

Jouvence du Marion Dufresne

Éléments de bilan et de prospectives scientifiques

Réflexion coordonnée par Jérôme Dymont

Rédaction coordonnée par Stéphane Blain
Préambule

Mandat et méthode de travail

Le Conseil d’Orientation Stratégique et Scientifique (COSS) de la flotte océanographique française lors de sa réunion inaugurale en Janvier 2012 avait donné mission à Jérôme Dymont

de conduire et d'animer un groupe de travail sur la prospective d'utilisation scientifique du Marion Dufresne sur les vingt prochaines années.

Ce travail devait recenser et analyser le besoin scientifique des différentes communautés scientifiques et les évolutions perçues par elles du fait des spécificités du navire : grande capacité d'hébergement permettant la mise en œuvre de campagnes pluridisciplinaires incluant la biodiversité, le carottier géant CALYPSO, la possibilité de navigation dans l'océan Austral.

Les scénarios de réponse de faisabilité devaient être laissés ouverts puisqu'ils sont du ressort du comité directeur de l'UMS.

Le travail qui a donné lieu à ce rapport s'est déroulé en deux temps.

1) Une phase de consultation de la communauté réalisée au sein d'un groupe de travail animé par Jérôme Dymont. Ce groupe de travail formel constitué de 15 membres rassemblant toutes les spécialités impliquées (tableau ci-dessous) à fait remonter les besoins. Ceux-ci ont été synthétisés et discutés au cours de deux réunions. Une réunion de l'ensemble du groupe le 23 mars 2012 et une réunion d'un sous-groupe de 12 membres sur le carottage le 28 mars

Jérôme Dymont (géosciences) (coordinateur réflexion)	IPGP, Paris et CNRS-INSU
Christine Deplus (gravimétrie, bathymétrie)	IPGP, Paris
Daniel Sauter (bathymétrie, magnétisme)	UdS, Strasbourg
Fraucke Klingelhoefer (sismique)	IFREMER, Brest
Christophe Hémond (prélèvement de roches)	UBO, Brest
Jean-François Bourillet (sédimentologie)	IFREMER, Brest
Franck Bassinot (paléocéanographie)	LSCE, Gif/Yvette
Xavier Crosta (paléocéanographie)	EPOC, Bordeaux
Stéphane Blain (océanographie) (coordinateur rédaction)	UPMC, Banyuls
Jérôme Vialard (océanographie)	LOCEAN, Paris
Laurent Testut (observatoires)	LEGOS, Toulouse
Nadia Ameziane (biologie)	MNHN, Paris
Marc Trousselier (biologie)	UM2, Montpellier et CNRS-INEE
Yves Cherel (biologie)	CEBC, Chizé
Philippe Koubbi (biologie)	LOV, Villefranche sur Mer

2) Une phase de rédaction coordonnée par Stéphane Blain avec la participation de Nadia Améziane, Franck Bassinot, Jérôme Dymont et Christophe Hémond.

Le rapport mentionne, outre le travail de prospective scientifique demandé, des éléments de bilan scientifique. Ce bilan n'est pas un bilan exhaustif mais une illustration du rôle majeur joué par le Marion Dufresne dans l'obtention de résultats qui ont permis à la communauté scientifique française de se situer au meilleur niveau international pendant les vingt dernières années. Ce bilan inclut également les difficultés opérationnelles qui ont pu survenir durant cette période. C'est sur la base à la fois de ces constats et des évolutions des thématiques et des outils de recherche prévisibles pour les vingt prochaines années qu'ont été bâties les perspectives. Celles-ci débouchent sur une liste de souhaits d'aménagement techniques proposée par la communauté scientifique. Cette liste est présentée sans degré de priorité et sans considération sur la faisabilité du point de vue technique ou sur les coûts.

Suite à ce travail, la communauté scientifique reste disponible, notamment au travers des représentants ayant rédigé ce rapport, pour poursuivre le dialogue avec les différentes instances qui ont en charge la jouvence du Marion Dufresne.

Bilan 1995-2013

1 Eléments de bilan scientifique.

Remarques préliminaires :

- Les éléments de bilan scientifique sont présentés sous formes disciplinaires. Toutefois cette présentation ne doit pas masquer un des atouts majeurs du Marion Dufresne qui est la mise en œuvre de travaux pluridisciplinaires. Ceux-ci sont mis en avant au sein des différentes sections.

- le Marion Dufresne n'a pas été utilisé par les biologistes marins (autres que les planctonologistes) à cause de l'impossibilité d'utiliser des engins de capture adaptés alors que tous les navires scientifiques étrangers travaillant en zone subantarctique sont capables de mener de telles campagnes. Il n'y a donc pas de bilan de cette communauté, qui a en revanche contribué à la prospective.

1.1 Physique, biogéochimie, biologie.

Au cours de ces 18 ans, une dizaine de grandes campagnes ont été réalisées dans ce domaine. Elles constituent pour une large part des contributions à des projets qui ont reposé sur plusieurs campagnes lourdes (un ou plusieurs legs) associées à des opérations de plus faible envergure, par exemple relevé de mouillage, réalisées dans le cadre de valorisation de transit.

Du fait du positionnement privilégié du Marion Dufresne dans l'Océan Indien, et de la disponibilité d'autres navires de la flotte française ou des flottes étrangères dans d'autres régions océaniques, les recherches menées en océanographie physique, biogéochimie et biologie à bord du Marion Dufresne ont principalement été focalisées sur le secteur indien de l'Océan Austral (au sud de 30°S).

Les grandes questions scientifiques traitées concernaient.

- Le rôle de l'océan Austral dans le système climatique.

- La circulation océanique dans cet océan.

- Le fonctionnement de la pompe biologique de CO₂ et des cycles biogéochimiques.

- Les échanges air/mer.

Ces questions ont été abordées par deux types de projets : des campagnes océanographiques dédiées et des observatoires dont des exemples significatifs sont présentés ci-après.

Les campagnes océanographiques :

Le projet ANTARES était un projet piloté par la communauté française dans le cadre du programme international JGOFS et plus particulièrement de sa composante Southern Ocean-JGOFS. Ce projet avait été amorcé avec le Marion Dufresne 1 et s'est poursuivi avec la Marion Dufresne 2 (Campagnes ANTARES3 et ANTARES4, et la campagne de récupération de mouillage TRAPANTAR). Les campagnes ANTARES ont initié l'utilisation du Marion Dufresne comme grande plateforme d'études pluridisciplinaires physique-biogéochimie-biologie dans l'océan austral. L'objectif d'ANTARES était d'étudier le couplage entre l'océanographie physique et les flux des principaux éléments chimiques dans différents environnements (zones frontales, zone marginale des glaces, plateau de Kerguelen). ANTARES s'est intéressé à tous les compartiments de la colonne d'eau mais aussi aux échanges à l'interface air-mer et mer-sédiment. La moisson de résultats scientifiques a été impressionnante avec l'édition de plusieurs volumes spéciaux. Un des résultats majeurs a été de résoudre le paradoxe de l'opale dans l'océan austral. Ceci a été possible en combinant les données issues de plusieurs campagnes ainsi que celles provenant des mouillages de pièges à particules. (Pondaven et al. 2000 Nature, Figure 1).

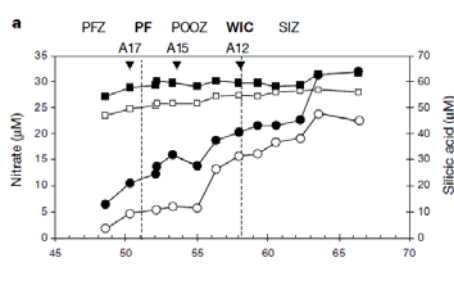


Figure 1a : Distributions comparée des concentrations en nitrates et silicates mesurées pendant les campagnes ANTARES 2 et 3.

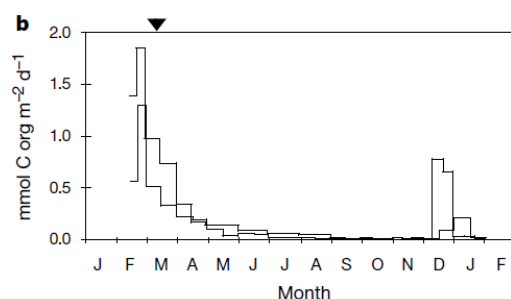


Figure 1b : Flux de carbone mesurés lors du programme ANTARES 3.

Le projet KEOPS dont l'exploitation est encore en cours a réalisé deux grandes campagnes océanographiques (KEOPS1(2005), KEOPS2(2011)) au large des îles Kerguelen. Ces campagnes ont été complétées par 3 valorisations de transit pour la récupération de mouillages instrumentés, courantomètres et pièges à particules). KEOPS a amplifié le caractère pluridisciplinaire des campagnes initié par ANTARES. Les équipes scientifiques embarquées rassemblaient une cinquantaine de scientifiques avec une très forte composante internationale. KEOPS a nécessité un nombre d'opérations à la mer qui par leur nombre et leur diversité n'avaient jamais été atteint. Ceci n'a pu être possible que grâce aux capacités d'accueil du Marion Dufresne et à sa capacité à opérer dans des conditions météorologiques difficiles.

L'objectif général du projet KEOPS est d'étudier le fonctionnement de la pompe biologique de CO₂ dans l'océan austral. En particuliers KEOPS avait pour objectif de résoudre la question suivante : Un ajout de fer permet-il d'augmenter l'efficacité de la pompe biologique de CO₂ dans l'océan austral ? La stratégie qui a été utilisée était différente de celle des fertilisations artificielles puisqu'elle reposait sur l'étude d'un site où la pompe biologique semblait naturellement active dans un environnement HNLC. Ce site est le plateau de Kerguelen où un large bloom de phytoplancton est observé annuellement, contrastant avec les eaux pauvres environnantes (figure 2).

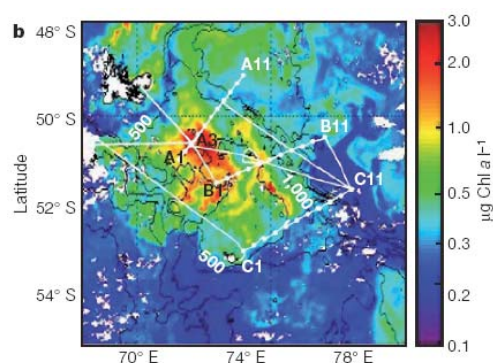


Figure 2 : Image satellite : en rouge les zones riches en chlorophylle (Blain et al. 2007)

Le premier objectif de KEOPS était de démontrer que cette augmentation de l'activité biologique était due à une fertilisation naturelle en fer des eaux de surface.

Le second objectif était d'étudier l'impact de cette fertilisation sur l'écosystème et les conséquences sur les cycles biogéochimiques en particuliers celui du carbone, ceci en comparant la zone fertilisée et la zone non fertilisée.

Un résultat majeur de KEOPS1 a été de prouver que la fertilisation naturelle de l'océan austral induit une augmentation de la pompe biologique de CO₂ et que l'efficacité du processus naturel est bien supérieure à ce qui avait pu être obtenu lors d'expériences de fertilisations artificielles (Blain et al. Nature 2007). KEOPS1 a donné lieu à plus de 50 publications scientifiques et a servi de matière à la soutenance de 10 thèses.

Les objectifs de KEOPS2 étaient essentiellement focalisés sur les questions qui avaient été incomplètement résolues pendant KEOPS1 ainsi que sur les nouvelles hypothèses qui avaient été générées. Du point de vue opérationnel KEOPS2 a marqué l'arrivée de la définition de la stratégie d'échantillonnage en quasi temps réels, ce qui nécessitait le transfert d'important flux de données vers le Marion Dufresne. Les données de KEOPS2 sont encore en cours d'exploitation mais d'ores et déjà une cinquantaine de manuscrits sont en préparation. Les données sont également utilisées dans le cadre de 11 thèses.

