

# SONDER LA TERRE POUR MIEUX LA CONNAITRE

## Dossier de presse

*Journées scientifiques d'IODP-France  
Les 10 et 11 avril 2012 à Paris*

Contact presse

---

CNRS | Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | [priscilla.dacher@cnrs-dir.fr](mailto:priscilla.dacher@cnrs-dir.fr)



# Journées Scientifiques IODP - France 10 & 11 avril 2012 - Paris

## Climate and Ocean Change

Reading the Past, Informating the Future



## Earth Connections

Deep Processes and Their Impact  
on Earth's Surface Environment



## Earth in Motion

Processes and Hazards on  
Human Time Scales



## Biosphere Frontiers

Deep Life, Biodiversity and  
Environmental Forcing of Ecosystems

**10 avril 2012**

au siège du CNRS

**11 avril 2012**

à l'IPGP

Informations : <http://iodp-france.org>

Contact : [iodp-france@get.obs-mip.fr](mailto:iodp-france@get.obs-mip.fr)



# *Sommaire*

Programme des journées scientifiques

Plus de cinquante ans de forages océaniques

Présentation d'IODP et d'ECORD

Les objectifs d'IODP pour 2013-2023

Les projets novateurs portés par la France dans le cadre d'IODP

Les laboratoires français impliqués dans IODP

*Des photos sont disponibles sur demande au service de presse du CNRS.*





**Mardi 10 avril 2012 au CNRS – Campus Michel-Ange de 8H45 à 18H30**

**8h45 – 8h50**

**Mot de bienvenue**

*Jean-François Stephan (Directeur de l'INSU)*

**8h50 – 9h00**

**Introduction**

*Georges Ceuleneer (CNRS – GET – Toulouse)*

**9h00 – 10h30**

**Regards extérieurs sur le New Science Plan d'IODP (2013-2023)**

**1. Le niveau marin**

*Anny Cazenave (CNES – LEGOS – Toulouse)*

**2. Les modèles climatiques**

*Yannick Donnadieu (CNRS – LSCE – Gif-sur-Yvette)*

*Yves Godderis (CNRS – GET – Toulouse)*

**3. La tectonique globale**

*Yves Lagabrielle (CNRS – Géosciences Montpellier)*

**4. Les risques naturels**

*Pierre-Yves Bard (CNRS – ISTERRE – Grenoble)*

**5. Les frontières de la vie**

*Bénédicte Menez (CNRS – IPG – Paris)*

**6. Les ressources du futur**

*Rémi Eschard (IFP – Paris)*

**10h30 – 10h50**

**Pause Café**

**10h50 – 11h10**

**La France dans ECORD, ECORD dans un monde qui bouge**

*Catherine Mével (CNRS – IPG – Paris)*

*Gilbert Camoin (CNRS – CEREGE – Aix-en-Provence)*

**11h10 – 11h30**

**Bilan de la période IODP (2003-2013)**

*Georges Ceuleneer et Bénédicte Abily (CNRS – GET – Toulouse)*

**11h30 – 12h00**

**IODP dans le paysage français des géosciences marines et au-delà**

**1. Le forage océanique et les géosciences marines**

*Jérôme Dymont (CNRS – IPG – Paris)*

**2. La flotte nationale et les « site surveys »**

*Gilles Lericolais (IFREMER – Paris)*

**3. Les relations avec d'autres grands programmes (exemple du programme IMAGES)**

*Xavier Crosta (CNRS – EPOC – Bordeaux)*

**12h00 – 14h00**

**Pause Déjeuner**

**14h00 – 14h15** **Participation de la France aux grands programmes internationaux : une analyse comparative d’IODP et des programmes d’exploration planétaire**

*Patrick Pinet (CNRS – IRAP – Toulouse)*

**14h15 – 15h45** **La France, une actrice majeure des grandes percées scientifiques et des projets innovants d’IODP**

**1. Les failles sismogéniques et tsunamigéniques**

*Pierre Henry (CNRS – CEREGE – Aix-en-Provence)*

**2. Les écoulements gravitaires et le risque tsunamigénique**

*Christine Deplus (CNRS – IPG – Paris)*

*Anne Le Friant (CNRS – IPG – Paris)*

**3. La lithosphère océanique & Le projet MOHOLE**

*Benoit Ildefonse (CNRS – Géosciences Montpellier)*

**4. La Méditerranée & Le projet GOLD**

*Marina Rabineau (CNRS – IUEM – Brest)*

**5. La paléocéanographie et la paléoclimatologie**

*Catherine Pierre (CNRS – LOCEAN – UPMC – Paris)*

**15h45 – 16h05** **Pause Café**

**16h05 – 17h05** **La France, une actrice majeure des grandes percées scientifiques et des projets innovants d’IODP**

**6. Les variations du niveau marin**

*Pierre Deschamps (IRD – CEREGE – Aix-en-Provence)*

**7. Les interactions climat et tectonique**

*Christian France-Lanord (CNRS – CRPG – Nancy)*

**8. La biosphère profonde**

*Olivier Rouxel (IFREMER – IUEM – Brest)*

**9. La géophysique et les observatoires en forage**

*Philippe Pézard (CNRS – Géosciences Montpellier)*

**17h05 – 17h20** **IODP source de vocation pour les jeunes**

*Bénédicte Abily (CNRS – GET – Toulouse)*

*Paul Le Campion (Université Paris Diderot – IPG – Paris)*

**17h20 – 17h50** **Regards croisés sur IODP**

*Jean-François Minster (Total)*

**17h50 – 18h25** **Discussion avec les représentants des Tutelles et des Instituts**

**18h25 – 18h30** **Message de clôture**

*Jean-François Stephan (Directeur de l’INSU)*

**18h30** **Apéritif**



## Plus de cinquante ans de forages océaniques

*« Nous ne pouvons pénétrer dans l'écorce de la terre, et les plus grandes cavités, les mines les plus profondes, ne descendent pas à la huitième partie de son diamètre. Nous ne pouvons donc juger que de la couche extérieure et presque superficielle ; l'intérieur de la masse nous est entièrement inconnu. A peine pouvons-nous former quelques conjectures raisonnables. »*

Buffon (1749)

Les savants des *Lumières* eussent été, sans nul doute, de fervents adeptes des forages. Le projet MOHOLE, l'ancêtre commun d'IODP et des programmes qui l'ont précédé (ODP et DSDP), est né, il y a plus d'un demi-siècle, de cette même et irrésistible quête des profondeurs qui titille notre imaginaire collectif depuis l'aube de l'humanité. L'ambition du MOHOLE était de creuser un puits, non pas jusqu'au cœur de notre planète !, mais au moins à travers son épiderme, l'écorce terrestre, là où elle est la plus mince, dans les océans, afin d'entrapercevoir « l'intérieur de la masse », d'atteindre ce que nous appelons, aujourd'hui, le « manteau ». Ambition d'apparence assez modeste, somme toute. Faisant appel au bon sens de ses lecteurs, voici ce qu'écrivit John Steinbeck dans un reportage dédié au MOHOLE publié en avril 1961 dans le magazine *Life* : « *If we can seriously plan and design stations in space and on the moon, we are surely capable of mining a few thousand feet under water. The engineering problems are far simpler.* ». Ambition, démesurée, pourtant : malgré quelques essais prometteurs, le projet MOHOLE fut interrompu avant d'aboutir si bien que la nature de la croûte profonde océanique et de la discontinuité croûte/manteau (le « Moho ») restent parmi les secrets les mieux gardés de notre planète. Espoir toujours vivace pourtant : les progrès technologiques aidant, MOHOLE renaît de ses cendres et, il ne fait guère de doute qu'il sera un jour couronné de succès. Un jour prochain peut-être. Oserait-on annoncer « Avant la fin de cette décennie » ? Forer jusqu'au Moho reste, en tous cas, un projet mis en exergue dans le *New Science Plan* d'IODP. Il n'est pas le seul, loin de là !

Les méthodes indirectes d'auscultation de la terre, telles le magnétisme, la sismologie et la gravimétrie ont permis de nous forger une image que l'on peut espérer assez juste de la structure interne de notre planète. Grâce à elles, nous pouvons, littéralement, imaginer que le manteau terrestre est constitué de roches denses, comme les péridotites, capables de fluer et de fondre. Avancées extraordinaires, certes, sans elles nous en serions toujours au stade des « conjectures raisonnables », mais tenir dans ses mains un échantillon de ces roches profondes, pouvoir l'observer sous toutes ses facettes et percer les moindres secrets de sa texture et de sa composition est une aventure d'une toute autre dimension. Rien ne remplacera jamais l'observation directe, le contact avec le réel qui nous permet, toujours, de préciser la nature des choses, nous amène, souvent, à corriger les erreurs d'interprétation des signaux géophysiques, et nous conduit, parfois, à découvrir (au sens propre du terme) ce qui défait l'imaginaire. Les exemples sont légion ! Nous en détaillerons quelques-uns.



Navires de forage utilisés lors des programmes de forages océaniques DSDP, ODP et IODP.

Le puits le plus profond jamais foré atteint la cote de -12,262 mètres. Les marins n'y sont pour rien ! Ce record est à mettre au crédit des géologues et ingénieurs continentaux et d'une volonté politique, celle de l'ex-URSS qui voulut ajouter cet exploit technologique à son palmarès. Il fut percé au niveau de la



péninsule de Kola, en Scandinavie, dans une zone stable (un « craton ») où la croûte terrestre est froide, très épaisse (une cinquantaine de kilomètres) et ... où il ne se passe plus grand-chose sur le plan géologique, il faut bien l'avouer ! Forer sous les océans, dans les secteurs les plus actifs de notre planète, est beaucoup plus enthousiasmant mais infiniment plus ardu. Par exemple, pas moins de sept expéditions, soit environ quatorze mois d'opérations en mer, furent nécessaires pour atteindre la profondeur record de 2,111 m sous le plancher océanique au niveau du puits 504B foré sous une tranche d'eau de 3,457 m, non loin d'un centre d'expansion de l'océan Pacifique. Pour atteindre le Moho ou les grandes failles sismogéniques, il faudra être capable de percer des puits au moins trois fois plus profonds. Le tout récent navire de forage *Chikyu*, équipé d'un système de re-circulation des boues là où ses grands frères, le *Glomar Challenger* et le *Joides Resolution* foraient « à nu », est taillé pour ce genre d'exploits. Il ne reste plus qu'à identifier les sites idéaux, ou du moins consensuels, et ... d'y aller !

L'arrêt du premier projet MOHOLE n'a pas refroidi l'ardeur des géologues marins. En effet, « *le métier de marin pousse ceux qui le professent à vouloir connaître les secrets de ce monde* », comme écrit si justement Christophe Colomb dans son Livre des Prophéties. Et les roches sous-marines sont une clef essentielle pour qui veut comprendre notre planète : quels processus physiques et chimiques en font un astre animé, capable de bâtir des montagnes, d'ouvrir des océans, d'ériger des volcans, de se différencier, de concentrer les richesses minérales, de s'envelopper d'une hydrosphère et d'une atmosphère, d'abriter voire de créer la vie ? C'est cette conviction et cet appel de la mer qui ont motivé la relance, dès 1968, d'un programme de forage océanique scientifique sous une forme très différente du projet MOHOLE. L'objectif, un peu obsessionnel, de forer le puits le plus profond possible, passa au second plan. Le forage fut remis à sa juste place, celle d'un outil parmi d'autres contribuant à résoudre des questions scientifiques de toute première actualité. Encore une fois, il s'agissait de préciser, de corriger, et, peut-être, de découvrir...

Les porteurs de ce qui fut baptisé le Deep Sea Drilling Project, avaient un modèle à tester : celui de la tectonique des plaques. Il fallait atteindre et forer, sous des épaisseurs plus ou moins grandes de sédiments, les premiers mètres du socle basaltique. Un objectif qui restait technologiquement difficile, mais parfaitement réaliste. L'outil s'avéra adapté à la question et on put ainsi vérifier, dans les premières années de vie de DSDP, que l'âge des basaltes et des sédiments qui les coiffent croît en s'éloignant des dorsales, offrant une superbe illustration du pouvoir prédictif de la toute récente théorie de l'expansion des fonds océaniques. On se mit également à étudier systématiquement les sédiments pélagiques qui se sont révélés de merveilleuses archives du climat, de la tectonique - océanique *et* continentale - ainsi que des circulations océaniques anciennes, pour les 200 derniers millions d'années d'histoire de la planète. De plus, nul besoin n'était de s'échiner à faire des carottages très profonds pour répondre à certaines questions essentielles dans ces domaines. Charles Darwin lui-même adressait dès 1881 cette lettre prémonitrice à l'un de ses collègues : « *Je souhaite qu'un richissime millionnaire se mette dans la tête de faire des forages dans quelque atoll du Pacifique ou de l'océan Indien, et de ramener pour examen des carottes de 500 à 600 pieds de profondeur* ». Darwin aurait pu, lui aussi, contribuer à la rédaction du New Science Plan d'IODP où les récifs coralliens et l'étude des changements du niveau marin occupent une place d'honneur !



*Carotte de coraux fossiles récupérée lors de l'expédition IODP 310, Tahiti Sea Level (moitiés « working » et « archive »). Scientific Drilling, vol.5.*



Nous sommes les héritiers directs de ces époques pionnières. Notre mission est de concrétiser les rêves des anciens et d'imaginer de nouveaux défis que nos étudiants relèveront à leur tour. En effet, la magie et la force de notre programme de forage océanique, dont la phase actuelle (IODP) se termine bientôt et passera le relais au décennal 2013-2023, résident en partie dans cette extraordinaire longévité, exemple rare, si pas unique, de programme commun à plusieurs générations de chercheurs.

Le forage de Kola n'a pas survécu à la chute du régime politique qui le soutenait. D'autres programmes bien plus ambitieux, et pourtant couronnés de succès comme le fut Apollo ont eu une vie étrangement courte. La réussite ne serait-elle pas le seul gage de survie pour un programme scientifique ? Elle est, certes, une condition nécessaire mais pourquoi n'est-elle pas suffisante ? La question est pertinente mais la réponse est complexe, et n'est certainement pas unique. Nous pouvons toutefois proposer quelques pistes de réflexion. Elles nous aideront à comprendre pourquoi, paraphrasant James Hutton, « *nous ne voyons pas de perspective d'une fin* » aux programmes de forages océaniques.

Tout d'abord, nous venons de voir que la course aux records n'a jamais été l'objectif de DSDP et de ses versions successives. Les questions scientifiques et elles seules guident, depuis 1968, la programmation des campagnes. Ces questions émanent de l'ensemble de la communauté : tout le monde peut soumettre un projet, toute idée est bienvenue et sera considérée, d'où qu'elle émane, à charge aux pairs, réunis en comités d'évaluation scientifiques et techniques, de juger de sa pertinence et de sa faisabilité. La conduite et les orientations du programme se font donc selon un mode purement « *bottom up* ».

Ensuite, la compétition internationale a toujours été totalement étrangère à l'esprit du programme. Dès 1968, DSDP, fonctionnant à l'époque entièrement sur fonds américains, conviait de nombreux étrangers à embarquer à bord du *Glomar Challenger*. Le mode de financement est devenu international en 1975 et ce fut l'occasion de réunir sous un même drapeau, celui d'IPOD (International Program for Ocean Drilling), des nations situées de chaque côté du rideau de fer. En pleine guerre froide, les exemples sont rares d'un si bel humanisme, d'une telle volonté de coopérer dans le cadre d'un programme qui, s'intéressant à l'ensemble des mers du monde, pouvait pourtant être perçu comme une entorse à la géostratégie ! L'esprit de compétition était sous-jacent à MOHOLE, non pas au projet scientifique lui-même, mais à la façon dont il a été récupéré par le pouvoir politique. Au-delà des difficultés techniques, et donc du coût, c'est peut-être ce qui lui fut fatal. Le message de félicitation adressé le 14 avril 1961 à la National Academy of Science par le président John F. Kennedy portait d'ailleurs en lui les germes de la fin du projet : les Etats-Unis avaient réussi à réaliser un exploit, non pas en atteignant le Moho mais en réussissant vaille que vaille le premier forage en eau profonde. Les politiciens considéraient donc que leur objectif était en partie atteint avec cette « première ». Cela apparaît en filigrane dans les termes du message : « *I have been following with deep interest the experimental drilling in connection with the first phase of project MOHOLE. (...) The people of the United States can take pride not only in the accomplishment but in the fact that they have supported this basic scientific exploration.* ». C'est donc bien l'honneur de la nation, avant tout, qu'il s'agissait de mettre en exergue ! De la même façon, le programme de missions habitées vers la Lune a perdu sa motivation essentielle le jour où une des grandes puissances a, grâce à Apollo, « gagné la partie ». Les scientifiques eussent pu espérer que le programme se prolonge. Avec l'embarquement du premier « spatio-géologue » sur Apollo 17, la science semblait reprendre ses droits. Les missions Apollo 18 et 19 étaient programmées mais, comme l'on sait, les fusées sont restées clouées au sol. Les politiques avaient décidé de courir d'autres lièvres. Quel drame pour la science ! Fort heureusement, les missions spatiales d'exploration de la Terre, des planètes et de l'univers se font, aujourd'hui, pour la plupart, selon le même mode de fonctionnement bottom up et dans le même esprit de coopération internationale qui cimente la communauté IODP et qui est, en quelque sorte, son âme.

