en 4D, dans l'espace et le temps.

Ces différents aspects montrent la nécessité d'actions pluri-disciplinaires, pluri-échelles et multi-approches fortement coordonnées pour être efficaces et porteuses de concepts nouveaux ayant un impact tant sur la dynamique des marges, depuis la marge proximale (*onshore*) jusqu'à la marge distale (*offshore*), que sur les questions environnementales et énergétiques.

Ainsi notre groupe de chercheurs, réunis dans les six ateliers de l'action coordonnée d'Action- Marges, a identifié les problèmes scientifiques majeurs ainsi que les chantiers et les méthodes pour y parvenir, transcendant les approches purement disciplinaires,.

1. Les mécanismes de l'étirement et de l'amincissement extrême de la lithosphère ;
2. L'héritage et l'évolution rhéologique et thermique pendant le *rifting* et après le *rifting* ;
3. Le rôle des processus magmatiques sur le développement et l'évolution des marges ;
4. Le décryptage des interactions entre différents types de processus (climat, érosion, flux sédimentaires, déformations lithosphériques) dans l'architecture sédimentaire ;
5. Les mouvements verticaux des marges ;
6. La mesure des Flux sédimentaires et des Bilans Erosion/Dépôt dans un continuum Terre- Mer ;
7. La compréhension des puits de carbone (transport et préservation de la matière organique, hydrates de gaz) ;
8. La compréhension des sources des fluides et de la « plomberie » sédimentaire et structurale à l'origine de la migration et des échappements des fluides.

Toutes ces questions ne peuvent être abordées sur un seul et même chantier. Une fois les questions identifiées, une réflexion et des discussions approfondies ont permis de dégager un nombre minimum de thèmes fédérateurs et de chantiers afin de développer les synergies entre les différentes approches. Ainsi, quatre thèmes centraux ont été identifiés :

- Genèse et évolution des marges, déformation et magmatisme
- Systèmes sédimentaires, transferts et bilan
- Mouvements verticaux, quantification et origine
- Fluides, matière organique et matière minérale

Et deux chantiers fédérateurs:

- Méditerranée occidentale
- Afar-Aden-Mer Rouge.

Mon projet de Recherche pour les années à venir est très fortement intégré dans le cadre de l'action- Marge et plus particulièrement : au sein du chantier **Méditerranée Occidentale**

(que je coordonne dans la nouvelle phase 2012-2016) mais aussi au sein des différents thèmes **Mouvements verticaux : quantification et origine** et **Systèmes sédimentaires, transferts et bilan** et en liaison avec les thèmes **Genèse et évolution des marges et Fluides, matière organique**.

La **Méditerranée Occidentale** est parfaitement adaptée à la compréhension des processus sédimentaires actuels et passés intégrant à la fois les évolutions amont de la marge, les variations climatiques et le contexte géodynamique relativement récent (Néogène) des marges.

Les résultats récents de nos travaux dans le Golfe du Lion ont montrés qu'une analyse sédimentologique et morphologique 3D et stratigraphique précise (la lecture et l'interprétation des paléo-marqueurs sédimentaires interpolés en 3D) remises dans un cadre géodynamique maîtrisé permettait de remonter à une lecture des processus terrestres profonds mettant ainsi en exergue la relation étonnamment durable entre la structure du rifting et l'évolution tardive post-rift des marges ([Rabineau *et al.*, 2014](#) ; [Leroux *et al.*, 2014](#). Voir Partie 2-Bilan).

Ces résultats établis dans le Golfe du Lion doivent maintenant

- 1) être confirmés et affinés par une vérité-terrain (forage Gold voir chapitre 2) mais aussi être testés via des modélisations analogiques et numériques et
- 2) élargis et modifiés par l'analyse d'autres marges de Méditerranée Occidentale d'une part (Golfe de Valence d'un côté (Thèse R. Pellen, démarrage Oct 2012) ; Algérie, sur la marge sud de la Méditerranée Occidentale (Thèse de M. Arab, initiée en Mai 2012), mais aussi sur les marges du Maroc (Analyse des données de Dakhla, Mirror et Marlboro, Postdoctorat : M. Benhabdelhaoued), et du Brésil (données SANBA, MAGIC et SALSA, postdoctorats : Z. Mokeddem, F. Gallais).

L'effort principal à réaliser dans ce chantier pour les années à venir doit être de pouvoir concentrer les moyens à la mer et de concrétiser une demande de **forage IODP** en Méditerranée (projet dont je suis leader, voir chapitre 2 de cette partie 3).

Si l'on connaît depuis longtemps les grands traits des transferts sédimentaires entre la Terre et la Mer à l'échelle d'une partie du système (fonctionnement des rivières, évolution des profils de plage, construction des deep-sea fans, sédimentation dans les deltas, etc...), **des questions majeures et pourtant simples** restent sans réponses dès lors qu'il s'agit de quantifier précisément les phénomènes de transport de matière depuis les zones source jusqu'aux aires de dépôt ainsi que les conditions de dépôts, d'érosion et de préservation. Les interrogations les plus importantes portent sur : 1) la part des événements extrêmes (tempête, cyclone par exemple) par rapport aux événements plus continus (cycle annuel ou pluriannuel de sédimentation) par exemple qui restent le plus souvent indéterminés 2) l'évolution au cours du temps des quantités de roches érodés, transportés (via les rivières puis les canyons sous-marins par exemple) puis déposés et préservés (ou non). Ces questions sont pourtant au cœur de la sédimentologie et de la géologie des bassins et doivent permettre de mieux anticiper des évolutions qui ont des conséquences importantes en termes de risques naturels, d'évolution climatique et d'aménagement de zones littorales dans de nombreuses régions du monde. Elles se posent d'ailleurs à toutes les échelles de temps, de l'échelle événementielle (jour, semaine) à celle de l'année, du millier d'années et jusqu'au million d'années. L'objectif est donc de reconstruire l'évolution en 4D des flux sédimentaires du bassin versant aux abysses et d'en comprendre les conséquences sur l'évolution des marges et des bassins et des cycles globaux.

Ces objectifs sont aussi au cœur de l'équipe « Transferts Terre-Mer, interactions Biosphère, Océans, Climat », dont je suis responsable pour le quadriennal 2012-2015. L'objectif de notre équipe est une meilleure compréhension de la dynamique des transferts de matière entre le domaine terrestre et le domaine marin et de leur résultante à l'échelle des temps géologiques. L'originalité de cette équipe réside dans son approche multi-méthode et multi-temporelle (d'une durée « événementielle » à plusieurs millions d'années). L'équipe est ainsi résolument multi-disciplinaire ce qui enrichit et combine les points de vue.

Les activités de notre équipe et du Labex, dans le domaine des « transferts Terre-Mer » sont partagées en **2 grands axes** liés à deux échelles de temps différentes :

- Les « transferts Terre-Mer » récents et actuels, donc à une échelle de temps court (actuel, historique)
- Les « transferts Terre-Mer » à une échelle de temps long (plurimillénaire à plusieurs Ma).

Les avancées qui seront réalisées à ces deux échelles complémentaires vont se nourrir mutuellement. Le « temps long » permettra de définir un cadre (type, nature, constantes de temps, origine et environnement des dépôts) et d'identifier les forçages (climatique,

eustatique et tectonique). Cette approche permettra également de réaliser des bilans sédimentaires lorsque l'on dispose de données suffisantes. C'est dans cette approche aux temps longs que je serais le plus impliquée. Le « temps court » permettra de travailler sur le processus lui-même (tempêtes actuelles, et courants associés, bilans sédimentaires, dynamique de transport dans les canyons...). La combinaison des deux approches devrait nous permettre des avancées notables sur la connaissance des capacités d'enregistrements et de préservation des événements à des âges stratigraphiques variés.

Les **modélisations numériques 3D**, puissant intégrateur des connaissances pluridisciplinaires acquises, représentent un outil essentiel pour la connaissance de l'objet « Marges », de son enregistrement sédimentaire jusqu'aux différentes étapes de sa formation. Elles ont montrées leurs potentialités et efficacité, par exemple dans le Golfe du Lion (thèse Leroux, 2012), mais aussi leurs exigences car elles ne sont in fine qu'un puissant moyen de tester des hypothèses: besoin d'une base de données importante pour définir précisément les géométries de dépôt et leur nature, besoin d'une connaissance pointue (quantifiée) des différents paramètres à des échelles de temps très variées, imposant véritablement un travail de collaboration pluridisciplinaires. Ainsi, la connaissance de la géodynamique des bassins est indispensable pour quantifier et valider la subsidence, tester des modèles de leur genèse (par une typologie générale) et leur relation avec l'enregistrement sédimentaire ; la connaissance des méthodes de mesures de l'érosion à terre (géomorphologie quantitative) est nécessaire pour une comparaison avec les mesures en mer et leur validation ; la connaissance de la géochimie des sédiments nous permet de localiser les sources de matériel ; la paléoclimatologie nous permet de définir les conditions globales influant potentiellement sur les flux ; enfin, la géo-microbiologie pourrait devenir un nouveau proxy paléo-environnemental.

Il me paraît donc indispensable de poursuivre dans cette voie dans les années à venir, comme nous l'avons proposé dans la feuille de route à 10 ans du Labex Mer (**2011-2021**) et en particulier dans le cadre de l'axe 4 intitulé : **Transferts du Littoral aux Abysses**, que je coordonne avec Stephan Jorry (IFREMER).

Cette nouvelle **synergie entre l'IUEM et l'IFREMER** établie sur le long terme (2011-2021) devrait améliorer la compréhension fine des processus et de leur enregistrement dans les sédiments à toutes les échelles de temps. Elle devrait aussi accroître notre visibilité internationale dans la communauté de la Géologie Marine. Cependant nos objectifs à dix ans sont aussi de renforcer les relations et collaborations de notre communauté "marine" avec la communauté scientifique "terrestre" pour accéder à une vision parfaitement intégrée du continuum érosion-transfert-dépôt.

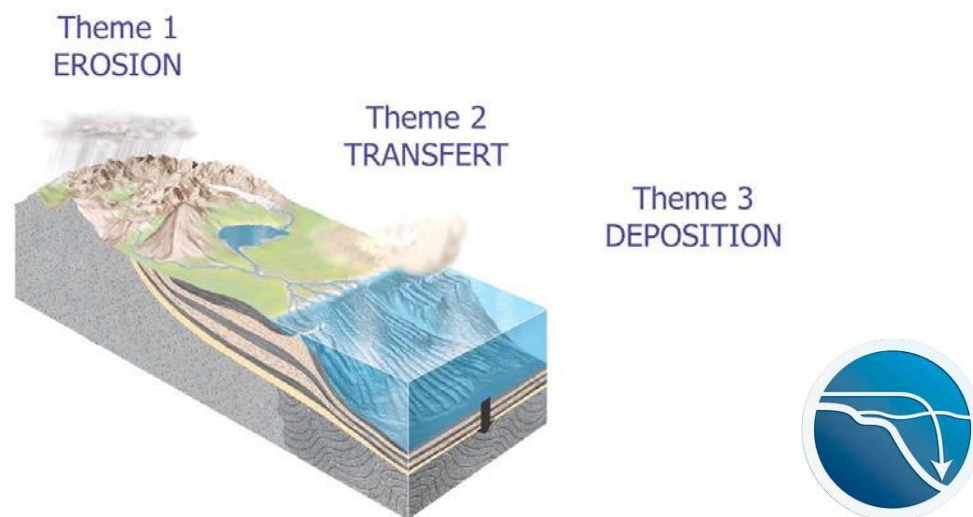


Figure V-1 Trois thèmes principaux pour quantifier les production-transfert-dépôt des sédiments.

Nous avons donc répartis nos actions futures pour les 7 ans à venir en trois thèmes principaux naturellement répartis le long du transect Source-Dépôt depuis la production des sédiments (*via* l'érosion), leur transfert (*via* les rivières, les courants, les canyons) jusqu'à leur dépôt dans les domaines bathymétriques les plus profonds (Figure 2). Au sein de chacun de ces thèmes nous chercherons à développer de nouvelles approches visant à quantifier les processus.

Theme I – Quantification des produits de l'érosion

Ce thème est dédié à l'étude de l'évolution de la production et de la quantification des produits de l'érosion qui sont contrôlés par des facteurs internes : tels les taux de subsidence/*uplifts* et des facteurs externes tels les fluctuations climatiques ou du niveau marin. Initiés dans le cadre de nos collaborations en géomorphologie dans le Golfe du Lion (voir Partie 2-Bilan, postdoctorats de S. Molliex), nous poursuivrons nos études des relations géomorphologiques entre les bassins versants et les dépôts marins par l'utilisation et la comparaison de méthodologies modernes. Une étude dédiée à la détermination des âges d'enfouissement et des taux de paléo-dénudation, en utilisant les méthodes cosmogéniques mais appliquées aux sédiments marins (ce qui n'a encore jamais été réalisé), est en cours.

Theme II – Transferts sédimentaires: processus et facteurs de contrôles

L'objectif est d'étudier les facteurs et les processus impliqués dans le transfert des sédiments en se focalisant sur les environnements modernes dans le but de comprendre ceux observés dans l'enregistrement sédimentaire.

L'étude des canyons sous-marins en particulier (connectés ou non à des réseaux fluviaux à terre) reste extrêmement parcellaire. Leur modélisation numérique encore plus limitée. Je souhaite continuer à m'investir sur cette thématique dans les années à venir (je participe à l'encadrement d'une thèse initiée en Oct 2013 sur ce sujet : **M. Payo-Payo**).

Theme III- Tracage des sources à partir des sédiments marins : stratigraphie haute résolution, géochimie et paléoenvironnements.

Le développement prochain à Brest d'un pôle d'analyses d'isotopie stable permis grâce au PSO (Pôle Spectrométrie Océan) et au Labex Mer (avec en particulier une Chaire d'Excellence ouverte en 2014) et à la nouvelle embauche dans notre laboratoire (poste de Géochimie sédimentaire pourvu en 2013) ouvre de nouvelles perspectives pour le traçage des sources sédimentaires. La chaire internationale du Labex Mer a été ouverte cette année et cinq candidats postulent pour le poste. Il s'agit de recruter pour 3 ans un chercheur de haut niveau pour mener un projet de recherche dans les domaines de la paleocéanographie et du cycle biogéochimique du Carbone en milieu marin profond

L'étude des environnements turbiditiques par exemple a longtemps été considérée comme impropre pour les études paléoenvironnementales, paléoclimatiques et chronostratigraphique. Cependant, les équipes brestoises et bordelaises ont récemment montré que la connaissance sédimentologique fine des processus turbiditiques permettait la réalisation d'étude chronostratigraphique (par mesures du $\delta^{18}\text{O}$ des tests de Foraminifères) dans ces environnements, malgré l'importance des apports terrigènes (Toucanne *et al.*, 2008 ; Dennielou *et al.*, 2009 ; Jorry *et al.*, 2009 ; Toucanne *et al.*, 2009, 2010, 2012 ; Babonneau *et al.*, 2013).

Un autre aspect prometteur concerne la reconnaissance et le traçage des sources de sédiments en utilisant les méthodes géochimiques (Nd, Hf, Sr, ...) qui sont aussi en cours de développement à Brest (Révillon *et al.*, 2011 ; Bayon *et al.*, 2012 par exemple).

Dans la même dynamique, le PSO brestois s'est doté cette année de plusieurs spectromètres de masse puissants (MAT 253 et Kiel à carbonates, 2 Delta V⁺ avec analyseur élémentaire et chromatographie Gaz) permettant la mesure des isotopes de (e.g. C, O, S, N, H/D) sur une large variété de minéraux (e.g. carbonates), de gaz et de matériel biologique.

Le développement de ces travaux en collaboration nous ont conduit à défendre et promouvoir l'ouverture d'un poste de Maître de Conférence au sein de notre équipe en Géochimie sédimentaire. Ce poste pourvu l'année dernière en Sept 2013 (**P. Sansjofre**) couplé à l'accueil d'un chercheur associé adossé à la PME SEDISOR (**S. Révillon**) va nous permettre de développer dans le futur cet aspect (un M2 en collaboration est en cours sur une nouvelle carotte de la campagne AM-MED-1 (Sept 2013), une thèse soutenue par la Région et le Labex mer, dans la continuité de ces travaux dans Golfe du Lion démarrera l'an prochain (Oct. 2014) sur la caractérisation géochimiques des flux de matière liés aux cyclicité de 100, 000 ans (divers outils géochimiques seront mis en œuvre Nd/Sr ; matière organique, BIT index et Ge/Si en particulier).

Références bibliographiques de ce chapitre :

- Babonneau N., Delacourt C., Cancouet R., Sisavath E., Bachelery P., Deschamps A., Mazuel A., Ammann J., Jorry S.J., Villeneuve N., 2013. Direct sediment transfer from land to deep-sea: insights from new shallow-marine multibeam data at La Réunion Island, *Marine Geology*, 47-57, Doi 10.1016/j.margeo.2013.08.006, 2013.
- Bayon, G., Bernard Dennielou, Joël Etoubleau, Emmanuel Ponzevera, Samuel Toucanne, Sylvain Bermell, *Science* 335, 1219 (2012).
- Dennielou, B., *et al.* (2009), Post-glacial persistence of turbiditic activity with the Rhone deep-sea turbidite system (Gulf of Lions, Western Mediterranean): Linking the outer shelf and the basin sedimentary records, *Marine Geology*, 257(1-4), 65-86.
- Jorry, S. J., Jegou, I., Emmanuel, L., Jacinto, R. S., and Savoye, B.: Turbiditic levee deposition in response to climate changes: The Var Sedimentary Ridge (Ligurian Sea), *Marine Geology*, 279, 148-161, 10.1016/j.margeo.2010.10.021, 2011.
- Révillon, S., Jouet, G., Bayon, G., Rabineau, M., Dennielou, B., Hémond, C., Berné, S., 2011. The provenance of sediments in the Gulf of Lions, Western Mediterranean Sea. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Volume: 12 Article Number: Q08006 DOI: 10.1029/2011GC003523 Published: AUG 10 2011
- Toucanne, S., *et al.* (2008), Activity of the turbidite levees of the Celtic-armoric margin (Bay of Biscay) during the last 30,000 years: Imprints of the last European deglaciation and Heinrich events, *Marine Geology*, 247(1-2), 84-103.
- Toucanne, S., *et al.* (2009a), Timing of massive 'Fleuve Manche' discharges over the last 350 kyr: insights into the European Ice Sheet oscillations and the European drainage network from MIS 10 to 2, *Quaternary Science Reviews*, 28, 1238-1256.
- Toucanne, S., *et al.* (2009b), A 1.2 My record of glaciation and fluvial discharges from the West European Atlantic margin, *Quaternary Science Reviews*, 28, 2974-2981.
- Toucanne, S., *et al.* (2010), The first estimation of Fleuve Manche palaeoriver discharge during the last deglaciation: Evidence for Fennoscandian ice sheet meltwater flow in the English Channel ca 20-18 ka ago, *Earth and Planetary Science Letters*, 290, 459-473.
- Toucanne, S., *et al.* (en préparation), A Global Distribution Map for Neodymium Isotopes in European Watersheds: Applications in Quaternary Sciences, *Quaternary Science Reviews*.