L'année polaire internationale a servi de cadre à plusieurs campagnes océanographiques réalisées sur la Marion Dufresne. Le projet BONUS GOOD HOPE a été une campagne pluridisciplinaire du même type que celles conduites dans les projets ANTARES et KEOPS. BONUS GOOD HOPE s'est focalisé sur la zone de jonction entre le bassin atlantique et indien de l'océan austral. Le projet visait à mieux comprendre les échanges et la ventilation des masses d'eau, moteurs du retournement méridien global, ainsi que les cycles biogéochimiques dans l'océan Austral. Ces paramètres ont tous un impact avéré sur la stabilité du climat terrestre. En particulier, le régime océanique Austral au sud de l'Afrique du Sud joue un rôle primordial dans la circulation globale des eaux, ainsi que dans le transport et la redistribution de chaleur, de sels, de nutritifs et du dioxyde de carbone anthropogénique dans les autres régions océaniques. Ce projet multidisciplinaire a réuni des physiciens, des bio-et-géochimistes et des modélisateurs: par le couplage i) de la dynamique océanique ii) avec la biogéochimie dans la colonne d'eau, l'atmosphère et le sédiment, iii) avec l'étude des éléments trace et des isotopes qui servent de traceurs de sources lithogéniques, de circulation et de ventilation des masses d'eau, et de processus biogéochimiques, et qui permettent également de quantifier les flux particuliers exportés de la surface vers les eaux profondes, et iv) avec le développement de modèles qui regroupent des configurations à grande échelle et à échelle régionale, des modèles idéalisés, des modèles biogéochimiques, et des simulations des éléments trace et des isotopes. De très nombreux résultats ont été produits dont une partie a

été publié dans des numéros spéciaux. A titre d'exemple, BONUS GOOD HOPE a mis en évidence le rôle de la bathymétrie du Bassin du Cap dans la détermination de trajectoires des tourbillons d'origine indienne pénétrant dans l'Océan Atlantique. Bien que cet ordonnancement des trajectoires en familles atténue l'image chaotique associée à la méso-échelle du Chaudron du Cap, le projet a permis de caractériser comment la dynamique turbulente dans ce bassin affecte le temps de transit des masses d'eau provenant de l'Océan Indien et Austral. Ces processus induisent des transformations locales des masses d'eau, soit par des fortes et longues interactions avec l'atmosphère pour les eaux de surface (au seuil des quarantième rugissants et des forts coups de vent d'Est le long de la marge Africaine) ; soit par les phénomènes d'interaction entre les tourbillons qui ralentissent le transit des masses d'eau et les exposent à des mélanges accrus par le biais des phénomènes de submésosécherelle qui interviennent dans ces interactions (Figure 3 Arhan et al., JGR 2011)

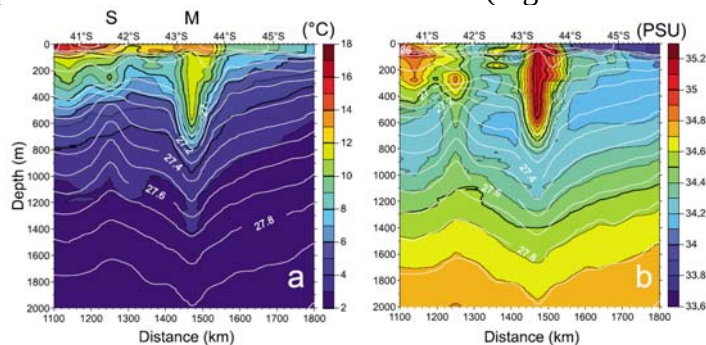


Figure 3 : Mise en évidence de tourbillons méso-échelle pendant la campagne BONUS –GOOD HOPE.

Le projet TRACK a été un des projets conduit dans le contexte de l'année polaire internationale. TRACK se propose 1) de quantifier le transport du Courant Circumpolaire Antarctique CCA traversant le passage de Fawn Trough, 2) de déterminer l'échange des masses d'eau circumpolaires entre les bassins de part et d'autre du plateau, 3) de tester la faisabilité du suivi de la variabilité du transport à l'aide de l'altimétrie et 4) d'identifier le changement climatique dans les masses d'eau profonde antarctique sur le flanc Est du plateau de Kerguelen. La réalisation de ces objectifs passe par la mesure des paramètres hydrologiques des masses d'eau le long de radiales interceptant les principales branches de courant de la région, mais aussi par des mesures courantométriques de trois mouillages déployés au travers du Fawn Trough permettant d'estimer la variabilité du courant, dont le relevage, après un an de mesures, constituait un objectif prioritaire de TRACK2. Un total de 60 stations CTD-O2 (conductivity-temperature-depth-oxygen), accompagnées de mesures directes de courant par LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler) a été réalisé pendant TRACK1, et 56 stations au cours de la campagne de récupération des mouillages TRACK2. En outre, des mesures en route de courant ont été réalisées par ADCP de coque (SADCP; shipborne ADCP). Les opérations supplémentaires ont consisté en des recherches bathymétriques au niveau du Fawn Trough auxquelles s'ajoute le déploiement de 5 profileurs ARGO, respectivement pour TRACK1 et TRACK2. (Figure 4a et 4b, Park et al 2009)

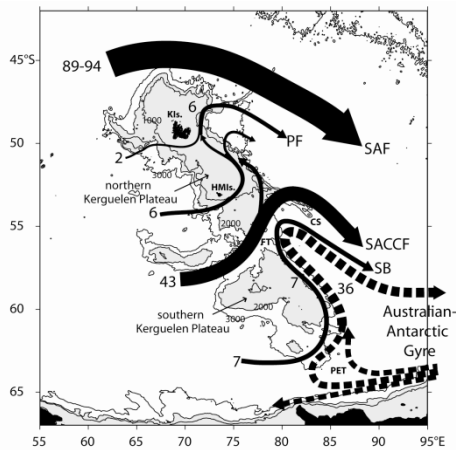


Figure 4a : Schéma des branches principales du CCA et du DWBC dans la région d'étude, avec leurs transports estimés à partir de TRACK1.

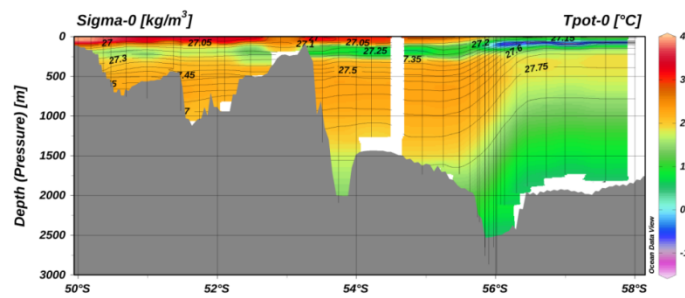


Figure 4b : Température et densité potentielles le long de la section principale de la trace #94 du satellite altimétrique Jason entre Kerguelen à 50°S et 58°S, qui intercepte le Fawn Trough à 56°S pendant TRACK2.

Les observatoires :

Le Marion Dufresne héberge les activités d'observation de deux services d'observation labellisés de l'INSU, OISO (composante du SOERE CARAUS (CARbone AUstral) et ROSAME, Réseau d'Observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la MER (composante du SOERE SONEL Système d'Observation des variations du Niveau de la mEr à Long terme). Le Marion Dufresne étant le seul Navire français à opérer dans ces zones, il est fondamental de maintenir chaque année une disponibilité de ce navire pour ces opérations. Le Marion Dufresne fournit également à CORIOLIS des données temps réels de salinité et température.

OISO :

Le service d'observation a pour objectif d'observer les variations saisonnière, interannuelle et décennale du cycle du carbone océanique dans l'océan Indien Sud et Austral pour mieux estimer et comprendre les bilans contemporains de carbone, leurs changements à l'échelle planétaire, et renseigner sur l'acidification des océans liée à l'accroissement de carbone anthropique dans l'océan. Les données récoltées servent aussi à valider les modèles de climat utilisés dans le cadre de l' »Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC.

Dans le contexte de l'augmentation continue du CO₂ atmosphérique et de ses implications climatiques, l'observation et la compréhension des variations saisonnière, interannuelle et décennale du cycle du carbone océanique sont primordiales pour estimer les bilans contemporains de carbone à l'échelle planétaire (bilan des flux de CO₂ air-mer, inventaire de CO₂ anthropique, projet 3 international Global Carbon Project) et paramétriser puis valider les modèles climatiques prédictifs (modèles couplés climat/carbone, scénario IPCC). Jusque dans les années 80, très peu de mesures répétitives de carbone inorganique dissous (CT), de l'alcalinité (AT) et de la pression partielle de CO₂ (pCO₂) existaient pour le compartiment océan. Dans les années 90 les expériences internationales WOCE et JGOFS ont permis d'accroître considérablement ces observations. Les résultats de ces expériences associées à d'autres mesures sur le terrain ont, en particulier, permis d'établir une première climatologie

mondiale des flux air-mer de CO₂ (Takahashi et al., 2002) permettant de valider les modèles océaniques et contraindre les méthodes d'inversions atmosphériques (e.g. Bousquet et al., 2000, projet PROOF et LEFE-Cyber/FlamenCO₂). Elles ont aussi montré que la variabilité des flux air-mer de CO₂ pouvait être importante notamment dans le secteur du Pacifique Equatorial en liaison avec ENSO ou plus récemment dans les hautes latitudes sud (S.O. OISO, Metzl, 2009). Elles ont enfin permis de dresser pour la première fois un inventaire de carbone anthropique dans l'océan mondial avec, il faut le noter, de grandes incertitudes dans l'Océan Austral (Lo Monaco et al., 2005). Fort de cet élan initié durant les années 90, la communauté internationale a décidé de renforcer ce type d'observations (figure 5), tant sur les séries de surface (cadre du programme SOLAS/IGBP) que sur la colonne d'eau (cadre de CLIVAR/WCRP et IMBER/IGBP). Ces observations, accompagnées de travaux de synthèses, globale ou régionales, permettent d'acquérir des informations déterminantes sur l'état du système biogéochimique dans l'océan, sa variabilité et son évolution (suivre l'accroissement du CO₂ dans les eaux de surface), comment l'océan régule l'accroissement du CO₂ atmosphérique (piégeage du CO₂), voire de quelle manière il subit les impacts anthropiques (acidification et déplacement des niveaux de saturation des carbonates). L'ensemble des projets d'observations et leurs synthèses sont aujourd'hui coordonnés au niveau international dans le cadre du groupe SOLAS-IMBER-CARBON (IOC/IOCCP, Metzl et al., EOS Juillet 2007).

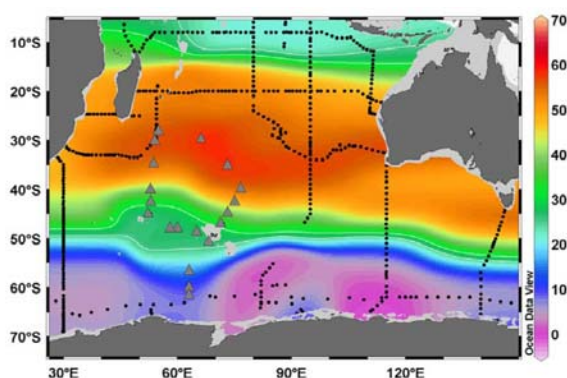


Figure 5 : Distribution du carbone anthropique (Cant en $\mu\text{mol/kg}$) à la profondeur 500m dans le bassin Indien déduite des données WOCE 1995-1996 et des observations OISO (triangles) qui complètent la base de données internationales (figure extraite de Lo Monaco et Metzl, 2005, Clivar Exchanges N10)

ROSAME (campagnes à la mer NIVMER) :

A la fin des années 1980 s'est mis en place, à l'instigation de la COI (Commission océanographique intergouvernementale) de l'UNESCO et dans le cadre du programme international WOCE2, un réseau coordonné et mondial d'observation *in situ* des variations du niveau de la mer : le réseau GLOSS3. C'est dans ce contexte international que le réseau ROSAME a été imaginé et implanté au début des années 1990, comme sous ensemble du réseau mondial GLOSS, et dans la perspective des programmes altimétriques satellitaires franco-américain Topex/Poseidon, et européen ERS1/2. Ce réseau répond maintenant aussi aux objectifs scientifiques de CLIVAR5 et de GOOS6.