Un autre de nos atouts majeurs réside dans la diversité des objectifs scientifiques et dans la pluridisciplinarité des équipes embarquées et des équipes « à terre » qui englobent virtuellement l'ensemble des géosciences, bien au-delà des seules géosciences marines. A ce titre, pour la période



actuelle, IODP, et, *a fortiori*, pour le prochain décennal (cf. le New Science Plan), on peut même parler d'une diversification accrue des objectifs et des moyens. Les problématiques sont toujours « aux frontières » de la connaissance mais aux questions devenues classiques, bien que toujours vivaces, de géologie structurale, de pétrologie, de sédimentologie, etc..., sont venus s'ajouter des objectifs tout aussi fondamentaux mais plus explicitement chevillés aux grandes questions de société telles la **prévention des risques naturels (sismogéniques et tsunamigéniques)**, la **compréhension des changements climatiques** et ses relations avec le cycle du carbone, la **détermination et la prédiction à plus ou moins court terme de l'évolution du niveau marin**, sans oublier l'étude du mode de formation des **ressources minérales et des sources renouvelables d'hydrocarbures**. Les études fondamentales d'aujourd'hui seront les guides des prospections de demain. De plus, les projets à l'interface entre biologie et géologie, s'attachant à comprendre l'origine de la vie sur terre et, rejoignant par certains aspects les recherches en exobiologie, ont fait leur apparition assez récemment dans notre paysage. Enfin, mais cela est moins nouveau, les spécialistes de la diagraphie (« logging ») embarquant sur IODP, les techniciens en charge des instruments de mesures hydrogéologiques installés sur les puits après les opérations de forage (les « CORKs ») et les foreurs eux-mêmes sont à la pointe de la recherche technologique, les solutions qu'ils imaginent et mettent en œuvre venant ensemençer la R&D des industries pétrolières et géothermiques. Avec les CORKs et autres instruments « fonds de mer », le programme de forage s'inscrit de plus en plus dans une démarche de type observatoire permanent, permettant d'obtenir de longues séries temporelles de mesures hydrologiques, géophysiques et géochimiques (cf. réseaux de surveillance NEPTUNE Canada et DONET).

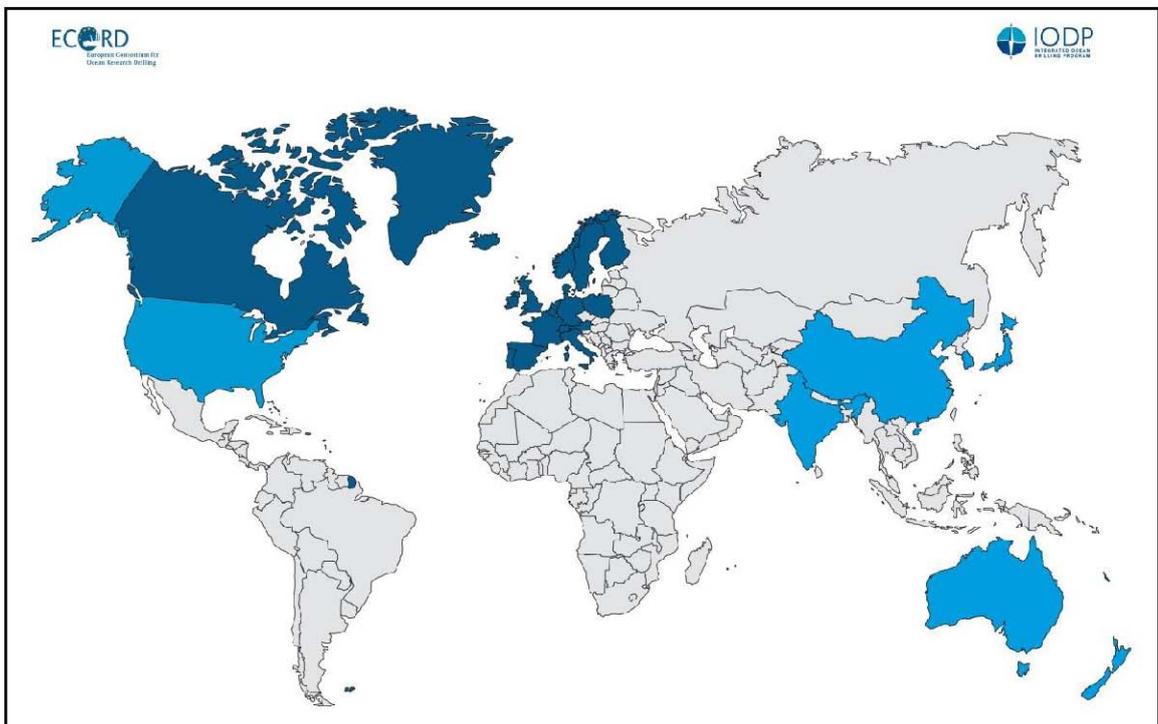


*Bulles d'hydrogène et de méthane produites par l'interaction entre l'eau et les roches du manteau terrestre, allant de pair avec des processus de carbonatation et donc de piégeage du CO<sub>2</sub> (les précipités blancs). Ces phénomènes, que l'on observe rarement à terre (ici dans l'ophiolite d'Oman), se sont révélés particulièrement actifs en milieu sous-marin, au niveau des centres d'expansion océanique et des zones de subduction. Leur étude est un des objectifs phares du New Science Plan d'IODP.*

Un autre point à mettre au crédit de notre programme est une gestion sans faille de ce patrimoine unique que constituent les centaines de kilomètres de carottes prélevées dans tous les océans du monde. Elles sont stockées dans plusieurs carothèques aux Etats-Unis, en Europe et au Japon et sont accessibles à l'ensemble de la communauté internationale après une courte période moratoire (un an) durant laquelle les scientifiques de la mission y ont seuls accès. Tout le monde peut soumettre une demande pour échantillonner la moitié « working » des carottes, la moitié « archive » étant préservée pour des examens non destructifs (sauf demandes de dérogations bien argumentées). De la même façon, toutes les données physico-chimiques, acquises à bord sur ces échantillons, ainsi que les données de diagraphie, sont rassemblées dans des bases de données publiques et accessibles, gratuitement, en quelques clics. Il est très difficile de quantifier précisément le nombre d'études s'étant appuyées sur du matériel DSDP, OPD ou IODP, mais le chiffre est considérable. Beaucoup de nos collègues ignorent d'ailleurs que telle ou telle courbe de référence, ensemble de données, voire concept, qu'ils utilisent au quotidien est un produit direct ou dérivé des programmes de forages océaniques !



Une spécificité structurelle de la phase IODP (depuis 2003) est la création du consortium européen ECORD réunissant dix-sept pays d'Europe et auxquels s'est joint le Canada. La France a joué un rôle moteur dans cette initiative ce qui lui a valu d'être choisie par ses partenaires pour assurer l'administration du consortium. A ce titre, la France est le porte-parole de dix-huit nations auprès des deux autres grands partenaires d'IODP que sont les Etats-Unis et le Japon. Cette organisation est un atout majeur car elle permet aux pays européens pour qui il aurait été difficile de contribuer à IODP en tant que partenaires isolés de rejoindre le programme. Elle permet aussi aux Européens de jouer un rôle de premier plan en tant qu'opérateur de plate-forme. L'histoire récente a, de plus, montré qu'ECORD pouvait avoir un rôle stabilisant pour l'ensemble du programme, lorsque quelques tiraillements entre grands partenaires risquaient de faire trembler l'édifice.



*Bleu foncé* - Nations membres du consortium ECORD : France, Allemagne, Royaume-Uni, Espagne, Suède, Irlande, Finlande, Danemark, Suisse, Pays-Bas, Portugal, Belgique, Autriche, Norvège, Italie, Pologne, Islande, Canada. *Bleu clair* - Nations membres d'IODP (hors ECORD) : Etats-Unis (NSF), Japon (MEXT), Chine (MOST), Inde (MoES), Corée (KIGAM), Australie et Nouvelle Zélande (ANZIC).

Durant la phase IODP, nous avons également assisté à une diversification des moyens à la mer indispensable pour aborder les nouveaux objectifs scientifiques de la communauté internationale. Le Japon a mis à la disposition du programme un nouveau navire foreur, le *Chikyu*, équipé d'un système de re-circulation de boues (« Riser Drilling »), indispensable, on l'a vu, pour envisager certaines opérations technologiquement ardues comme la traversée de la zone sismogénique, du Moho, ou des couches salifères comme celles du Messinien. ECORD a développé et mis en œuvre le concept des plates-formes de forage dites « spécifiques » (les MSPs) dans le but de répondre à certains objectifs inaccessibles au *Joides Resolution* et au *Chikyu*, ces derniers ne pouvant forer ni en eaux peu profondes (au niveau des récifs coralliens, entre autres) ni sous les glaces de l'océan Arctique. Les données acquises dans ces environnements sont indispensables pour améliorer la compréhension et la modélisation de l'évolution globale du climat et des circulations océaniques.



*Plates-formes spécifiques (MSPs) opérés par ECORD et utilisées lors des expéditions IODP 302, 310, 313 et 325.*

Cette analyse ne serait pas complète si l'on n'évoquait un dernier point : les programmes de forages perdurent aussi parce qu'ils sont une source de vocation pour les jeunes. Certains de nos étudiants se sont orientés vers les Sciences de la Terre le jour où ils ont assisté à une conférence ou lu des ouvrages dédiés aux forages océaniques. Conscient de ce devoir de formation et de motivation de la jeunesse (parmi laquelle on trouve les scientifiques, les responsables de programmes et les directeurs d'Instituts de demain), IODP organise des écoles thématiques pour les enseignants de collèges et lycées, et organise leur embarquement sur certaines campagnes (opérations « Teacher at Sea » et « School of Rock »). Des visioconférences mettent régulièrement en contact les écoles et les scientifiques embarqués. Depuis 2008, ECORD organise également chaque année plusieurs écoles d'été pour les jeunes chercheurs. Ajoutons à cela les très nombreuses initiatives individuelles, spontanées et généreuses : quel embarquant sur une campagne n'a pas, dès son retour à terre, participé à des conférences grand public, alimenté des forums sur internet, répondu à des demandes de participation à des « forums des métiers » ou autres animations pédagogiques ? Par ailleurs, les enseignants chercheurs sont unanimes pour dire que leur façon d'enseigner leur discipline a profondément bénéficié de leur expérience en mer.

Le bilan est, pour la France, plus que positif, mais loin de nous la tentation de sombrer dans le narcissisme hexagonal, l'histoire nous a montré les dangers d'une telle attitude ! On peut affirmer que le « retour sur investissement » est excellent pour la France, bien que ce type de formule ne soit pas vraiment adapté à l'évaluation de la recherche fondamentale. Le rôle d'un grand programme comme IODP est de mettre en place et de maintenir un contexte général favorable à l'émergence de nouvelles découvertes dont l'importance et les retombées ne sont le plus souvent perceptibles, et donc évaluables, que sur le long, voir le très long terme.

Il nous paraît donc important, pour conclure ce préambule, de souligner que le programme IODP, ses prédécesseurs et ses successeurs ont, à travers leurs réalisations et leur mode de fonctionnement, valeur d'exemple pour la communauté scientifique internationale. L'humanité est confrontée, en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, à des défis sociétaux majeurs. Les forages océaniques peuvent et doivent contribuer à relever certains d'entre eux, touchant à l'évolution climatique, aux problèmes environnementaux, à la prévention des risques naturels, et à la recherche de ressources renouvelables,... Déployer les moyens nécessaires pour ce faire est difficilement envisageable pour une seule nation. Ce n'est d'ailleurs pas souhaitable, car ces questions concernent la Terre dans sa globalité, et nous devons donc les résoudre en commun. Nous espérons que ces pages vous convaincront que le monde a besoin d'IODP, étant déjà rendus à l'évidence qu'IODP ne peut se passer d'ECORD, ni ECORD de la France.

*Rédigé par Bénédicte Abily et Georges Ceuleneer*



## Présentation d'IODP et d'ECORD

L'histoire du forage océanique scientifique commence avec le projet "Mohole". Initié aux Etats-Unis à la fin des années 1950 par le groupe AMSOC (comprenant entre autre Walter Munk et Roger Revelle), ce projet avait l'ambition de forer l'ensemble de la croûte océanique, jusqu'au manteau en traversant le Moho. En mars-avril 1961, à proximité de l'île Guadalupe, au large de la Baja California, le navire CUSS1 expérimente avec succès le positionnement dynamique et fore cinq puits dans le plancher océanique, sous plus de 3500 mètres d'eau (exploit pour l'époque) et récupère quelques centaines de mètres de sédiments miocènes et 13,5 mètres de basaltes ! Malheureusement, ce premier succès n'aura pas de suite et il faudra attendre le démarrage de DSDP pour que l'aventure du forage océanique continue.

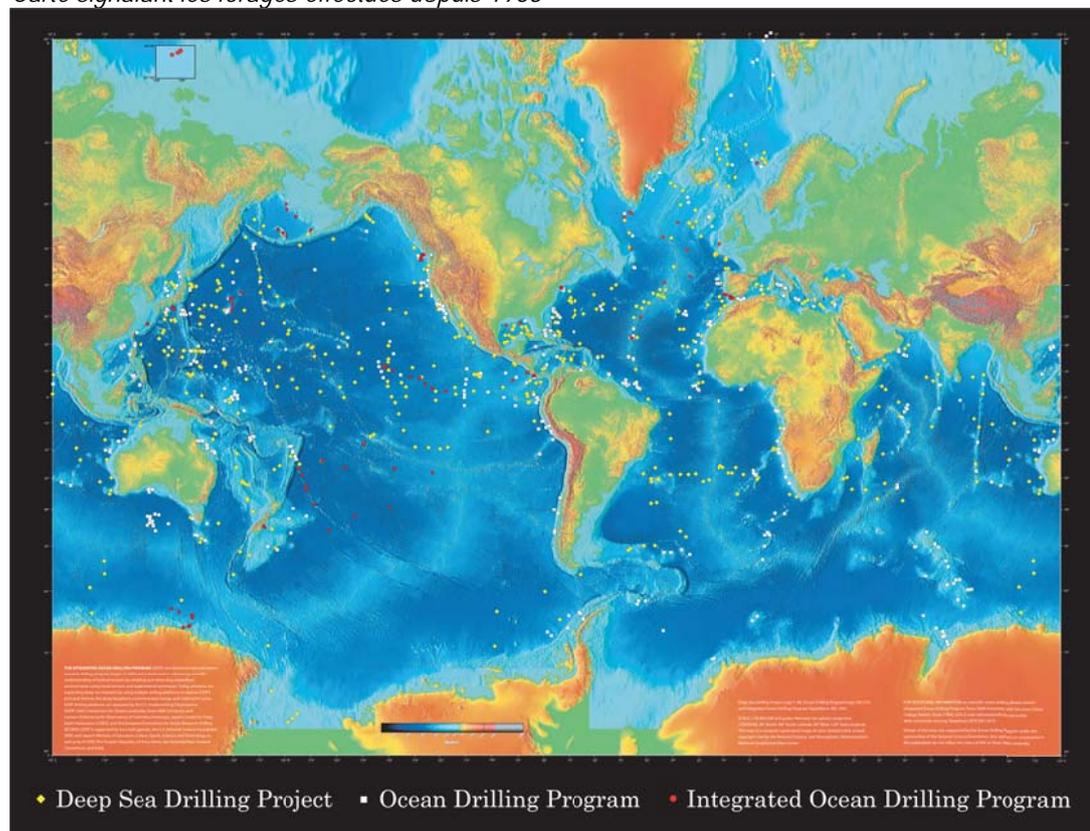
- ✓ Deep Sea Drilling project (DSDP) de 1968 à 1983 puis Ocean Drilling Program (ODP) de 1985 à 2003

En 1968, la première mission DSDP menait les géologues de Hawaii à Tahiti. Depuis, les programmes DSDP et ODP (Ocean Drilling Program) ont permis d'explorer tous les océans avec 206 campagnes de deux mois, avec deux navires foreurs, le *Glomar Challenger*, puis le *Joides Resolution*.

- ✓ Integrated Ocean Drilling Program (IODP)

Le programme intégré de forage océanique IODP a démarré le 1er octobre 2003. IODP est un partenariat international regroupant des organismes de recherche et des scientifiques spécialistes des sciences de la Terre et du vivant. IODP s'est construit sur le succès des programmes DSDP et ODP, dont il est le successeur. Il a pour vocation l'étude de la structure et de l'évolution de la Terre. Plusieurs plateformes de forage permettent aux chercheurs du monde entier d'accéder à une vaste carothèque riche de données géologiques, biologiques et environnementales prélevées dans le plancher océanique.

*Carte signalant les forages effectués depuis 1968*





### Au sein d'IODP

IODP regroupe aujourd'hui 7 partenaires représentant 24 pays :

- les Etats-Unis,
- le Japon,
- le consortium européen ECORD (European Consortium for Ocean Research Drilling), auquel la France participe,
- la Chine,
- la Corée,
- le consortium Australie-Nouvelle Zélande,
- et l'Inde.