CHAPITRE VI

LA NECESSITE D'UN FORAGE EN MEDITERRANEE OCCIDENTALE :

PROJET IODP DREAM-GOLD : PROBING DEEP-EARTH & SURFACE CONNECTIONS)

1 Origine du projet

Nos travaux en Méditerranée et l'élargissement de nos thématiques vers le Messinien, le Néogène, la formation des marges, les transferts Terre-Mer et les études de géomicrobiologie nous ont amené à identifier le Golfe du Lion comme un laboratoire unique pour l'étude des interactions entre les processus profonds (géodynamique, tectonique, subsidence, isostasie) et les processus plus superficiels (comportement des rivières, flux sédimentaires, impact des changements climatiques...) ce qui nous a conduit à relancer activement en 2008, le Projet d'un forage IODP ultra-profond dans le Golfe du Lion, en pied de pente (projet international de forage IODP « GOLD », MDP-798 déposé le 1^{er} Avril 2012 - Rabineau, Kuroda, *et al.* 2012). Ce projet de forage profond dans le Golfe du Lion, dont je suis *leader*, combine intérêts scientifiques pluri-, intra-disciplinaires et industriels et défis technologiques (forage sous un km de sel).

Une synthèse complète des données existantes a déjà été réalisée dans le cadre du GDR Marge et de l'Action-Marges, par des équipes universitaires, CNRS et EPIC (Ifremer, BRGM, IFPEN), avec le soutien de l'industrie (TOTAL, MELROSE), afin de sélectionner le site idéal. Ce site, accessible sous 2400 m d'eau en pied de talus, permet d'accéder à 6 km d'archives sédimentaires couvrant les 30 derniers millions d'années ; celles-ci reposent sur une croûte intermédiaire, à la transition continent-océan (TOC), dans une zone relativement épargnée de toute activité diapirique (remontées de sel). Cette position est aussi reconnue comme zone d'intérêt pour le stockage de gaz à effet de serre, là où les prismes silico-clastiques semblent se prolonger sous le sel. Le projet regrouperait autour d'une très grande infrastructure (navire foreur équipé d'un Riser) une large palette de disciplines des sciences de la mer (géologie, microbiologie, géochimie, géophysique, biologie) et des sciences de l'ingénieur (instrumentation, traitement du signal).

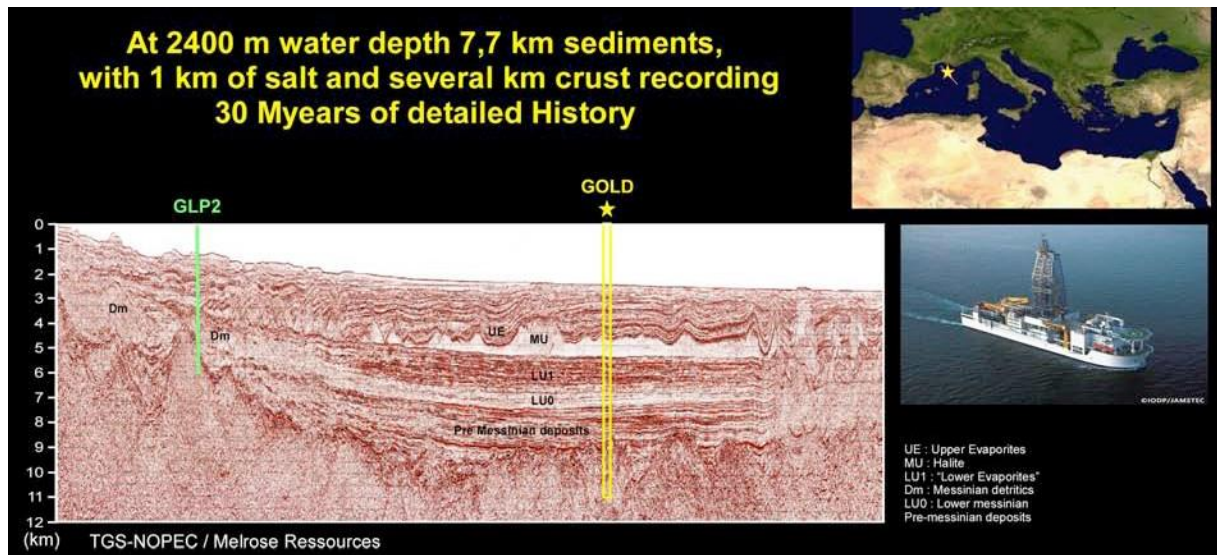


Figure VI-1 Position du forage IODP GOLD dans le Golfe du Lion.

Le but du projet est donc de réaliser le 1^{er} forage scientifique profond, échantillonnant pour la première fois les séries ante-sel dans le Golfe du Lion, à 200km des côtes, afin d'étudier les variations du climat global et celles du niveau marin, les événements extrêmes comme le Messinien, la formation et l'évolution de marges passives, les ressources naturelles, le stockage du CO₂, et la biosphère profonde, c'est-à-dire la limite de la vie dans des conditions de pression, de température ou de salinité extrêmes.

La position du forage est définie dans une zone restreinte où la colonne sédimentaire est complète, non déformée et sans érosion et hiatus majeurs. Le forage est localisé suffisamment loin de la plate- forme et de la pente pour que l'enregistrement sédimentaire soit préservé de l'extraordinaire érosion liée à l'événement messinien et aussi suffisamment loin des failles et des diapirs liés au sel pour éviter toute déformation majeure. A cette position nous avons donc, préservés par 7,7 km de sédiments l'enregistrement complet et très haute résolution des derniers 30 Ma de l'histoire de la terre et de la Méditerranée. Il se situe au niveau d'un substratum de nature inconnue, dans le domaine intermédiaire aussi appelé domaine allochtone (Aslanian *et al.*, 2009 ; Aslanian, Rabineau *et al.*, 2012, Aslanian *et al.*, submitted). Malgré des études intensives sur cette zone, aucun forage IODP ou DSDP n'a dépassé la partie superficielle de la couche d'évaporites.

Les enjeux du projet de forage s'articulent ainsi autour de 4 thèmes majeurs scientifiques

- 1) *Géodynamique, thermicité et formation des marges*
- 2) *Paléoenvironnements, Changements Climatiques et Evénements extrêmes*
- 3) *Biosphère souterraine et limites de la vie*
- 4) *Interaction surface/processus profond*

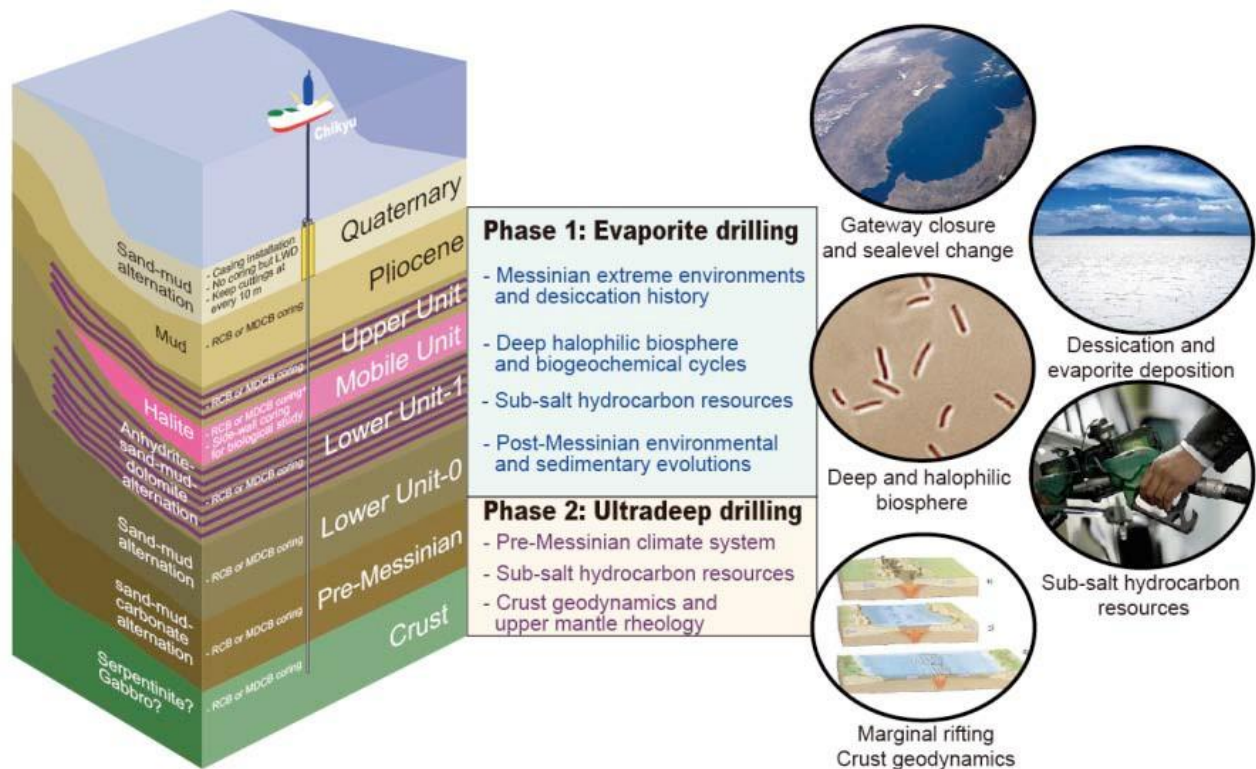


Figure VI-2 Conceptual image and operation plan of the Riser Mediterranean drilling GOLD-MDP798.

- 1 **Géodynamique, thermicité et formation des marges** : les données récemment acquises lors de la mission Sardinia (2006) confirment la présence d'une croûte énigmatique dans un domaine dit transitionnel situé entre la croûte continentale et le domaine océanique. Quelle est la nature du substratum ? Quelles sont les conditions de dépôt des premiers sédiments ? Ce forage donne l'opportunité d'obtenir des données de « vérité-terrain » permettant de contraindre les différents modèles de formation et de subsidence des marges passives qui sont loin d'être compris à l'heure actuelle.
- 2 **Biosphère souterraine et limites de la vie** : jusqu'à quelle profondeur trouve-t-on la vie (la profondeur maximale à laquelle des signatures de vie ont été mises en évidence est de 1626 mbsf) et quelle est sa nature ? Est-elle développée dans les milieux extrêmes (HT°, HP, couche salifère) et quelles sont alors les formes d'adaptation à ces milieux ? Ce forage représente la première opportunité d'étudier la composition et les fonctions des communautés microbiennes (bactéries, archées, virus, microeucaryotes) profondes de la Méditerranée et peut-être de contraindre les limites physicochimiques de la Vie en termes de salinité, pression et température.
- 3 **Changements Climatiques, variations du niveau marin et Événements extrêmes** : Le Golfe du Lion est un lieu exceptionnel d'enregistrement sédimentaire pour les derniers 30 millions d'années. La quantité de sédiments déposés est dépendante de l'existence de la calotte glaciaire en

amont et de ses variations d'extension et d'épaisseur au cours du temps. Ces variations sont directement liées aux variations climatiques, et nous pouvons ainsi « lire » les cyclicités glacio-eustatiques. Cette « lecture » a été effectuée pour les 500 000 dernières années à partir d'un réseau dense de profils sismiques et les résultats ont été confirmés par un forage peu profond (Promess). Le forage proposé permettra d'étendre ces résultats jusqu'au début du Miocène. L'assèchement de la Méditerranée au messinien représente une crise sédimentologique, hydrologique, biologique unique dans l'histoire de la Terre. Cette crise « catastrophique » a des conséquences importantes sur le paléoclimat, affecte l'ensemble de la Méditerranée et correspond à une baisse du niveau de la mer d'environ 1500m, accompagnée d'une érosion gigantesque sur le continent et le plateau continental. Près de 3000 m d'évaporites (sel) ont été déposés en moins de 500 000 ans. Aucun forage IODP ou DSDP n'a dépassé la partie superficielle de cette couche. Ce forage permettra de tester les différents modèles existant sur le processus de cet événement.

- 4 Connexions profond/surface :** L'étude de la partition crustale du bassin liguro-provençal, les marqueurs paleobathymétriques et les paleoenvironnement permettront de détailler la réponse de chaque segment, en fonction de sa rhéologie, à la subsidence et à la tectonique. En particulier, les mouvements de masse qu'induisent en particulier la crise messinienne, associés aux informations acquises sur la nature crustale du substratum sous-jacent, fourniront des données essentielles aux études sur la dynamique du manteau sous-jacent (réajustement isostatique) et sa rhéologie.

Au delà des intérêts scientifiques, le forage est un enjeu sociétal et devrait permettre d'évaluer le potentiel de cette zone en Ressources énergétiques et minérales. Enfin, le site et le forage pourraient aussi être instrumentés et fournir un observatoire permanent inédit.

La présence du sel impose, en contrepartie, l'utilisation d'un navire foreur équipé d'un BOP (Blow Out Preventor). Dans le monde académique, seul le Chikyu, navire foreur japonais est capable de réaliser un tel forage.

Le 1^{er} Avril 2012, le projet a été déposé au PEP Panel d'IODP pour évaluation, MDP-798 (cf première page du document de soumission (Rabineau, Kuroda, *et al.* 2012) ci-dessous). Le projet n'a pas été retenu lors de cette première soumission mais nous avons été encouragés à resoumettre la demande. A l'issue du Workshop Chikyu + 10 (Avril 2013) le projet de forer en Méditerranée a été reconnu comme le **Flagship Project: Extreme environments: Ocean Basin Desiccation (Mediterranean)** de la thématique "Sediment Secret" (<http://www.jamstec.go.jp/chikyu+10/>).

Le projet de forage a été redéposé à IODP le **1^{er} Avril 2014**, après la tenue du **Workshop Ecord DREAM les 20-23 Janvier 2014 à Paris**, dédié à tout les types de forages en Méditerranée autour des thématiques messiniennes, dans lequel s'inscrit notre projet

(même si les questions qu'il se propose de tester dépassent très largement le messinien en tant que tel).

Le projet général « Umbrella » s'intitule « Uncovering a Salt Giant» Umbrella proposal of the Deep-Sea Record of Mediterranean Messinian Events (DREAM) multi-phase drilling project. Ce projet général piloté par Angelo Camerlenghi (OGS), auquel je participe en tant que co-auteur, est ensuite subdivisé en 4 projets individuels nécessitant une série de forages (Figure X) de profondeurs différentes dans les bassins de l'Ouest et de l'Est Méditerranée :

- 1) *DREAM: Deep-Sea Records of the MSC*
- 2) *Deformation and fluid flow in the MSC salt giant*
- 3) *Probing the Salt Giant for its Deep Biosphere secrets*
- 4) *Probing deep Earth and surface connections*

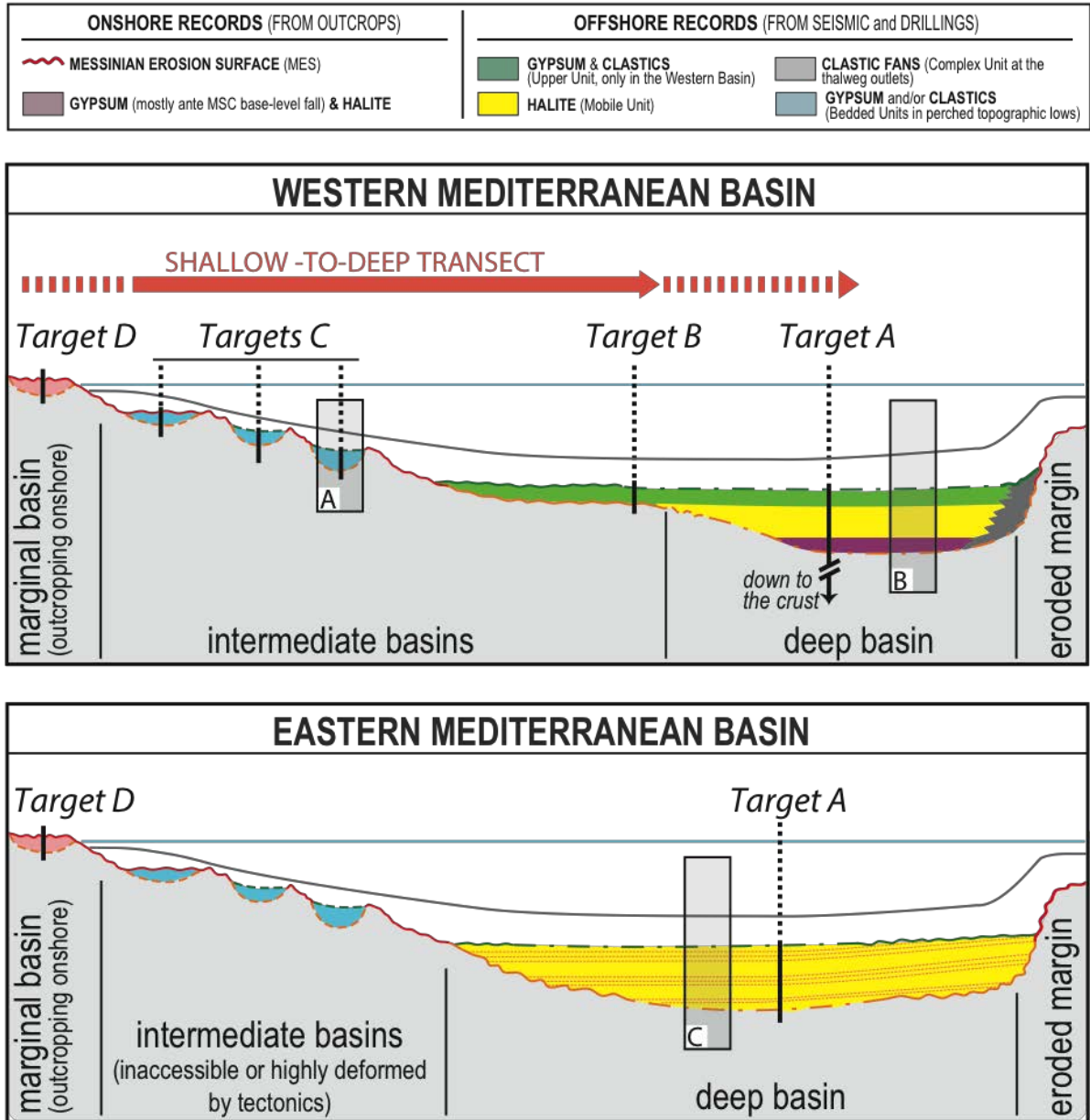


Figure VI-3 Schematic seismic line drawing cross-section showing the markers of the MSC (from Lofi, et al., 2011). GOLD represents the Deep basin site of DREAM in the Western Mediterranean Sea (Target A).