Le programme scientifique du SO ROSAME s'articule autour de trois thèmes principaux :

- 1) l'observation des variations séculaires du niveau de la mer,
- 2) l'étude de la dynamique de l'océan austral dans le secteur Indien et périantarctique,
- 3) une contribution à la validation et à l'exploitation des mesures altimétriques.

Le réseau ROSAME est constitué de quatre sites de mesure du niveau de la mer à Kerguelen, Saint-Paul, Crozet et Dumont d'Urville. Sur chaque site, la station marégraphique côtière acquiert automatiquement des mesures de pression de fond, température et conductivité de l'eau, réalisées par le capteur immergé, et des mesures de pression atmosphérique par le baromètre.

La maintenance du réseau est assurée par la Division Technique de l'INSU de Brest (DT/INSU) au cours des campagnes annuelles NIVMER (programme n°688 de l'IPEV). Ces campagnes ont lieu chaque année, lors d'une rotation du Marion Dufresne dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), et permettent : la maintenance des stations côtières, le relevage/mouillage des stations de plateau, la mise en place de nouveaux instruments, les opérations de géodésie et des opérations ponctuelles comme les rattachements de repères historiques.

Références citées :

- Arhan M. et al. Anticyclonic and cyclonic eddies of subtropical origin in the subantarctic zone south of Africa *Journal of Geophysical Research* 116 (2011) C11004.
- Blain, S. et al. (2007), Effect of natural iron fertilisation on carbon sequestration in the Southern Ocean, *Nature*, 446(7139), 1070–1075, doi:doi:10.1038/nature05700.
- Lo Monaco, C., C. Goyet, N. Metzl, A. Poisson, and F. Touratier, 2005. Distribution and inventory of anthropogenic CO₂ in the Southern Ocean: Comparison of three data-based methods. *Journal of Geophysical Research*, 110, C09S02, doi: 10.1029/2004JC002571.
- Metzl, N., 2009. Decadal increase of oceanic carbon dioxide in the Southern Indian Ocean surface waters (1991-2007). *Deep-Sea Res II*, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.007.
- Park Y.-H., F. Vivier, F. Roquet and E. Kestenare, 2009: Direct observations of the ACC transport across the Kerguelen Plateau. *Geophysical Research Letters*, 36, doi:10.1029/2009GL039617.
- Pondaven, P., O. Ragueneau, P. Tréguer, A. Hauvespre, L. Dezileau, and J. L. Reyss (2000), Resolving the "opal paradox" in the Southern Ocean, *Nature*, 405, 168–172.
- Takahashi T. et al. (2002) Global sea–air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects, *Deep-Sea Research II* 49 1601–1622

1.2 Paléocéanographie

En raison des inquiétudes grandissantes concernant le rôle de l'Homme sur l'évolution du climat, la demande sociétale est plus forte que jamais pour comprendre le fonctionnement complexe du système climatique terrestre. Caractériser et comprendre l'évolution passée du climat au-delà de la période instrumentale, qui ne couvre que les derniers 150 ans, est un enjeu essentiel pour (i) déterminer la variabilité naturelle en dehors de la période perturbée par l'activité humaine, (ii) comprendre la réponse du système Terre aux forçages externes et aux perturbations internes, et (iii) identifier l'ensemble des processus associés aux changements climatiques, dont certains font intervenir de longues constantes de temps (eg. circulation océanique à grande échelle). Seule l'analyse de longues séries d'enregistrements paléoclimatiques (10²-10⁶ ans) extraites des archives naturelles (coraux, cernes d'arbres, spéléothèmes, loess, glaces, sédiments continentaux et marins) permet de compléter les données instrumentales récentes et reconstruire l'évolution passée des climats. Exploitées conjointement avec les simulations numériques des climats passés, les données issues des archives naturelles permettent de tester notre compréhension des processus et d'évaluer les résultats des modèles.

Dans la mesure où l'Océan est un acteur majeur du climat terrestre, l'étude paléoclimatique et paléocéanographique des séries sédimentaires marines et des coraux est fondamentale à la

compréhension du fonctionnement du système climatique terrestre, de sa variabilité et de sa sensibilité à différents facteurs externes (insolation) et internes (e.g. gaz à effets de serre, instabilité des calottes de glace, volcanisme). Les carottes marines n'enregistrent pas que l'évolution du réservoir océanique mais elles enregistrent également les variations passées des autres compartiments climatiques ayant un rôle fondamental sur le climat terrestre (cryosphère, biosphère continentale et marine).

Le développement et l'amélioration progressive du **carottage à piston de grande longueur**, initiée sur le N/O *Marion Dufresne* dès la fin des années 1980 par Yvon Balut, a été un élément déterminant dans la capacité de la communauté des paléocéanographes à recueillir de longues séries sédimentaires marines, continues et bien préservées, pour l'étude des climats anciens. Le carottage à piston de grande longueur a rendu possible l'étude du dernier million d'années sur de très nombreux sites océaniques sans faire appel aux capacités lourdes de forage du programme IODP, et a permis d'aborder l'étude à haute résolution de la variabilité climatique rapide dans des séries sédimentaires à forts taux de sédimentation. Le N/O *Marion Dufresne* et son carottier de grande longueur ont ainsi été un élément essentiel du développement scientifique et de la structuration de la communauté paléocéanographique française qui a rapidement fédéré son activité autour de l'organisation et l'exploitation de campagnes communes.

En 1995, le développement du carottage de grande longueur a pris un essor supplémentaire avec le lancement du N/O *Marion Dufresne* dont les capacités de treuillage (treuil SIAMOIS avec câble aramide) et la structure (coursive tribord élargie avec limitation des structures verticales) ont été optimisées pour la mise en œuvre du carottier **CALYPSO** dont la longueur peut atteindre plus de 60 m. Depuis 2002, le carottier CALYPSO est fréquemment complété par l'utilisation d'un carottier gravité (sans piston) de grande section, le carottier CASQ. Ce carottier permet de recueillir, sans les perturber, de grands volumes de sédiments dans les premiers mètres de la colonne sédimentaire (longueur maximale ~12 m). Ces deux carottiers ont été utilisés non seulement pour recueillir des sédiments hémi-pélagiques à pélagiques, mais ont permis également d'échantillonner des coraux profonds dans des monts carbonatés, ouvrant de nouvelles perspectives pour la reconstruction des caractéristiques géochimiques des masses d'eaux océaniques. A partir de 2009, l'instrumentation du carottier CALYPSO avec des capteurs de pression a permis de déconvoluer les phases de fonctionnement du carottier et d'améliorer encore son utilisation. Couplées à l'utilisation du logiciel CINEMA développé par l'IFREMER, ces données permettent d'optimiser les réglages et d'éviter ou de compenser les problèmes de pistonage.

Le carottier de grande longueur CALYPSO a ainsi permis des avancées majeures en paléocéanographie et a été, en particulier, la pierre angulaire du programme international IMAGES (International Marine Global Change Study), lancé en 1995 sous l'égide du SCOR (Scientific Committee on Oceanic Research, ICSU) et de IGBP-PAGES (IGBP core program on Past Global Changes). Le programme IMAGES a regroupé ~70 instituts issus de 26 pays et a connu un exceptionnel succès scientifique. Les objectifs fondamentaux d'IMAGES étaient de quantifier la variabilité climatique et chimique de l'océan à l'échelle des constantes de temps des processus océaniques et cryosphériques au cours des derniers 300 000 ans, de déterminer la sensibilité de l'océan aux forçages internes et externes, et de comprendre son rôle dans le contrôle du pCO_2 atmosphérique.

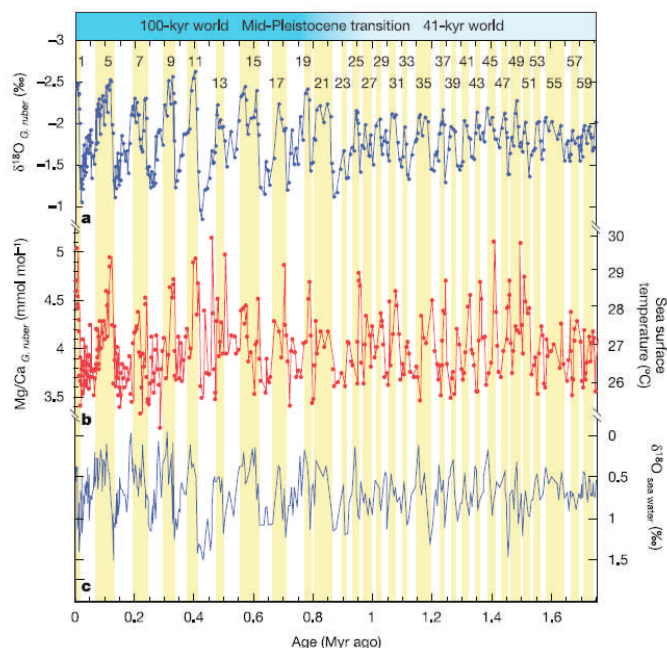


Figure 6 : Evolution du $\delta^{18}\text{O}$ de l'espèce *Globigerinoides ruber* (a), des températures de surface obtenues à l'aide du rapport Mg/Ca (b), et du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de surface dans la carotte MD97-2140 prélevée dans la Warm Pool du Pacifique ouest. L'absence d'une tendance à la baisse progressive des températures de l'Ouest Pacifique au cours des derniers 1.75 Ma semble ainsi contredire l'hypothèse selon laquelle l'émergence des cycles glaciaires/interglaciaires de grande amplitude à partir de 900 ka résulterait d'un effet radiatif associé à la baisse progressive de la pCO_2 atmosphérique (de Garidel-Thoron et al., Nature, 2005).

Pour atteindre ces objectifs, IMAGES a organisé dix-huit campagnes à la mer sur le N/O Marion Dufresne, systématiquement pilotées ou co-pilotées par des chercheurs français. Ces campagnes ont permis de recueillir plus de 15 km de sédiments dans tous les bassins océaniques. Parmi les très nombreux résultats obtenus, on pourra noter des avancées majeures concernant notre compréhension des changements climatiques à long terme et, en particulier, les scénarii concernant la Révolution du Pléistocène supérieur (vers 900ka) qui correspond à l'émergence des cycles glaciaires de grande amplitude (Figure 6). Les sédiments recueillis par le N/O *Marion Dufresne* ont été également déterminants dans la mise en évidence de la variabilité tropicale (en particulier le lien entre mouvements de la zone intertropicale de convergence (ITCZ), mousson globale et changements rapides survenant aux hautes latitudes), dans la compréhension des connexions inter-hémisphériques aux échelles des changements glaciaires-interglaciaires, et dans l'étude de la variabilité millénaire (événements de Heinrich, oscillations de Dansgaard-Oeschger) lors de la dernière période glaciaire (Figure 7).