### IODP change de nom en 2013

IODP, qui a signifié durant la dernière décennie « Integrated Ocean Drilling Program » restera l'acronyme de la prochaine phase du programme (2013 -2023), mais le « I » signifiera, cette fois, « International », le « D » du nouvel acronyme ne voudra plus dire « Drilling » mais « Discovery », les rédacteurs du New Science Plan ayant préféré insister sur l'objectif plutôt que sur l'outil. **IODP devient donc : « International Ocean Discovery Program ».**

### Les moyens de forages d'IODP/ECORD

- ✓ Les Etats-Unis mettent en œuvre un navire de forage conventionnel (non riser), qui est le *Joides Resolution* (rénové en 2007-2008). Ce dernier ne peut pas forer des fonds marins situés à très faibles profondeurs (inférieures à la centaine de mètres) mais il n'existe théoriquement aucune limite d'opération vers les plus grands fonds. Il embarque dans ses soutes une dizaine de km de train de tige et a foré avec succès par des fonds atteignant 6000 mètres.
- ✓ Le Japon a apporté à la communauté en 2007 un navire de forage "riser", le *Chikyu*, qui permet d'envisager le forage de puits qui devraient pouvoir atteindre des profondeurs de 6 à 7 km sous le plancher océanique.
- ✓ Enfin, l'Europe *via* ECORD fournit au programme des *plateformes dites spécifiques ou MSP* (brises-glace, "drilling barges", "jack-up rigs", "seafloor drilling systems", ...). Ce sont des plateformes de forage commerciales pouvant opérer dans des zones inaccessibles aux deux autres navires : les zones englacées (où la banquise dérivante nécessite la mise en œuvre d'un navire brise-glace) et les zones à faible profondeur d'eau (<100 m). La communauté française est fortement impliquée dans ces expéditions puisque qu'elles ont drainé 24% des « embarquants » français.

### La France dans ECORD

Le projet DSDP s'est internationalisé en 1975 avec la participation explicite de la France, de l'Allemagne, de la Grande-Bretagne, du Japon et de l'URSS. Durant la phase suivante, chaque « grand » pays participait individuellement au programme. Un ensemble de plus petits partenaires ont rejoint ODP sous forme d'un consortium constitué sous l'égide de l'ESF (European Science Foundation). Avant la fin de la phase ODP (1985-2003), il est apparu clairement à tous les partenaires européens d'ODP que créer un consortium unique leur permettrait d'accroître leur visibilité et de jouer un rôle plus important.

A l'initiative de la France, le projet JEODI (pour Joint European Ocean Drilling Initiative) a été financé de 2001 à 2003 par la Commission européenne pour initier les discussions entre les partenaires potentiels de ce consortium. ECORD (pour European Consortium for Ocean Research Drilling) a été créé en 2003. Le consortium comprenait 12 pays membres : France, Allemagne, Danemark, Finlande, Royaume-Uni, Islande, Italie, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Suède et Suisse. Depuis, l'Espagne, le Canada, la Belgique, l'Autriche, l'Irlande, la Pologne ont rejoint ECORD qui compte à ce jour 18 partenaires.

**C'est grâce à ECORD que l'Europe a pu jouer un rôle fondamental dans IODP en devenant l'un des trois opérateurs de plates-formes.** Le concept de MSP a, en effet, été créé par ECORD.



Les partenaires d'ECORD ont choisi le CNRS, à travers son Institut des sciences de l'Univers (INSU), pour en assurer le management et l'administration. La mise en place du consortium a été soutenue par la commission européenne sous la forme d'un ERA-Net, ECORD-Net (2003-2008), projet soumis puis coordonné par le CNRS.

En 2012, le budget total d'ECORD a atteint 21.4 M\$ (~16,2 M€). Les contributions sont très inégales, de 5.6 M\$ (~4,2 M€) pour les trois plus gros contributeurs (France, Allemagne et Royaume-Uni) à 30,000 \$ (~23 k€) pour les trois plus petits (Belgique, Islande et Pologne). Au sein d'ECORD, les « droits » des différents pays sont proportionnels à leur contribution financière. La France peut embarquer en moyenne deux scientifiques sur chaque campagne et, sur les quatre représentants d'ECORD dans chaque panel de la Science Advisory Structure d'IODP, un est français. De ce fait, la France participe activement aux décisions stratégiques du programme.

Pour en savoir plus : [www.iodp.org/](http://www.iodp.org/) et [www.ecord.org/](http://www.ecord.org/)





## Les objectifs d'IODP pour 2013-2023

Les objectifs scientifiques de IODP sont définis par un document de prospective, dit "Science Plan", intitulé "Illuminating Earth's past present and future". Ce document, fruit du travail collectif d'un comité scientifique international, regroupe les objectifs et enjeux d'IODP en quatre grands thèmes :

### 1- Changements du climat et de l'océan :

#### Lire le passé, renseigner le futur

*Comment le système climatique de la Terre réagit-il à des niveaux élevés de CO<sub>2</sub> atmosphérique?*

*Comment les calottes glaciaires et le niveau de la mer répondent-ils à un réchauffement du climat?*

*Comment se comporte l'océan face à des perturbations chimiques?*

- ✓ Évaluer la sensibilité du climat mondial et des écosystèmes océaniques à des niveaux plus élevés de gaz à effet de serre.
- ✓ Mieux prévoir l'amplitude et le calendrier des futurs changements du niveau des mers imputables à la fonte de grandes calottes glaciaires.
- ✓ Évaluer comment les changements dans l'océan et les températures atmosphériques peuvent influencer sur le régime des précipitations régionales, la distribution et la fréquence des ouragans.
- ✓ Comprendre comment l'océan réagit à une augmentation de l'acidité, des nutriments et d'autres modifications chimiques.

### 2- Frontières de la biosphère: La vie profonde et Forçage Environnemental de l'évolution

*Quelles sont l'origine, la composition et l'importance globale des communautés des grandes profondeurs?*

*Quelles sont les limites de la vie dans le plancher océanique?*

*Quelle est la sensibilité des écosystèmes et la biodiversité aux changements environnementaux?*

- ✓ Comprendre les limites physiques et chimiques nécessaires à la vie dans le plancher océanique, y compris les mécanismes utilisés par les microbes pour produire de l'énergie et fixer le carbone loin de la surface de la Terre et de la photosynthèse.
- ✓ Déterminer la composition et la diversité des communautés profondes, élucider les processus par lesquels elles se sont établies, et la facilité avec laquelle elles se sont dispersées et ont trouvé de nouvelles ressources.
- ✓ Déterminer le moment de l'extinction et des événements de spéciation, les taux de la migration océanique, et la vitesse à laquelle les changements se produisent au sein des écosystèmes en réponse au changement rapide de l'environnement.

### 3- Interactions entre les processus profonds et leur impact sur l'environnement de surface de la Terre

*Quelles sont la composition, la structure et la dynamique du manteau supérieur de la Terre?*

*Comment l'expansion des fonds océaniques et la fusion du manteau sont-elles liées à l'architecture de la croûte océanique?*

*Quels sont les mécanismes, l'ampleur et l'histoire des échanges chimiques entre la croûte océanique et l'eau de mer?*

*Comment les zones de subduction initient-elles les cycles des éléments volatils, et génèrent-elles la croûte continentale?*

- ✓ Poursuivre le défi de pénétrer 5-6 km de croûte océanique et d'échantillonner directement pour la première fois le manteau sous-jacent à partir duquel se forment la croûte océanique, et une grande partie de la croûte continentale est dérivée.
- ✓ Tester des modèles tridimensionnels de formation de croûte océanique, un processus qui a créé

- ✓ les deux tiers de la surface de la Terre en moins de cinq pour cent de l'histoire de la Terre.
- ✓ Décoder les échanges eau de mer-roches et quantifier leur rôle dans les cycles géochimiques globaux dont le cycle du carbone
- ✓ Décrypter comment la subduction débute et comment la formation des arcs insulaires contribue à fournir les blocs pour débiter la construction de la croûte continentale.

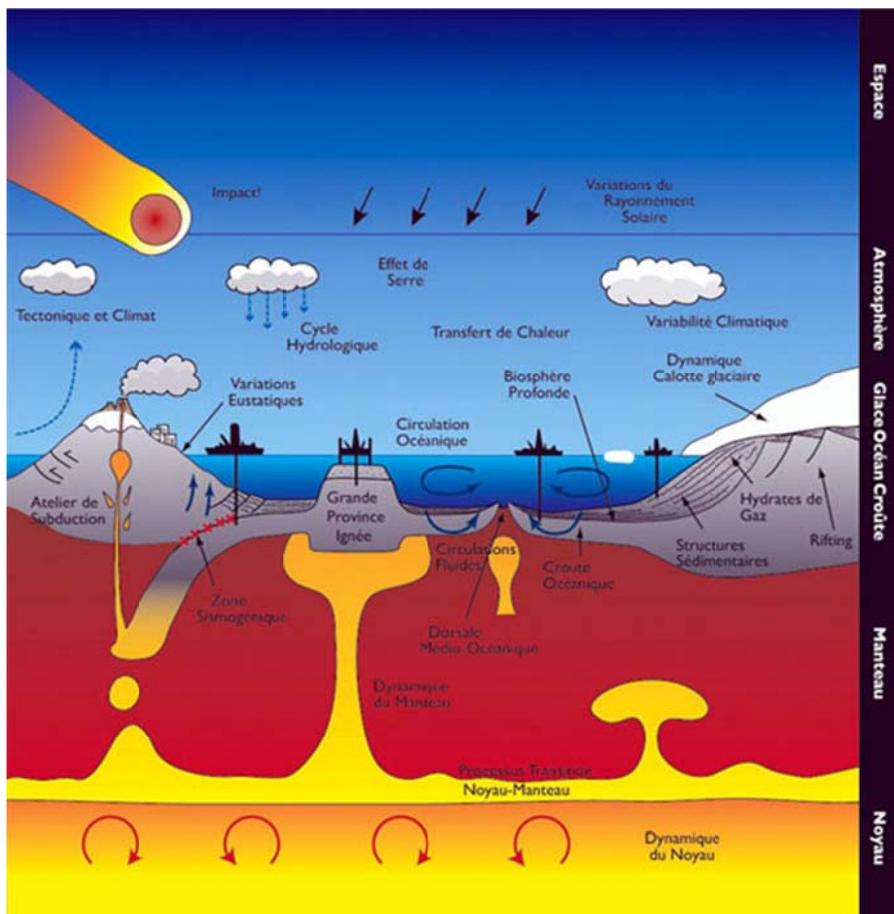
#### 4-La Terre en mouvement : Processus et risques aux échelles temporelles de l'homme

Quels sont les mécanismes qui contrôlent le déclenchement de tremblements de terre destructeurs, de glissements de terrain, de tsunami?

Quels sont les propriétés et les processus régissant la circulation et le stockage du carbone dans le plancher océanique?

Comment les fluides relient-ils les processus tectoniques, thermiques et biogéochimiques?

- ✓ Mesurer et surveiller les propriétés des roches et les conditions pouvant être associées aux très gros séismes et tsunamis des zones de subduction.
- ✓ Explorer la formation, la distribution, la dissolution, et les impacts des hydrates de gaz des sédiments marins sur le cycle du carbone terrestre, les systèmes biogéochimiques et le climat.
- ✓ Faciliter les études pilotes de séquestration du carbone dans un environnement marin en collaboration avec les programmes nationaux et internationaux.
- ✓ Quantifier l'ampleur, le taux, et l'influence de l'écoulement à grande échelle de fluides sous le plancher océanique affectant les systèmes microbiens,
- ✓ le comportement de la contrainte et de la déformation, et le transport de la chaleur et des solutés.





## Forages au Japon dans une zone à l'origine de séismes

La grande majorité des séismes de magnitude supérieure à 8 se sont produits au niveau de fosses de subduction. Comme le plan de faille activé lors de ces séismes se situe en mer, ils produisent des tsunamis qui peuvent être plus dévastateurs que le séisme lui-même, comme cela a été le cas à Sumatra en décembre 2004 et au Japon en mars 2011. Les Japonais ont construit le navire de forage *Chikyu*, équipé d'un riser<sup>1</sup>, pour pouvoir atteindre un plan de faille de subduction dans la zone où ces séismes se produisent, appelée la zone sismogène.

### Le projet NanTroSEIZE

La subduction est le processus d'enfoncement d'une plaque tectonique dans le manteau dans une zone de convergence. L'essentiel du mouvement entre les plaques (2 à 11 cm/an suivant les cas) est absorbé dans une zone de faille principale. Le projet SEIZE (pour SEIsmogenic Zone Experiment) a pour but d'étudier comment les propriétés de cette zone de faille varient avec la profondeur et de comprendre ce qui détermine l'étendue de la zone sismogène et l'amplitude du glissement co-sismique<sup>3</sup>. Il consiste à échantillonner *in situ* la zone de faille aux profondeurs où le glissement co-sismique se produit et à y implanter des capteurs, mais aussi à caractériser par une série de puits moins profonds l'ensemble de la marge<sup>2</sup> et de la plaque océanique entrant en subduction.

Le projet NanTroSEIZE s'est focalisé sur la subduction de Nankai au Japon où un grand chevauchement (appelé chevauchement satellite, « megasplay fault » sur la Figure 1) remonte, à travers la plaque supérieure, du plan de faille principal vers la surface (« plate interface » sur la Figure 1). Ce chevauchement se divise en plusieurs branches qui atteignent le fond de la mer entre le domaine du bassin d'avant-arc où se sont déposés des sédiments peu déformés et le prisme d'accrétion, constitué de sédiments décollés de la plaque plongeante et formant une chaîne de plis et chevauchements (Figure 2).

Le chevauchement satellite coïncide également avec la limite vers la fosse du glissement co-sismique lors du dernier grand séisme ayant affecté la zone, le séisme de To-Nankai en 1944. Il paraissait alors évident que cette faille était la terminaison de la zone sismogène et que son mouvement pendant les grands séismes contribuait au tsunami. Avant les forages, nous pouvions aussi imaginer que le bassin d'avant-arc et le prisme d'accrétion étaient deux domaines géologiquement différents, correspondant à deux épisodes de subduction successifs (plaque Pacifique jusqu'à la fin du Miocène Inférieur puis plaque Philippine du Miocène Supérieur jusqu'à l'actuel), séparés par une période d'une dizaine de millions d'années d'interruption.

---

<sup>1</sup> Canalisation entre le fond de la mer et le navire ou la plate-forme de forage servant à remonter la boue de forage.

<sup>2</sup> Marge désigne généralement la partie d'un continent entre la côte et la plaine abyssale ou, dans le cas d'une subduction, entre la côte et la fosse.

<sup>3</sup> Une faille est, par définition, un plan de glissement. Le glissement sur une faille est appelé co-sismique quand il se fait pendant un séisme. Sinon, on parle de glissement lent ou a-sismique. La zone de glissement co-sismique est également appelée zone de rupture, c'est pareil. La vitesse de glissement est la vitesse à laquelle les deux côtés de la faille bougent l'un par rapport à l'autre. Pendant un séisme, elle est de l'ordre du cm au m/s. La vitesse de propagation de la rupture est la vitesse de l'onde de choc qui délimite la zone de glissement, en expansion rapide pendant le séisme. Dans la croûte, elle est de l'ordre de 3 km/s.

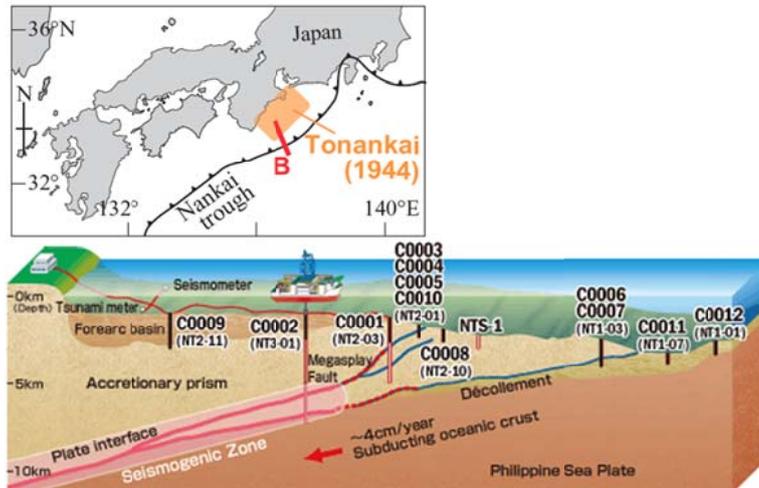


Figure 1 : Localisation du séisme de To-Nankai et schéma de la zone sismogène montrant la disposition des sites forages. Le forage profond est prévu au site C0002 de 2012 à 2014. (source : IODP/CDEX)

Depuis 2007, une série de forages relativement peu profonds (< 2 km) a été réalisée le long d'un profil, des observatoires ont été installés sur deux sites. La phase de forage profond avec le « riser » débute cette année. Mais l'investigation de la zone sismogène elle-même ne fait que commencer. Cependant des résultats importants ont été déjà obtenus, et remettent en question certaines des hypothèses formulées.

### Les premiers résultats

1. Un premier résultat des forages est le jeune âge du prisme d'accrétion et du bassin d'avant arc (moins de 2 Ma)(Figure 2). La limite supposée de la zone sismogène correspond à une brève interruption de l'accrétion vers 2-2,5 Ma, et non à un héritage géologique plus ancien. Une interruption comparable de l'accrétion est actuellement observée au front de déformation et dure depuis 400 000 à 800 000 ans.