Notre projet, « Probing connections between deep earth and surface processes in a land-locked ocean basin transformed into a giant saline basin: Mediterranean DREAM-GOLD » (Rabineau et al., IODP 857A-Pre) », est présenté ci-dessous dans sa version soumise (en anglais).

2 Probing connections between deep earth and surface processes in a land-locked ocean basin transformed into a giant saline basin: Mediterranean DREAM-GOLD

IODP Proposal Cover Sheet

2	-	Pre	1
---	---	-----	---

Clone of: DREAM-GOLD

Title	Probing connections between deep earth and surface processes in a land-locked ocean basin transformed into a giant saline basin: Mediterranean DREAM-GOLD		
Proponents	M. Rabineau, S. Cloetingh, J. Kuroda, D. Aslanian, A. Droxler, C. Gorini, D. Garcia-Castellanos, G. Nolet, A. Moscariello, Y. Hello, E. Burov, F. Siero, F. Lirer, F. Roure, P. Pezard, L. Matenco, Y. Mart, A. Camerlenghi, G. DREAM,		
Keywords	Margin, Salt, Isostasy, Messinian, Dynamics	Area	Gulf of Lion Sardinian margins

Contact Information

Contact Person:	Marina Rabineau		
Department:	Domaines Océaniques		
Organization:	CNRS		
Address:	1 Place N. Copernic	Flouzan	29280
Tel.:	33-298498728	Fax:	
E-mail:	marina.rabineau@univ-brest.fr		

Abstract

One of the critical developments in Earth Science over the past decade has been the recognition of the importance of links between deep Earth dynamics and surface geologic processes. The field of dynamic topography has been developed as a consequence, but at the same time it has been demonstrated that the outcome of models depends critically on constraints regarding crustal structure and the thermo-mechanical properties of the lithosphere. Since the classical models of McKenzie (1978) and Wernicke (1985), understanding how passive continental margins form, i.e., the thinning of the continental lithosphere leading to vertical movements (subsidence), remains a major challenge in Earth Sciences. Deep earth dynamics (topography, erosion, tectonics) are also strongly connected to natural hazards such as earthquakes, landslides, and tsunamis. On the other hand, sedimentary mass transfers have important consequences on georesources and geothermal energy repartitions. The ability to read and understand the link between deep Earth dynamic and surface processes has therefore important societal impacts.

The overarching objective of this pre-proposal is to answer the question: What are the mechanisms underlying the spectacular vertical motions inside basins and their margins? Due to its youth (<30 Ma) and its history of strong subsidence, the almost land-locked Gulf of Lion-Sardinia continental margins system provides a unique record of sedimentary deposition from the Miocene to present. Paleoclimatic variations, tectonic events, and subsidence history are all recorded there at very high resolution. The late Miocene isolation and desiccation of the Mediterranean, a major and extreme event in the Neogene known as the Messinian Salinity Crisis (MSC), caused massive erosion of surrounding margins and widespread deposition of evaporites. These extraordinary mass transfers from land to sea imparted strong isostatic re-adjustments that are archived in the sedimentary record.

The DREAM-MDP Umbrella proposes to carry out a drilling transect using IODP and ICDP platforms, extending from the basin margins to the deep ocean basins, and linking sediment source (the continent) to sink (the ocean basin). In that view, the GOLD drilling project is the basal end-member of the DREAM drilling transect in the deep western Mediterranean basin. GOLD will also explore the nature of the deep crustal structure and the paleo-environmental evolution from the sedimentary record, providing valuable information about the mechanisms underlying vertical motions in basins and their margins.

Scientific Objectives

Our main objective is to sample for the first time the deep basin of the Mediterranean Sea in the Gulf of Lion while recovering strata from the base of Pliocene, through the Messinian Series (both detritic and evaporitic strata), the pre-MSC Series, and down to basement rocks in a key transitional zone of unknown nature, in order to:

- 1) Constrain the timing and quantify the consequences of MSC base-level change on river behaviour, the erosion, supply, and transport of sediment, karstification, and landscape-relief evolution, through the characterization and quantification of sediment fluxes.
- 2) Reconstruct a complete history of basin vertical evolution, with specific focus on the paleoenvironment, paleobathymetry, and chronology of early Miocene sedimentation, to address fundamental questions about rifting, passive margin genesis, and the nature of the first oceanic crust.
- 3) Characterize the thermal and mechanical properties of the lithospheric crust underlying the western Mediterranean and establish the relationship between temporal and spatial variations in crustal structure and the mechanisms that generated the spectacular vertical motions of both the basin and its margins during the MSC.

Non-standard measurements technology needed to achieve the proposed scientific objectives.

Riser Drilling

Proposed Sites

Site Name	Position (Lat, Lon)	Water Depth (m)	Penetration (m)			Brief Site-specific Objectives
			Sed	Bsm	Total	
GOL-01A	41.7653, 5.0017	2420	6230	270	6500	1- Sample for the first time the deep basin of the Mediterranean Sea 2- Reconstruct a complete history of basin vertical evolution 3- Characterize the thermal and mechanical properties of the lithospheric crust underlying the western Mediterranean and establish the mechanisms that generated the spectacular vertical motions 4- Constrain the timing and quantify the consequences of MSC base-level change

Probing connections between deep earth and surface processes in a land-locked ocean basin transformed into a giant saline basin: Mediterranean DREAM-GOLD

M. Rabineau, S. Cloetingh, J. Kuroda, D. Aslanian, A. Droxler, C. Gorini, D. Garcia-Castellanos, G. Nolet, A. Moscariello, Y. Hello, E. Burov, F. Sierro, F. Lirer, F. Roure, P. Peuzard, Y. Mart, A. Camerlenghi, and the GOLD and DREAM Working Groups

1- Introduction, Significance and Relevance

During the last decade, the interaction of deep processes in the lithosphere and mantle with surface processes (erosion, climate, sea level, subsidence, glacio-isostatic readjustment) has been the subject of intense exploration through the *International Lithosphere Program (ILP)*, the *Topo-Europe*, *TopoIberia*, and *TopoAfrica* projects, and the *MISTRAL* program. The use of a multidisciplinary approach linking geology, geophysics, geodesy, modelling, and geotechnology has led to the concept of coupled deep and surface processes [1]. New, carefully-selected sites of investigation are required to better understand this coupling: the Gulf of Lions - Sardinia margins system (GOLSMS) is a perfect candidate.

Due to its youth and history of strong subsidence, this almost land-locked continental margin system provides a unique record of sedimentary deposition from the Miocene to present that has registered paleoclimate variations, tectonic events, and subsidence history. The late Miocene isolation and desiccation of the Mediterranean, a major and extreme event in the Neogene known as the Messinian Salinity Crisis (MSC), caused massive erosion of surrounding margins and widespread deposition of evaporites. These extraordinary mass transfers from land to sea imparted strong isostatic re-adjustments that are archived in the sedimentary record.

Thanks to the multidisciplinary academic-industrial Action Marges program and several European projects, the western Mediterranean sea, and more specifically the Liguro-Provençal Basin, has been intensely studied from land to deep basin and from surface to deep crustal structure. Various numerical models have been developed to characterize « surface » observations and their links with the deep processes. The GOLD drilling project has a complementary process-oriented and ground-truth approach, with the objective to better understand and quantify the mechanisms underlying the spectacular motions inside the basin and at the margins on-land and offshore. The GOLD drilling project is an integral

part of the DREAM project with strong links to the Dream MSC, Deep Biosphere, and Deformation and fluid flow pre-proposals, with targets in both the East and West Mediterranean.

The **principal focus of the proposed GOLD project** addresses one of the very fundamental themes of IODP: *Earth connections, more specifically the dynamic processes that form ocean basins and their impact on surficial environment*. The GOLD project aims to sample the transitional crust, understand paleo-environmental evolution from the sedimentary record, and constrain the chronology of sedimentary mass transfers. These science targets are critical for understanding the processes of margin formation and the opening of oceanic basins, the behaviour of the lower continental crust, isostatic rebound, connections between deep earth and surface processes, and in the specific context of GOLSMS, their roles in the evolution of a land-locked ocean basin into a giant saline one. Outcomes expected from the drilling will directly address multiple thematic challenges of the IODP Science Plan: dynamics of Earth's upper mantle (Challenge 8), links between the lower continental crust - upper mantle and first oceanic crust (Ch. 8-9), fluids and subseafloor tectonic, thermal, and biogeochemical processes (Ch. 14), and resiliency of the ocean to chemical perturbations (Ch. 4). Biological challenges to be addressed include: the origin, composition, and global significance of subseafloor communities (Ch. 5), ecosystem sensitivity to the highly significant Neogene MSC chemical perturbation (Ch. 4, 7), and links between the thickly piled salt layers, the deep biosphere, and the limits of life in the subseafloor (Ch. 6). The proposed project will also shed light on the processes of sedimentation and accumulation of hydrocarbon resources under the thick evaporites, and has analog potential for a better understanding sediment-hosted base-metal deposits now located on land (SEDEX).

Technological innovations and riser technology with blow out preventers will permit drilling in ~2400 m of water and down to the total depth required for sampling the entire geodynamic history of the GOLSMS, including the MSC. The GOLD project is divided into two parts. The first part targets surficial processes and will provide the first chronological, lithological, paleoenvironmental, paleoceanographic, and paleoclimatic constraints from samples in the deep basin, and will also examine the deep biosphere. The GOLD deep site provides the unique opportunity to determine how multiple extremes of

high temperature, pressure, and salinity impact on life's frontier(s). When does the biosphere truly become the geosphere?

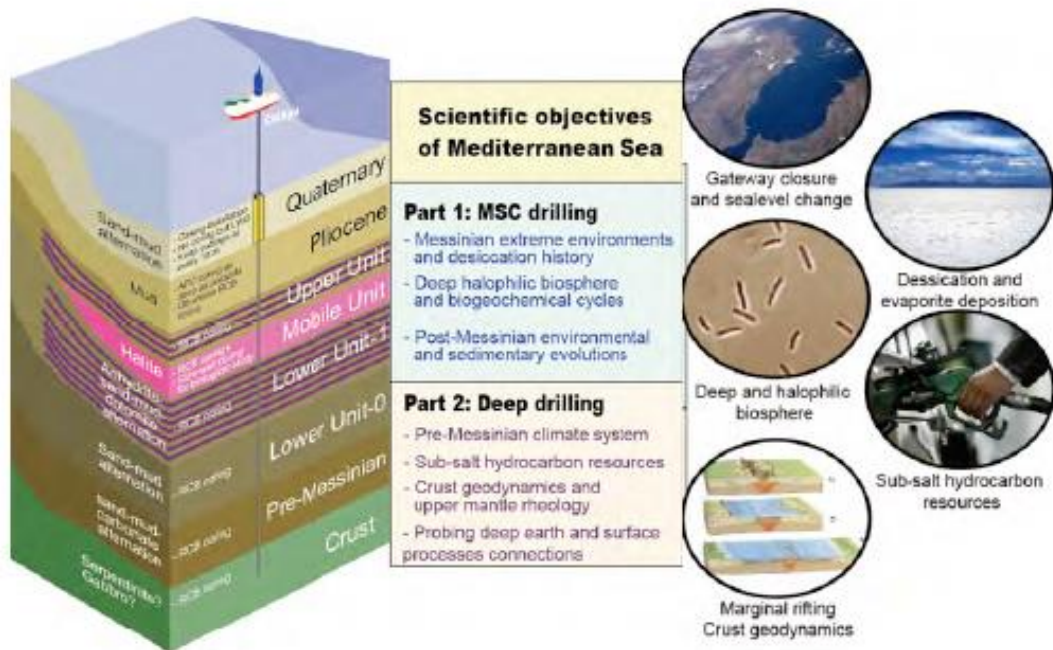


Figure 1: Conceptual image and operational plan for GOLD Mediterranean Riser drilling. Note that Part 1 is not intended to be fully cored. The first part of drilling includes some continuous as well as spot and sidewall coring in the evaporites and their immediate pre- and post-depositional units, and a second part proposed to drill and sample the section below the Messinian and down to the basement.

The second part seeks fundamental information on deep processes, specifically those governing conjugate rift system formation (including mantle and lower crust rheology) dynamics (exchanges, thinning process, rifting history), and subsequent sedimentary filling (nature of the sediments and paleoenvironments.). The combination of Part 1 and Part 2 will provide unprecedented insight into subsidence and isostatic adjustment in the GOLSMS with the goal of informing the emerging concept of Deep-Surface connection.

This proposal brings together a large group of Earth scientists with diverse and complementary expertise (TopoEurope, TopoMed, Action Marges...) and from many ECORD and other IODP member countries (e.g., France, Japan, USA, the Netherlands, Italy, Spain, Germany, UK, Canada, Israël, Australia, Portugal, Switzerland and Brazil). Similarly, industry scientists from several different oil, mineral, and biotechnology companies have expressed keen interest in better understanding the pre-salt history of the western Mediterranean basin. The GOLD project is highly interdisciplinary in nature, and

will help train tomorrow’s sedimentologists, geologists, microbiologists, geophysicists, and geochemists to work together and communicate more effectively in a **holistic approach** for the benefit of future multidisciplinary endeavours.

2- GOLD as a part of the DREAM Project: Understanding the extreme Messinian Salinity Crisis (MSC) event and the deep response of the lithosphere.

The MSC is the youngest and most catastrophic event to occur during the Neogene period, inducing drastic changes in marine environments, widespread deposition of evaporite (gypsum, anhydrite, and halite) in the central Mediterranean basins [2], and intense subaerial erosion along its periphery [3]. The closure of the Mediterranean is believed to be linked to uplifts of the Rifean Corridor and/or Betic internal basins due to slab detachment, with an uplift of more than 1mm/yr indicated over a period of at least 80kyr [4].

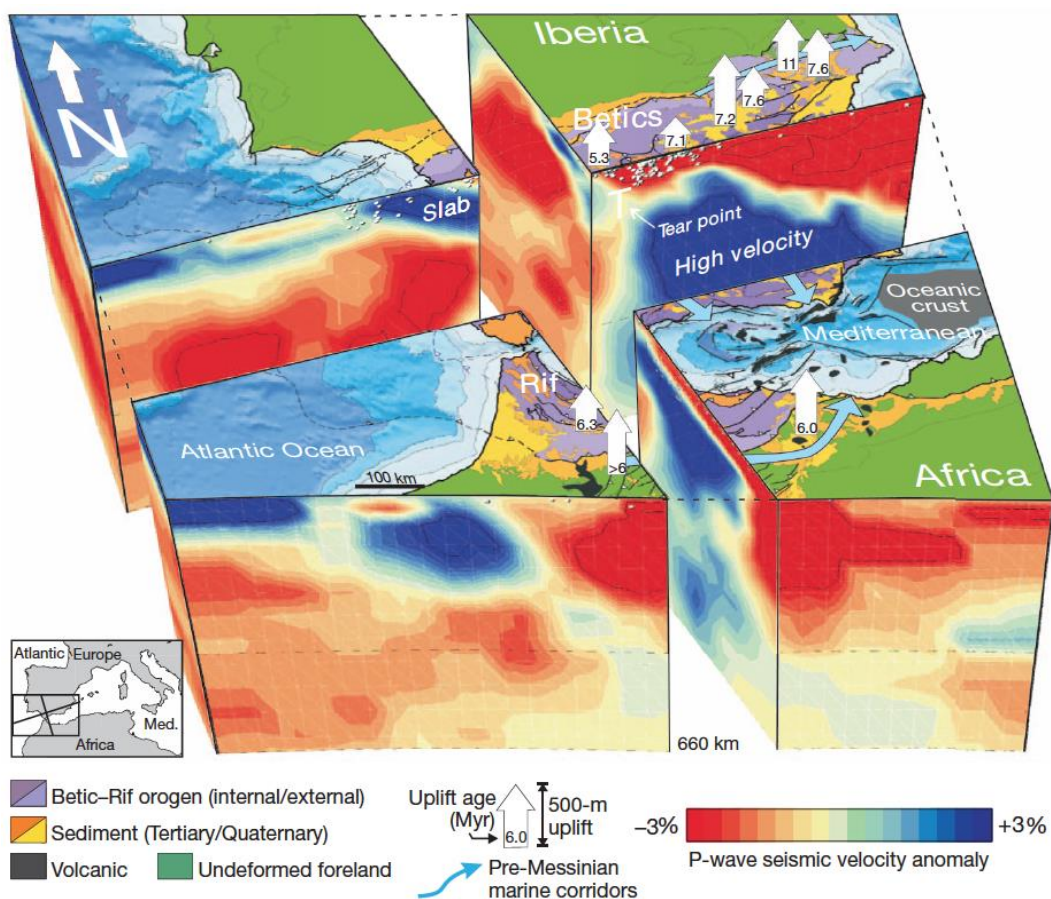
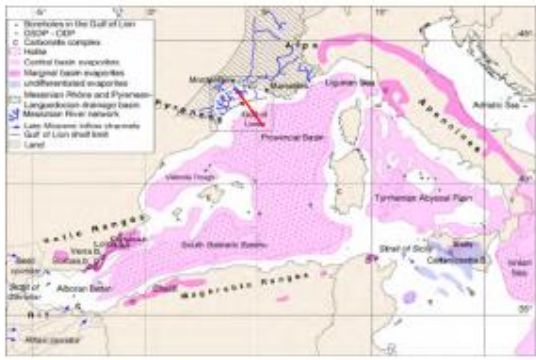


Figure 2: Geological map of the Gibraltar arc and subjacent mantle structure as derived from seismic tomography. White arrows indicate uplift of intramountain basins within the Betic-Rif orogen, with ages indicated for their transition from marine to continental conditions. White dots show earthquake hypocentres used for the tomographic inversion and blue arrows show proposed connecting corridors (Garcia-Castellanos & Villaseñor, 2011).