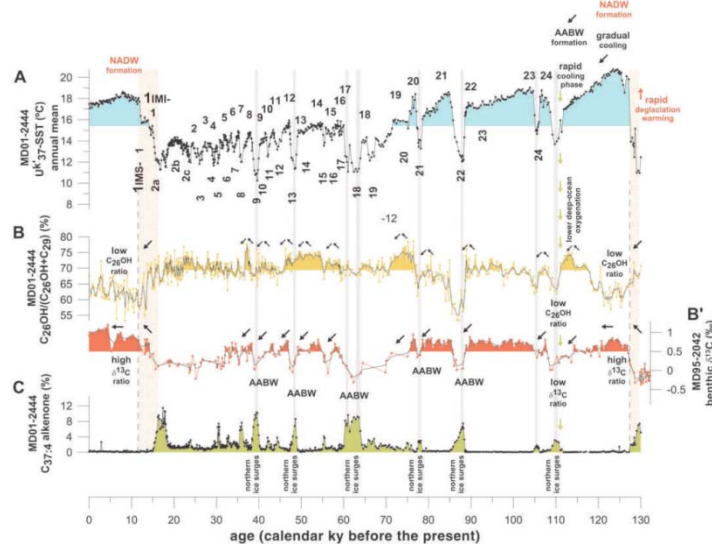


Figure 7 : Analyses à haute-résolution de la température de surface (A ; Uk_{37}), du signal $\delta^{13}C$ des foraminifères benthiques (B' ; traceur des masses d'eaux) et de deux traceurs biogéochimiques qui traduisent les conditions d'oxygénation (B) et les apports de matière organique continentale (C) dans la carotte MD01-2444 (Marge Ibérique). Les épisodes froids suivent des épisodes relativement chauds marqués par une augmentation de l'importance relative des eaux profondes venant du Sud (Martrat et al., Science, 2007).

Les domaines couverts par ces avancées scientifiques sont très vastes allant du rôle de la circulation océanique sur les changements climatiques et celui des cycles biogéochimiques marins sur la régulation du CO_2 atmosphérique, à l'impact des changements océaniques sur l'environnement continental ou à la réponse des biomes et des écosystèmes aux changements du climat et de l'environnement. Les avancées dans ces domaines ont été rendues possibles, en particulier, par un déchiffrement toujours plus complet et précis des informations enregistrées dans les sédiments marins et les coraux grâce au développement et à l'amélioration de traceurs physiques, sédimentologiques, biologiques et géochimiques, permettant d'extraire des données quantitatives toujours plus fiables sur les changements climatiques et océanographiques du passé.

Plusieurs chiffres clés témoignent de l'importance du matériel sédimentaire recueilli par le N/O *Marion Dufresne* depuis 1995 dans les études paléocéanographiques au niveau national et international :

- En plus des dix-huit campagnes intégrées dans le programme international IMAGES, onze campagnes ou valorisations de transit ont été organisées et exploitées par la seule communauté française dans le cadre de programmes nationaux ou européens dans lesquels la communauté française est un acteur majeur : cinq projets des Framework Programs (FP) européens (Biosope, Past4future, Case, Pop, Epica-MIS), un projet ERC (ACCLIMATE), un projet ESF PolarClimate (HOLOCLIP), six projets ANR (Magorb, ElPaso, Picc, Calhis, Monopol, Climice), vingt-six projets INSU-LEFE.
- Le matériel recueilli a donné lieu à la soutenance de plus de 150 thèses de doctorat ou de Master à travers le monde;
- Un bilan effectué en 2011 a montré que les recherches effectuées sur le matériel sédimentaire recueilli à l'aide du carottier CALYPSO ont donné lieu à plus de 850 publications dans des revues internationales à comité de lecture dont plus de 100 publiées dans les journaux de tout premier plan (*Science*, *Nature*, *Nature Geoscience*, *Earth and Planetary Science Letters* and *Paleoceanography*). La communauté française a été leader d'environ 30% de ces publications et en a co-signé près de 60%. Ces chiffres traduisent bien l'importance du N/O *Marion Dufresne* et son carottier

CALYPSO pour la communauté paléocéanographique française et le poids qu'ils lui assurent au niveau international.

Références citées :

Garidel-Thoron T. et al (2005), Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years, *Nature* 433, 294-298, doi:10.1038/nature03189

Martrat B. et al (2007), Four climate cycles of recurring deep and surface water destabilizations on the Iberian Margin, *Science*, 317 (5837), 502-507, doi: 10.1126/science.1139994

1.3 Géosciences marines

Les N.O. Marion Dufresne 1 et 2 ont joué un rôle essentiel dans la définition des structures de la croûte océanique de l'océan Indien, depuis les premières grandes traversées de cet océan menées dans les années 1970 et 1980. Cette phase d'exploration a permis de caractériser les principales dorsales océaniques et de reconnaître les nombreux plateaux et rides asismiques. Elle a également conduit à la datation des bassins océaniques et aux premières reconstructions tectoniques des plaques composant cet océan. Muni d'un sondeur bathymétrique mono-faisceau, d'un magnétomètre et d'un gravimètre, et parfois d'une sismique, de dragues ou de carottiers, le N.O. Marion Dufresne était parfaitement adapté à cette phase d'exploration. Avec son sondeur multifaisceaux, ses appareils de pont améliorés et sa capacité d'emport accrue, le N.O. Marion Dufresne 2 a permis de dépasser cette phase et de travailler de manière détaillée sur des chantiers de dimensions plus limitées, tout en conservant la possibilité de réaliser des travaux d'exploration.

L'une des réalisations emblématiques de la communauté internationale travaillant sur les dorsales océaniques, réunie au sein du programme InterRidge, a été d'unir les efforts des pays participants pour étudier la dorsale ouest-indienne. Le N.O. Marion Dufresne a joué un rôle majeur dans ces travaux, notamment lors de la réalisation de la campagne FUJI¹ (France-UK-Japan-InterRidge) rassemblant les efforts communs de trois pays sur cette cible importante. L'intérêt majeur de la dorsale ouest-indienne vient de son taux d'ouverture extrêmement lent, de moins d'un centimètre par an, qui ne se retrouve que sur la dorsale de Gakkel, située sous les glaces de l'océan Arctique. La dorsale ouest-indienne est également caractérisée par un manteau froid, sauf peut-être à proximité du point chaud de Marion. Cette région est donc très importante pour mieux comprendre la fusion partielle d'un manteau froid, les mécanismes d'exhumation d'un manteau non fondu, et la fracturation liée à un épaississement lithosphérique rapide sous une croûte mince. Les campagnes GALLIENI, EDUL, FUJI, SWIFT, SWIR 61-65 et SMOOTHSEAFLOOR se sont attachées à caractériser les variations pétrologiques et géochimiques le long de cette dorsale, la segmentation magmatique et les variations d'épaisseur crustale à l'axe et hors axe, et le fonctionnement des failles conduisant à l'exhumation des roches mantelliques sur de larges parties de cette dorsale.

La dorsale est-indienne est une dorsale à taux d'ouverture intermédiaire à morphologie variable. Les campagnes GEISEIR 1 et 2 ont permis de mettre en évidence la diversité et la taille des hétérogénéités de composition du manteau supérieur, de modéliser les processus de formation de ces hétérogénéités, et de relier la variabilité de morphologie au régime thermique en relation avec la composition du manteau. Ces campagnes ont, en outre, offert l'opportunité d'évaluer la densité de l'activité hydrothermale sur 1500 km de cette dorsale.

1 Les noms en majuscules marquent les campagnes océanographiques réalisées par le N.O. Marion Dufresne.

La dorsale est-indienne subit l'activité du point chaud de Saint Paul et Amsterdam dans la région située à proximité des îles éponymes. Cette interaction a induit la formation d'un plateau océanique, aujourd'hui en cours de rifting du fait de l'éloignement progressif du point chaud et de la dorsale. La campagne PLURIEL a révélé la chronologie détaillée des différentes structures tectoniques et magmatiques créées par le point chaud, ainsi que la nature des mélanges entre magmas.

Un autre exemple majeur d'interaction entre point chaud et dorsale est celui du point chaud de La Réunion avec la dorsale centrale indienne. Cette interaction est aujourd'hui caractérisée par la grande distance séparant le point chaud de la dorsale, et semble avoir existé depuis au moins 10 millions d'années. Elle est à l'origine de la ride de Rodrigues et de structures la prolongeant jusqu'à la dorsale, découvertes lors de la campagne MAGOFOND 2.

De nombreuses îles de l'océan Indien ont été formées par des points chauds avant d'être progressivement érodées et de subir le cas échéant des effondrements gravitaires résultant de déstabilisations de pente. La campagne ERODER 4 a permis d'échantillonner les pentes de l'île de La Réunion et de montrer qu'il existe, comme à l'île Maurice, une évolution temporelle de la composition des laves. Les campagnes ERODER 3 et 4 ont prélevé des carottes sédimentaires permettant de reconstituer l'histoire érosive de l'île. A plus grande échelle, la campagne RHUM-RUM a mis en place un réseau de sismomètres de fond de mer destiné à éclairer la structure profonde du point chaud jusqu'au manteau inférieur. D'autres îles formées par des points chauds, comme Kerguelen, Crozet, Saint Paul et Amsterdam, Mayotte... ont bénéficié plus ou moins ponctuellement des moyens d'étude du N.O. Marion Dufresne (campagnes EXTRAPLAC, BATHYMAY...).

La zone de subduction indonésienne a soudainement rappelé sa dangerosité lors du séisme de Sumatra du 26 décembre 2004. Une campagne d'intervention rapide, SUMATRA-AFTERSHOCK, a enregistré les répliques de ce séisme, réalisé quelques carottages pour en rechercher la trace, et levé la bathymétrie de la zone. Une seconde campagne du N.O. Marion Dufresne, SUMATRA-OBS, a accompagné la réalisation de profils sismiques industriels profonds, donnant accès au modèle de vitesses sismiques requis pour convertir ces derniers en profondeur. Ces travaux ont contribué significativement à l'effort international mené à la suite de ce séisme majeur avec pour objectif d'identifier la zone sismogène, d'en comprendre le fonctionnement, et ainsi d'en limiter les effets dévastateurs par des mesures préventives appropriées. D'autres travaux, menés dans le bassin marginal d'Andaman, ont révélé son fonctionnement en "pull apart" dans un contexte de subduction très oblique (campagne ANDAMAN).

Dans une approche de type observatoire, la mise en place d'hydrophones mouillés dans le canal SOFAR lors des campagnes DEFLO-HYDR et OHA-SIS-BIO 1 à 5 a permis de mettre en évidence et de localiser la sismicité de faible magnitude des dorsales de l'océan Indien, mais également les nombreux craquements affectant les glaces des pourtours de l'Antarctique et les sons émis par les mammifères marins.

Outre ses missions scientifiques, le N.O. Marion Dufresne a effectué des missions de service public telles que certaines campagnes EXTRAPLAC, qui ont recueilli les données bathymétriques et sismiques en support aux demandes d'extension de la zone économique exclusive française auprès de l'ONU. Il a également réalisé plusieurs campagnes de géosciences en affrètement ou en collaboration avec des industriels ou des partenaires scientifiques étrangers, dont il n'est pas fait mention ci-dessus.

1.4 La formation

Les grandes capacités du Marion Dufresne en font un vecteur idéal pour des programmes éducatifs de type "Université flottante" ou "*Teacher at sea*". Une particularité appréciée du navire est de réaliser ces opérations de manière conjointe aux campagnes scientifiques, offrant aux étudiants et/ou aux professeurs participants un regard unique sur la recherche en train de se faire. Par exemple, lors de la campagne MONOPOLE dans le golfe du Bengale, une Université flottante a permis de rassembler une vingtaine d'étudiants, dont douze en Master et les autres en Doctorat. Lors de ces opérations, des cours théoriques sont dispensés durant la matinée, et des participations aux quarts et au travail sur le pont sont réalisées l'après-midi. Les étudiants sont d'origine mixte, certains venant des universités françaises, d'autres d'universités étrangères (Chine, Australie, Etats-Unis...).