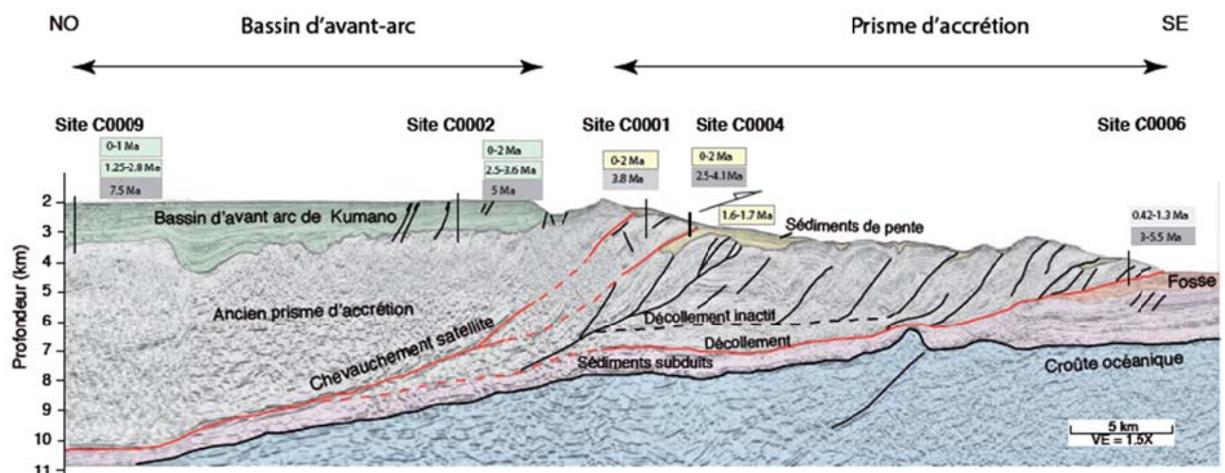


Figure 2 : Coupe sismique interprétée au travers de la marge de Nankai (adapté de Moore et al., 2009). Les âges des unités stratigraphiques traversés en forage sont indiquées en vert pour les sédiments du bassin d'avant arc, en jaune pour les sédiments de pente et en gris pour les sédiments accrétés.

2. Ensuite, la branche principale du chevauchement satellite a cessé d'être active il y a environ 1,3 Ma. Sur la section étudiée **cette faille ne peut plus être la terminaison active de la zone sismogène** (mais elle reste active à d'autres endroits à l'est et à l'ouest le long de la fosse).
3. La contrainte maximale horizontale suit généralement la déformation compressive NW-SE sauf dans une zone en arrière des **chevauchements satellites où une extension perpendiculaire à la fosse est maintenant observée**.
4. L'étude des carottes a montré que la rupture co-sismique s'est propagée jusqu'au Site C0006 situé près de la fosse lors de séismes passés. On peut savoir cela parce que le frottement dans la faille pendant le séisme a chauffé la roche à plus de 350°C et que cela a laissé des traces. **La rupture ne s'est donc pas toujours arrêtée au niveau du chevauchement satellite comme nous en avons fait l'hypothèse**. La rupture co-sismique a également atteint le Site C0004 situé le chevauchement satellite, mais probablement, comme nous l'avons dit plus haut, lors de séismes plus anciens.

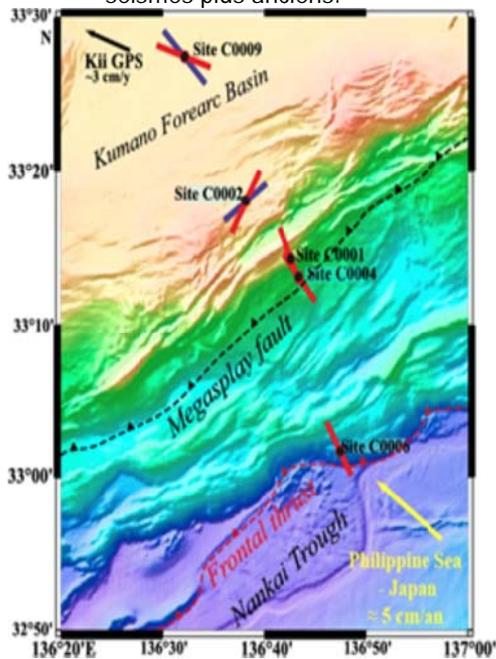


Figure 3 : Orientation de la compression (adapté de Lin et al., 2010 et Kinoshita et al., 2009). Au Site C0002, la direction de compression est presque orthogonale à celle déterminée aux autres sites.

#### Du nouveau suite au séisme de Tohoku du 11 mars 2011

Les données récemment publiées par les Japonais montrent que la rupture a atteint la fosse pendant le séisme, et même que le glissement maximal a pu augmenter de 50 m jusqu'à 80 m (en horizontal) dans les 40 km les plus proches de la fosse et que le déplacement de cette zone constitue la source principale du tsunami. Cette zone du plan de faille, cependant, rayonne peu d'énergie sismique, ce qui amène à penser qu'un mécanisme particulier est responsable de la lubrification de la zone de faille, comme cela avait été proposé pour la partie nord de la faille de Chi-Chi à Taiwan. La campagne J-FAST (expédition 343 ; embarquant français : Marianne Conin) en cours avril-mai 2012 a pour but principal de mesurer l'échauffement dans la zone de faille et de retrouver dans les sédiments déformés la trace de cet événement ou d'évènements antérieurs similaires.

Les données acquises lors des premières phases de NanTroSEIZE permettent de connaître l'état actuel de la marge. Ces résultats, ainsi que les observations effectuées lors des derniers gros séismes de subduction dans le monde ont profondément modifié notre vision du cycle sismique. **Les propriétés**



physiques intrinsèques des zones de failles sont un élément important, mais ne sont pas le seul facteur déterminant l'étendue de la rupture co-sismique. D'une part, les mécanismes à l'origine de la réduction dynamique du frottement sont multiples et dépendent entre autres de l'amplitude du mouvement et de la vitesse. D'autre part, il semble maintenant probable que **les variations de contrainte au cours des grands séismes soient suffisantes pour amener une partie de la marge, et non seulement la zone de faille, à la limite de rupture.** Les observations consécutives au séisme de Tohoku montrent qu'un grand séisme peut induire de l'extension accompagnant une augmentation du mouvement vers la fosse. D'une manière générale, la zone de glissement co-sismique, le long de laquelle se propage la rupture, semble être plus étendue que la zone où cette rupture peut s'initier, qui correspond à la zone sismogène au sens strict. Qu'en est-il de Nankai, et d'autres subductions ? Plus encore maintenant, le forage profond est nécessaire pour comprendre la génération des tsunamis par les séismes de subduction. Il doit cependant être effectué dans un contexte d'observatoire sous-marin, permettant l'étude détaillée de l'activité microsismique, le suivi de la déformation et des variations temporelles de la contrainte dans la marge.

#### Contact chercheur

Pierre Henry

Directeur de recherche CNRS au CEREGE (CNRS/Aix Marseille Université/IRD/Collège de France), co-chef de mission NanTroSEIZE

T 04 42 50 74 04

[henry@cdf.u-3mrs.fr](mailto:henry@cdf.u-3mrs.fr)



www.cnrs.fr

université  
**PARIS**  
**DIDEROT**  
PARIS 7



---

COMMUNIQUÉ DE PRESSE NATIONAL | PARIS | 27 FEVRIER 2012

---

## Des forages aux Antilles pour mieux évaluer les risques liés à l'instabilité des volcans

Cap sur les Petites Antilles, du 3 mars au 17 avril 2012, pour l'équipe internationale co-dirigée par Anne Le Friant, chercheur CNRS à l'Institut de physique du Globe de Paris (CNRS / Université Paris Diderot / IPGP) et par Ozamu Ishizuka du Geological Survey of Japan. Cette campagne océanographique vise à mieux évaluer les risques associés aux instabilités de flanc de volcan, susceptibles de provoquer des tsunamis. Pour remplir cet objectif, les scientifiques réaliseront une dizaine de forages qui permettront de retracer l'histoire éruptive des zones les plus actives des Antilles durant le dernier million d'années. C'est la première fois que des carottages seront effectués dans des fonds marins recouverts par des dépôts d'avalanches de débris volcaniques.

### Petites Antilles : un arc volcanique aux risques multiples

L'arc des Petites Antilles<sup>1</sup>, directement lié à l'affrontement des plaques Caraïbes et Amérique du Nord, est constitué de nombreux édifices volcaniques dont douze, au moins, ont été actifs lors des 10 000 dernières années. La Montagne Pelée, en Martinique, et la Soufrière, en Guadeloupe font partie de ces volcans. Si, tout le long de l'arc, les compositions magmatiques et les styles éruptifs sont différents, les éruptions sont la plupart du temps explosives. De grands glissements (aussi appelés « déstabilisations »<sup>2</sup>) peuvent se produire sur les flancs des volcans, générant un risque de raz de marée lorsque les avalanches de débris arrivent en mer. Les scientifiques ont montré précédemment qu'au moins 52 instabilités de flanc s'étaient produites sur les volcans des Petites Antilles, dont au moins 15 durant les 12 000 dernières années. Autour de Montserrat, pas moins de 75 % des produits émis par le volcan actuellement en éruption se sont épanchés en mer.

### Forer au large pour retracer l'histoire éruptive et comprendre les risques

Au cours de cette nouvelle campagne IODP<sup>3</sup>, prévue du 3 mars au 17 avril 2012, l'équipe prévoit de réaliser dix forages (de 130 à 500 mètres), choisis stratégiquement autour de trois sites représentatifs des principaux processus volcaniques de l'arc antillais : Montserrat, la Martinique et la Dominique. Grâce aux analyses des carottes marines prélevées en 2002 au large des Petites Antilles, les scientifiques ont mis en évidence un nombre d'éruptions plus important que celui déduit des seules études effectuées sur la terre ferme (où les dépôts des éruptions sont parfois masqués ou érodés). En plus des sédiments et des

---

<sup>1</sup> Par opposition aux Grandes Antilles, les Petites Antilles sont un archipel composé des îles les plus méridionales de l'arc antillais, depuis la fosse d'Aneгада jusqu'au nord du sous-continent sud-américain. La Guadeloupe et la Martinique en font partie.

<sup>2</sup> Cette déstabilisation fait suite à différents processus : injection de magma qui n'atteint pas la surface, simple fragilisation du flanc par altération hydrothermale et fracturation ou surcharge provoquée par l'édifice.

<sup>3</sup> Le programme Integrated Ocean Drilling Program (IODP) est un ambitieux programme international de forage océanique au sein duquel la France est fortement impliquée, via le consortium européen ECORD, aux côtés de 17 autres pays.



www.cnrs.fr

université  
**PARIS**  
**DIDEROT**  
PARIS 7



niveaux de cendres volcaniques qui permettront d'accéder à l'histoire des volcans, les forages prélèveront, pour la première fois, les dépôts d'avalanches de débris, dans une zone où la fréquence des déstabilisations semble plus importante qu'ailleurs.

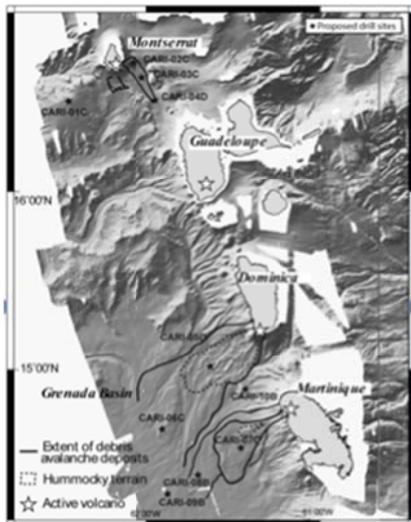
Cette campagne a pour objectif de reconstituer le plus finement possible l'histoire éruptive des volcans des Petites Antilles en documentant les cycles de construction et de destruction volcanique. Il s'agit notamment de mieux définir la nature du volcanisme durant les premiers stades de construction des édifices volcaniques (composition chimique, taux de production, explosivité, rôle de la construction par rapport aux processus de destruction) ainsi que les processus caractérisant l'activité éruptive et sa migration le long de l'arc antillais. Le but est également de mieux comprendre les processus à l'œuvre dans les avalanches de débris et la dispersion des sédiments en milieu océanique. Ces informations permettront de mieux évaluer les risques liés à l'activité volcanique dans cette région.

L'ensemble de l'équipe scientifique : <http://iodp.tamu.edu/scienceops/precruise/lesserantilles/participants.html>

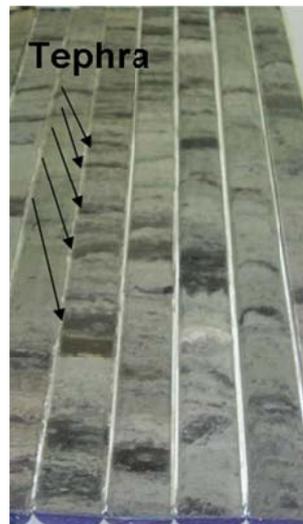
## Contacts

Chercheur CNRS | Anne Le Friant | T 01 83 95 76 36 | [lefriant@ipgp.fr](mailto:lefriant@ipgp.fr)

Presse CNRS | Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | [priscilla.dacher@cnrs-dir.fr](mailto:priscilla.dacher@cnrs-dir.fr)



Localisation des sites de forage prévus. Les forages carottés (130 à 500 mètres) seront réalisés au large de la Martinique, la Dominique et de Montserrat, d'une part dans les avalanches de débris et d'autre part, dans les sédiments et les téphra (niveaux de cendres volcaniques). © IPGP



Exemple de niveaux de tephra (cendres volcaniques) représentant des éruptions successives dans une carotte sédimentaire marine collectée au large des Petites Antilles (Caraval, N/O L'Atlante, mars 2002). © IPGP

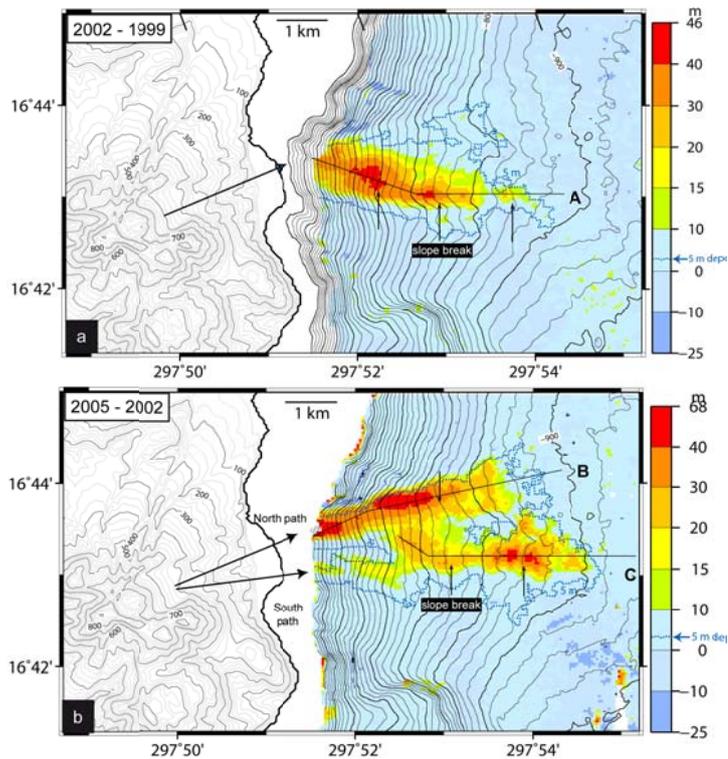


www.cnrs.fr

université  
**PARIS  
DIDEROT**  
PARIS 7



Photos du volcan de Soufrière Hills (Montserrat) prises le 31 mai 2003 et le 12 Août 2003 (avant et après l'écroulement de juillet 2003)  
© MVO.



Évolution du relief sous-marin au large de Montserrat lors de l'éruption en cours du volcan de Soufrière Hills :  
Les relevés bathymétriques (profondeurs du plancher océanique) effectués successivement en 1999, 2002, 2005 au cours de différentes campagnes océanographiques, permettent de suivre la mise en place des dépôts épanchés en mer au cours de l'éruption. L'échelle de couleur représente l'épaisseur des dépôts mis en place entre 1999 et 2002 (a), et entre 2002 et 2005 (b).  
© Le Friant et al. 2009.