In the western Mediterranean, this event has a well-preserved record. The DREAM project aims to settle the dispute on the desiccation history of the western Mediterranean Sea by recovering a complete MSC sequence (See the DREAM Umbrella).

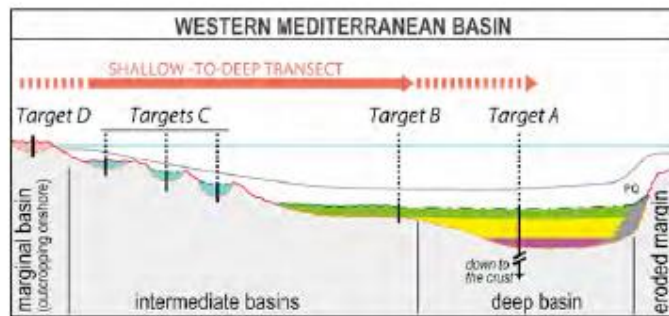


Figure 3: Location map (modified from Bache et al., 2009) and seismic line drawing cross-section showing the markers of the MSC (from Lofi, et al., 2011). GOLD represents the Deep basin site of DREAM (Target A).

A variety of different interpretations have been proposed regarding MSC-related deposition and reflooding, each with their own strong paleoenvironmental, tectonic, isostatic, and climatic implications, thus emphasizing the need to drill the entire sedimentary section in the deep basin:

- (1) interpreted thickness ranges from a “minimal” hypothesis with thin chaotic detritics (1km) coeval with evaporite deposition and with additional turbiditic components embedded in the Lower Unit [5], to a “maximal” hypothesis with huge, thick, fan detritics deposited prior to the Lower Unit [6] for a total thickness of 3.5km.
- (2) The reflooding is generally seen as a rapid flood along the strait of Gibraltar. It has been suggested that the re-connection itself was caused by subsidence to a threshold below the level of the Atlantic, by faulting, by erosion, or by a combination of these three mechanisms [7, 4]. Geomorphological evidence from the strait suggests a large, catastrophic discharge [8], and numerical modeling shows that once the inflow started, the difference in levels across the Gibraltar threshold should vanish in no more than a few thousand years [9]. In contrast, seismic stratigraphy showed a prominent flat wave ravinement surface interpreted as erosional features carved during the refill, which argues for a slow initiation of the refill [6].

The large shelf and the low continental slope gradient in the GOL enables the best possible observations for understanding the Messinian Mediterranean Event as a whole. Here, we can measure subaerial erosion on the shelf, observe markers of marine transgression on the slope and toe of the slope, and map the succession of detritic units, their lateral seaward evolution, and their correlation with the evaporites. This area is unique in that it provides a full record of evaporite deposition in a deep basin. Its understanding requires an integrated approach quantifying the coupling of geodynamic, tectonic, and surface processes, and linking IODP-ICDP drillings with transects from the basin margins to the deep ocean basins where the sediment source-to-sink budget is well constrained. This will go hand-in-hand with multiscale seismic imaging of basin fill and the crustal and upper mantle structure through a combination of multichannel and wide-angle seismic profiling, and the deployment of novel seismic instrumentation (including the Mermaid system of floating seismometers [10] and the European Plate Observing System (EPOS)). Data will be interpreted with the aid of state of the art coupled analogue and numerical facilities and experimental rock-deformation laboratories.

In addition, reconstruction of the history of water exchange between the Mediterranean Sea and North Atlantic will be attempted based on the isotopic records of Sr, Nd and Pb [11, 12]. Bromine concentrations and the stable isotopic compositions of sulfur, osmium, chlorine ($\delta^{37}\text{Cl}$) and boron ($\delta^{11}\text{B}$) might also be used to further constrain the nature of the original water, evaporative and post-depositional processes [13, 14], and evaporite crystal growth patterns that are controlled by the environment of their formation [15, 16].

3 Main Scientific Objectives: Understanding connections between deep earth and surface processes

One of the most significant developments in Earth Science over the past decade has been the recognition of the importance of the link between deep Earth dynamic processes and surface and near surface geologic processes [17]. Deep earth dynamics (topography, erosion, tectonics) are strongly connected to natural hazards such as earthquakes, slope instabilities, and tsunamis. On the other hand, mass transfers have important consequences on georesources and geothermal energy. The ability to read and understand the link between deep Earth dynamics and surface processes has therefore important societal impacts.

The almost land-locked Gulf-of Lions – Sardinia continental margins system is a unique natural laboratory for addressing key questions on passive margin genesis, the nature of the

intermediate crust and the first atypical oceanic crust, the timing of subsidence, glacio-isostatic rebound, and the impact of the mass transport, in particular during the MSC. It is also the home to many multidisciplinary studies, at all scales, onland and offshore, combined with innovative experiments (Mermaids, ICPD, numerical and analogue modeling).

3.1. Passive margin genesis and evolution.

Since the classical models of McKenzie [18] and Wernicke [19], understanding how passive continental margins form, i.e., the thinning of the continental lithosphere leading to vertical movements (subsidence), remains a major challenge in the Earth Sciences. Conservative models, which intrinsically exclude exchanges between the lower continental crust and upper mantle, are usually proposed to explain the lithospheric stretching and consequential crustal thinning of passive continental margins. Major effort has been made to explore the conjugate Galician/Iberian and Newfoundland margins (ODP Legs 103, 149, 173, 210). Nevertheless, their results mainly concern an end-member of conjugate passive margins with strong continental lower crust [20] and cannot in general be applied to other margins. Moreover, evidence of an emerged or shallow marine position of margins until the break-up [21, 22, 23], absence of extensional faults [24, 23, 25], anomalous heat flow [26], the presence of a strong reflector in the lower crust [27], and of exhumed mantle [28], all have modified our basic concepts of margin formation. The physical and numerical models proposed to explain some of these observations [29, 30, 31, 32] imply huge horizontal movements, which do not fit the geological and geophysical observations [21, 33]. Comparisons between different conjugate margin systems in different tectonic contexts around the world (Central Atlantic [34]; South Atlantic [21]; Liguro-Provencal Basin [35]), intracontinental basins (Baikal lake [36]; Parentis Basin [37]), and aborted rifts (Valencia Basin [38]) present a common picture, with a ~200km wide thinned basin in high position and missing lower continental crust. The thinning process seems to be depth dependent and to mainly involve the lower/middle crust, which appears to be exhumed in the continent-ocean transition zone [21, 32]. However, this exhumation does not explain the entire thinning of the system. The thinning of the continental crust cannot be explained only by stretching, shears, faults or lower crust exhumation; some lower crust is still missing, and must have flowed elsewhere or mixed with the upper mantle [33]. This behaviour of the lower continental crust

has strong implications for deep processes, vertical movements, and isostatic response to the mass transfer that should be readable in the sedimentary record.

3.2 Natural laboratory of the Gulf of Lion – Sardinia margins system

The GOLSMS corresponds to a pair of rifted margins formed by the rupture of the Corso–Sardinian micro-continent with respect to the Ibero–European plate since the Priabonian (33.7Ma [39]) in the context of collision between the African and European plates [40]. The opening took place at the southern end of the intra-European rift system, in a back-arc situation and in response to a SE rollback of the slab of the African plate subducting beneath the Maghrebides-Calabrian-Apenninic arc during an extensional phase [39]. The Corso–Sardinian microcontinent’s counterclockwise rotation resulted in the emplacement of an oceanic crust starting in the Late Aquitanian (23Ma to 19Ma) and lasting until the Langhian (around 15Ma) [41]. Although rifting in back-arc basins might differ somewhat from cratonic rifting, the mechanics of thinning of the continental crust ought to be similar. The Sardinia Cruise (2006) surveyed both conjugate margins [42], allowing precise palinspastic reconstruction of the GOLSMS [43] showing the same configuration as those of Atlantic margins and intracontinental basins. Moreover, the puzzling similarity in the seismic velocity profiles of the intermediate domain and the atypical oceanic crust [35] brings into question the role of the lower continental crust in the first oceanic crust fabric, as proposed by Bott [44] and Sibuet et al. [45]. The GOLSMS is expected to have a continuous and relatively complete sedimentary series, neither affected by basement tectonics nor by recent tectonic or gravity processes, and that can be divided in two second-order sequences: a late Aquitanian/Burdigalian transgressive sequence with a mixed silicoclastic-carbonate platform in a ramp-like configuration [46], and a Langhian-Tortonian sequence characterised by prograding clinoforms. During this time-interval, major paleogeographical change occurred with the initiation of the major Rhône River. The nature and age of drilled sediments could provide major insight into paleogeography, fluvial dynamics, paleobathymetries, sea level changes, sedimentary fluxes, erosion/sedimentation balance, and subsidence. The MSC event was both a time of extreme erosion and major sea-level fall, huge mass transfer and important halite deposition implying major isostatic vertical movements, recently quantified [47]. The amount of isostatic movement associated with the MSC still needs to be quantified and related to the nature of the substratum and to the rheology of the underlying material. The sampling of post- and pre-salt sedimentary layers and crustal material in the key intermediate domain

will allow to us to test competing ideas about passive margin genesis and subsidence, to validate the interpretation of crustal velocity models, and to quantify the striking correlation between surface and deep earth dynamic processes that reflects how the sedimentary record and markers may serve as a window into deep geodynamic processes.

THE GEODYNAMIC HISTORY OF THE LIGURO-PROVENÇAL BASIN

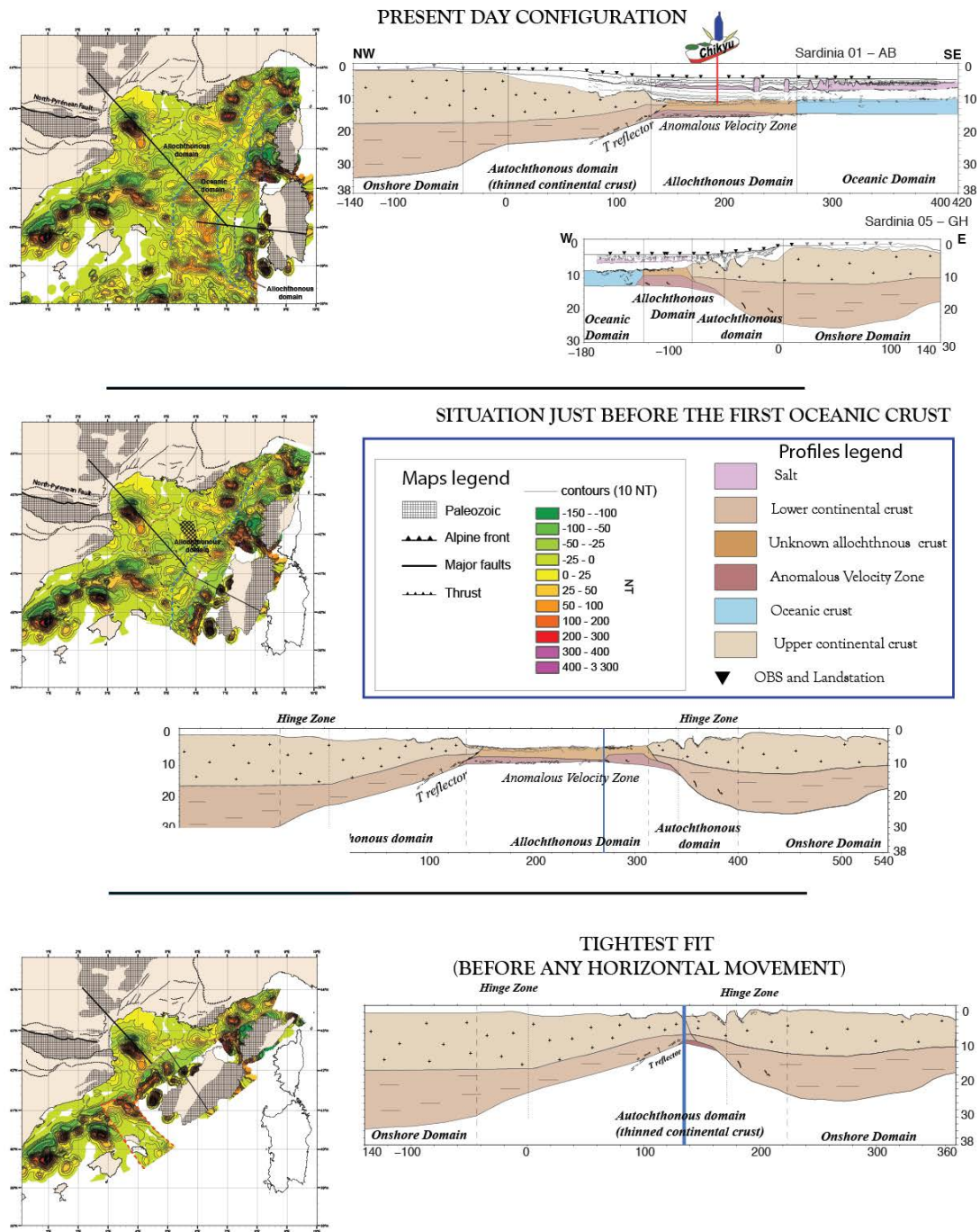


Fig 4: The geodynamical history of the Gulf of Lions-Sardinia system based on geological interpretation of wide-angle and reflexion seismic data from the Sardinia Cruise (Moulin et al., submitted; Afilhado et al., submitted) and kinematic reconstruction. The GOLD site is shown in the top profile. Modified from Aslanian et al. (submitted)

4-GOLD and its link with the Deep Biosphere & Deformation and fluid flow projects (see DREAM Umbrella)

GOLD will also contribute to addressing questions raised in “DREAM-Deep Biosphere” pre-proposal to study the microbial communities and associated environments in extremely deep marine sediments of the Mediterranean Sea. The site’s severe physico-chemical conditions make it ideally suited to address the habitability of environmental extremes, where high pressure, temperature, and salinity all may constrain the subsurface biosphere. In this regard, GOLD is a unique opportunity to investigate the interacting effects of multiple extremes within and between diverse sedimentary strata.

In GOLD, drilling/coring is planned down to at least 5,130mbsf where the temperature should reach 162°C; at the base of all sediments (6230m) it might reach 190°C [48]. Nevertheless, the presence of a thick, very heat-conductive salt layer may reduce the heat below the layer. Moreover, signs of overpressure and fluid escape that have been described in our area [49] could also result in temperatures lower than estimated. The GOLD project will allow detailed investigation of the effects of temperature and pressure on: (i) microbial diversity/activity, (ii) life’s physico-chemical limits, and (iii) the adaptation of subsurface life to environmental changes before, during, and after the Messinian salinity crisis.

At the same time, GOLD represents a very valuable counterpart to the salt-tectonics proposal focusing on the Eastern Mediterranean Basin.

Addressed questions

- *What is the nature, age, and paleobathymetry of sedimentary deposits*
- *When did the margin start to subside?*
- *What are the thermo-mechanical properties and spatio-temporal variations in crustal lithosphere structure?*
- *How did major rivers behave during the MSC? (erosion, karstification, supply, transport, landscape-relief evolution, mass transfer)*
- *What was the effect of the Messinian event on the subsidence history (water, salt, and sediment mass-transfers)? What are the consequences for thermo-mechanic models?*
- *What is the history of water exchange between the Mediterranean Sea and the North Atlantic?*

➤ Sampling strategy

Understanding connections between deep earth and surface processes

- coring of pre-Messinian units and crust material,
- wireline logging of a set of geophysical and geochemical in situ properties,
- coring of the different MSC lithological units (Pliocene, UU, LU1, LU0) and potential spot-coring in halite (MU),
- exhaustive study of core material, taking into account diagenetic history and leveraging sedimentary biostratigraphic (foraminifera, nannofossils, dinoflagellates, ostracodes, diatoms), palynological, sedimentological, and geochemical analyses (including the chemical composition of pore waters), along with physical, paleomagnetic, petrological, and stable isotope study of the crustal cores.