2 Bilan des difficultés rencontrées.

En termes de difficultés ou de faiblesses avérées lors du déroulement des campagnes les points suivants ont été mis en avant :

a/ Sondeur de sédiments et bathymétrie multifaisceaux

Le sondeur multifaisceaux actuel du N.O. Marion Dufresne est progressivement devenu obsolète au regard des standards internationaux en géosciences: la résolution spatiale des pieds de faisceau est désormais trop faible. Il y a une nécessité d'une sauvegarde permettant un accès rapide et le rejeu de cette donnée essentielle dans la recherche de structures et de fonds à lithologie particulière. L'impossibilité d'obtenir simultanément des données bathymétriques et de sondeur de sédiment de qualité n'est plus acceptable, d'autres navires tels que l'Atalante ayant clairement démontré qu'une telle réalisation conjointe est possible à condition de mettre en place un système de synchronisation adéquat.

La recherche des meilleurs sites de carottage dans des environnements sédimentaires complexes, correspondant souvent à des zones à fort taux de sédimentation (eg. drifts, monts carbonatés, levées sédimentaires dans les systèmes d'éventails sédimentaires,...) souffre des faibles capacités résolutives du sondeur de sédiments qui équipe le N/O *Marion Dufresne*. Pour illustrer ce propos, deux profils sont présentés ci-dessous, obtenus à travers des levées sédimentaires des systèmes d'éventails sous-marins de l'Indus et du Gange. Le premier a été enregistré avec l'échosondeur du *Marion Dufresne* en 2012 (Fig.8, gauche), l'autre en 2006 avec l'échosondeur du N/O *Beautemps-Beaupré* (Fig.8, droite). Rien que les deux profils n'aient pas été obtenus sur les mêmes systèmes



Figure 8: Gauche – profil obtenu à travers un système de chenal/levées de l'éventail du Gange avec le sondeur de sédiment du Marion Dufresne (campagne MONOPOL, 2012); droite – profil d'un système chenal-levées du cône de l'Indus obtenu avec le sondeur du Beutemps-Beauté (campagne SHOM FanIndien, 2006).

b/ Treuils et gestion des systèmes de prélèvement/mesure

Depuis plusieurs années, les campagnes organisées par la communauté des paléocéanographes sont rarement limitées aux seules opérations de carottage. Comme signalé plus haut, la reconstruction des variations climatiques et océanographiques s'appuie sur une palette de traceurs biologiques et géochimiques de plus en plus riche et complexe dont la calibration nécessite des prélèvements de plancton vivant, d'eau et de sédiment d'interface. Le déploiement séquentiel de plusieurs outils (eg. filet à plancton, rosette, carottier multi-tubes) en plus des opérations de carottage (CASQ, CALYPSO) pâtit d'un manque d'optimisation de la course pour les opérations multiples. On notera, par exemple, le maniement malaisé de la rosette sur le pont alors que la zone d'échantillonnage prévue à l'intérieur est étroite et peu commode. Cette configuration oblige souvent à effectuer dans la course extérieure une partie des opérations d'échantillonnage, bloquant le pont pour les opérations de carottage. Par ailleurs, l'existence d'un seul câble électro-porteur au niveau du treuil hydro ralentit les opérations de permutation des outils (eg. rosette, filet auto fermant, carottier d'interface multi-tubes). En ce qui concerne l'utilisation des filets pour la pêche de plancton, la communauté regrette également l'impossibilité de réaliser des traits obliques en raison d'une mauvaise compensation de la houle au niveau du portique arrière. De rares tentatives se sont soldées par des déchirures du matériel en raison d'un pilonnement trop important.

A ces observations, la communauté des géosciences souligne la difficulté de mise en œuvre de systèmes de prélèvement de roche de type "wax core", qui requièrent l'utilisation d'un treuil latéral tribord. Il serait nécessaire de pratiquer des ouvertures dans le bastingage et de pouvoir dévirer à de plus grandes vitesses pour ces opérations.

c/ traitement des carottes et du matériel recueilli

Les carottes sédimentaires sont systématiquement ouvertes et décrites à bord et différents paramètres physiques non-destructifs sont mesurés (e.g. réflectance couleur, susceptibilité magnétique, densité,...). Ces analyses permettent non seulement d'identifier pendant la campagne les carottes prioritaires pour les analyses en laboratoire, mais elles sont également cruciales pour savoir si les objectifs ont été atteints à chaque site, conditionnant les décisions de re-carottage éventuel à proximité. Or, la configuration actuelle de l'espace laboratoire rend particulièrement malaisées et acrobatiques la manutention et l'étude des carottes à bord du *Marion Dufresne*. Une partie des mesures s'effectue dans des conteneurs situés sur la plage arrière et l'ouverture des tronçons de carottes se fait en plein air rendant difficile le travail du personnel scientifique embarqué quand les conditions météorologiques ne sont pas clémentes (Atlantique Nord – mission GINNA, Antarctique – mission CADO). Un espace protégé, dédié à l'ouverture des tronçons doit être envisagé. Encore plus problématique, les laboratoires de description et d'échantillonnage sont situés au pont supérieur et la montée des sections de carotte s'effectue sur un monte-charge de fortune dont les pannes obligent des manutentions acrobatiques et dangereuses dans les escaliers extérieurs glissants. La réorganisation de l'espace de travail et de la surface des laboratoires disponibles au niveau du pont principal est un souhait de l'ensemble de la communauté. Cette réorganisation doit permettre aussi de faciliter le déploiement, en plus du banc MST (mesures physiques), d'un système XRF core-scanner conteneurisé pour mesurer la composition élémentaire des sédiments. Au cours de la dernière décennie, les mesures XRF en quasi-continu (pas d'échantillonnage millimétrique à

centimétrique) se sont imposées comme un outil essentiel pour l'analyse à haute-résolution des enregistrements sédimentaires.

L'organisation du travail sur les carottes à bord a régulièrement souffert de l'absence de "zone tampon" où les tronçons emballés pourraient être conservés provisoirement avant leur stockage définitif dans les conteneurs réfrigérés. Par ailleurs, si l'accès aux conteneurs réfrigérés sur la plage arrière est relativement facile, le parcours devient problématique lorsqu'il faut effectuer le stockage dans un conteneur réfrigéré situé à l'avant du navire (difficulté d'accès, sécurité).

La communauté des Géosciences marines souligne l'absence d'un laboratoire où le traitement des roches (sciage, litholamellage, ...) puisse s'effectuer à proximité du lieu de récupération des outils de prélèvement, et plus particulièrement des dragues.

La récupération des mouillages :

Les caractéristiques du navire (pont très élevé par rapport à la surface de l'eau, longueur, prise au vent) rendent les manœuvres d'approches et de relevages de mouillage particulièrement délicates lorsque les conditions de mer ne permettent pas la mise à l'eau d'une embarcation. Ceci a conduit à la perte de plusieurs mouillages ce qui représente un préjudice non seulement financier mais aussi scientifique compte tenu des échantillons et données perdu.

Les locaux laboratoires, équipements:

Au cours des années les laboratoires du Marion Dufresne se sont peu à peu dégradés causant des problèmes nombreux tels que les évacuations des éviers défectueuses, les fonctionnements aléatoires de certains équipements (hotte aspirante), la climatisation. Le fonctionnement des laboratoires thermorégulés a souvent posé problème. Les capacités de stockage en congélateur (-20°C) ou surgélateur (80°C) se sont révélées au cours temps insuffisantes compte tenu de l'évolution des besoins.

La mise à l'eau des instruments notamment de l'ensemble rosette-CTD à partir du portique latéral est devenue de plus en plus problématique entraînant des retards dans le déroulement des opérations et des risques supplémentaires pour les personnels en charge de ces déploiements. Le système, y compris l'espace de préparation et de prélèvement, initialement conçu pour un équipement 12 bouteilles n'est plus adapté aux campagnes travaillant un équipement 24 bouteilles.

Questions scientifiques et évolutions en termes d'équipements.

Le Marion Dufresne est le navire le plus long de la Flotte Océanographique Française, caractéristique qu'il tient de sa double utilisation : navire océanographique de l'IPEV, navire ravitailleur des TAAF. De cet usage découlent les trois originalités principales du navire : sa capacité à réaliser des carottages longs, sa grande capacité d'emport, et sa capacité à naviguer dans l'océan Austral. Ces deux dernières caractéristiques font du navire un laboratoire exemplaire de l'interdisciplinarité.

Les questionnements scientifiques qui vont être traités dans les 20 prochaines années et qui nécessitent la mise en œuvre de navires océanographiques tels que le Marion Dufresne sont nombreux et variés. Ils sont largement développés dans les documents de perspectives scientifiques des grands programmes internationaux mis en place dans le contexte de l'ICSU (International Council for Science) et qui font actuellement l'objet d'une réévaluation au sein du programme « future earth ». D'autre part, au niveau national, les exercices de perspectives scientifiques menés régulièrement au sein des différents organismes aboutissent à l'affichage de priorités en termes d'axes de recherche dans l'océan et de moyens requis pour les mener à bien.

D'une manière très générale, l'appellation de « future earth » et sa déclinaison en « future ocean » met en avant la recherche pour une meilleure compréhension et prédiction de l'évolution du système terre que ce soit dans un contexte d'évolution naturelle ou perturbée par l'activité humaine et à toutes les échelles de temps. Ceci implique des recherches dans de nombreux domaines couvrant les différents compartiments du système terre : de la terre interne aux océans et à l'atmosphère, du monde inerte au monde vivant. Pour l'ensemble de ces recherches, le navire océanographique reste le moyen privilégié d'investigation lorsque l'océan est l'objet d'étude ou lorsqu'il est le moyen d'accès aux autres compartiments (e.g. fond sous-marin). L'augmentation du caractère pluridisciplinaire des recherches à mener dans les prochaines décennies est aussi un élément dimensionnant important à prendre en compte pour la conception et la mise en œuvre des infrastructures.

Le présent document ne vise pas à reprendre ces questionnements scientifiques de manière extensive, mais plutôt à pointer quelques-uns de ces axes qui, une fois déclinés en terme de besoins, dessinent les souhaits de la communauté scientifique pour la jouvence du Marion Dufresne.

Plusieurs spécificités actuelles du Marion Dufresne conduisent à mettre en avant certaines de ces questions scientifiques. Ce sont :

- La localisation préférentielle du Marion Dufresne dans l'océan Indien et en particulier dans l'océan Austral.
- La grande capacité d'embarquement de scientifiques et de mise en œuvre des instruments.
- Le potentiel unique du navire pour le carottage long.

Si, comme mentionné ci-dessus, de nombreuses recherches sont à mener dans un contexte pluridisciplinaire (à la frontière des disciplines et en forte interactions entre les disciplines), la déclinaison en termes d'infrastructures et d'équipements est facilitée par un découpage disciplinaire. C'est pour cette raison que les perspectives scientifiques et les conséquences en termes d'équipements scientifiques sont exposées selon le même découpage disciplinaire que celui qui a prévalu à la présentation du bilan.

1 Physique biogéochimie biologie

L'océan comme composante du système climatique va constituer un cadre majeur pour les recherches à mener dans les vingt prochaines années. Ceci est d'autant plus vrai pour l'océan Austral. En effet cet océan est le moins bien échantillonné et donc connu de tous les océans. De par sa géographie d'océan circumpolaire, il joue un rôle fondamental dans la circulation océanique globale en connectant les autres océans entre eux. Il est aussi un lieu de connexion entre l'océan profond et l'océan de surface et est le siège d'intenses échanges de chaleur mais aussi de CO₂ avec l'atmosphère. Du point de vue biogéochimique, la pompe biologique de carbone y fonctionne aujourd'hui au ralenti mais des changements futurs dans son intensité auraient des conséquences climatiques importantes. L'ensemble des mécanismes qui régissent tous ces processus sont très loin d'être élucidés.