## Le MoHole : voyage vers le manteau terrestre

MOHOLE, l'ancêtre commun d'IODP et des programmes qui l'ont précédé (ODP et DSDP), est né, il y a plus d'un demi-siècle, de cette même et irrésistible quête des profondeurs qui titille notre imaginaire

### La lithosphère océanique participe à la dynamique terrestre

La formation, l'évolution et le recyclage de la lithosphère océanique sont une des clefs de la dynamique globale de la planète Terre, dominant notamment son évolution physique et chimique. Ce processus comprend le transfert de matière et d'énergie depuis le manteau vers la croûte, puis de la croûte vers l'océan et l'atmosphère. En l'absence de lumière, la croûte océanique accueille la vie dans des habitats sous-marins et souterrains uniques, analogues possibles des conditions d'émergence de la vie sur Terre. A partir de sa formation aux dorsales océaniques, la lithosphère océanique échange avec l'eau de mer, séquestre des matériaux de surface (en particulier eau et CO<sub>2</sub>), pour finalement les recycler dans le manteau asthénosphérique. Le carbone est un élément fondamental pour la vie et l'environnement terrestre. Néanmoins, la contribution du manteau, le plus volumineux réservoir terrestre de carbone, au cycle global du carbone reste très mal connue en l'absence d'observations directes. Les chercheurs n'ont à ce jour aucun échantillon de manteau frais *in situ*. Quelques kilogrammes de péridotites « fraîches » échantillonnées sous une croûte océanique intacte constitueraient un trésor de nouvelles informations sur la dynamique et l'évolution de la Terre, comparable à celui qu'ont représenté les échantillons lunaires d'Apollo.

### M2M: échantillonner le manteau *in situ*

Le projet international "MoHole to the Mantle" (M2M) résulte d'une longue série de workshops et réunions menés depuis 2006<sup>1</sup>. Il relève directement des objectifs d'IODP pour 2013-2023 (cf. fiche dédiée). La communauté française y est très présente, notamment *via* l'un des porteurs du projet, Benoit Ildefonse (CNRS, Montpellier) qui a mené l'ensemble des activités liées à sa mise en œuvre depuis 2006.

L'échantillonnage d'une section complète de la croûte océanique était la motivation originelle du forage océanique scientifique. Le MoHole, un puits de forage très profond vers le manteau terrestre, se veut le point culminant d'une quête commencée il y a plusieurs décennies par IODP, ODP et DSDP, depuis la première proposition de l'AMSOC (American Miscellaneous Society) en 1957<sup>2</sup>. Cet objectif a été présent dans tous les documents de prospective depuis le démarrage du forage océanique scientifique dans les années 60. L'objectif du projet M2M dans un futur proche est de forer l'intégralité de la croûte océanique et d'atteindre, pour l'échantillonner, le manteau supérieur lithosphérique. Récupérer pour la première fois des échantillons frais du manteau *in situ* est fondamental pour comprendre la dynamique et l'évolution de notre planète.

Les scientifiques ont choisi de s'intéresser à la lithosphère océanique formée rapidement (dans l'océan Pacifique) : cette croûte « rapide » est très majoritairement recyclée dans le manteau, au niveau des zones de subduction. Il importe donc de caractériser ce type de lithosphère en priorité pour mieux appréhender les cycles géochimiques (comme celui du carbone) à l'échelle de la planète.

<sup>1</sup> "Mission Moho", Portland, Septembre 2006 (Christie et al., 2006, Ildefonse et al., 2007),

"Melting, Magma, Fluids and Life", Southampton, Juillet 2009 (Teagle et al., 2009),

"INVEST", Bremen, Septembre 2009 (Bach et al., 2010, Ravelo et al., 2010),

"The MoHole, A Crustal Journey and Mantle Quest", Kanazawa, Juin 2010 Ildefonse et al., 2010a, 2010b),

"Mantle Frontier", Washington DC, Septembre 2010 (Workshop Report Writing Group, 2011).

<sup>2</sup> <http://www.nationalacademies.org/mohole.html>



Rappelons que la croûte océanique se forme à l'axe des dorsales par refroidissement de magma issu de la fusion partielle des roches du manteau (les péridotites). Si le magma arrive en surface, sur le plancher océanique, il refroidit rapidement et se fige en basaltes qui constituent en grande majorité la croûte océanique supérieure. En revanche, le magma qui cristallise plus lentement en profondeur forme alors des gabbros. Ainsi, la croûte océanique est la superposition de gabbros profonds et de basaltes plus superficiels.

La discontinuité de Mohorovičić, communément appelée "Moho", est une interface imagée sismiquement, en-dessous de laquelle les vitesses des ondes sismiques sont supérieures à 8 km/s. Il s'agit d'une discontinuité vis-à-vis de la propagation des ondes sismiques située à environ 6 km de profondeur dans la lithosphère océanique. A ce jour, les hypothèses sur la nature géologique du Moho n'ont jamais été testées.

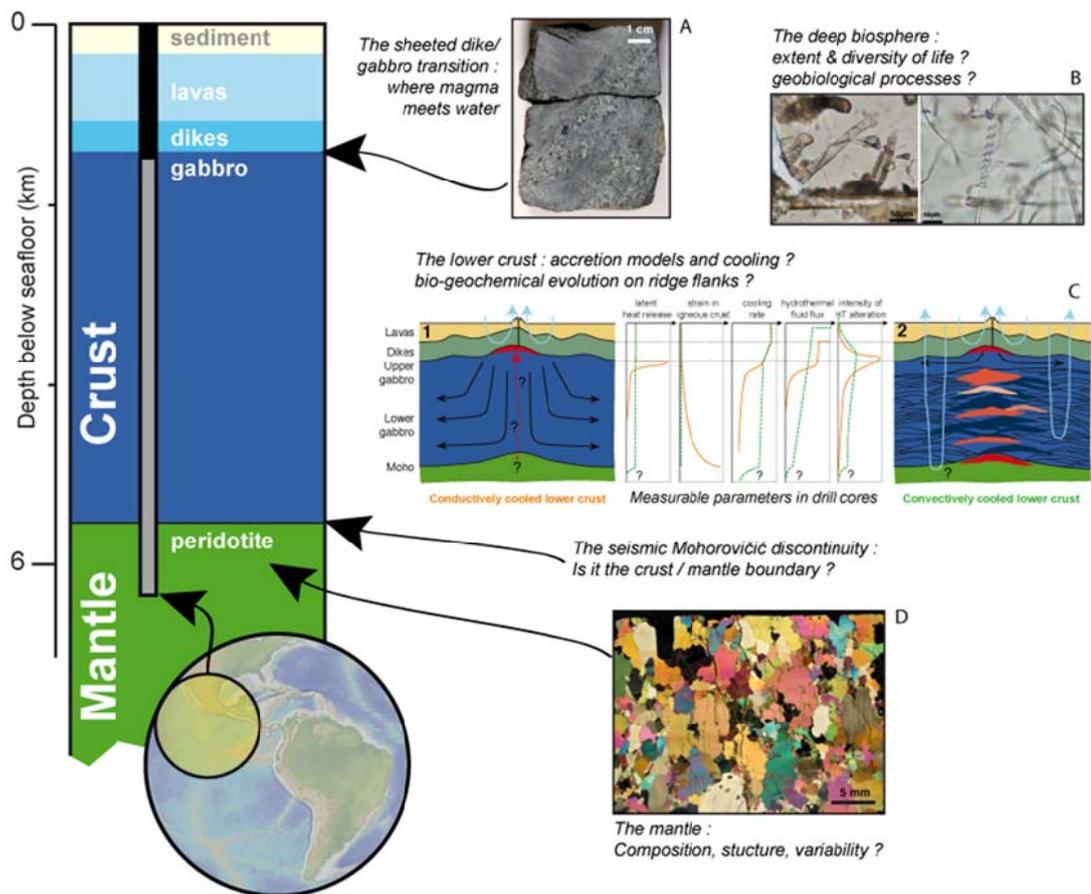
#### Les objectifs scientifiques de M2M

- Déterminer in situ la composition, la structure et les propriétés physiques du manteau supérieur convectif (tel qu'il est fossilisé dans la lithosphère océanique) et caractériser les processus de migration des liquides magmatiques,
- Déterminer la signification géologique du Moho et des réflecteurs sismiques dans la croûte rapide,
- Déterminer la composition globale de la croûte afin d'établir le lien entre les laves émises en surface et leur source mantellique,
- Déterminer le(s) mode(s) de formation de la croûte océanique au niveau des dorsales rapides,
- Déterminer l'étendue et l'intensité des échanges hydrothermaux entre la lithosphère océanique et l'eau de mer, et estimer le flux chimique vers le manteau via la subduction,
- Déterminer la contribution de la lithosphère océanique aux cycles géochimiques globaux, du carbone en particulier,
- Déterminer les limites et les facteurs de contrôle de la vie dans la lithosphère océanique,
- Calibrer les mesures sismiques régionales par les mesures sur échantillons et en puits,
- Comprendre l'origine des anomalies magnétiques marines et quantifier la contribution des roches de la croûte inférieure à la signature magnétique de la croûte océanique.

#### Pour la réalisation du forage

De nombreuses hypothèses scientifiques de première importance peuvent être testées directement par forage profond de la croûte océanique jusqu'au manteau sous-jacent ; elles le seront avec le projet M2M.

Trois régions du Pacifique sont actuellement candidates pour le MoHole, qui sera un puits d'environ 6 000 mètres de profondeur dans la lithosphère océanique rapide. Le choix du site du projet M2M requiert l'acquisition de données géophysiques supplémentaires dans ces trois régions. La profondeur d'eau est au minimum de 3 500 mètres dans les trois. Le cadre géographique et technique des futures opérations de forage d'un MoHole peut maintenant être construit, puisqu'il est aujourd'hui technologiquement réalisable. Sa faisabilité a fait l'objet d'une étude indépendante, commandée par IODP en 2011 (Blade Energy Partners, 2011). Les choix technologiques et les développements associés seront essentiels pour le succès du projet M2M. La recirculation continue des boues de forage est la première priorité technologique pour forer un puits ultra-profond, ceci est maintenant accessible à la communauté scientifique grâce au navire de forage japonais Chikyu.



Croûte schématique de la lithosphère rapide, et pénétration prévue du MoHole. A: Contact complexe filonien / gabbro dans le puits 1256D. B: Ichnofossiles microbiens dans les basaltes de l'ophiolite de Troodos (McLoughlin et al., 2009). C: Schémas des modèles de formation de la croûte inférieure à tester (d'après Korenaga et Kelemen, 1998) et variations schématiques relatives de paramètres observables dans les carottes en fonction du mode de refroidissement de la croûte. D: Péridotite mantellique transportée par un volcan (Polynésie française; Tommasi et al., 2004).

Pour en savoir plus : <http://mohole.org>

**Contact chercheur**

Benoit Ildefonse

Directeur de recherche CNRS au laboratoire Géosciences Montpellier (CNRS/Université Montpellier 2), co-porteur du projet M2M

T 04 67 14 38 18

[benoit.ildefonse@gm.univ-montp2.fr](mailto:benoit.ildefonse@gm.univ-montp2.fr)



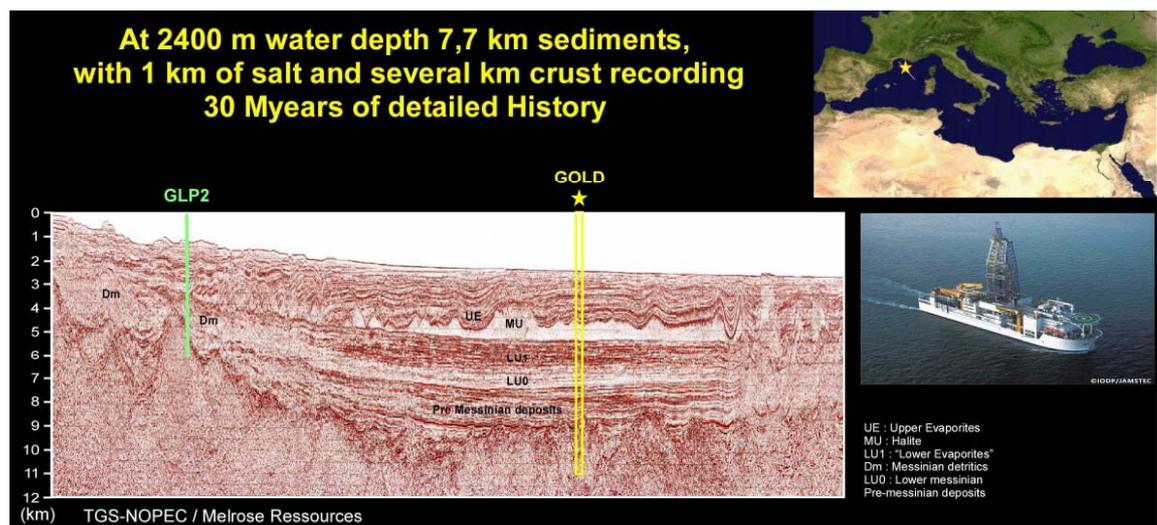


## Projet GOLD (Gulf Of Lion Drilling), forages profonds en Méditerranée : atteindre le socle et traverser la couche de sel datant du Messinien

Au cours de son histoire géologique, la Méditerranée a connu un événement exceptionnel dont on connaît aujourd'hui la cause. Un déplacement des plaques tectoniques Afrique et Eurasie a fermé le détroit de Gibraltar. Les eaux atlantiques n'ont plus pu s'écouler dans le bassin méditerranéen qui de ce fait s'est trouvé soumis à une évaporation importante, que les apports en eau douce des fleuves ne pouvaient compenser. La Méditerranée s'est progressivement asséchée au point qu'une couche massive de sel s'y est déposée. L'événement se passait il y a environ 6 millions d'années au Messinien. Ce fut une catastrophe écologique de grande ampleur. Puis le détroit de Gibraltar s'est rouvert, les eaux atlantiques sont revenues, le bassin s'est rempli de nouveaux.

Comment l'environnement a-t-il été affecté par cet événement avant l'assèchement complet de la méditerranée, et que s'est-il passé après au moment du renouveau ? Nul ne le sait vraiment, la couche de sel du Messinien n'a encore jamais été atteinte ni traversée par des forages scientifiques.

Le projet de forage IODP GOLD (Gulf Of Lion Drilling) a pour ambition d'atteindre et de traverser la célèbre couche de sel du Messinien épaisse d'1 kilomètre, connue depuis longtemps par la marque qu'elle impose dans les profils sismiques. Forer cette couche de sel représente en soit, du fait de sa dureté, un défi qu'il semble désormais possible de relever grâce aux performances du navire foreur japonais *Chikyu* (de la branche japonaise de IODP) équipé d'un BOP (Blow Out Preventer). Le forage est prévu dans le Golfe du Lyon, à 200 kilomètres des côtes, sous 2400 mètres d'eau en pied du talus continental. Il traversera 7 à 7,5 km de sédiments représentant 23 millions d'années de dépôts jusqu'au socle.

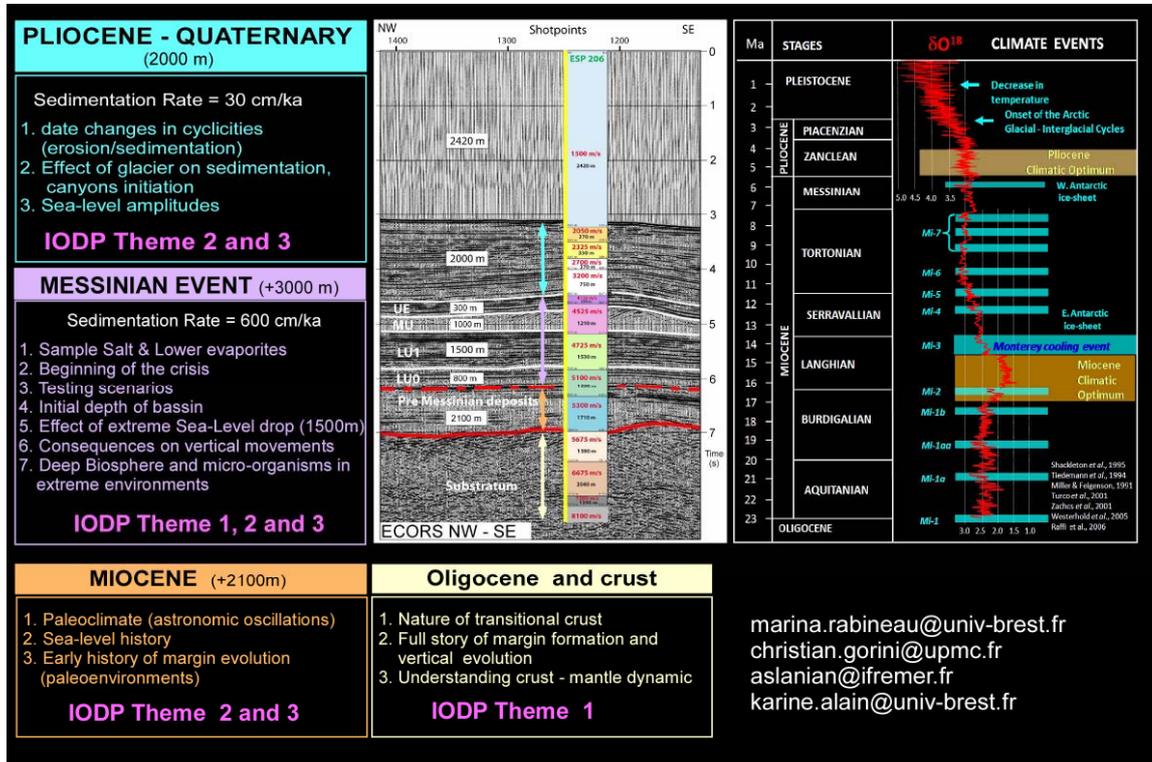


Les sédiments qui seront ainsi recueillis permettront d'analyser l'ensemble des processus aussi bien environnementaux (climatiques, sédimentologiques (liés à l'érosion), écologiques) que tectoniques qui ont encadré (antérieurement et postérieurement) l'événement extrême du Messinien, notamment :

- les variations du climat global et celles du niveau marin,
- le déroulement de l'événement extrême Messinien,



- la formation et l'évolution de marges passives,
- la biosphère profonde, c'est-à-dire la limite de la vie dans des conditions de pression, de température ou de salinité extrêmes.