Deep Biosphere & Deformation and fluid flow

- spot-coring of the different lithological units (every ~100m)
- wireline logging of a set of geophysical and geochemical in situ properties
- sampling of in situ formation fluids using wireline sampling tools
- extensive microbiological, genomic, biogeochemical, geological, palaeoceanographical and geophysical analyses of the core.

This strategy will be further detailed in the DREAM-Deep Biosphere proposal.

Plate 1: Summary of addressed questions and sampling strategy of the GOLD project

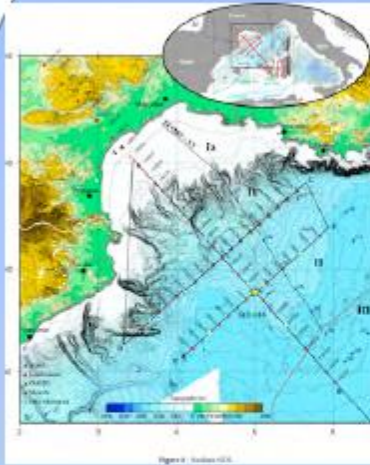
5- Proposed Site, Operational Plans, and Stages

The **GOLD site** is one of the very few deep target sites that can satisfy technological and security constraints, such as bathymetry <2500m, bottom hole maximum depth <9km, low geothermal gradient, and absence of salt diapirs. It constitutes a complete sedimentary column without faults, major erosional hiatuses, or sedimentary time gaps.

The proposed site (N41°45,92, E05°00,10) is located at the toe of the continental slope at a water depth of 2420m (where a short 3m core has recently been acquired). We aim to drill through the 6230m of sediments deposited during the last ~23Ma, down to the crust. This drilling requires the use of a drill ship equipped with a Blow Out Preventer to go through the ~600m thick Messinian halite succession. This succession has never been drilled through before, and the unexplored strata below have never been sampled. The Riser Drilling will be in two phases:

An **alternate site** has been identified in the Northern Balearic basin at a water depth of 2625m. It is more distal, 20km SW of the primary site, and thus bears less clastic input both in the overburden and in the MSC sequence. The Plio-Quaternary (P-Q) overburden is 900m thick, overlying an undeformed MSC trilogy sequence ~2km thick, of which 600m is halite (MU).

GOLD SITE - Part 1:



- 1) Drill through Quaternary without coring (800m) to install casing. Keep cuttings every 10m.
- 2) Core through Pliocene strata (800-1645m) (siltstone-claystone-fine sand).
- 3) Core through Upper Unit (1645-2215m) (evaporites-sand-silt alternations).
- 4) Core in Upper part of Mobile Unit 2215-2235m (halite) (as deep as possible). For problems with core recovery: drill without coring but with LWD. Keep cuttings every 5m. Try spot-coring when heterogeneities are identified. Analyse logging measurements to position side-wall corings for biostratigraphic, geochemistry and microbiological investigations.
- 5) Core in Basal part of Mobile Unit (2785-2815m) (halite).
- 6) Core Lower Unit 1 (2815-4365m) (Evaporites-sand-clay alternations).
- 7) Core Lower Unit 0 (4365-5130m) (Sandstone-siltstone-claystone).

- Part 2:

- 8) Core Pre-Messinian (5130-6230m) (Sand-silt-calystone and possible carbonates).
- 9) Core Crust (6230-6500m) (unknown nature, serpentine or gabbro).

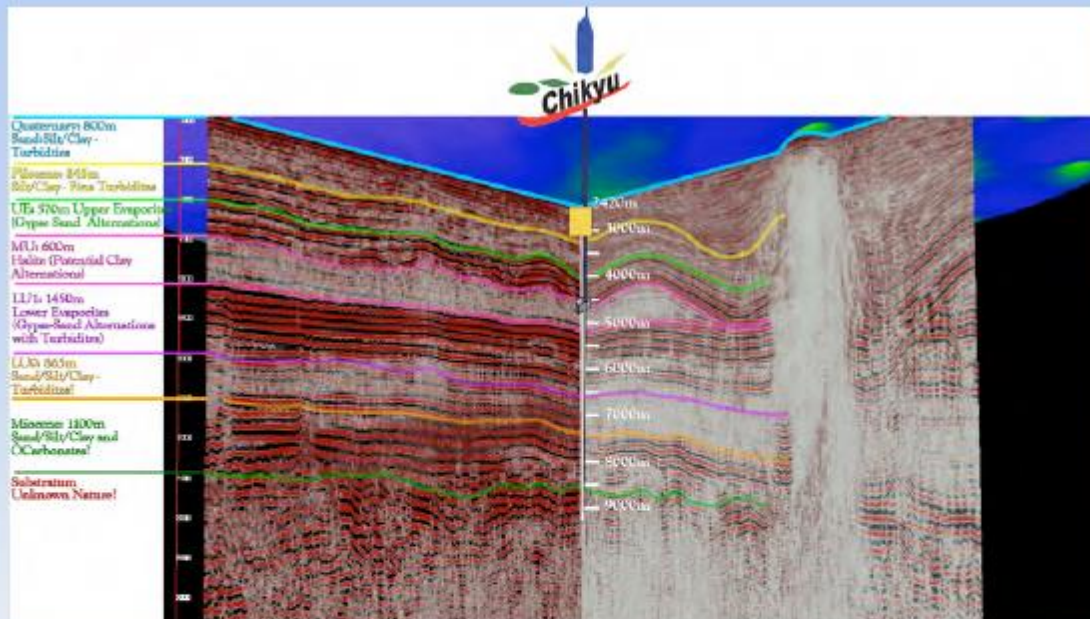


Plate 2: Top: Location of the Sardinia profiles (red lines in the top figure) and the GOLD project in the Gulf of Lion. The NW-SE profile was extended onland (red and yellow circles). The grey lines represent the limits of the different crustal domains (see the text for more details). After Moulin *et al.*, submitted. Bottom: GOLD drilling position on the two Sardinia seismic profiles. The multi-channel seismic reflection data was acquired using a 4.5 km long, 360 trace digital streamer and a tuned airgun array of 8260 in³.

6- Companion projects

As was done for drilling during the AMED High resolution Seismic cruise (Sept. 2013), the GOLD project will benefit from complementary companion projects through a series of multidisciplinary programs conducted by our international group:

Crustal and lithospheric imaging: Mermaid deployment (G. Nolet)

In order to obtain high resolution tomographic imaging of the Upper mantle and the lithosphere underlying the Liguro Provençal area, a set of Mermaid tools of floating seismometers [10] will be deployed in a preparatory phase of GOLD drilling.

ICDP companion Project

We are already in contact a number of international participants and also with the BRGM and French energy and water companies active in this area in order to raise funding for an ICDP project (Jan. 2015) entitled “Coring the Rhône Valley: A case-study of an outstanding erosion – sedimentation cycle”. We are currently preparing an international campaign for the acquisition of on-land high-resolution seismic profiles.

Numerical & Analogue Modeling

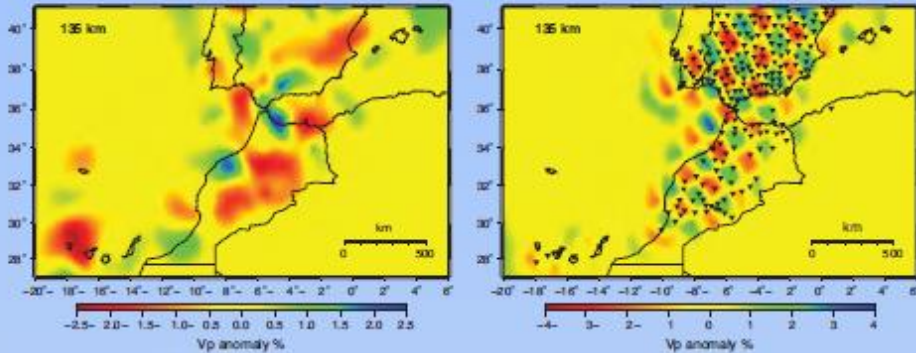
Sedimentary sequences have been successfully reproduced in 2D-profile [50]. We are currently performing a 3D-stratigraphic simulation to account for 3D-geometry of the basin.

The next step will include both conjugate sides of the GOLSMS system and the allochthonous domains (intermediate and oceanic crusts) to take into account the entire 4D-evolution of the system.

In parallel, we will implement an analogue modeling effort using research facilities in experimental modelling of tectonic and sedimentary processes developed at Utrecht University. In this context we will also develop coupled numerical-analogue models for the rotation of the Corsica-sardinia plates and the genesis of the allochthonous domains.

GOLD COMPANION PROJECTS

Crustal and lithospheric imaging: Mermaid deployment



ICDP companion Project

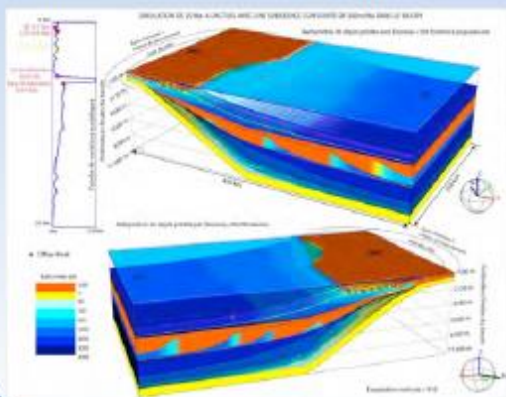


Plate 3: GOLD companion projects

Top - Example of tomographic imaging in the Gibraltar area that illustrates the capability of the Mermaid deployment for higher resolution mapping of deep earth structure. (pers comm. Nolet & Bronner)

Middle - Left - Reconstructed Messinian Erosional Surface in the southern Rhône Valley (Roure, unpublished). Right - Post-MSC refill of the Rhône valley (modified from: Clauzon, 1982) Both the northernmost extension of the Rhône and in its southernmost deepest part near the present-day shoreline will be cored.

Numerical & Analogic Modeling



Bottom - 3D simulation of post-rift filling of the Provençal basin (Leroux et al., submitted). The simulation was run over the last 20 Ma with a 0.1 Ma time-step. Deposits, paleobathymetries, and resultant geometries were predicted using Dionisos in our 3D stratigraphic modelling of the Gulf of Lion and Provençal basin.

References

1. Cloetingh, S., Ziegler et al., **2007**. TOPO-EUROPE: The geoscience of coupled deep Earth-surface processes, *Global and Planetary Change*, Volume: 58, Issue: 1-4, Pages: 1-118, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.02.008
2. Hsü, K. J., W. B. F. Ryan, And M. B. Cita, **1973**. Late Miocene Desiccation Of The Mediterranean: *Nature* (London), V. 242, P. 240-244.
3. Clauzon, G., **1973**. The Eustatic Hypothesis And The Pre-Pliocene Cutting Of The Rhône Valley, In W. B. F. Ryan, K. J. Hsü, And Al., Eds., *Initial Reports Of Deep Sea Drilling Project*, Volume 13: Washington, (U.S. Government Printing Office), P. 1251-1256
4. Garcia-Castellanos, D., Villaseñor, **2011**, Messinian salinity crisis regulated by competing tectonics and erosion at the Gibraltar arc, *Nature*, Volume: 480, Issue: 7377, Pages: 359-U108, DOI: 10.1038/nature10651
5. Lofi, J., Sage, F., Déverchère, J., Loncke, L., Maillard, A., Gaullier, V., Thinon, I., Gillet, H., Guennoc, P., Gorini, C., **2011**. Refining our knowledge of the Messinian salinity crisis records in the offshore domain through multi-site seismic analysis. *Bulletin Société Géologique de France*, 182, 163-180.
6. Bache, F., Olivet, J.-L., Gorini, F., Rabineau, M., Baztan, J., Aslanian, D. & Suc, J.-P., **2009**. Messinian Erosional And Salinity Crises: View From The Provence Basin (Gulf Of Lions, Western Mediterranean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 286, 139–157.
7. Loget, N., Van Den Driessche, J., Davy, P., **2005**. How did the Messinian Salinity Crisis end? *Terra Nova*, 17, 414-419.
8. Blanc, P.-L., **2002**. The opening of the Plio-Quaternary Gibraltar Strait: assessing the size of a cataclysm. *Geodinamica Acta*, 15, 303-317.
9. Garcia-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernandez, M., Vergés, J., De Vicente, R., **2009**. Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature*, 462, 778-781.
10. Jones, N., **2014**, Global seismic network takes to the seas: Two systems could plug the ocean-sized gap in earthquake detection, *Nature*, 507, 151, doi:10.1038/507151a
11. Flecker, R., de Villiers, S, Ellam, RM, **2002**, Modelling the effect of evaporation on the salinity-Sr-87/Sr-86 relationship in modern and ancient marginal-marine systems: the Mediterranean Messinian Salinity Crisis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Volume: 203, Issue: 1, Pages: 221-23, DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00848-8
12. Flecker, R., Ellam, **2006**, Identifying Late Miocene episodes of connection and isolation in the Mediterranean-Paratethyan realm using Sr isotopes, *Sedimentary Geology*, Volume: 188, Pages: 189-203, Special Issue: SI, DOI: 10.1016/j.sedgeo.2006.03.005
13. Eggenkamp, H.G.M., Kreulen, R. and Koster Van Groos, A.F., **1995**. Chlorine stable isotope fractionation in evaporite. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 59, 5169-5175.

14. Vengosh, A., Starinsky, A., Kolodny, Y., Chivas, A.R., M. Raab, M., **1992**. Boron isotope variations during fractional evaporation of sea water: New constraints on the marine vs. nonmarine debate. *Geology*, 20, 799-802.
15. Van Driessche, A.E.S., García-Ruiz, J.M., Tsukamoto, K., Patiño-Lopez, L.D. and Satoh, H., **2011**. Ultraslow bgrowth rates of giant gypsum crystals. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, doi:10.1073/pnas.1105233108.
16. Lugli, S., Manzi, V., Roveri, M., **2010**. The primary Gypsum in the Mediterranean: A new fades interpretation for the first stage of the Messinian salinity crisis. *Palaeogeography, paleoclimatology paleoecology*, Volume: 297 Issue: 1 Pages: 83-99
17. Cloetingh, S., Willett,S., **2013**, TOPO-EUROPE: Understanding of the coupling between the deep Earth and continental topography, *Tectonophysics*, Volume: 602, Pages: 1-14, Special Issue: SI, DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.023
18. McKenzie. D., **1978**. “Some remarks on the development of sedimentary basins”, *Earth and Planetary Science Letters*. 40, 1: 25-32
19. Wernicke, B., **1985**. Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere. *Can. Journal of Earth Sci.* 22, 22.108-22.125.
20. Huisman, R.S., Beaumont, C., **2011**. Depth-dependent extension, two-stage breakup and cratonic underplating at rifted margins, *Nature*, 473, 74-78, doi:10.1038/nature09988.
21. Aslanian, D., Moulin, M., Olivet, J-L., Unternehr, P., Bache, F., Rabineau, M., Matias, L., Nouzé, H., Klingelhoefer, F., Contrucci, I. and Labails, C., **2009**. Brazilian and African passive margins of the Central Segment of the South Atlantic Ocean: kinematic constraints, *Tectonophysics*, 468, 98-112.
22. Péron-Pindivic, G. & Manatschal, G., **2009**. The final riftng evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfounland: a new point of view. *Int. J. Earth Sci.*, doi:10.1007/s00531-008-0337-9.
23. Bache F., Olivet, J.-L., Gorini, C., Aslanian, D., Labails, C. & Rabineau, M., **2010**. Evolution of rifted continental margins: The case of the Gulf of Lions (Western Mediterranean Basin), *Earth and Planetary Research Letters*, 292, 3-4, 345-356.
24. Moulin, M., Aslanian, D., Olivet, J-L., Contrucci, I., Matias, L., Géli, L., Klingelhoefer, F., Nouzé, H., Réhault, J.-P., Unternehr, P., **2005**. Geological constraints on the evolution of the Angolan margin based on reflection and refraction seismic data (ZaïAngo project), *Geophysical Journal International*, 162, 793-810.
25. Unternehr, P., Péron-Pindivic, G., Manatschal, G., Sutra, E., **2010**. Hyper-extended crust in the South Atlantic: in search of a model. *Petroleum Geosciences*, 16, 207-215, doi:10.1144/1354-079309-904.
26. Lucazeau, F., Leroy. S., Rolandone, F., D’Acremont, E., Watremer, L., Bonneville, A., Goutorbe, B., Düsünur, D., **2010**. Heat-flow and hydrothermal circulation at the ocean–continent transition of the eastern Gulf of Aden. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 554–570.