Deux grandes stratégies se dessinent pour faire progresser la connaissance de cet océan et de son fonctionnement afin de mieux prédire son devenir et sa réaction au changement futur :

- La première est la poursuite des campagnes océanographiques pluridisciplinaires dédiées à des programmes de recherche.

- La seconde est le renforcement des activités d'observation, par l'acquisition du plus grand nombre possible de données de qualité et par le déploiement de nouveaux outils d'observation dans des régions inaccessibles par d'autres moyens que le Marion Dufresne.

Les campagnes océanographiques pluridisciplinaires dans l'océan Austral.

Ce type de campagne a déjà été mis en œuvre dans le passé sur le Marion (voir bilan). Dans ce contexte le Marion Dufresne possède deux atouts principaux. Premièrement sa capacité d'embarquement qui permet d'accueillir à bord une équipe pouvant comprendre jusqu'à 50-60 scientifiques. Deuxièmement, la stabilité de la plateforme qui permet d'avoir un nombre d'heures d'opérations à la mer optimal dans ces océans réputés pour des conditions météorologiques particulièrement difficiles. Toutefois l'intérêt d'embarquer une aussi grande équipe ne peut être réellement révélé que si l'environnement technique est approprié. Ces conditions qui impliquent des choix techniques sont détaillées ci-dessous :

Utilisation de la rosette-CTD :

La rosette-CTD est l'outil de base de ces campagnes où plus d'une centaine de déploiements sont réalisés en quelques semaines. La préparation de cet outil ainsi que la collecte des échantillons après prélèvement doit se faire dans un espace clos (hors coursive) dont la dimension et la configuration permettent un travail dans des conditions optimales assurant la qualité des prélèvements et la sécurité des personnes. Le transfert de la rosette vers le lieu de mise à l'eau doit être rapide. La déconnection du câble électro porteur doit être évitée.

Déploiement d'autres engins de prélèvement :

Les filets à plancton doivent pouvoir être déployés avec un bon contrôle de la vitesse de filage et de relève, en minimisant les effets de pilonnement du bateau.

Le système de mise en œuvre des pompes in situ doit être réfléchi compte tenu des difficultés liées à la programmation de ces pompes, à leur poids, leur encombrement et leur difficulté de manipulations.

Optimisation des temps de déploiement et de passage entres opérations :

Ce type de campagne implique la mise en œuvre de très nombreux instruments et outils de prélèvements requérant différents types de câbles et de treuils. La mise en œuvre d'une opération et le passage d'une opération à une autre sont deux points critiques qu'il importe d'optimiser afin de garantir la meilleure utilisation possible du temps de câble et donc du temps navires.

Mise en œuvre d'outils de la communauté nationale ou de laboratoire ayant leur propre moyen de déploiement à la mer.

Le nouveau treuil propre équipé d'un câble Kevlar et d'une rosette titane, sera un outil important des futures campagnes océanographiques (par exemple dans le contexte du programme GEOTRACES). La mise en œuvre de ce treuil sur le Marion Dufresne doit être prévue et optimisée.

Laboratoire dédiés et spécialisés:

Les laboratoires dédiés actuels du Marion Dufresne doivent être remis à niveau d'un point de vue de l'usage mais aussi des normes hygiène et sécurité. Ceci implique que parmi l'ensemble des laboratoires du Marion Dufresne, on trouve les équipements de base présents dans un laboratoire à terre (hotte aspirante, hotte flux à laminaire, étuve, stérilisateur, four, arrivée d'eau déminéralisé). Ils doivent être aussi pour certain être équipés d'arrivée d'eau de mer. La possibilité actuelle de transformer des cabines en laboratoires doit être conservée.

Des laboratoires, au nombre de 2 minimum dont la température peut-être régulée ($2 - 25^{\circ}\text{C}$ à $\pm 1^{\circ}\text{C}$) sont indispensables. Il est important que le système de régulation en température de ces laboratoires soit indépendant afin de pouvoir gérer rapidement tout problèmes techniques survenant sur une des unités, ou que leur fonctionnement ne soit pas impacté par celui de la climatisation générale du navire.

Emplacement pour les containers laboratoires embarqués.

Les campagnes pluridisciplinaires nécessitent l'embarquement de nombreux containers laboratoire ou atelier (jusqu'à 8) qui doivent pouvoir être disposés judicieusement sur le navire par rapport à leur fonction. L'accès à ces containers pour les chercheurs et les échantillons doit être optimisé en liaison avec les zones de prélèvement et d'expérimentation. La possibilité d'intégrer un/des containers laboratoires dans le hangar hélicoptère pourrait être pertinente. Ces containers doivent pouvoir être alimentés en eau de mer.

Circulation des échantillons :

Le transport des échantillons entre les moyens de prélèvement et les lieux de traitements doit être optimisé. Le franchissement de porte, couloir, escalier doit être minimisé. Les changements de niveau pour les échantillons lourds (plus de 10 kg) et encombrant doivent pouvoir être réalisés par des moyens appropriés autres que le transport manuel. Un monte-charge permettant de relier le niveau cale « océano » ou sont les laboratoires thermostatés, le pont principal, le niveau PC et le niveau plateforme hélicoptère serait un grand progrès.

Réception de grands flux de données :

La définition des stratégies de prélèvement se fait maintenant largement sur la base d'images données satellites reçues en quasi temps réel (couleur de l'eau, altimétrie, positionnement de bouée GPS). Le système de transmission avec la terre doit pouvoir permettre de gérer ce flux de données (bidirectionnel).

Moyen de stockage des échantillons avant débarquement. Le développement des techniques de biologie moléculaire a considérablement accru les besoins de stockage à -20 et -80°C. Les échantillons de ce type ne peuvent supporter aucune rupture de la chaîne de froid. Il est de première importance de disposer d'un volume de stockage approprié et d'un volume de stockage de secours en cas de panne d'un des surgélateurs. Il en est de même pour le stockage à -20°C. Les capacités actuelles devraient donc être multipliées par deux et renouvelées.

Les activités d'observation et de déploiement et récupération d'instruments

Les campagnes océanographiques déploient également à la mer un grand nombre d'instruments très variés. Pour certains d'entre eux ils doivent être récupérés après des durées variables allant de l'heure à l'année. Les besoins techniques liés à ces pratiques sont exposés dans le paragraphe ci-dessous.

La demande d'observations récurrentes dans l'océan austral va aller croissante dans les décennies à venir. Cette évolution est liée à deux points majeurs :

- a) Le besoin croissant de données avec une résolution spatiale et temporelle accrue pour dégager des tendances d'évolution de l'océan austral liées au changement en cours (par exemple température, intensité des vents, acidification....) et pour générer des bases de données de qualité servant à la validation ou au forçage des modèles océanique ou climatique
- b) Les développements technologiques importants sur les capteurs et échantillonneurs qui permettent de multiplier les paramètres observables et les développements tout aussi important sur les vecteurs supportant ces capteurs (mouillage fixe, glider, bouées dérivante, profileur type argo...)

Ces activités requièrent des dispositions techniques particulières détaillées ci-dessous.

La mesure en continu de surface

Elle nécessite un circuit d'eau dédié dont les caractéristiques sont stables et connues (matériaux, débit, propriétés de l'eau à l'entrée). Ce circuit (qualité analyse) doit desservir plusieurs laboratoires.

Le déploiement d'instrument : le type d'instrument est varié et les contraintes techniques varient en conséquence.

- Déploiement en route à pleine vitesse ; nécessité d'avoir un système de tir d'XBT opérationnel.
- Déploiement en route éventuellement à vitesse réduite : cela concerne principalement les flotteurs « argo » qui doivent pouvoir être largués sans risque de collision avec la coque du navire.
- Déploiement de mouillage en station : La difficulté de mise à l'eau de ces mouillages réside principalement dans l'assemblage sur la plage arrière de configurations très diverses et équipés de nombreux matériels couteux. Les systèmes de déploiement doivent permettre de minimiser les risques lors du déploiement. Le plan de pont et la

configuration du portique arrière doivent permettre ces mouillages avec un minimum de risque.

Pour les mouillages fixes un système acoustique approprié doit permettre de réaliser la triangulation rapidement

La récupération d'instrument : Cette opération est toujours particulièrement délicate car les conditions météorologiques sont souvent difficiles et le pont du Marion Dufresne est situé très haut par rapport au niveau de la mer. Une des phases délicates est celle du crochetage du système à relever (en général son chien). Afin de minimiser les risques, l'installation d'un canon lance amarre ou d'un système similaire pourrait être étudié pour conserver une distance de sécurité entre l'engin à relever et le navire.

Le déploiement d'instrument tractés :

Lors des transits il y a un grand intérêt à collecter des échantillons ou effectuer des mesures avec des engins tractés. La nouvelle configuration du Marion Dufresne doit permettre de mettre en œuvre le « Continuous Plankton recorder ». En adaptant la vitesse les autres engins de type « seasear », « MVP », système tracté pour altimétrie GPS. Ce dernier système s'ajoute à un système de récepteurs GPS disposés en plusieurs points du Marion et une centrale inertielle. Ce type de dispositif qui est encore du domaine du prototype est utilisable pour des campagnes, mais pourrait aussi dans l'avenir être envisagé en routine pour faire une cartographie précise de la surface lors des transits du navire.

Données d'environnement et log book: Les campagnes océanographiques ainsi que l'acquisition de données d'observation ont besoin d'obtenir dans un format utilisable et archivable rapidement (voir directement dans des bases de données) les paramètres « d'environnement » de la campagne. Ceux-ci comprennent, la navigation, la météorologie (température, vent, lumière (y compris PAR), humidité), les données ADCP coques, les mesures continues (température salinité) aux quelles pourraient être ajoutés d'autres capteurs, le suivi des opérations dans un log book.

2 Paléocéanographie

Pour les décennies à venir, le challenge majeur va être de déterminer ce que l'étude des climats du passé nous indique sur les changements climatiques et océanographiques qui vont survenir dans le courant du XXIème siècle et sur leurs impacts. Des questions fondamentales restent posées:

- Quelle est la sensibilité du climat aux forçages naturels et comment cette sensibilité peut nous aider à comprendre la réponse au forçage anthropogénique?
- Comment les cycles biogéochimiques marins, les biotopes et les écosystèmes sont-ils impliqués dans cette sensibilité?
- Quelles ont été les réponses du volume des glaces et du niveau de la mer au forçage naturel qui peuvent être comparables aux changements induits par l'activité humaine?
- Quels sont les paramètres clés qui ont poussé le climat à osciller à des échelles décennales à centennales par le passé?

L'étude des climats du passé nous a en outre sensibilisés au fait que l'évolution du climat ne correspond pas à une simple réponse linéaire aux forçages et que des changements abrupts,

des bifurcations de grande amplitude, peuvent survenir à l'échelle de quelques décennies, attestant du caractère éminemment non-linéaire du système climatique terrestre. Mais les processus en jeu demandent encore à être précisés. Le fait que les modèles climatiques couplés, utilisés pour prévoir l'évolution climatique future, sont notoirement stables et incapables de simuler une bifurcation sans une perturbation majeure forcée (e.g. injection massive d'eau douce aux hautes latitudes), illustre la limite de nos capacités prédictives actuelles et la nécessité de travailler sur l'identification et la compréhension des processus et des rétroactions complexes qui sont au cœur des variations abruptes. L'étude des climats du passé, en plus de préciser les mécanismes, peut également nous permettre d'identifier un certain nombre de "précurseurs" ou d'enchaînements de phénomènes qui pourraient nous alerter sur le fait que le climat futur approche d'un point de rupture d'équilibre.