Le projet GOLD a été présenté à la communauté internationale lors d'un colloque qui s'est tenu du 19 au 22 octobre 2010 au laboratoire de Banyuls sur Mer, il a regroupé 60 participants issus de 12 pays dont des représentants de 5 compagnies pétrolières (Total, Melrose, Statoil, Petrobras, Sonatrach). À la suite de ce colloque, l'équipe directrice du projet GOLD a été adoptée, Marina Rabineau du laboratoire « Domaine océanique » de Brest (CNRS/Université de Bretagne occidentale) en est la responsable. Il regroupera autour d'une très grande infrastructure une centaine de chercheurs internationaux et 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) pour un véritable challenge scientifique et technique.

*Ce projet fait partie du sous programme TerMex (Terra-mediterranean earth science experiment) du programme MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales) du CNRS.*

### Les implications du projets GOLD

En permettant de mieux comprendre le processus de genèse général des marges passives, leur évolution thermique, et la nature des terrains sous le sel, trois paramètres cruciaux dans la formation des hydrocarbures, le projet Gold devrait apporter des éléments utiles à la recherche pétrolière. De même que l'échantillonnage des séries salifères et anté-salifères offrira un potentiel pour l'étude des gisements de minéraux rares à fort potentiel économique (ex : lithium, terres-rares). Enfin, la question de l'étude de la séquestration du CO<sub>2</sub> pourra être abordée par des tests sur l'étanchéité de la couche de sel. Autant d'aspects qui concernent les recherches pour une exploitation durable des ressources naturelles.



### **AMD (Algerian Margin Drilling), un projet compagnon de Gold**

Enfin, à la suite du colloque international à Banyuls, la SONATRACH a invité les responsables du projet GOLD à considérer la faisabilité d'un forage compagnon sur la marge Algérienne. La marge algérienne possède une histoire plus complexe que celle du Golfe du Lion et certains thèmes ne peuvent y être abordés de la même façon (par exemple, la situation géographique de la marge algérienne ne permet pas la même approche pour la paléoclimatologie) mais d'autres thèmes surgissent, comme l'instrumentation du trou de forage en vue de l'étude des risques sismiques, et l'intérêt d'avoir deux forages compagnons, AMD (Algerian Margin Drilling) au sud et GOLD au nord de la méditerranée occidentale, sur la majeure partie des thèmes scientifiques est apparu clairement autant aux participants de cette réunion à Alger, qu'au comité directeur du projet GOLD, et au correspondant du JAMSTEC, institut japonais qui s'occupe du bateau foreur *Chikyu*.

### **Contact chercheur**

Marina Rabineau

Laboratoire « Domaine Océanique » (CNRS/UBO) au sein de l'Institut universitaire européen de la mer

T 02 98 49 87 28

[marina.rabineau@univ-brest.fr](mailto:marina.rabineau@univ-brest.fr)





## La paléocéanographie et la paléoclimatologie

### Les hydrocarbures des sédiments marins des marges continentales

Sur les marges continentales où s'accumulent rapidement des sédiments riches en matière organique, la dégradation des composés organiques par des processus microbiens et abiotiques (en opposition à microbien, formés sans l'intervention des microbes) conduit à la formation d'hydrocarbures dont la composition dépend de leur degré de maturation. Le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est l'hydrocarbure gazeux qui domine dans les produits de transformation microbienne de la matière organique ; le méthane est également associé aux hydrocarbures lourds qui sont produits par des réactions abiotiques au cours de l'enfouissement. Ces deux types de méthane « biogénique » et « thermogénique » peuvent donc être présents dans les sédiments jusqu'à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres sous le fond de la mer à l'état dissous, gazeux ou solide suivant leur concentration et les conditions de pression et température.

Lorsque les sédiments sont sursaturés en méthane, le méthane est piégé dans les structures cristallines des hydrates de gaz, encore appelées clathrates, qui se forment dans des conditions de haute pression et basse température, c'est-à-dire principalement dans les zones polaires et l'océan profond. Leur présence dans les sédiments océaniques avait été détectée par voie sismique pour la première fois en 1970<sup>1</sup>. Depuis cette date, la présence d'hydrates de gaz a été confirmée sur l'ensemble des marges des océans et jusqu'à des profondeurs d'eau de plus de 5000 mètres, comme dans les fosses de Nankai au Japon et du Pérou. Plusieurs expéditions ont été dédiées en partie ou totalité à l'étude des hydrates de gaz ce qui a permis d'obtenir des informations sur leur distribution, leur composition ainsi que sur les processus sédimentaires associés. Un objectif important de ces études concernait également l'évaluation des stocks de méthane potentiellement exploitables, contenus dans ces réservoirs océaniques profonds.

### La diagenèse, processus de formation des hydrocarbures

Les processus diagénétiques (ensemble des réactions qui transforment les composés inorganiques et organiques des sédiments après leur dépôt,) conduisant à la formation de méthane et à la précipitation de carbonates dans les sédiments anoxiques ont été décrits de façon synthétique en 1983<sup>2</sup>. Ces travaux ont ensuite été complétés par la découverte dans des sites variés de nouveaux exemples de carbonates diagénétiques enfouis jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur dans des sédiments océaniques riches en méthane et/ou contenant des hydrates de gaz.

La diagenèse anoxique (c'est-à-dire en l'absence d'oxygène) correspond à une succession de processus biogéochimiques et abiotiques, qui transforment les composés organiques et le méthane (ou d'autres hydrocarbures) pour produire l'alcalinité<sup>3</sup> permettant la précipitation des carbonates. Ces réactions induisent des fractionnements isotopiques très importants entre les composés carbonés réduits qui se trouvent très appauvris en  $^{13}\text{C}$  par rapport aux composés carbonés oxydés.

La caractérisation minéralogique et isotopique des carbonates diagénétiques se révèle essentielle pour connaître leurs conditions de formation comme l'illustrent les résultats obtenus récemment lors de l'expédition IODP 323 sur les carbonates diagénétiques des sédiments de la mer de Bering (Pierre et al., 2010). Sur la marge beringienne de la mer de Bering, les sédiments sont très riches en matière organique et en méthane ; ils contiennent de nombreuses intercalations de carbonates diagénétiques qui sont présentes tout au long des 750 mètres de la série sédimentaire déposée au cours du Pléistocène depuis au moins 2 Ma, ce qui démontre que leur formation a été un processus permanent pendant toute cette

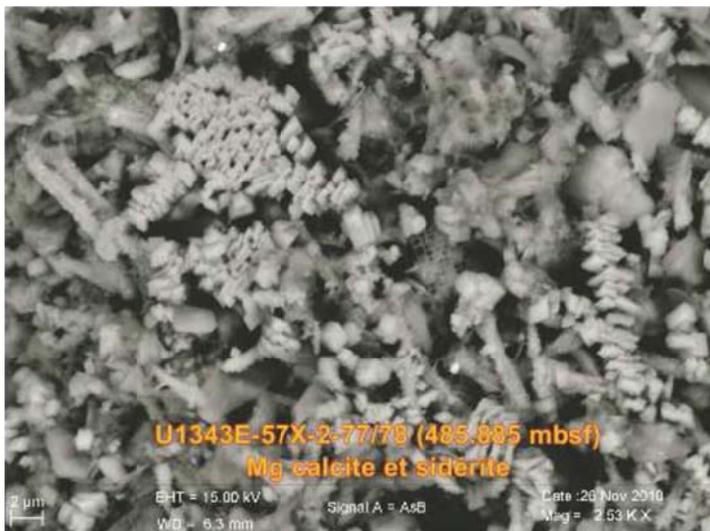
<sup>1</sup> au cours du leg 41 du DSDP sur la Blake Ridge dans l'Atlantique Ouest (Ewing and Hollister, 1972)

<sup>2</sup> grâce aux résultats du leg 76 du DSDP sur la Blake Ridge (Claypool et Threlkeld, 1983; Matsumoto, 1983)

<sup>3</sup> somme des ions carbonate et bicarbonate d'une solution



période. La grande diversité de minéralogie des carbonates (calcite magnésienne, dolomite et carbonates ferrifères) et la grande variabilité des compositions isotopiques de l'oxygène et du carbone révèlent la succession des réactions diagénétiques décrites précédemment. Dans les sédiments sub-surface où le sulfate est disponible dans les eaux interstitielles, l'oxydation anaérobie du méthane couplée à la réduction sulfato-bactérienne conduit à la précipitation de calcite magnésienne. Plus en profondeur où les eaux interstitielles sont dépourvues de sulfate, la méthanogenèse par fermentation microbienne de la matière organique produit du CO<sub>2</sub> qui est transformé en alcalinité par altération des silicates (en particulier les argiles), conduisant à la précipitation de dolomite (carbonate double de calcium et de magnésium) et de carbonates ferrifères.



*L'image ci-dessus prise en rétrodiffusion au microscope électronique à balayage montre l'association de deux phases de carbonates diagénétiques plus ou moins riches en fer. La calcite magnésienne se présente sous forme de fins cristaux fibreux allongés recouverts par de très petits cristaux de carbonate à fort contraste donc riche en fer. Les cristaux de sidérite correspondent aux petits rhomboédres (1 à 2 µm) à fort contraste. La différence de composition isotopique du carbone de ces deux types de carbonates confirme qu'ils se sont formés pendant des stades diagénétiques différents, dans la zone d'oxydation anaérobie du méthane pour la calcite et dans la zone de méthanogenèse pour la sidérite (carbonate de fer). Crédit : Omar Boudouma et Catherine Pierre*

#### Contact chercheur

Catherine Pierre

Directrice de recherche CNRS au LOCEAN (CNRS/UPMC/MNH/IRD)

T 01 44 27 51 62

[cat@locean-ipsl.upmc.fr](mailto:cat@locean-ipsl.upmc.fr)



## Les variations du niveau marin

L'impact de la hausse dramatique du niveau marin liée au réchauffement climatique global risque d'être directement ou indirectement ressenti par une grande partie de la population mondiale. Les incertitudes sur les prévisions du niveau marin pour 2100 restent cependant importantes (0,5 – 2,0 m) puisqu'elles sont basées sur des enregistrements instrumentaux qui s'étendent sur les derniers 150 ans seulement, et que la dynamique actuelle des calottes glaciaires en réponse au réchauffement climatique est mal comprise. C'est pourquoi l'une des plus importantes préoccupations des chercheurs en sciences de la Terre est d'améliorer notre connaissance du rythme et du comportement des calottes glaciaires en réponse au réchauffement climatique en reconstituant la chronologie, les amplitudes, les taux, les mécanismes et les effets des variations du niveau marin à différentes échelles de temps.

Les fluctuations du niveau marin résultent des variations du volume d'eau dans les océans ou du volume de bassins océaniques, du fait de l'interaction spatiale et temporelle complexe de processus incluant : la subsidence thermique de la lithosphère, la surcharge et la compaction des sédiments, les changements dans l'apport sédimentaire des zones côtières et dans la charge isostatique et/ou flexurale de la croûte, la redistribution de masse de la glace terrestre qui affecte le niveau de la mer en déformant le plancher océanique (à travers la déformation isostatique) et la surface des océans (à travers des changements de gravité), ainsi que divers autres mouvements tectoniques verticaux au niveau des bassins. La reconstitution de la variation du niveau marin eustatique est donc un défi considérable et nécessite la coordination de nombreuses données de puits de forage *onshore* et *offshore* représentant de multiples périodes de temps dans des contextes tectoniques et sédimentaires variés, incluant des systèmes de dépôts siliceux, carbonatés et mixtes.

Contraindre l'histoire des changements du niveau marin permet également de fournir des données directement utilisables par des chercheurs d'autres disciplines du fait des relations étroites entre l'eustasie et la croissance des calottes glaciaires et la décomposition, la nutrition et la productivité océanique, le stockage du carbone et la chimie des océans.

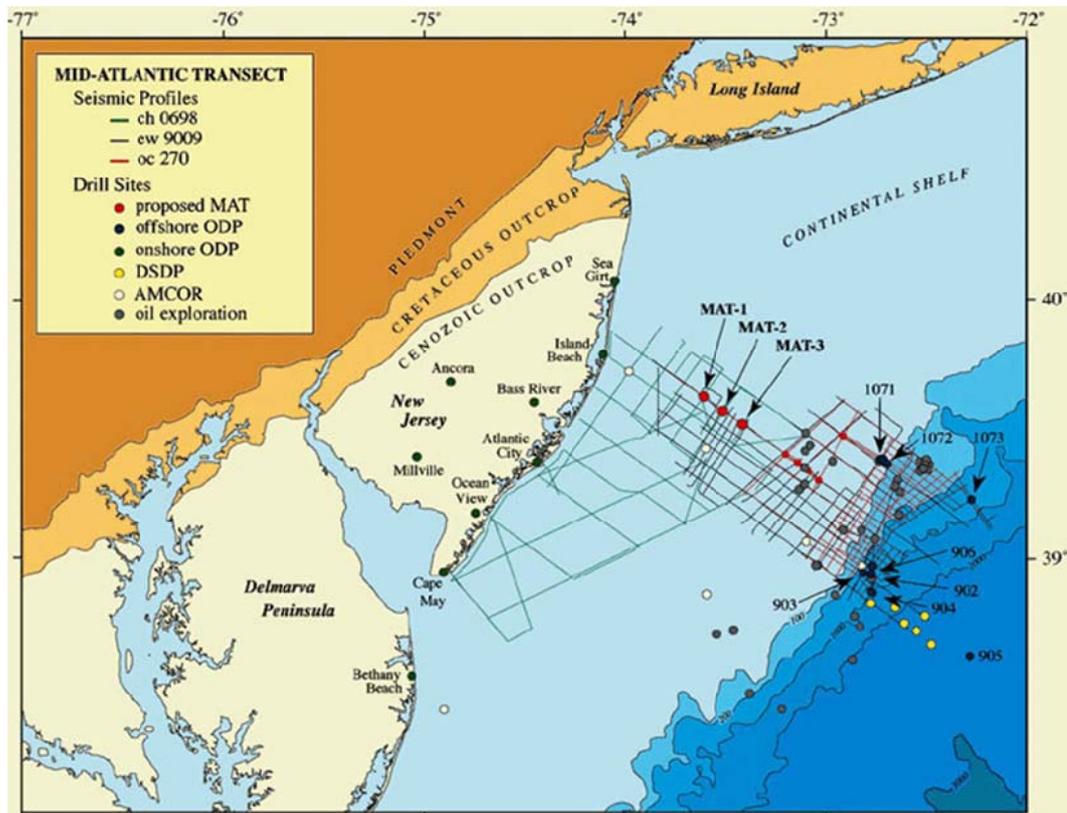
### **Les contributions d'IODP et d'ECORD aux études de la variation du niveau marin**

Durant les cinq dernières années, les contributions d'IODP et d'ECORD aux études de la variation du niveau marin se sont focalisées sur la précision de la chronologie, des amplitudes et des mécanismes des variations du niveau marin eustatique. Quatre expéditions ont été réalisées sur ce thème. Deux se sont concentrées sur la période Oligocène - Actuel au niveau de marges continentales (notamment l'expédition 313 « *New Jersey Shallow Shelf* » en avril-juillet 2009 avec Jean-Noël Proust comme co-chef de mission ECORD), les deux autres se sont focalisées sur les enregistrements haute résolution de la hausse du niveau marin lors de la dernière déglaciation par les récifs coralliens (23-6 ka), en particulier l'expédition 310 « *Tahiti Sea Level* » en octobre-novembre 2005, avec Gilbert Camoin comme co-chef de mission ECORD<sup>1</sup>.

### ***Les variations du niveau marin de l'Oligocène à l'Actuel au niveau de marges continentales***

Il s'agissait de comprendre l'importance relative des niveaux marins globaux (eustasie) à l'Oligocène et à l'Actuel par rapport à la tectonique locale et aux processus sédimentaires à partir de l'étude des ensembles sédimentaires (séquences) et de leurs discordances. Pas moins de 15 réflecteurs régionalement cartographiés ont été recoupés au niveau de plusieurs sites de forage lors de l'expédition 313, avant d'être étudiés en détail.

<sup>1</sup> Voir le communiqué de presse (28 mars 2012) : <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/2535.htm>



Location of the New Jersey/Mid Atlantic Transect with the drill sites (MAT-1 to -3) of the Expedition 313 (Mountain et al., 2006 - IODP Proposal 564-Full2).

Les sédiments collectés pendant cette expédition se sont déposés sur un plateau continental dominé par l'action des vagues et des rivières, et pendant des intervalles de dégradation de la pente du clinoforme. L'ensemble sédimentaire a été daté à l'Oligocène supérieur-Miocène moyen, à partir d'études biostratigraphiques (principalement basées sur les palynomorphes, les foraminifères et les nanofossiles calcaires) et de datations Rb/Sr effectuées sur des coquilles de mollusques et des foraminifères. Ces travaux suggèrent des variations du niveau marin d'une amplitude atteignant 60 m pendant les périodes étudiées.