27. Pascal, G.P., Mauffret, A., Patriat, P., **1993**. The ocean–continent boundary in the Gulf of Lion from analysis of expanding spread profiles and gravity modeling, *Geophysical Journal International*, 113, 701–726.
28. Boillot, G., Féraud, G., Recq, M., Girardeau, J., **1989**. “Undercrusting” by serpentinite beneath rifted margins: the examples of the west Galicia margin (Spain). *Nature*, 341, 523–525.
29. Lavier, L., Manatschal, G., **2006**. A mechanism to thin the continental lithosphere at magma-poor margins, *Nature*, 440, 324-328, doi:10.1038/nature04608.
30. Kuznir, N.J., Karner, G. D., **2007**. Continental lithospheric thinning and breakup in response to upwelling divergent mantle flow: application to the Woodlark, Newfoundland and Iberia margins, In: Karner, G. D., Manatschal, G., Pinherio, L. M. (eds), *Imaging, Mapping and Modelling Continental Lithosphere Extension and Breakup*, *Geological Society, London*, Special Publications, 282, 389-419.
31. Reston, T.J., **2010**. The opening of the central segment of the South Atlantic: symmetry and the extension discrepancy. *Petroleum Geosciences*, 16, 199-206, doi:10.1144/1354-079309-907.
32. Burov, E., and A. Poliakov, **2001**. Erosion and rheology controls on syn- and post-rift evolution: verifying old and new ideas using a fully coupled numerical model, *J. Geophys. Res.*, 106, 16461-16481.
33. Aslanian, D., Moulin, M., **2012**. Paleogeographic consequences of conservative models in the South Atlantic Ocean, *Geological Society, London*, Special Publications, V. 369, Feb 29, 2012, doi 10.1144/SP369.5
34. Labails, C., Olivet, J.-L., and the “Dakhla Group”, **2009**. Crustal Structure of the SW-Moroccan margin (Dakhla experiment). Part B - the tectonic heritage, *Tectonophysics*, 468, 83-97, doi:10.1016/j.tecto.2008.08.028.
35. Moulin M.,), F. Klingelhoefer, A. Afilhado, D. Aslanian, P. Schnurle, H. Nouzé, M. Rabineau, M.O. Beslier, A. Feld., **Submitted**, Deep crustal structure across an young passive margin from wide-angle and reflection seismic data (The SARDINIA Experiment) - I. Gulf of Lion’s margin, Submitted *BSGF, ILP Special volume*
36. Thybo, H. and Nielsen, C. A., **2009**. Magma-compensated crustal thinning in continental rift zones. *Nature*, 457, 873- 876, doi:10.1038/nature07688.
37. Marillier, F., Tomassino, A., Patriat, P., Pinet, B., **1988**. Deep structure of the Aquitaine Shelf; constraints from expanding spread profiles on the ECORS Bay of Biscay transect. *Marine and Petroleum Geology*, 5(1), 65-74.
38. Torné, M., Pascal, G., Buhl, P., Watts, A.B., Mauffret, A., **1992**. Crustal and velocity structure of the Valencia trough (western Mediterranean), Part I. A combined refraction/ wide-angle reflection and near-vertical reflection study, *Tectonophysics*, 203, 203,1-20
39. Réhault, J.-P., Boillot, G., Mauffret, A., **1984**. The western Mediterranean Basin geological evolution. *Marine Geology*, 55, 447-477.

40. Olivet, J.L., **1996**. La Cinématique de la plaque Ibérique, Bulletin des Centres de Recherches *Exploration–Production Elf Aquitaine*, Pau, France, 20, 131–195.
41. Burrus, J., **1984**. Contribution to a geodynamic synthesis of the Provençal Basin (North-Western Mediterranean). *Marine Geology*, 55, 247-269.
42. Gailler, A., Klingelhoefer, F., Olivet, J.-L., Aslanian, D., Afilhado, A., Bache, F., Beslier, M.-O., Cosquer, E., Deschamp, A., Droz, L., Gorini, C., Moulin, M., Nouzé, H., Oudet, J., Pascucci, V., Perrot, J., Rabineau, M., Réhault, J.-P., Allano, L., Bégot, J., Crozon, J., Fernagu, P., Labahn, E., Pelleau, P., Théreau, E., **2009**. Crustal structure of a young margin pair: New results across the Liguro–Provençal Basin from wide-angle seismic tomography, *Earth and Planetary Science Letters*, 286, 333-345.
43. D., Aslanian, M., Moulin, M., Rabineau, A., Afilhado, F. Bache, , E., Leroux, F., Klingelhoefer, P., Schnurle, L., Matias, C. Gorini, **Submitted**, Passive Margin genesis: Towards a general model? The insight of the Gulf of Lion-Sardinia System, submitted to *Science*.
44. Bott, M.H.P., **1971**, “Evolution of young continental margins and formation of shelf basin”, *Tectonophysics*, v. 11, p 319-37.
45. Sibuet, J.-C., Tucholke, B., **2012**. The Geodynamic Province of Transitional Lithosphere Adjacent to Magma-Poor Continental Margins. In: Mohriak, W.U., Danforth, A., Post, P.J., Brown, D.E., Tari, G.C., Nemcok, M. & Sinha, S.T. (eds). Conjugate Divergent Margins. *Geological Society London*, Special Publications, 369, <http://dx.doi.org/10.114/SP369.21>.
46. Gorini, C., **1993**. Géodynamique D'une Marge Passive: Le Golfe Du Lion (Méditerranée Occidentale): *Doctorat Thesis*, Université Paul Sabatier, Toulouse, 256 P.
47. Rabineau, M., Leroux, E., Aslanian, D., Bache, F., Gorini, C., Moulin, M., Molliex, S., Droz, L., Dos Reis, T., Rubino, J.-L., Olivet, J.-L., Guillocheau F., **2014**, Quantification of Pliocene-Quaternary Subsidence and isostatic readjustment related to the Messinian Erosional and Salinity Crisis, *Earth and Planetary Science Letters*, 388, 353-366
48. Lucazeau, F., Le Douaran, S., **1985**. The blanketing effect of sediments in basins formed by extension : a numerical model. application to the gulf of lion and the viking graben. *Earth and Planetary Science Letters* 74 (1), 92–102.
49. Carmenlenghi, A., Geletti, R., Chisari, D., Del Ben, A., Forlin, E., Mocnik, A., Romeo, R., Sauli, C., Wardell, N. and Zgur F., **2012**. Pre-salt fluids in the Mediterranean Basin., *2012 DS3F conference*, Sitges.
50. E. Leroux, M. Rabineau, D. Aslanian, D. Granjeon, C. Gorini et L. Droz, **2014**, Stratigraphic simulations on the shelf of the Gulf of Lion : testing subsidence rates and sea-level curves during Pliocene and Quaternary, *Terra Nova*

CHAPITRE VII



VERS UNE « ACTION-MARGE » AU BRÉSIL, COLLABORATION FRANCO- BRÉSILIENNE A LONG TERME, LA SUITE DU COLLOQUE DE BUZIOS

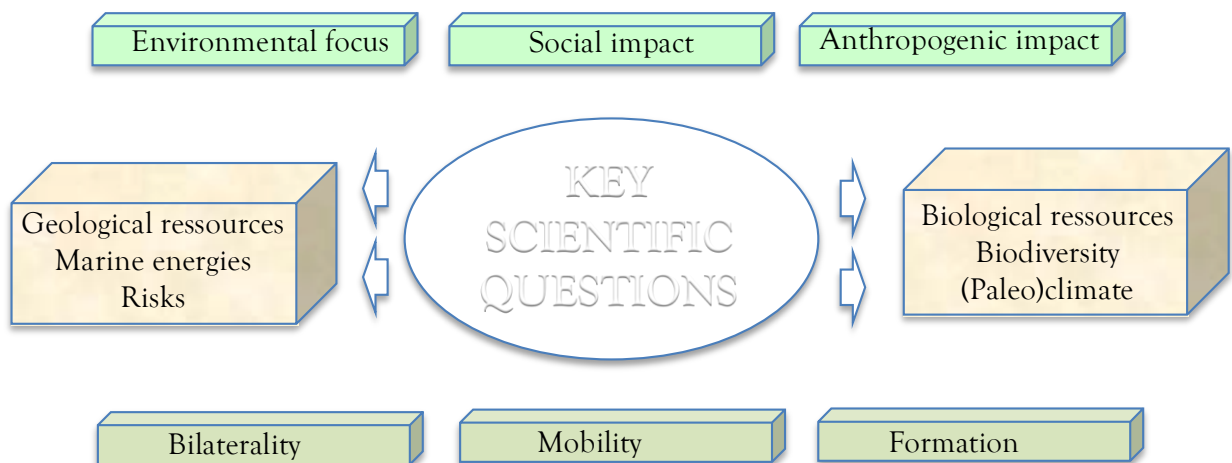
Le domaine des sciences de la mer est un grand enjeu pour la France et le Brésil et pour leur collaboration scientifique et technique. Le domaine est également devenu un sujet très porteur au Brésil. En quelque sorte, après s'être concentré sur l'« Amazone vert », le Brésil a récemment redécouvert l'importance de l'« Amazone bleu » et de son littoral tout entier, du fait de ses 7.500 kms de côte et des enjeux liés à l'exploitation des ressources naturelles (biodiversité, pêche...) et minérales (pétrole, gaz, nodules polymétalliques...). La création toute récente d'un Institut océanographique fédéral (l'INPOH) ainsi que de 4 INCTs (instituts/réseaux d'équipes) dédiés aux sciences de la mer témoigne de cette volonté politique.

Depuis 2008, nous avons développé un certain nombre d'actions bilatérales franco-brésilienne sur les marges continentales, en particulier dans le bassin de Santos (campagne Sanba avec Ifremer et Petrobras, travaux sur la plateforme avec l'UERJ, ...), sur les marges équatoriales (Campagne MAGIC) et sur les marges du Nord-Est (Campagne SALSA). La mise en place de ces collaborations nous a conduit à participer activement à la préparation et à la réalisation de la première rencontre Franco-brésilienne sur les sciences de la Mer. Ce colloque nommé « Building the Marine Sciences– French Brazilian Meeting » s'est tenu à Buzios les 3-8 Novembre 2013. Il était co-organisé par Daniel Aslanian de l'Ifremer et Sidney Mello de l'UFF, avec une participation active d'Abdel Siffedine de l'IRD et de Florence Puech, AST au Consulat Général de Rio de Janeiro. Il s'agissait de réunir, dans un esprit de pluridisciplinarité affirmé comme règle, les différentes disciplines concernées, telles que : la biologie marine, la biodiversité marine, l'écologie marine, l'océanographie, les géosciences marines, les relations océan-climat, les énergies marines, la gestion des ressources marines et leur impact sur l'environnement, en considérant également les sciences humaines, les questions importantes relatives au droit de la mer, sans oublier les aspects enseignement et formation. L'objectif était de bien identifier l'existant, les équipes de recherche et les institutions concernées et le potentiel de collaboration tant en recherche qu'en formation entre nos deux pays.

Cette rencontre préparée et organisée en bonne partie par les chercheurs brestois (co-animateurs de nombreuses sessions) a rassemblé plus de 200 chercheurs français et brésiliens animés par l'envie d'établir une collaboration bilatérale durable dans une

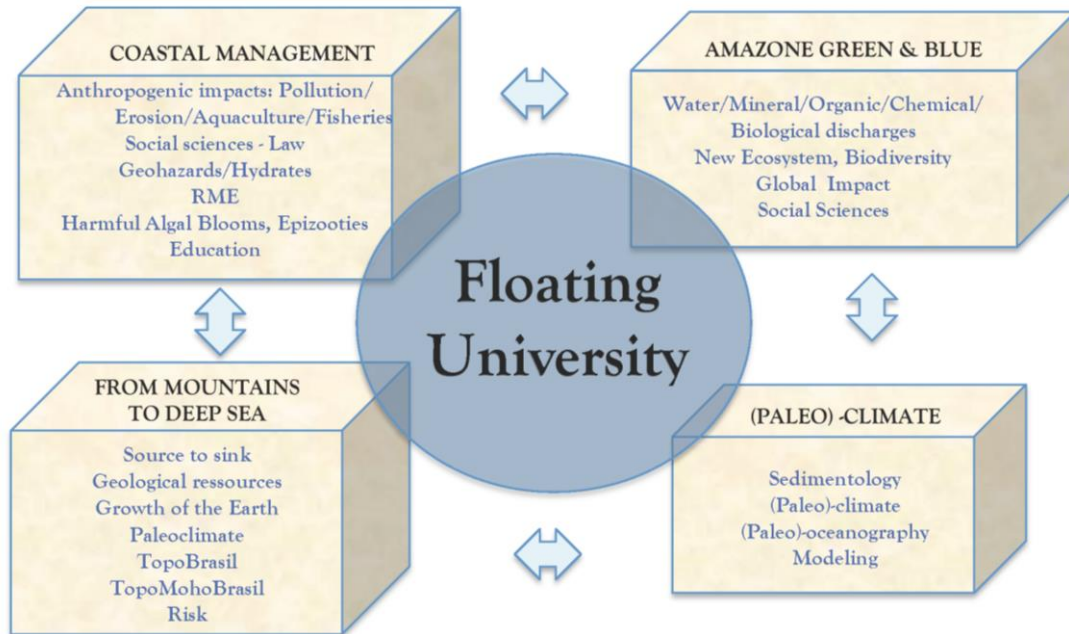
approche **holistique** des marges brésiliennes au travers d'un réseau de chercheurs ouvert incluant les aspects scientifiques, technologiques et de formation, et impliquant les industriels de deux pays. Cette approche long-terme doit promouvoir la future génération de chercheurs qui vont construire les collaborations franco-brésiliennes et le futur des Sciences Marines.

Les discussions riches et enthousiastes durant ces cinq jours de rencontre nous ont conduit à bâtir l'organisation des collaborations futures à partir de concepts directeurs illustrés dans le schéma suivant :



La rencontre de Buzios a identifié l'Atlantique Sud comme une zone d'intérêt scientifique idéale pour la mise en œuvre des collaborations et des efforts communs franco-brésiliens. Premièrement, parce que cette zone est encore largement inconnue dans l'ensemble des océans mondiaux, ensuite parce qu'elle représente une zone clef pour comprendre l'ensemble des processus globaux comme les changements climatiques, la rupture des marges et la formation de la croûte océanique, la sédimentation et les transferts Terre-Mer, la biodiversité et les écosystèmes marins.

Quatre thèmes/programmes scientifiques transdisciplinaires abordés de manière concomitantes par plusieurs disciplines ont donc émergés au cours de la rencontre pour l'étude du passé et du futur des océans (voir schéma ci-dessous) : (1) Le système de l'Amazonie : de la Forêt jusqu'à la Mer (2) l'étude du Climat/Paléoclimat et de la Circulation/Paléocéanographie de l'Atlantique Sud (3) le transfert liquides et solides de la Terre à la Mer (4) le management des côtes et du littoral. Chacune de ces cibles doit être vue comme un Observatoire pour le futur avec des connexions fortes entre la Science, la Technologie et les Sciences Humaines



Dans ce schéma l'Université flottante apparaît comme un laboratoire de formation commun idéal pour les étudiants des deux pays et pour l'ensemble des disciplines marines grâce à la participation active aux campagnes océanographiques qui constituent le meilleur moyen d'acquérir une expérience pratique en mer. Je souhaite ainsi m'investir dans les prochaines années dans la mise en place de cette Université Flottante franco-brésilienne telle que je l'ai proposée lors de ces rencontres avec une approche pluridisciplinaire, sédimentologique, biologique et paléoclimatique, à bord des Navires Océanographiques « Le Marion-Dufresne » et le « Pourquoi Pas ? » qui ont la capacité d'accueil d'une vingtaine d'étudiants.

A moyen et long terme, je souhaite m'impliquer dans plusieurs des cibles identifiées lors du colloque en particulier dans **le système Amazone, l'étude des paléoclimats et les transferts des Montagnes aux Océans** sur les marges brésiliennes et comparer in fine les résultats à ceux déjà acquis sur les marges de Méditerranée ; de même que dans l'organisation de **l'Université flottante**.

1 Le système de l'Amazone : des Forêts jusqu'à la Mer (Amazone Verte et Bleue)

La rivière Amazone représente la deuxième source mondiale d'eau et de sédiments au monde et la toute première pour l'ensemble de l'océan Atlantique. Les dépôts marins de l'Amazone (son delta et son éventail profond en particulier) recèlent l'histoire des flux de matières transférés par la rivière et accumulés en milieu marin au cours des temps géologiques. Toute étude quantitative sur les flux d'eau, les flux de sédiment ou de

nutriments améliorera donc significativement notre connaissance et nos moyens de modélisation des processus et des bilans globaux.

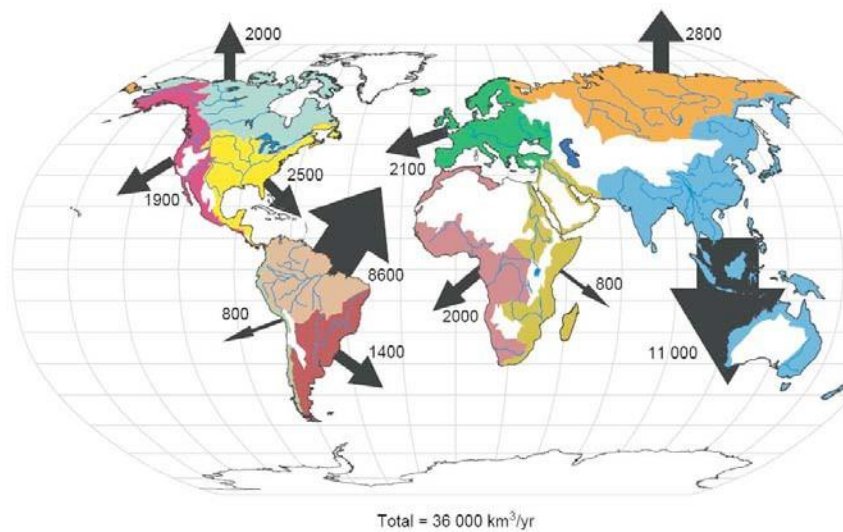


Figure VII-1 Flux d'eau vers les océans côtiers (Milliman & Farnsworth, 2011)

Lors de la rencontre de Buzios, une approche intégrée depuis l'embouchure de l'Amazone jusqu'en domaine abyssal a été proposée avec combinaison et connections des approches Géophysique- Sédimentologique ; Biologique-Biogéochimique ; environnementale et de Sciences Humaines. Plusieurs actions clefs ont été discutées tels que la découverte d'un nouveau biome, la cartographie de l'estuaire, la décharge du plume de l'Amazone, les problèmes d'acidification,...

A plus court terme, le lancement d'une étude sur la caractérisation d'un nouveau type de système récifal a été proposé sur la plate-forme de Guyane et de l'Amazone (un projet a d'ailleurs d'ores et déjà été soumis à l'appel d'offre « Guyane » du CNRS, projet dans lequel je suis associée).