Ces différentes questions soulignent encore une fois le fait que les observations modernes sont limitées dans le temps et ne peuvent pas capturer toute la gamme de variabilité naturelle du système climatique. Il convient d'ailleurs de noter que la vaste majorité des concepts et de notre compréhension des changements climatiques abrupts provient de l'étude des climats du passé. Nos questionnements sur l'évolution climatique future, sa variabilité, les singularités régionales et les risques de bifurcation requièrent donc plus que jamais une parfaite compréhension des variations passées enregistrées par les archives naturelles et une quantification toujours plus précise des paramètres essentiels du climat (e.g. températures et salinités océaniques, intensité de la circulation, productivité organique marine,..).

L'étude des variations climatiques et océanographiques enregistrées dans les sédiments marins est essentielle pour répondre aux grandes questions listées ci-dessus dans la mesure où: (1) l'Océan couvre plus de 70% de la surface terrestre et les études paléocéanographiques sont le seul moyen d'obtenir des données physiques, chimiques, biologiques et biogéochimiques sur ce domaine dans le passé; (2) l'Océan contient et contrôle plus de 90% du CO₂ échangeable avec l'atmosphère, ce qui implique que même des modifications mineures dans le bilan du cycle du carbone océanique peuvent avoir des répercussions drastiques sur la teneur en CO₂ de l'atmosphère; et (3) l'Océan renferme dans les premiers dix mètres de sa couche d'eau superficielle autant de chaleur que dans l'ensemble de l'atmosphère, expliquant qu'il joue un rôle déterminant dans la redistribution de la chaleur à la surface du globe, sous forme sensible (advection latérale associée à la circulation océanique) et comme source de vapeur d'eau qui transporte l'énergie sous forme latente. Par ailleurs, l'océan profond joue actuellement un rôle tampon dans l'absorption de l'excès de chaleur produit par le forçage anthropique. Les enregistrements paléocéanographiques et l'étude des climats du passé peuvent nous permettre d'appréhender comment l'Océan va, à long terme, restituer cette chaleur.

En terme d'outils, de nouveaux instruments et de nouveaux traceurs voient le jour grâce à des capacités analytiques toujours plus précises et rapides, permettant de quantifier les compositions chimiques ou physiques de quantités toujours plus petites de matériel (e.g. analyses élémentaires par le scanner XRF, analyses élémentaires et isotopiques en spectrométrie de masse multi-collecteurs - souvent associées à de l'ablation laser, analyses isotopiques par laser, etc..). Le développement et la calibration de nouveaux traceurs permettent de reconstruire et de quantifier des paramètres hydrologiques jusque-là mal contraints (ex. traçage des masses d'eau en utilisant les isotopes du Nd et du $\delta^{13}\text{C}$, vitesse moyenne d'écoulement des masses d'eau par Pa/Th, reconstruction de la salinité à partir de l'analyse de la concentration en deutérium de la matière organique, utilisation du $\Delta 47$ et du rapport Li/Mg pour l'étude des changements de température dans les bio-carbonates,

développement de l'isotopie du bore et du rapport B/Ca sur les foraminifères pour reconstruire le cycle du carbone océanique, etc..). Le travail de calibration de ces traceurs engendre une collaboration toujours plus étroite entre programmes paléocéanographiques et programmes axés sur la connaissance de l'océan actuel et des traceurs qui permettent de rendre compte de sa chimie et de sa circulation (ie. GEOTRACES), ainsi qu'un rapprochement avec les biologistes et les biogéochimistes. En effet, une très grande partie des traceurs paléocéanographiques dépend de l'analyse de tests fossiles et l'amélioration de ces traceurs passe donc par une parfaite connaissance des processus de bio-minéralisation et de la biologie/écologie des différentes espèces morphologiques et pseudo-cryptiques (profondeur de vie, saisonnalité des développements, etc..). Cette tendance à développer des études interdisciplinaires implique que les campagnes à la mer deviennent systématiquement "multi-thématiques" et "multi-outils", les opérations de carottages étant couplées à des prélèvements d'eau, de micro-organismes planctoniques ou benthiques vivants et de sédiments d'interface.

En terme de prélèvements sédimentaires et d'archives naturelles marines, la communauté paléocéanographique va s'efforcer de travailler à des résolutions toujours plus fines afin de fermer le "gap" entre les résolutions centennales à millénaires, typiques des séries marines habituelles, et les échelles temporelles beaucoup plus fines accessibles par les observations récentes, instrumentées. Arriver à descendre à une résolution sub-décennale est envisageable dans les environnements sédimentaires à très forts taux de sédimentation, idéalement dans des domaines où la bioturbation est limitée (zones suboxiques ou anoxiques permettant le dépôt de sédiments variés) ou en combinant étude des sédiments avec celle des tests de coraux profonds, échantillonnés par carottage. Ces objectifs passent par une amélioration constante et une parfaite maîtrise des capacités de sondage acoustique et de carottage, avec une mise en œuvre aussi rapide que possible des outils. Cette rapidité de déploiement est nécessaire pour pouvoir échantillonner efficacement les séries sédimentaires dans des zones géographiques étroites le long de profils bathymétriques (marges, reliefs sous-marins) afin de mieux reconstruire l'évolution des différentes masses d'eaux. Les variations de taux de sédimentation de ces séries obtenues à différentes profondeurs dans la même région permettent en outre de construire des séries paléoclimatiques composites allant de la dernière période glaciaire à la période instrumentale.

Une telle expertise est disponible sur le *Marion Dufresne* et les améliorations à apporter aux outils de carottage ou à leur manutention sont d'ores et déjà partiellement prises en compte dans le cadre de l'EquipEX CLIMCOR. Mais, comme cela a été souligné plus haut, la communauté des paléocéanographes insiste aussi sur l'importance de remplacer les systèmes acoustiques actuels (sondeurs de sédiments, bathymétrie multifaisceaux), qui ne sont plus au standard des navires océanographiques modernes, afin d'optimiser le déploiement des outils exceptionnels de carottage du *Marion Dufresne* (CALYPSO, CASQ) et de renforcer ainsi la position qu'occupe ce navire au niveau international pour l'étude des sédiments océaniques.

Les efforts et l'activité de recherche de la communauté paléocéanographique française seront relayés à l'échelle internationale par le lancement de la suite du programme IMAGES. Le plan d'implémentation scientifique a été mûri au cours des deux dernières années, et le futur programme a été présenté lors de la Conférence Internationale de Paléocéanographie (ICP) qui s'est tenue près de Barcelone en septembre 2013. Comme pour le programme IMAGES, ce nouveau programme, dont le premier workshop s'est tenu en septembre 2013 à Cambridge (UK), va coordonner les efforts de notre communauté mais dans une logique multi-plateformes dans laquelle seront également renforcés les liens avec IODP (International Ocean Discovery Program). A ce titre, il faut noter le rapprochement de la communauté IMAGES avec ECORD et les avancées ayant eu lieu concernant la possibilité d'intégrer le

Marion Dufresne dans les plateformes européennes de carottage qui seront déployées dans des projets IODP (MSP Mission Specific Platforms).

3 Géosciences

Explorer les fonds océaniques

* structure, âge et évolution des bassins océaniques, reconstitution détaillée

Bathymétrie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismique rapide

Les bassins océaniques constituent l'essentiel de la lithosphère océanique et s'étendent des dorsales, où cette lithosphère continue de se former, jusqu'aux marges continentales. Ces dernières sont dites actives, et correspondent alors à des zones de subduction où la lithosphère océanique plonge sous un continent et disparaît, ou passives, marquant la cicatrice du rift continental ayant mené à la naissance de l'océan considéré. Contrairement aux dorsales et aux zones de subduction, qui en tant que frontières de plaques sont le lieu de processus tectoniques et magmatiques de premier ordre, les bassins océaniques sont généralement stables et constituent des reliques de la structure passée des frontières de plaques. Les anomalies magnétiques enregistrent dans la croûte océanique, les variations passées du champ magnétique terrestre, et permettent d'en déterminer l'âge. La structure des zones de fractures et des collines abyssales reflète les failles transformantes et les segments de dorsale passés. L'étude des bassins océaniques permet ainsi de reconstituer l'évolution des frontières de plaques au cours des temps géologiques et, par conséquent, celle de l'ensemble de la lithosphère terrestre. Les outils importants pour réaliser ces travaux sont la bathymétrie multifaisceaux, le magnétisme, la gravimétrie et la sismique rapide.

* diversité des structures volcaniques mises en place en domaine intra-plaque

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, gravimétrie, sismique rapide, échantillonnage de roches

Les structures volcaniques se comptent par dizaines de milliers rien que dans l'océan pacifique. Ce sont soit des seamounts en général de forme conique régulière issus de l'activité de points chauds soit des édifices de forme moins caractéristique construits sur des zones de fracture ou de faiblesse de la croûte océanique. Ils enregistrent dans leur forme l'influence de la tectonique de la lithosphère sous-jacente et leur disposition traduit le mouvement absolu de la plaque qui les porte. Leur composition chimique qui diffère des basaltes de dorsales informe sur celle du manteau source. Il a été proposé que leur recyclage dans le manteau via la subduction modifie significativement les modèles d'évolution de la composition du manteau supérieur. Il convient donc de mieux connaître ce composant crustal qui joue un rôle dans la dynamique chimique du manteau. Leurs laves enregistrent les variations du champ magnétique terrestre et leur magnétisme peut aussi être utilisé pour évaluer leur durée de construction.

Les outils nécessaires sont des moyens de bathymétrie, la sismique rapide, des moyens de dragage, magnétomètre et gravimètre.

* variabilité de composition du manteau, modèles d'hétérogénéité physique et chimique

Echantillonnage de roches

Les échantillons de MORB sont autant d'échantillons du manteau, intacts pour ce qui est des compositions isotopiques et modifiés pour les concentrations des éléments.

Les modèles de fusion partielle permettent de remonter à la composition du manteau source pour les concentrations et ainsi associés aux isotopes, ils apportent une image fidèle de la composition du manteau source et de son niveau d'hétérogénéités passé et présent. Ces échantillons ont jusqu'il y a peu pour l'essentiel été dragués. Depuis une dizaine d'années de façon « artisanale » et depuis peu de façon plus efficace, les verres volcaniques présents à l'axe d'accrétion ont été par des « wax core », qui permettent un échantillonnage systématique rapide des dorsales. Cet outil permet l'étude fine de la géochimie du manteau supérieur et de ses hétérogénéités à courte période dont l'utilité a été révélée par une étude récente de la SEIR (South East Indian Ridge).

Les outils nécessaires sont des moyens de bathymétrie et d'imagerie, moyens de dragage et de prélèvement de verres, magnétomètre et gravimètre.

* variabilité magmatique, tectonique et hydrothermale aux dorsales

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, gravimétrie, magnétisme, échantillonnage de roches et de fluides

La morphologie des dorsales est liée à la vitesse d'expansion et à la vigueur du magmatisme, les deux étant liées à l'état thermique du manteau local. Elle est donc variable le long des 70 000 km de dorsales avec parfois des frontières abruptes mais plus souvent des transitions progressives plus ou moins rapides. L'activité hydrothermale est naturellement aussi fonction du bilan thermique et de la fracturation. Comprendre leur fonctionnement et les associations entre les phénomènes, c'est ainsi analyser finement les structures et les associations d'observables de différentes disciplines.

Les moyens d'investigation de ces variables sont ainsi des levés bathymétriques et une imagerie précise des structures tectoniques et volcaniques, des mesures magnétiques et gravimétriques. Il faut aussi un échantillonnage dense des laves, de la colonne d'eau par bathysonde ou aussi par néphélométrie sur câble de wax core lors de campagnes d'échantillonnage dense (5km de pas) de verres volcaniques.