### *Les enregistrements de la remontée du niveau marin lors de la dernière déglaciation par les récifs coralliens*

Les récifs coralliens sont sensibles aux changements environnementaux et aux variations du niveau marin en raison de leur dépendance à la lumière du soleil et de leurs besoins écologiques spécifiques (salinités et températures de l'eau de surface, nutriments et contenus clastiques, etc...). La datation précise des récifs coralliens par spectrométrie de masse est de première importance pour déterminer la chronologie des événements de déglaciation et donc pour comprendre les mécanismes à l'origine des cycles glaciaire - interglaciaire. Ils apportent l'enregistrement le plus détaillé et le plus direct sur les variations du niveau marin, mais ne peut être déterminé que jusqu'au Pléistocène inférieur. Les deux expéditions basées sur cette thématique (Tahiti et grande barrière d'Australie) étaient les deux premières expéditions de ce type effectuées par un programme de forage océanique scientifique avec pour principaux objectifs :

- de reconstituer la hausse du niveau marin lors de la dernière déglaciation (i.e. 23-6 ka),
- de déterminer la variabilité climatique durant cette période
- et d'évaluer l'impact des changements environnementaux et des variations du niveau marin sur le développement des récifs.

### *Niveau marin et impact sur le développement des récifs*

La nouvelle courbe pour les derniers 16 ka reconstruite à partir des âges obtenus sur des échantillons de

coraux fournit un enregistrement complet et détaillé sur la remontée du niveau de la mer pendant cette période clef de la dernière déglaciation. L'amplitude ( $16 \pm 2$  m) et la durée de l'événement Meltwater Pulse (MWP)-1A correspondant à une phase de débâcle massive des calottes de glace ont pu être déterminés : cet événement a dû se terminer avant -14300 et a très probablement débuté il y a environ 14650 années. Ceci indique une contemporanéité avec le réchauffement Bølling, suggérant une relation temporelle, et probablement causale, entre ces deux grands événements de la dernière déglaciation.

La hausse du niveau marin pendant cet événement catastrophique était donc d'environ 50 mm/an, ce qui induit inévitablement des impacts considérables sur la circulation océanique et le climat global comme le suggèrent des modélisations numériques récentes.

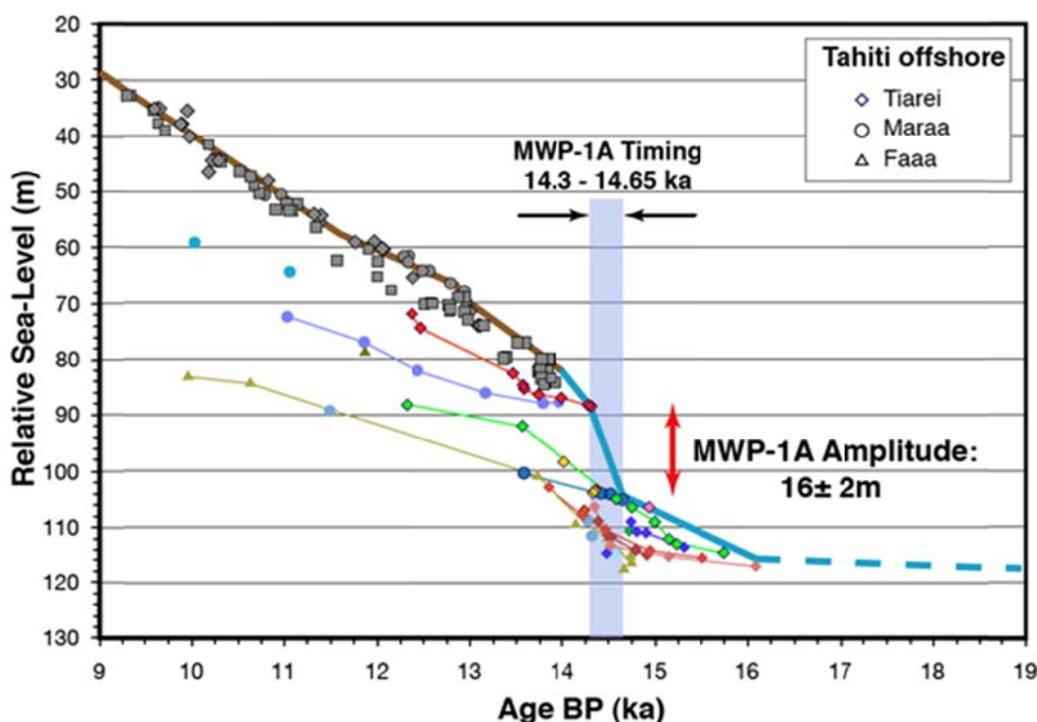


Fig. 3 – Courbe du niveau marin de Tahiti reconstruite à partir de datations U/Th sur des coraux prélevés dans des carottes forées offshore (Expédition IODP 310) et onshore au niveau de l'île de Tahiti. La courbe bleue épaisse qui prolonge la courbe marron précédemment déterminée à partir de données onshore du niveau marin indique clairement la présence de l'événement MWP-1A. (D'après Deschamps et al., *Nature*, 2012).

Aucune rupture majeure dans le développement du récif n'est observée entre 16 et 10 ka. Un ennoïement progressif et un retrait général du complexe récifal a cependant été mis en évidence dans la fenêtre de temps 14,6-13,9 ka, contemporaine du MWP-1A, ce qui laisse supposer que la croissance du récif est décalée par rapport à la hausse du niveau marin. La croissance des récifs résulte principalement de processus d'aggradation à des taux de croissance de 10 mm/an en moyenne. Cela exclut donc un impact catastrophique sur le développement du récif tel que la cessation temporaire de la croissance du récif comme précédemment déduit des enregistrements existants sur les récifs coralliens.

#### Contact chercheur

Gilbert Camoin

Directeur de recherche CNRS au Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement (CNRS/ Aix-Marseille Université/IRD/Collège de France)

T 04 42 97 15 14

[camoin@cerege.fr](mailto:camoin@cerege.fr)



## Le delta profond du Bengale, témoin de l'interaction tectonique et climat

Le projet IODP 552 s'inscrit dans la problématique des relations climat-érosion-tectonique et est destiné à reconstituer un enregistrement de l'érosion du bassin Himalayen depuis l'Oligocène (34 millions d'années). Cet enregistrement doit permettre de documenter l'initiation du soulèvement himalayen pour lequel les chercheurs ne disposent que de très peu d'indices avant 20 millions d'années, de documenter des taux d'érosion continus et fiables sur les 20 derniers millions d'années et de comprendre certains processus de transport sédimentaires dans les méga-cônes sédimentaires. Les données permettront de tester des modèles d'évolution de la chaîne himalayenne en fonction de son contexte tectonique et de ses interactions superficielles avec la mousson asiatique ou le cycle global du carbone.

Initié en 1999, ce projet est complet depuis les derniers repérages réalisés en 2006 dans le cadre de la mission RV-Sonne SO-188. Un atelier de synthèse sur les propositions IODP dans l'océan Indien s'est tenu à Goa fin 2011 et a confirmé l'intérêt de la communauté pour ce projet. D'autres projets associés à cette thématique sont programmés en mer de Chine. Enfin un atelier Magellan est prévu en septembre 2012 avec des équipes de l'Université de Brême pour élaborer une proposition de forage dans le delta sous-marin du Gange-Brahmapoutre au sud du Bangladesh. Il s'agit de produire un enregistrement à très haute résolution temporelle de l'érosion pour documenter au sud du Bangladesh les relations entre climat, érosion et subsidence (affaissement progressif d'une partie de l'écorce terrestre). Ce volet « court terme » est particulièrement important pour comprendre les processus qui contrôlent la stabilité du Bangladesh et est très complémentaire des approches long terme.

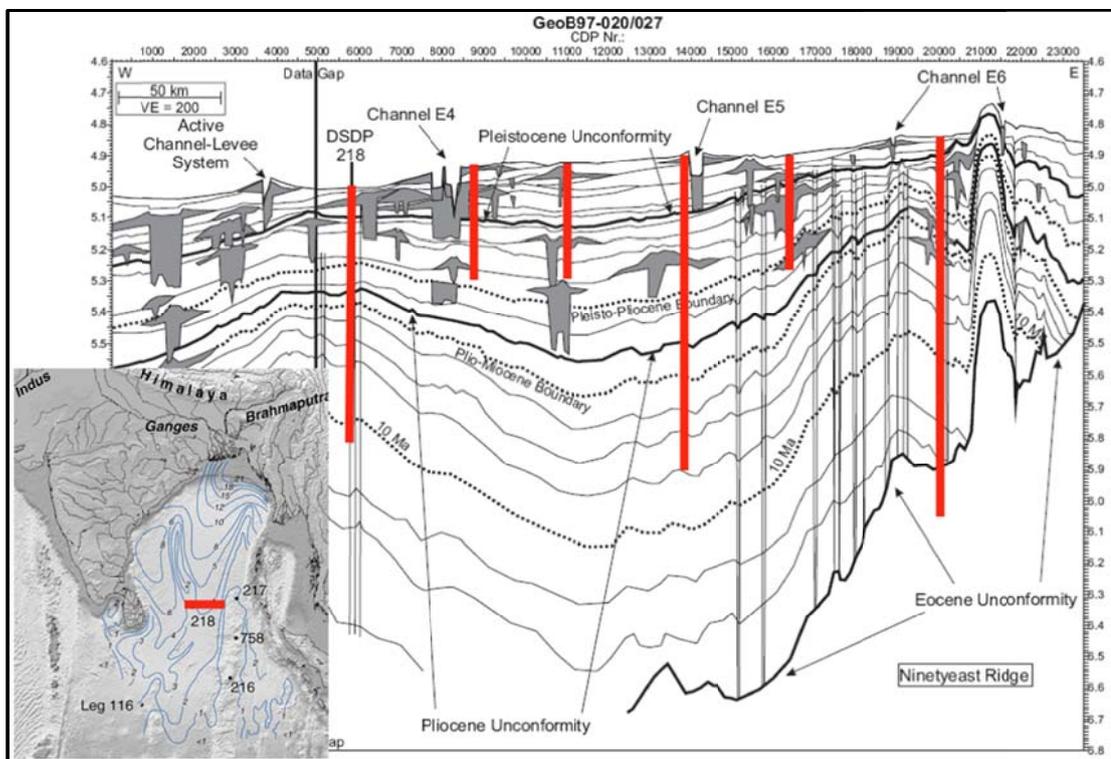


Fig 1 Coupe sismique interprétée Est-Ouest du cône du Bengale (Bangladesh). En rouge le transect de six forages du projet IODP 552 à travers le cône du Bengale à 8°N. Le forage le plus oriental doit permettre d'atteindre des sédiments allant jusqu'à 35-40 millions d'années. Les lentilles grises figurent les principaux chenaux de transport sédimentaires (Schwenck & Spiess, 2009, SEPM Special Publication No. 92)



En France, les travaux récents dans ce domaine portent essentiellement sur des approches préparatoires pour comprendre les processus de transfert sédimentaires depuis les zones d'érosion actives en Himalaya jusqu'au bassin océanique. Il s'agit de calibrer des traceurs minéralogiques et géochimiques permettant de remonter aux sources érodées, aux vitesses d'érosion et aux conditions environnementales régnant dans le bassin. Ces traceurs pourront être appliqués sur ce type de sédiments pour comprendre les liens entre les conditions climatiques et les processus d'érosion. Ces travaux ont permis en particulier de comprendre et de quantifier les flux de carbone organiques et inorganiques associés à l'érosion actuelle de l'Himalaya à partir des sédiments de rivières. Ils montrent que l'érosion himalayenne agit comme un puits de carbone significatif à l'échelle globale pouvant agir sur le cycle du carbone à l'échelle des temps géologiques.

Des approches parallèles ont permis de tester des traceurs quantitatifs des taux d'érosion et de localisation des zones d'érosion. Enfin des enregistrements sédimentaires en mer et dans la plaine du Gange sont étudiés pour reconstituer l'évolution de l'érosion au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (actuel à -25000 ans).

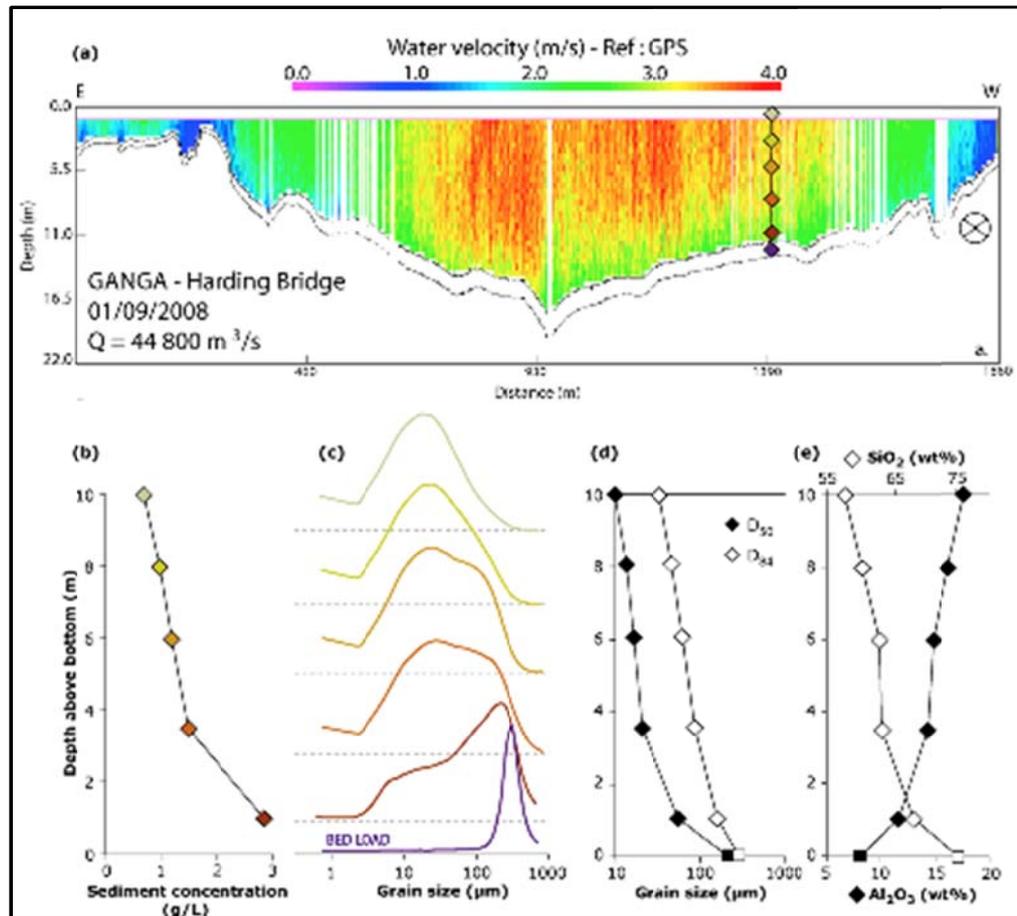


Fig 2 : Etude des sédiments transportés par le Gange:

(a) image des vitesses d'écoulement de l'eau dans une section du Gange au Bangladesh, obtenue avec une sonde acoustique.

Localement, sur une verticale, un profil d'échantillonnage de matière en suspension a été réalisé :

(b) Profil des concentrations,

(c) Spectres granulométriques aux différentes profondeurs d'échantillonnage,

(d) Profil des diamètres de grain médian (D50) et maximum (D84),

(e) Profil des concentrations en SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la matière en suspension. Cet échantillonnage illustre la ségrégation granulométrique, minéralogique et géochimique qui existe entre le fond et la surface d'une tranche d'eau. L'intégration de ces variations dans le temps et l'espace ont permis d'extrapoler pour le Gange les caractéristiques moyennes des sédiments transportés. (Lupker et al. 2011 JGR)

#### Contact chercheur

Christian France-Lanord

Directeur de recherche CNRS au CRPG (CNRS)

T 03 83 59 42 20

[cfl@crpg.cnrs-nancy.fr](mailto:cfl@crpg.cnrs-nancy.fr)





## La biosphère profonde

L'expédition IODP 336 a mis en œuvre avec succès un observatoire sous-marin couplant microbiologie, géochimie et hydrologie sur la croûte océanique jeune (8 Ma) à 22°45'N et 46°05'W, au niveau du bassin de North Pond situé dans l'océan Atlantique. Les sites de forage sont localisés dans ce bassin sur le flanc Ouest de la dorsale médio-atlantique à une profondeur de 4 414 à 4 483 mètres (Voir figures 1 et 2). North Pond est un bassin sédimentaire isolé d'une largeur de 8 km sur une longueur de 15 km environ, délimité à l'est et à l'ouest par un relief dont la hauteur peut atteindre 2 000 mètres. Les précédentes campagnes de forage et d'exploration ont mis en évidence une circulation active d'eau de mer dans la section volcanique sous la couche sédimentaire, dont l'épaisseur maximale est de 300 mètres. Les études géothermiques (température, flux de chaleur) ont montré que la zone d'infiltration de l'eau de mer se produit principalement dans la partie sud-est du bassin et est dirigée vers le nord-ouest. Cette expédition vise principalement à **comprendre comment cette circulation de fluide affecte les processus microbiens et géochimiques au sein de la section superficielle de la croûte océanique jeune.**

Cette mission s'attache à étudier la nature des communautés microbiennes du plancher océanique, à la fois au niveau des basaltes altérés et des sédiments océaniques. Il s'agit de tester l'hypothèse selon laquelle les bactéries jouent un rôle actif dans l'altération de la croûte océanique, et dans le même temps, de savoir dans quelle mesure la circulation des fluides et la géochimie influencent les structures des communautés microbiennes. La dispersion, la diversité et l'activité des micro-organismes dans les sédiments du plancher océanique ainsi que la biogéographie (i.e. la distribution géographique des espèces) sont également étudiés.