2 Paleoclimat : variabilité Climatique and Paleoceanographie

Le transport de chaleur entre l'hémisphère Sud et l'hémisphère Nord est très influencé par les courants de l'Atlantique Sud et le courant Nord Brésil (NBC) en particulier. Les observations et modélisations climatiques actuelles montrent clairement que les changements de température de Surface des Océans (SST) dans les zones de l'océan Equatorial et de l'Atlantique Sud modulent la position et l'intensité du Système de Mousson Sud-Atlantique (SAMS) qui, à leur tour, contrôlent les précipitations au Nord-Est et au Sud-Est du Brésil.

Les marges équatoriales et de l'Atlantique Sud du Brésil sont donc des zones uniques pour étudier l'enregistrement paléocéanographique et paléoclimatique de cette région du globe encore très mal documentée. Ces variations climatiques fréquemment associés à des modifications d'écosystèmes et des altérations biotiques pourront être étudiées grâce aux archives sédimentaires échantillonnées par les carottes marines ou des forages scientifiques (type ICDP ou IODP).

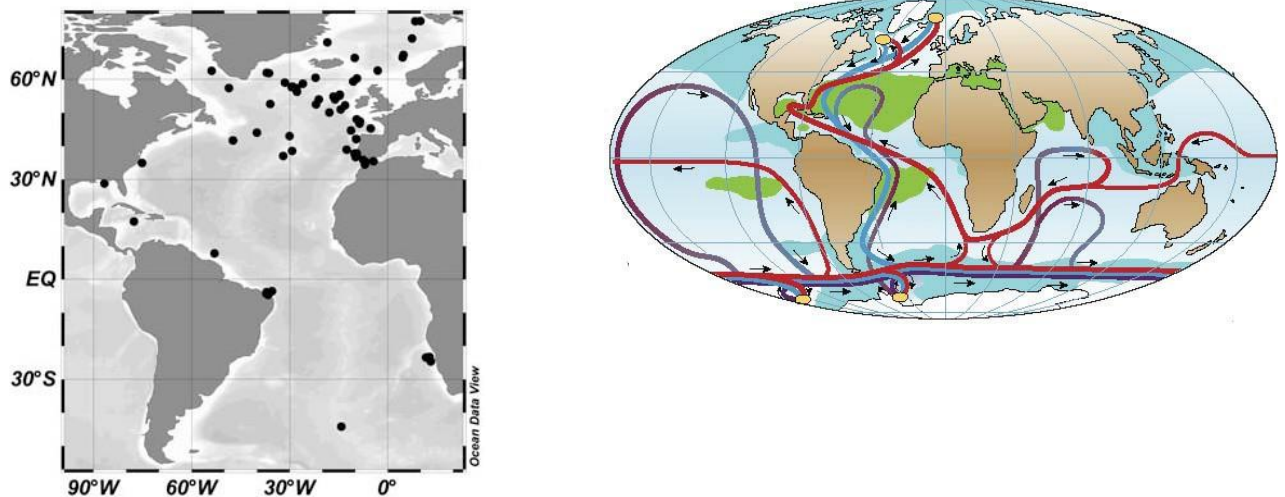


Figure VII-2 Schéma de la circulation thermohaline globale actuelle (Rahmstorf, 2002) et carottes longues Marion-Dufresne existantes en France (points noirs)

3 Des montagnes aux Abysses

L'approche est ici identique à celle développée dans le cadre de l'Action Marge et du Labex Mer avec une étude intégrée de la structure profonde, des mouvements tectoniques du transport et de l'enregistrement sédimentaire dans les bassins profonds à différentes échelle de temps en utilisant des méthodes directes (terrain) et indirectes (géophysique, géochimie, ...) et en combinant plusieurs disciplines (Océanographie, Biologie, Géologie) afin de reconstituer l'histoire de l'Océan Atlantique depuis sa naissance jusqu'à l'actuel.

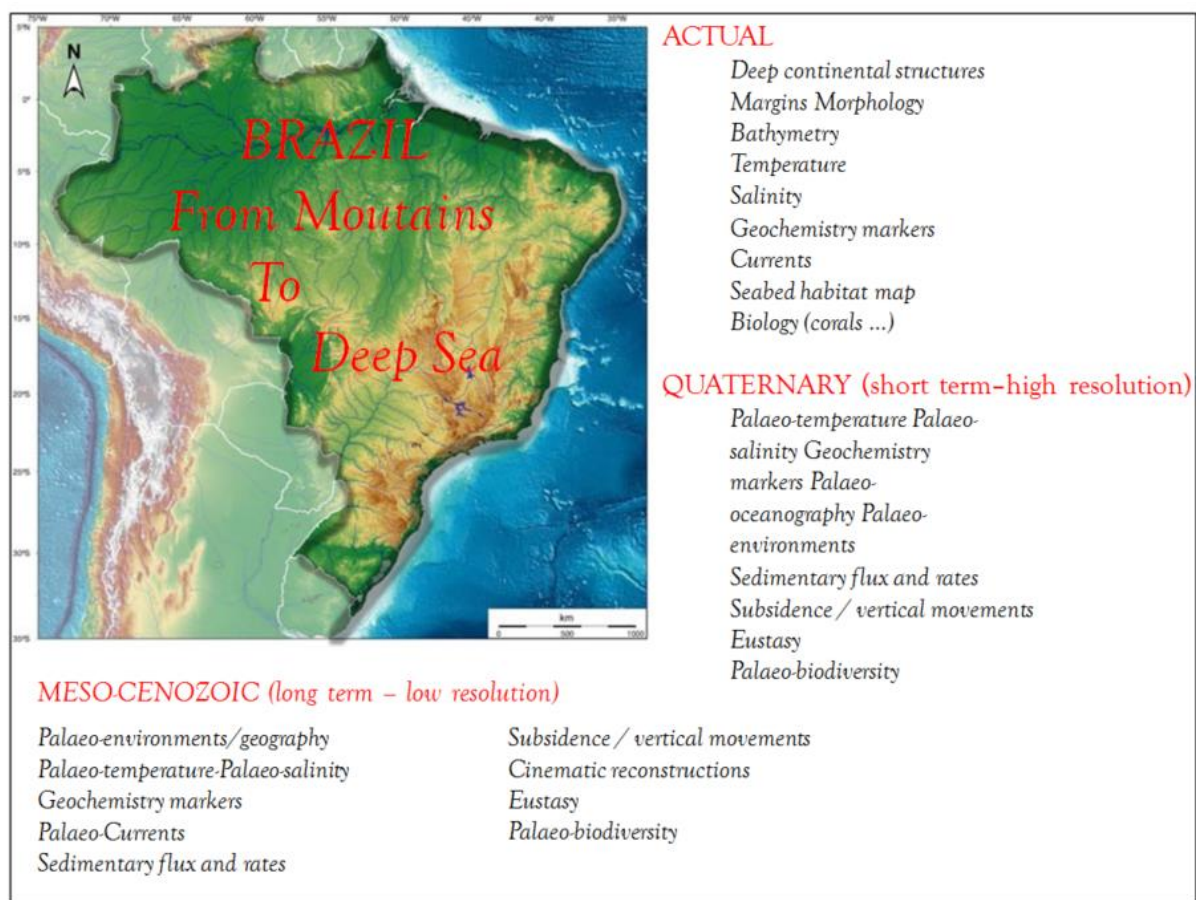


Figure VII-3 Etude intégrée des montagnes aux abysses à différentes échelles de temps.

Là aussi, l'acquisition de données nouvelles en utilisant les données géophysiques haute résolution, à terre comme en mer, sera d'une importance capitale car il y a un manque crucial d'information en profondeur sur les zones terrestres, marines côtières et abyssales. La création d'une Université Flottante (idéalement annuelle) sera là aussi une opportunité unique d'acquérir des données de bonne qualité tout en formant les étudiants des deux pays. Un projet de couverture de stations sismiques terrestres sera proposé, tout comme un déploiement de mermaids tout au long de la marge brésilienne. Une étude de topographie dynamique à partir de la géomorphologie (de type TopoAfrica) sera également discuté, dans ce contexte mais aussi dans le cadre du programme Gondwana.

Ainsi, pour résumer, le programme « Marine Sciences » développé à Buzios offre des perspectives riches et diversifiées pour le développement de travaux futurs sur la thématique des marges continentales. Je souhaite donc dans les années à venir développer mes collaborations avec le Brésil dans un cadre multidisciplinaire intégrant la formation des étudiants (création d'un module d'enseignement à l'Univ. de l'Etat de Rio de Janeiro (UERJ) ; échanges dans le cadre de campagne de chercheurs invités (en France et à Rio et Brasilia – Prof Soares) ; création d'une université flottante, avec l'UERJ et l'Univ. Fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ) et de Sao Paulo ; co-encadrement d'étudiants et post-doctorants brésiliens et français en partenariat avec Ifremer, l'UERJ, l'UFRJ et Petrobras dans le cadre des projets SANBA, MAGIC et SALSA, le groupe Geomargem et le tout nouveau réseau « Marine Sciences » soutenu entre autres par le GIS Europe Mer.

Notons enfin, l'organisation d'un nouveau colloque cette fois en France, à Brest, en octobre 2014, lors de la Sea Tech Week (Semaine Internationale des Sciences et Technologies de la Mer), du 13 au 17 octobre 2014, à l'invitation de M. F. Cuillandre, Président de Brest Metropole Océane.

Références bibliographiques de ce chapitre :

- Milliman, J.D., V. Farnsworth, 2011. River Discharge to the Coastal Ocean: A global synthesis. Cambridge: Cambridge University Press., 2011
- Rahmstorf, S., 2002. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. Nature 419, 207-214.

CHAPITRE VIII

AUTRES PISTES DE RECHERCHE

Plus récemment, je me suis impliquée dans un projet interdisciplinaire de l'INEE porté par mes collègues biologistes du LEMAR (V. Pichereau et C. Paillard) (projet APEGE, Paléocoq) dont le but était d'étudier les coquilles de mollusques marins comme nouvelles archives paleogénétiques retraçant l'histoire évolutive des interactions biotiques et des processus adaptatifs en milieu marin. Mon rôle dans ce projet est d'avoir proposé d'élargir les études sur des coquilles fossiles (du dernier cycle Glaciaire/interglaciaire, pour commencer), issues d'environnements sédimentaires déjà bien identifiées et datés dans nos carottes et très différents des conditions actuelles. Si le projet aboutit nous pourrions ainsi avoir accès au paléogénome de la coquille et des bactéries/virus l'environnant, de quoi suivre potentiellement les adaptations hôtes-pathogènes en fonction des variations climatiques !

Un projet inter-axes a aussi été proposé au Labex : Paléo-MICRO : Caractérisation de la paléo-microbiodiversité sédimentaire par l'analyse métagénomique des restes carbonatés d'organismes marins.

Porteurs : Vianney Pichereau / Marina Rabineau

Participants :

- Axe 6 : Vianney Pichereau (UMR 6539), Christine Paillard (UMR 6539)
- Axe 4 : Marina Rabineau (UMR 6538), Pierre Sans-Jofre (UMR 6538), Gwénaél Jouet (LES, Ifremer), Stephan Jorry (LES, Ifremer)
- Axe 3 : Karine Alain (UMR 6197), Stefan Lalonde (UMR 6538)

Collaborations : Ludovic Orlando (CEGG, DK), Clio Der Sarkissian (CEGG, DK), Christophe Fontanier (BIAF, Angers)

Description du projet:

Les écosystèmes marins côtiers sont caractérisés par des fluctuations importantes des paramètres physico-chimiques, à la fois à court terme (marées, saisons...), et plus long terme (cycles climatiques, pollutions...). Les changements globaux actuels ont pour effet d'amplifier ces fluctuations, impactant fortement la structure et le fonctionnement des populations d'organismes marins. Les principales variations climatiques passées, par exemple le dernier maximum glaciaire (approx. 30 000 - 19 000 ans BP) et la déglaciation qui a suivi, ou, plus récemment le petit âge glaciaire (du 13^{ème} au 19^{ème} siècle) ont ainsi conduit à une forte restructuration des communautés côtières, impliquant notamment des déplacements de population (Harley, 2006). En outre, les capacités d'adaptation des organismes constituent l'un des points clefs ayant conditionné la survie des espèces marines (Pörtner, 2010, Evans, Hofmann, 2012).

Les sédiments, par leur stratification, enregistrent et figent des traces de la mémoire des événements ayant perturbé les écosystèmes côtiers. Ainsi, diverses informations basées sur l'analyse des compositions isotopiques du carbone et de l'oxygène permettent de recueillir des informations sur l'âge des couches sédimentaires (par les datations radiocarbone ^{14}C), l'origine de la matière organique présente ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$), ou encore sur les paramètres physico-chimiques de l'environnement au moment de la formation de la strate, comme par exemple la température de l'eau de mer ($\delta^{18}\text{O}$). De plus, l'analyse de ces couches sédimentaires donne des informations de tout premier plan sur la biodiversité ancienne. On y trouve également des restes carbonatés d'organismes marins, notamment des coquilles de mollusques ou de foraminifères, dont les analyses sclérochronologiques et sclérochimiques peuvent en outre informer sur certains paramètres écophysologiques des animaux anciens (Chauvaud *et al.*, 2005 ; Gröcke D.R., Gillikin D.P. 2008).

L'environnement anaérobie des sédiments marins est particulièrement propice à la conservation de l'ADN, permettant de recueillir des traces de la biodiversité présente au moment de la formation de la strate. Ainsi, des approches de type meta-barcoding ont déjà été réalisées sur ce type d'échantillons. Notamment, dans le contexte d'une collaboration entre les laboratoires UMR6197 et UMR6538 de l'IUEM initiée en 2008 et ayant bénéficié du soutien de l'INSU (AO INTERRVIE, projets Sedamic1 et 2), une comparaison d'échantillons sédimentaires prélevés au niveau de 2 environnements contrastés, la ride du Var et le Golfe du Lion, a été réalisée (thèse de M. Ciobanu co-encadrée LM2E et LDO). Ce travail a visé à caractériser la structure et la composition des communautés microbiennes de subsurface de Méditerranée au sein de ces dépôts sédimentaires, affectés par des événements climatiques et dont l'architecture reflétait les processus géologiques, eustatiques et climatiques au cours du temps. Les objectifs de l'étude étaient (i) d'analyser la diversité microbienne de subsurface associée à des séquences turbiditiques (ride du Var) et à la partie supérieure d'une pente continentale (Golfe du Lion) en Méditerranée Occidentale, et (ii) d'étudier l'importance potentielle des conditions paléoenvironnementales de dépôt des sédiments et de paramètres purement physiques et lithologiques sur la distribution verticale des espèces microbiennes le long du log sédimentaire.

Les résultats obtenus (analyses moléculaires et culturales de la diversité microbienne, analyses sédimentologiques, analyses canoniques) sur la carotte prélevée au niveau de la ride du Var tendent à indiquer que les derniers changements climatiques (Quaternaire tardif) imprimés dans l'environnement de dépôt ont influencé la structure et la composition des communautés microbiennes. La dominance de lignées microbiennes d'origine terrigène affiliées aux *Betaproteobacteria* est corrélée avec l'augmentation de l'intensité des turbidites et la fonte des glaces (apport terrigène). En 2012, des investigations similaires ont été réalisées au niveau du Golfe du Lion. Pour cet autre site, nous avons également mis en évidence une corrélation entre la diversité des communautés microbiennes et des séquences lithologiques déposées pendant le dernier Maximum Glaciaire, donc également influencées par des apports sédimentaires. Ces résultats extrêmement prometteurs sont publiés dans la revue *Biogeosciences* (Ciobanu *et al.*, 2012).

La présence de fragments de coquilles anciennes dans les couches sédimentaires profondes (=anciennes) ouvre des perspectives extrêmement intéressantes, tant pour la caractérisation de la microbiodiversité ancienne que de l'évolution des organismes marins en réponse aux forçages imposés par l'environnement. En effet, dans le cadre d'un projet exploratoire supporté par l'axe 6 du LabexMER (projet MethoMol, 4k€), suivi d'un projet CNRS (AO APEGE, projet PaleoCOQ, 12,5k€), nous avons pu montrer par des analyses métagénomiques que des coquilles anciennes (25 ans) de palourdes japonaises contenaient de

l'ADN du mollusque lui même, mais également les signatures génomiques d'infections bactériennes passées (permettant le reséquençage d'une 20^{aine} de souches anciennes de *Vibrio tapetis* dans le cadre de ces projets), ainsi qu'un métagénome microbien portant des signatures caractéristiques de la biodiversité marine. Nous sommes actuellement en cours de validation de ces résultats sur davantage d'espèces de mollusques, et sur des coquilles plus anciennes. Concernant le métagénome microbien, il faut préciser que nous ne pouvons pas dire aujourd'hui si il est représentatif de la biodiversité environnementale au moment de la vie de l'animal (i.e., de la formation de la coquille), ou bien de son microbiote. Il est évident que la réponse à cette question revêt une importance majeure en termes d'interprétation des résultats, mais également en termes de perspectives pour la caractérisation des paléo-écosystèmes marins.

Les problématiques de changement de la biodiversité marine, et d'évolution des organismes marins face aux forçages environnementaux, notamment climatiques, sont au cœur des questions scientifiques adressées par l'axe 6 du Labex. Les problématiques de caractérisations paléoenvironnementales et de reconstructions des variations paléoclimatiques et leurs effets sur le transfert des sédiments du continent vers l'océan sont quant à elles au cœur des questions scientifiques adressées par l'axe 4 du Labex. Dans ce cadre, l'UMR 6538 et l'Ifremer ont procédé à de nombreux prélèvements par carottages mettant à disposition de la communauté Labex des carottes sédimentaires datées et déjà caractérisées d'un point de vue géologique et chronostratigraphique.

Nous proposons ici de poursuivre ces investigations en développant des approches méta-génomiques. Nous étudierons ici la faisabilité de séquencer de l'ADN dans des échantillons de coquilles marines de plus en plus anciennes et de différentes origines, de manière notamment à en caractériser la paléo-microbiodiversité.

Plus particulièrement, nous proposons :

De nombreux fragments de coquilles de mollusques ont été trouvés dans les carottes évoquées précédemment (projets Sedamic, 0 à 15 000 ans BP), mais également dans une carotte prélevée dans le golfe du Lion en 1999 (carotte MD2349) permettant de remonter à plus de 50 000 ans BP. Cette dernière est d'ores et déjà bien caractérisée pour ce qui est des paléoenvironnements sédimentaires (Jouet, 2007 ; Jouet *et al.*, 2006). Les fossiles ont été archivés à Ifremer. Notamment, les fragments retrouvés dans 3 des strates sédimentaires analysées correspondaient à *Chlamys islandica*, une espèce qui montre aujourd'hui une biogéographie limitée aux régions arctiques et qui est aujourd'hui, pour cette raison, étudiée au sein de l'UMR 6539. Il faut noter que ces strates sédimentaires contiennent également les restes calcifiés d'autres espèces (foraminifères benthiques, ostracodes et mollusques). Ces échantillons seront analysés de différentes manières. En plus de leurs caractérisations isotopiques, une approche de métagénomique permettra de séquencer l'ADN emprisonné dans ces coquilles. Nous porterons une attention particulière à deux points:

- (i) la caractérisation du métagénome microbien présent dans ces fragments de coquilles. En particulier, nous comparerons les métagénomiques obtenus pour les différentes espèces, qui ont partagé le même paléo-environnement (mollusques et foraminifères). Ces métagénomiques devraient, s'ils sont représentatifs de la biodiversité océanique, donner des résultats similaires entre eux. Par ailleurs, la comparaison avec les résultats obtenus dans le cadre de la thèse de M.

Ciobanu apportera des informations extrêmement importantes sur la signification réelle des métagénomés microbiens obtenus à partir de coquilles.

- (ii) l'étude de l'évolution de *C. islandica* (plusieurs fragments dans 3 strates d'époques différentes allant de 20 ka à plus de 50ka) face aux bouleversements climatiques, par la comparaison des séquences génétiques obtenues pour des gènes relatifs à l'adaptation au stress dans des individus anciens et récents. La même démarche sera entreprise sur les coquilles d'une espèce de foraminifère encore présente aujourd'hui, que nous isolerons à partir des sédiments.

Enfin, l'ensemble des échantillons testés en métagénomique sera soumis aux analyses isotopiques (^{14}C , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) permettant de les dater précisément et de tirer des informations sur l'écosystème au moment de la vie de l'animal.

Autrement dit les variations climatiques s'enregistrent-elles dans nos gènes ?

Références Bibliographiques de ce chapitre :

- Chauvaud L. *et al.* 2005. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6:Q08001
- Ciobanu M. *et al.* 2012. *Biogeosciences* 9:3492-3512.
- Evans T.G., Hofmann G.E. 2012. *Phil. Trans. R. Soc. B* 367:1733-1745.
- Gröcke D.R., Gillikin D.P. 2008. *Geo-Mar. Lett.* 28:265-268.
- Harley C.D.G. *et al.* 2006. *Ecol. Lett.* 9:228-241.
- Jouet G. 2007. thèse UBO
- Jouet G. *et al.* 2006. *Marine Geology* 234:21-42.
- Pörtner H.O. 2010. *J. Exp. Biol.* 213:881-893;

CONCLUSION

EVOLUTION INTER-DISCIPLINAIRE DE MES TRAVAUX.

La manière d'aborder les problèmes et de poser les questions demeure plus importante que l'accumulation de connaissances même si celle-ci nourrit notre réflexion.

En guise de conclusion, l'évolution de mes travaux est née d'une prise de recul progressive sur l'analyse des enregistrements sédimentaires élargie dans le temps et l'espace mais aussi vers d'autres domaines pluri-disciplinaires. Cette évolution est le fruit de rencontres de collègues passionnés et passionnants que l'existence de l'IUEM, balayant de large champs disciplinaires a favorisé. L'évolution future de mes travaux visera à consolider et valoriser les nouvelles thématiques engagées en collaboration interdisciplinaire, en particulier en Géochimie, Géomicrobiologie, Paléoclimatologie, Géomorphologie, Géodynamique et Biologie. Dans chacune de ces collaborations j'essaie d'apporter ma vue et mes compétences centrées sur le Sédiment, c'est-à-dire ma compréhension des processus sédimentaires et de leur enregistrement dans le temps dans un continuum Terre-Mer. Bien souvent le sédiment, conteur de l'histoire de la terre, apporte des arguments décisifs pour étayer ou réfuter des hypothèses touchant aux autres domaines.

Nous devons provoquer le dialogue, la réfutation et la disputation, non pas dans un besoin de controverse, mais dans une envie réelle de compréhension. Dans une telle approche multi et trans-disciplinaires, il se peut que chaque discipline perde un peu par rapport à ses propres critères d'excellence (qu'il faudrait redéfinir dans une vision moins parcellaire et mono-disciplinaire : la cohérence interne ne signifie rien au regard d'une incohérence globale), mais les résultats de ce travail collectif, de disputation, sont plus riches et plus à même de comprendre. Le défi est bien de mettre les connaissances de chaque domaine **en résonance** sur des problématiques variées qui doivent permettre de nouvelles avancées scientifiques, voire l'émergence de nouveaux concepts.

Les interdisciplines

Tentative de typologie

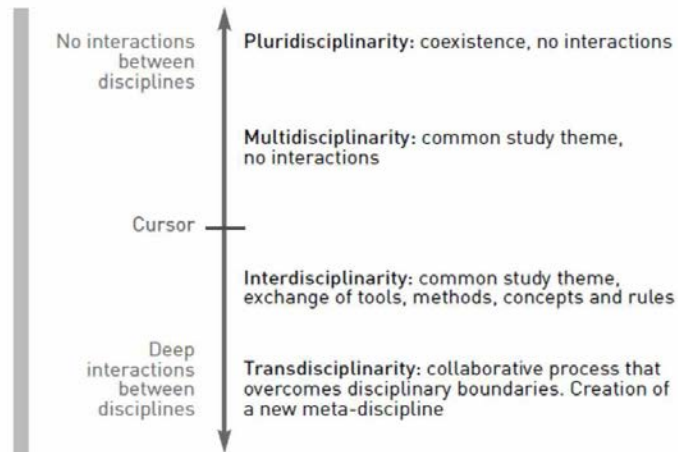


Figure 1. Four levels of cross-disciplinary interaction. The interactions between disciplines can be classified according to four points on a scale, along which researchers have to explicitly place their cursor.
Source: Inspired by Klein (1996) and Jakobsen (2004)

Tiré de : Blanchard, A., & Vanderlinden, J.-P. (2010). Dissipating the fuzziness around interdisciplinarity: the case of climate change research. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society (S.A.P.I.E.N.S)*, 3(1).

EPILOGUE

QU'EST-CE QUE DIRIGER DES RECHERCHES ? COMMENT ?

En guise d'épilogue j'aimerais souligner quelques points qui me semblent important et qui paradoxalement me semble trop peu mis en avant dans nos communautés scientifiques, à savoir :

Le devoir d'éthique et de déontologie du chercheur et du directeur de Recherche

Mon objectif ici n'est certainement pas de faire une épistémologie de la science et de ses pratiques, mais de citer quelques points qui me semblent important. En écrivant ces paragraphes j'ai découvert « la déclaration de Singapour sur l'intégrité de la Recherche », signée en 2010 (par le CNRS en particulier) et dont j'ignorais, je dois l'avouer, jusqu'à l'existence, de même que celle du COMETS (Comité d'Ethique du CNRS) ce qui souligne, peut-être, le manque de diffusion des principes qui doivent pourtant gouverner nos pratiques quotidiennes et sur lesquelles nous devrions, tous, nous engager (http://www.singaporestatement.org/Translations/SS_French.pdf).

1) La déclaration sur l'intégrité en Recherche dit en préambule :

« La valeur et les bénéfices de la recherche pour la société sont totalement dépendants de **l'intégrité** en recherche. Quelle que soit la manière dont la recherche est menée et organisée selon les disciplines et les pays, il existe des principes communs et des obligations professionnelles similaires qui constituent le fondement de l'intégrité en recherche où qu'elle soit menée.

Ces principes sont :

- (1) Honnêteté dans tous les aspects de la recherche
- (2) Conduite responsable de la recherche
- (3) Courtoisie et loyauté dans les relations de travail
- (4) Bonne gestion de la recherche pour le compte d'un tiers »

2) La pratique scientifique vise à la connaissance objective.

Elle cherche à l'atteindre par différentes pratiques dont l'observation et sa systémisation mais aussi par l'expérimentation.

Cependant, la science est aussi une entreprise humaine et **faillible** et le chercheur, tout diplômé ou habilité qu'il soit (ou sera ?), peut se tromper ou tout au moins peut avoir énoncé des propositions qui doivent finalement être révisées. Cette évidence ne me semble pourtant pas toujours si facilement mise en pratique dans le quotidien du chercheur. Et quand un lien d'autorité existe (entre un docteur et son directeur, par exemple), la remise en cause des résultats du second par le premier n'est pas toujours si facilement acceptée. C'est pourtant là un des fondements de la science que de reconnaître que **toute proposition scientifique est, en droit et en devoir, « révisable »**. En science, il n'y a pas de vérités absolues. Pour être capable de diriger les recherches d'autrui, avec bienveillance et efficacité, il me semble indispensable d'être fermement imprégné et convaincu de cet état de fait. Le respect du doctorant et du postdoctorant en dépend. La discussion substantielle des hypothèses et des faits qui en découlera ne pourra qu'être bénéfique qu'elle qu'en soit l'issue : soit pour la science, si la proposition est révisée ce qui montre que la science avance, soit pour les acteurs en jeu : par la mise en pratique de la méthode scientifique par le directeur et son apprentissage par le doctorant.

3) Le problème des publications

Dans l'évolution actuelle et mondiale du monde de la recherche, la question des publications et des évaluations est devenue de plus en plus cruciale et sensible pour le chercheur. La pression et la compétition au sein du monde scientifique, toutes disciplines confondues, est devenu extrêmement intense et continue encore d'augmenter. Le financement de la recherche diminue, le nombre de chercheur augmente : la bataille est féroce (ce qui semble d'ailleurs, au passage, avoir aussi augmenté les cas de fraudes scientifiques : P. Gravel, 2002). La mise au point d'indices de publications (points H, M) résume de manière quelque peu sibylline l'activité du chercheur et encore plus celle de l'enseignant-chercheur qui ne dispose pas d'un Point E pour mettre en avant la qualité de son enseignement. Toujours est-il que ces nouveaux indices d'évaluation ont entraîné une évolution sensible et très rapide des pratiques de notre monde scientifique. On jauge la qualité du collègue par un *click* du *Web of knowledge* ou de *google* ! D'où l'outrancière importance des publications pour tous, pour l'évolution des carrières, des laboratoires, des instituts, l'évaluation des dossiers de financements pour le chercheur mais aussi évidemment pour l'embauche future pour les doctorants et les postdoctorants.

Face à cet état de fait :

Quelle pratique adopter ?

Quelle éthique suivre pour le directeur de recherche ?

Le Directeur de recherches est de mon point de vue responsable de l'avenir du doctorant et du post-doctorant et doit donc œuvrer pour favoriser un bon taux de publication à son jeune collègue sans pour autant écrire pour lui les papiers ou le mettre systématiquement dans toutes ses publications ! A l'inverse, le directeur de recherches doit aussi tout mettre en œuvre pour éviter la tentation de l'abus de pouvoir que le statut précaire du doctorant et du post-doctorant pourrait faire naître...

A cette fin, je pense que l'on n'insiste pas suffisamment sur les bonnes pratiques déontologiques de la publication et la définition du rôle de chaque co-auteurs. Cette pratique tend d'ailleurs à se développer dans les revues internationales, peut-être pour pallier, justement, à quelques abus...

Ainsi l'Aviesan (l'alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé) a publié en Février 2011 un texte de « recommandations pour la signature des articles scientifiques dans le domaine des sciences de la vie et de la santé ».

« L'objectif des recommandations n'est pas de définir un cadre directif mais de rappeler les critères de la définition de la qualité d'auteur, telles qu'elles ont été formulées par les associations internationales des éditeurs de journaux scientifiques et médicaux confrontés à la multiplication du nombre des auteurs d'une part et du nombre croissant des conflits de signatures d'autre part. Ces critères peuvent servir de base à la discussion au sein du laboratoire ou lors de collaborations, la véritable recommandation est d'envisager suffisamment en amont de la publication et de façon transparente, qui doit être auteur quel sera l'ordre des signatures en s'efforçant d'obtenir un consensus et une décision commune ».

Sans reprendre *in extenso* ce texte j'y relève quelques points intéressants en particulier la définition de la qualité d'auteur :

« Un auteur doit remplir les 3 conditions suivantes :

1. Avoir joué un rôle substantiel dans la conception du projet et du protocole expérimental, l'acquisition des résultats ou l'analyse et l'interprétation des résultats ;
2. Avoir écrit la première version de l'article ou participé à la révision critique du contenu intellectuel ;
3. Approuver la version finale publiée et assumer la responsabilité du contenu.

Certains journaux scientifiques encouragent à préciser en quelques lignes la contribution de chacun des co-auteurs ou exigent qu'elle soit précisée à l'aide d'un formulaire détaillé. Ceci dans le but de rendre transparente la responsabilité prise par chacun d'entre eux dans la partie de la publication qui dépend directement de leur contribution même si cette responsabilité reste globale pour l'ensemble des auteurs. L'acquisition des financements du projet, la mise à disposition de locaux, la direction de l'Unité de recherche ne justifient pas en elles-mêmes la qualité d'auteur. La contribution au travail sous forme d'exécution de tâches définies purement technique, d'aide à la rédaction, de collecte de données, de don de matériel, de soutien financier, doit être reconnue dans les remerciements. [...]

Les auteurs doivent également vérifier que **tous les individus qui remplissent ces conditions sont coauteurs de l'article** car certains comportements comme l'oubli d'un auteur (ghost authorship) ou l'ajout d'un auteur non justifié (gift or guest authorship) constituent de **réels manquements à l'intégrité scientifique**.

L'ordre des signatures doit être une décision commune et les auteurs doivent pouvoir l'explicitier.

Les positions dont la signification sont les plus claires sont celles de premier et dernier auteur, le premier auteur étant celui dont la contribution a été la plus importante et souvent un chercheur "junior" et le dernier auteur le chercheur "senior" de l'équipe qui a guidé le projet.

La pratique de plusieurs co-auteurs "en premier" est admise et permet de résoudre la prise en compte pour la carrière des jeunes lors de collaborations notamment et il se dessine la possibilité de plusieurs "derniers" co-auteurs.

Certains journaux exigent d'ailleurs que les manuscrits qui leur sont adressés soient accompagnés d'une déclaration signée par l'ensemble des coauteurs indiquant leur accord pour figurer comme signataires dans l'ordre indiqué, ce qui ne résout pas le problème des auteurs "oubliés" notamment lorsqu'ils ont quitté le laboratoire. »

On notera que la pratique diffère quelque peu en sciences de la terre puisque la position de dernier auteur comme le senior de l'équipe n'est pas utilisée, ce qui à mon avis ne fait qu'amplifier les problèmes potentiels d'ordre des auteurs et de conflits sur la position de premier auteur.

D'où l'importance d'une pleine conscience du **besoin absolu d'intégrité** en recherche pour le directeur de recherches que j'aspire à devenir mais aussi pour les jeunes scientifiques que j'espère accompagner sur cette voie, justement. Plus que diriger il s'agit bien plutôt d'accompagner l'étudiant, dans un esprit de maïeutique, à accoucher du chercheur qui est en lui.



“Geopoliticus Child Watching the Birth of the New Man” by S. Dali, 1943.

Liste des figures

Figure I-1	Le Golfe du Lion	18
Figure I-2	Enregistrement des séquences	19
Figure I-3	Simulation stratigraphique.....	20
Figure I-4	Synthèse des courbes de variabilités climatiques et eustatiques.....	21
Figure I-5	Zoom sur le dernier cycle glaciaire.....	22
Figure I-6	Séquences très haute résolution.	23
Figure I-7	Fonctionnement du canyon de l'Aude.....	25
Figure I-8	Evolution du canyon de l'Aude	26
Figure I-9	Carte bathymétrique.	28
Figure I-10	Courbe de variation du niveau marin.	29
Figure I-11	Interprétation des profils sismiques.....	30
Figure I-12	Modélisation stratigraphique.....	31
Figure II-1	A) Interprétation sismique B) Modélisation stratigraphique.....	40
Figure II-2	Carte isochore des épaisseurs.....	41
Figure II-3	Evolution des flux sédimentaires.....	42
Figure II-4	Coupe topographique.....	45
Figure II-5	Base de données Bassin de Valence.....	46
Figure II-6	Compositions isotopiques Sr et Nd.	48
Figure II-7	A) Taux de dénudation B) Répartition des taux de dénudation.....	51
Figure III-1	Morphologie des marges passives	56
Figure III-2	Surface d'érosion précoce	59
Figure III-3	Mesure de la subsidence.....	60
Figure III-4	Hinge-Line.....	61
Figure III-5	Modélisation 3D	62
Figure III-6	Modèle de formation des marges passives.	64
Figure III-7	Modèle d'évolution pour le bassin liguro-provençal.....	65
Figure IV-1	Environnement sédimentaire et communautés microbiennes	71
Figure IV-2	Distribution de Bétaproteobacteria.....	72
Figure V-1	Production-transfert-dépôt des sédiments.	86

Figure VI-1	Position du forage IODP GOLD dans le Golfe du Lion.....	90
Figure VI-2	Conceptual image and operation plan	91
Figure VI-3	Schematic seismic line	94
Figure VII-1	Flux d'eau vers les océans côtiers (Milliman & Farnsworth, 2011).....	120
Figure VII-2	Schéma de la circulation thermohaline.....	121
Figure VII-3	Etude intégrée des montagnes aux abysses.	122