Au niveau opérationnel, l'expédition a permis l'installation de trois observatoires de type CORKs<sup>1</sup> dans les puits de forage afin d'initier le suivi à long terme de la microbiologie, de la géochimie et de l'hydrologie. Ces observatoires permettront à terme de mesurer les paramètres physico-chimiques dans le temps et d'étudier les processus *in situ* une fois que les perturbations et contaminations induites par le forage dissipées. Un échantillonnage systématique a été réalisé sur les carottes de roches volcaniques et de sédiments provenant des sites de forages instrumentés avec le système CORK afin de mener les études microbiologiques, pétrologiques et géochimiques après la mission.

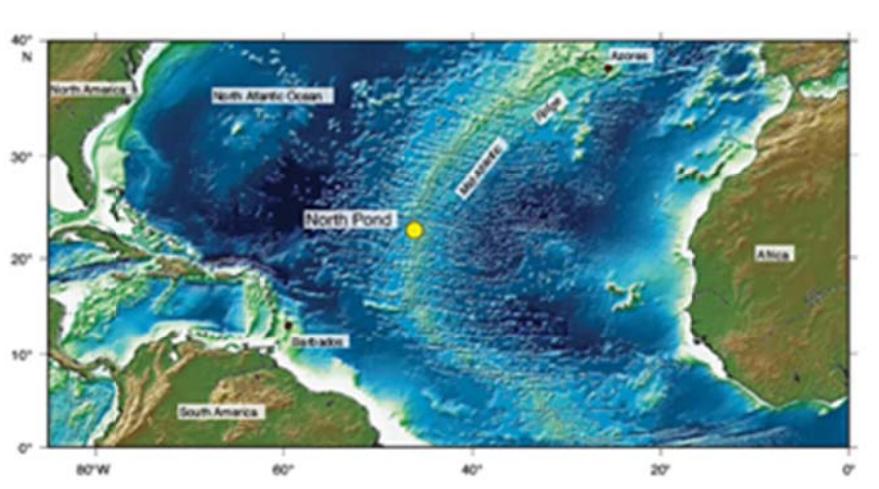


Figure 1: Localisation de la zone de North Pond sur le flanc Ouest de la Dorsale Médio-Atlantique.  
Crédit : Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., for the Integrated Ocean Drilling Program (Expedition 336 Preliminary Report)

<sup>1</sup> CORK : Circulation Obviation Retrofit Kit. Un système CORK est un observatoire de fond de mer qui permet des mesures et expérimentations in situ sur du long terme. Un CORK est placé en au haut des forages et se prolonge par une chaîne d'équipement à l'intérieur du forage.

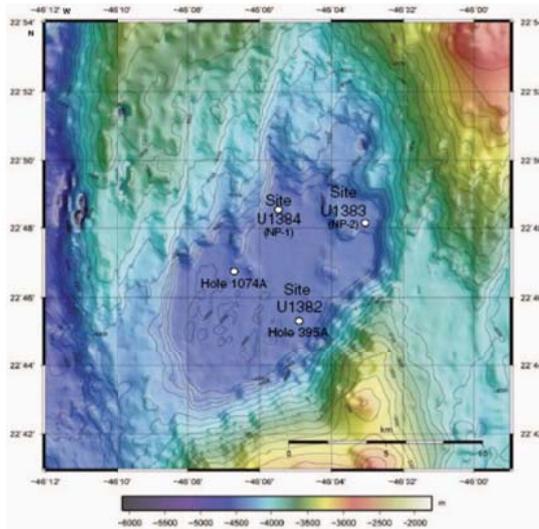


Figure 2: Carte bathymétrique du North Pond indiquant la localisation des forages DSDP 395A et ODP 1074A, et les trois sites de forage de la mission IODP336 (U1382, U1383 et U1384). Les données bathymétriques sont issues de Villinger et al. (2010). Crédit: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., for the Integrated Ocean Drilling Program (Expedition 336 Preliminary Report)

En plus des outils traditionnels de diagrapie, un nouvel outil a été utilisé pour la première fois. Intitulé « Deep Exploration Biosphere Investigative tool », cet outil a été spécifiquement développé pour la détection de la vie microbienne *in situ* dans les puits de forage du plancher océanique.

Des avancées majeures dans l'étude des processus biogéochimiques des flancs de dorsale sont attendues grâce aux observatoires de type CORK. Les nouvelles générations de CORK instrumentés permettent maintenant de mener des études multidisciplinaires en hydrogéologie, géochimie et microbiologie, mais aussi de réaliser des expérimentations *in situ* sous le plancher océanique. Lors de l'expédition 336, deux observatoires fonctionnels ont été installés dans les puits U1382A et U1383C. Des outils d'échantillonnage et de mesure ont également été placés dans un puits préexistant (395A). Le CORK du puits U1382A a été configuré pour isoler et échantillonner une seule zone de la partie supérieure de la croûte océanique, comprise entre 90 et 210 mètres de profondeur. En revanche, le CORK du puits U1383C est à trois niveaux, ce qui permet l'échantillonnage d'une première zone constituée de coulées basaltiques avec du calcaire intercalé (entre 70 et 146 mètres de profondeur), puis d'une zone de coulées basaltiques avec de nombreux niveaux à hyaloclastites (située entre 146 et 200 mètres de profondeur), et enfin d'une zone plus profonde (entre 200 et 331,5 mètres de profondeur), composée de laves plus massives.

### Un site de premier ordre pour une recherche interdisciplinaire

L'altération de la croûte océanique par l'eau de mer est l'un des processus les plus importants contrôlant la chimie des océans et la formation des dépôts métallifères des grands fonds marins. Récemment, le rôle potentiel des micro-organismes endolithiques (vivant à l'intérieur ou associés à un substrat minéral) dans l'altération basse température de la croûte océanique a été identifié. Cependant, l'étude de la biosphère profonde au sein de la croûte océanique volcanique est actuellement limitée par rapport aux études menées dans sédiments marins profonds.

Afin de mieux comprendre l'importance globale de la biosphère profonde et son implication dans les réactions eau-roches, une gamme d'expériences alliant microbiologie, biogéochimie et hydrologie vont être conduites sur plusieurs années sur le site de North Pond. Cette expédition permettra, **pour la première fois, de mettre en pratique plusieurs nouveaux traceurs et outils biogéochimiques pour étudier une biosphère profonde active dans un contexte de flanc de dorsale de basse température.** Les équipes françaises vont réaliser des approches combinant le marquage moléculaire, l'étude de la signature en isotope stable (oxygène, carbone, soufre et fer) et la minéralogie des phases secondaires (ex. carbonate, pyrite, argile, oxyhydroxydes de fer). L'objectif étant de localiser spécifiquement au sein des minéraux les



cellules individuelles, afin d'enquêter sur leur affiliation phylogénétique, tout en caractérisant les microhabitats, les interactions passées et les sous-produits métaboliques (*i.e.* biominéralisations). Ce jeu de données sera interprété dans le cadre des études de diversité et d'activité microbienne réalisées sur les mêmes échantillons. Grâce à cette approche, les chercheurs espèrent mieux comprendre l'étendue de la colonisation microbienne en profondeur, sa diversité, son activité, ainsi que son effet dans la spéciation et la distribution des traceurs chimiques dans la croûte océanique.

#### **Contact chercheur**

Olivier Rouxel

Chercheur Ifremer au laboratoire « Géochimie et métallogénie » du département de Ressources physiques et écosystèmes de fond de mer (REM)

T 02 29 00 85 41

[olivier.rouxel@ifremer.fr](mailto:olivier.rouxel@ifremer.fr)





## Tremblements de terre, changements climatiques et rivières de sables : six millions d'années d'histoire de la Terre au débouché du détroit de Gibraltar

L'expédition IODP 339 « Mediterranean Outflow » (Veine d'eau méditerranéenne) s'est achevée le 17 janvier 2012. Huit mille mètres de puits ont été forés dans le plancher océanique au niveau du Golfe de Cadix et sur la marge continentale à l'ouest du Portugal et 5500 mètres ont été récupérés. Cette expédition a apporté des réponses aux questions soulevées ainsi que des résultats scientifiques totalement inattendus.

### **Comment le détroit de Gibraltar a servi de barrage puis de passerelle entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée durant les 6 derniers millions d'années ?**

Les chercheurs sont parvenus à identifier la trace d'un écoulement méditerranéen profond et puissant à travers le détroit de Gibraltar qui a débuté il y a plus de 4,5 millions d'années. Ils ont également mis en évidence le rôle joué par des épisodes tectoniques à la jonction entre les plaques Afrique et Europe. Ce sont ceux-ci qui ont fermé la connexion alors existante entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée il y a un peu plus de 6 millions d'années, puis l'a ré-ouvert environ un million d'années plus tard. Ce même forçage tectonique a provoqué des épisodes successifs de subsidence de bassins ponctués par des périodes de surrection et de formation de volcans de boue sur le fond océanique.

Les carottes prélevées conservent l'enregistrement de ces processus. Les glissements sous-marins, les coulées de débris et les dépôts massifs de sables sous forme d'avalanche de sédiments, marquent le moment où les plaques tectoniques sont entrées en collision, ce qui s'accompagna d'un nombre accru de tremblements de Terre et de tsunamis. Au niveau de 4 sites, parmi les 7 forés, une portion majeure de l'enregistrement géologique fait lacune dans les carottes de sédiments – et des évidences d'absence de sédimentation s'observent au niveau des autres sites. La surrection tectonique régionale a confiné le flux d'eau de mer profond et a créé un courant si puissant qu'il a érodé le fond océanique. Et, lorsque la phase tectonique a diminué, ces mêmes courants de fond ont diminués en intensité mais étaient toujours suffisamment actifs pour déposer d'immenses dunes de vase et de sable.

### **Ré-évaluation du modèle de dépôt des contourites pour la prospection pétrolière**

Quelles sont la nature et les propriétés des vases et des sables déposés par ces courants de fond ? Ces dépôts sédimentaires sont appelés des *contourites* car les courants qui les déposent suivent de très près les contours du fond océanique. Le Golfe de Cadix a d'ailleurs été considéré comme le premier « laboratoire d'étude des contourites » au monde, mais il n'avait encore jamais été foré à des fins scientifiques, jusqu'à aujourd'hui. Les chercheurs ont prélevé des kilomètres de carottes contenant des contourites, et disposent désormais d'un meilleur aperçu de leurs caractéristiques. Ils ont observé le modèle de dépôt caractéristique des contourites sous une vitesse de flux croissante puis décroissante. Les scientifiques ont également trouvé beaucoup plus de « *sable* » que prévu – remplissant les chenaux contouritiques, soit sous forme d'épaisses couches au sein des gigantesques dunes de vase, soit sous forme d'un immense banc de sable s'étendant sur 100 km au niveau du détroit de Gibraltar. Tout ceci témoigne de la grande force, de la vitesse élevée et de la longue durée d'action de ces courants de fond qui sont dus à l'écoulement de la veine d'eau méditerranéenne.

Les chercheurs ont pu forer ce banc sur 230 mètres : c'était suffisant pour proposer un nouveau paradigme sur la recherche de réservoirs profonds adaptés au pétrole et au gaz. L'épaisseur, l'étendue et les propriétés de ces *sables contouritiques* font d'eux une cible idéale pour de futures prospections, dans des zones où ils sont enfouis assez profondément pour permettre le piégeage des hydrocarbures.



### Déchiffrer le code du climat

Le premier site de forage, sur la marge ouest du Portugal a été totalement consacré à l'obtention d'un enregistrement sédimentaire marin le plus complet possible sur les changements climatiques des derniers 1,5 millions d'années. Ceci permettra de suivre les traces des derniers âges glaciaires majeurs de l'histoire récente de la Terre, et d'apporter une nouvelle archive marine à travers des sédiments océaniques non perturbés afin de la comparer d'une part avec les enregistrements des carottes de glaces des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, et d'autre part, avec de nombreux enregistrements terrestres. Les analyses réalisées à bord du *Joides Resolution* ont déjà révélé des évidences de cycles climatiques. Plusieurs mois, même plusieurs années, de recherches assidues à terre sont maintenant nécessaires pour décoder correctement les signaux des changements climatiques du passé et documenter les périodes de changement très rapide comparables au réchauffement global que nous vivons actuellement.

Par contre, les chercheurs ont été surpris par le fait que les immenses dunes de vase et de sable contouritiques ensuite forées dans le Golfe de Cadix montrent *un* signal climatique semblable. Il s'agit en réalité d'un signal plus étendu puisque les taux de sédimentation au niveau des accumulations de contourites étaient 3 à 6 fois plus importants au niveau du Golfe de Cadix qu'au niveau de la marge Portugaise. Ceci permettra un échantillonnage plus détaillé et, fournira des données complémentaires sur les changements climatiques. Déchiffrer le code du climat en utilisant les contourites sera plus difficile qu'à partir de sédiments ordinaires puisque ces dépôts sont constitués d'un mélange de sédiments issus de sources variées. Les océans et le climat sont inextricablement liés. Il semble qu'il y ait un signal irréprouvable de cette connexion dans les sédiments contouritiques. C'est ce que les chercheurs s'attèleront à expliquer dans des recherches futures.

### Contacts chercheur

Maria-Fernanda Sanchez-Goni

Laboratoire "Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux" (Ecole Pratique des Hautes Etudes/CNRS/Universités Bordeaux 1 et 4)

T 05 40 00 83 84

[mf.sanchezgoni@epoc.u-bordeaux1.fr](mailto:mf.sanchezgoni@epoc.u-bordeaux1.fr)

Emmanuelle Ducassou

Laboratoire "Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux" (Ecole Pratique des Hautes Etudes/CNRS/Universités Bordeaux 1 et 4)

T 05 40 00 88 45

[e.ducassou@epoc.u-bordeaux1.fr](mailto:e.ducassou@epoc.u-bordeaux1.fr)



## Laboratoires impliqués dans les programmes d'expédition IODP

- **Biogéosciences** – CNRS / Univ. Bourgogne / EHESS / AgroSup Dijon - Dijon
- **Centre International de Valbonne**
- **Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE)** – CNRS / Aix-Marseille Université / IRD / Collège de France - Aix en Provence
- **Chrono-Environnement** - Univ. Franche-Comté / CNRS - Besançon
- **Collège Jean Vilar** - Saint Sever, Calvados
- **Collège Marguerite de Navarre** - Pau
- **Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG)** – CNRS - Nancy
- **Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC)** - CNRS, Univ. Bordeaux I-Talence
- **Laboratoire Géosciences et Environnement Cergy (GEC)** - Univ. Cergy-Pontoise
- **Géosciences Montpellier** – CNRS / Univ. Montpellier II - Montpellier
- **Géosciences Rennes** – CNRS / Univ. Rennes I, Rennes
- **Géosciences Réunion** – IPGP / Univ. Réunion, Saint-Denis
- **Géosystèmes** – CNRS / Univ. Lille I / Univ Picardie Jules Verne - Villeneuve d'Ascq
- **Géosciences Environnement Toulouse (GET)** – CNRS / UPS / IRD - Toulouse
- **Géologie des Systèmes Carbonatés (GSC)** – CNRS / Univ. Provence - Marseille
- **Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER)** - Plouzané
- **Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC)** – CNRS / UPMC / IRD / IPGP / Univ Paris 7 - Paris
- **Institut de Physique du Globe, Paris IPGP** : CNRS / Univ. Paris Diderot / IPGP
- **Institut de Recherche pour le Développement (IRD)** - Nouméa
- **Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP)** – CNRS / UPMC -Paris
- **Institut des Sciences de la Terre (ISTerre)** – CNRS / Univ. Joseph Fourier / IRD / Labo Ponts et Chaussés / Univ. de Savoie
- **Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)** – CNRS / Univ. Orléans / BRGM - Orléans
- **Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM)** – CNRS / UBO - Brest
- **Lab. de Géologie** – UPJV - Amiens
- **Lab. Géologie** – CNRS / ENS - Paris
- **Lab. Géologie, MNHM, Paris**



- Lab. Pétrologie Magmatique, Univ. Aix-Marseille III
- Lab. Pierre Süe-DRECAM (IRAMIS) – CEA / CNRS / Ministère de la culture - Gif sur Yvette
- LaRGe, -UAG- Pointe à Pitre, Guadeloupe
- Laboratoire d'Océanographie et du Climat - Expérimentations et Approches Numériques (LOCEAN) – CNRS / UPMC / MNHN / IRD - Paris
- Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (LSCE) – CNRS / CEA / UVSQ - Gif-sur-Yvette
- Lycée Alain Chartier, Bayeux, Calvados