* activité sismique aux limites de plaque et en domaine intraplaque

Hydrophones, OBS

Connaître la distribution des séismes et certaines de leur propriétés telles que la magnitude ou le mécanisme au foyer constitue un atout essentiel pour comprendre l'état de contrainte et les déformations que subit une frontière de plaques ou tout autre lieu soumis à de telles contraintes. Ce type d'étude est particulièrement important à grande échelle, en contexte intraplaque, pour comprendre le fonctionnement des larges zones de déformation que constituent les limites de plaque diffuses, nombreuses dans l'océan Indien. A plus petite échelle, l'obtention d'une sismicité détaillée, d'une résolution en localisation et en magnitude que les réseaux globaux de stations sismologiques sont incapables d'atteindre sur une dorsale, permet d'appréhender la géométrie des failles actives mais aussi de mettre en évidence, suivant les cas, des événements liés aux remontées magmatiques ou aux circulations hydrothermales. Sur les zones de subduction, une telle sismicité permet, peu après un événement majeur, de compléter les catalogues de répliques et de définir l'ensemble des failles ayant joué. Ces travaux nécessitent la mise en place, pour des durées variables, de sismomètres fond de mer (OBS) ou d'hydrophones mouillés dans le canal SOFAR. Il est également envisagé de déployer de véritables observatoires fond de mer (sismomètres) ou hydroacoustiques (hydrophones) pour pallier aux insuffisances des réseaux terrestres.

Comprendre les processus

* interactions océan-lithosphère

→ altération, hydrothermalisme, bilans chimiques de l'océan

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, échantillonnage de roches et de fluides

La croûte océanique via sa création par magmatogenèse et son devenir via l'altération hydrothermale est le lieu d'échanges essentiels entre la terre solide et les océans. L'hydrothermalisme de haute température centré sur les dorsales génère d'importants dépôts de sulfures et transfère à l'océan de grandes quantités d'éléments solubles. Ces échanges varient en intensité avec le type de fonctionnement de la dorsale et de façon plus globale avec la longueur du système. L'étude des échanges nécessite la quantification des éléments en solutions et celles de ceux qui précipitent par des prélèvements solides et liquides à l'axe des dorsales. L'hydrothermalisme basse température survenant sur les flancs des dorsales est un autre lieu d'échange entre croûte et océan. Les bilans peuvent être réalisés sur les fluides froids ou sur la croûte altérée. Il convient aussi de mesurer l'évolution chimique de la croûte océanique basaltique au cours de son refroidissement et de son altération et survenant sur une longue période. Ce bilan ne peut être réalisé que sur la croûte altérée.

Les moyens nécessaires à mettre en œuvre sont de la bathymétrie et imagerie multifaisceaux, un échantillonnage de roches et/ou de fluides réalisé depuis la surface ou bien à l'aide de submersibles pilotés du fond ou de la surface.

* transferts continent-océan

→ dynamique sédimentaire

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, sismiques (rapide, multitraces, HR, THR...), carottages, mesures géotechniques (pénétrromètre...)

Les processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments sur les marges continentales et dans les bassins océaniques jouent un rôle important dans la recherche de ressources énergétiques carbonées, mais aussi plus largement dans la connaissance des environnements et des climats du passé, dans les bilans chimiques actuel et anciens de la Terre, voire dans la mitigation de risques liés aux instabilités gravitaires et aux tsunamis. La compréhension de ces processus dans différents environnements requiert la caractérisation des structures et des corps sédimentaires ainsi que leur échantillonnage et le cas échéant la mesure de leurs propriétés physiques in situ. Les outils utilisés sont la bathymétrie et l'imagerie multifaisceaux, l'éventail des sismiques (sismiques rapide, multitraces, haute résolution très haute résolution, 2D ou 3D) en fonction des profondeurs et des résolutions demandées, les différents types de carottage en fonction des cibles visées, et les outils de mesure géotechniques tels que le pénétrromètre Penfeld.

* formation de la lithosphère océanique

→ accréation: magmatisme, tectonique, hydrothermalisme

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismique rapide, OBS, hydrophones, échantillonnage de roches et de fluides, engins d'exploration profonde (cartographie bathymétrique et géophysique HR, observation in situ), observatoires fond de mer

Trois processus majeurs concourent à la formation de la croûte et de la lithosphère océanique aux dorsales. Les processus tectoniques résultent de la divergence des plaques et conduisent à la fracturation de la croûte magmatique nouvellement créée, voire à la mise à l'affleurement de roches mantelliques profondes en contexte de dorsales lentes et/ou froides. Les processus magmatiques sont la conséquence de la remontée du manteau sous-jacent et sa décompression, qui induit la fusion partielle et conduit à la mise en place des roches de la

croûte océanique. Ces roches représentent de haut en bas, les produits éruptifs (basaltes), les filons d'alimentation (dolérites) et le résidu des chambres magmatiques (gabbros). Enfin, les processus hydrothermaux résultent du magmatisme (source de chaleur) et de la tectonique (pénétration de l'eau de mer par les fractures), avec des circulations de fluide qui refroidissent et altèrent la croûte et remobilisent de nombreux éléments, dont des métaux. Les sorties de fluide à l'eau libre et leur brusque refroidissement conduisent à la précipitation de ces éléments, qui constituent alors des amas sulfurés dont l'intérêt économique potentiel est en cours d'évaluation.

L'étude des dorsales fait l'objet d'une stratégie multi-échelle allant de la cartographie du segment d'accrétion, de l'ordre d'une centaine de kilomètres, à l'observation détaillée d'un site hydrothermal, à l'échelle de quelques mètres. L'exploration à grande échelle repose sur la bathymétrie et l'imagerie multifaisceaux, le magnétisme, la gravimétrie, la sismique rapide, ainsi que les hydrophones et/ou les sismomètres de fond de mer pour l'étude de la sismicité, l'échantillonnage de roches par dragage ou wax core, et la recherche de panaches hydrothermaux dans la colonne d'eau par CTD. L'exploration détaillée requiert l'utilisation d'engins sous-marins tels que les AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), ROV (*Remotely Operated Vehicle*) ou encore les sous-marins habités. Selon les cas, ces engins d'exploration profonde permettent de réaliser un cartographie bathymétrique, géophysique, voire chimique de haute résolution, que complète l'observation in situ et la collecte d'échantillons de roche, de fluide, ou biologique. La nécessité d'acquérir des séries temporelles de paramètres physique, chimique, ou biologique pour comprendre les phénomènes observés conduit à la répétition annuelle ou pluriannuelle de ces travaux de détail, et *in fine* à l'installation d'observatoires fond de mer qui demandent une maintenance suivie à l'aide des mêmes engins sous-marins.

* évolution de la lithosphère océanique

→ refroidissement et épaississement

→ altération, hydrothermalisme BT, échanges chimiques

→ mise en place de la charge sédimentaire

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques, OBS, carottages, flux de chaleur

Dans les vingt premiers millions d'années suivant sa formation, la croûte océanique subit un hydrothermalisme de basse température et s'altère progressivement. La lithosphère océanique se refroidit alors rapidement, par conduction mais aussi et surtout par convection hydrothermale. Au-delà de vingt million d'années, la couverture sédimentaire pélagique est suffisante pour prévenir les échanges entre l'eau de mer et la croûte océanique, et seule la conduction préside au refroidissement et à l'épaississement graduel de la lithosphère océanique. Ces phénomènes, moins spectaculaires que ceux observés aux dorsales, n'en sont pas moins essentiels, sur la durée considérée, dans les bilans thermiques et chimiques de l'océan. Les outils d'approche sont ceux de la cartographie bathymétrique et géophysique (sondeur multifaisceaux, magnétomètre, gravimètre, sismiques, sismomètres fond de mer) mais aussi la récupération de carottes sédimentaires et la réalisation de mesures de flux de chaleur.

* disparition de la lithosphère océanique

→ prisme d'accrétion ou érosion

→ métamorphisme, déshydratation, magmatisme

→ sismogénèse, risque sismique, volcanique et tsunamigénique

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques, OBS, carottages, observatoires fond de mer

La lithosphère océanique disparaît dans les zones de subduction, frontières de plaques convergentes porteuses du plus grand potentiel de risque sismique, volcanique, et tsunamigénique de la planète. Le front d'une zone de subduction est constitué d'un prisme sédimentaire plus ou moins large suivant que la marge est en accrétion (accumulation de sédiments affectés d'une tectonique compressive) ou en érosion (passage en subduction d'une fraction importante de ces sédiments). Le jeu des failles dans ce prisme sédimentaire génère une importante sismicité et induit les mouvements du fond marin à l'origine des tsunamis. Plus profondément, le contact entre socles des plaques plongeante et superficielle constitue la zone sismogène, d'où proviennent la plupart des séismes majeurs. Élément crucial dans la compréhension de ces séismes, son fonctionnement est scruté: présence d'aspérité susceptible d'accumuler les contraintes et d'augmenter le temps de récurrence et l'intensité des séismes; occurrence de glissements lents asismiques prenant en compte une partie de la convergence; segmentation de l'interface et donc des zones susceptibles de rompre sous l'effet de discontinuités de la plaque plongeante; ces éléments, et bien d'autre, concourent à une meilleure connaissance du risque sismique. Plus profondément encore, les roches crustales se métamorphosent, se déshydratent, et donnent finalement naissance à un magmatisme qui constituera les arcs insulaires.

L'étude des zones de subduction requiert, d'un point de vue strictement marin, l'acquisition d'une cartographie bathymétrique et géophysique conséquente (sondeur multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques de diverses pénétration); d'une cartographie de la sismicité lors de grands événements occasionnant des milliers de répliques (sismomètres fond de mer); de données concernant les sédiments du prisme d'accrétion (carottages, mesures géotechniques, flux de chaleur), et enfin d'observatoires fond de mer destinés à lancer l'alerte en cas d'événement sismique susceptibles de générer un tsunami. Les travaux menés sur les zones de subduction font souvent l'objet d'approches intégrées terre-mer, et la présente liste n'est évidemment pas limitative.

* structures intra-plaques

→ volcanisme de point chaud

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques, OBS, échantillonnage de roches, engins d'exploration profonde (cartographie bathymétrique et géophysique HR, observation in situ, prélèvement de roches et de fluides)

Les points chauds qui remontent du manteau terrestre sous forme de panache thermique, créent en surface un magmatisme plus ou moins alcalin en contexte géodynamique intraplaque ou à proximité de limites de plaques. Tant que leurs manifestations de surface se situent intraplaque, ils produisent des édifices volcaniques de type Trapps lors de l'arrivée du panache sous la lithosphère d'un continent ou de type Ontong java sous celle d'un océan puis des chaînes d'édifice sous marins pour les points chauds en domaine océanique qui nous intéressent ici. La compréhension du fonctionnement dynamique nécessite de connaître les structures de surface et profondes. Celles-ci peuvent être imagées, les produits de surface échantillonnés et analysés. Leur étude requiert l'utilisation de moyens variés.

La bathymétrie et imagerie multifaisceaux, le magnétisme, la gravimétrie, les moyens sismiques, OBS, l'échantillonnage de roches ou l'utilisation d'engins d'exploration profonde (cartographie bathymétrique et géophysique HR, observation in situ, prélèvement de roches et de fluides) contribuent à la connaissance de ces structures.

→ déformation intra-plaque

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques, OBS, hydrophones

Si la majeure partie des déformations de la lithosphère terrestre est localisée aux frontières de plaque, une partie non négligeable de cette déformation affecte des zones a priori inactives, parfois sous l'effet de déséquilibres locaux (par exemple déstabilisation d'un empilement sédimentaire), en d'autres lieux parce que l'évolution géodynamique globale induit la formation de frontières de plaque de second ordre, initialement diffuses, qui affectent de manière modérée de grandes régions. Tel est le cas, par exemple, d'un domaine large de plus d'un milliers de kilomètres s'étendant, au Sud de l'Inde, des Maldives à Sumatra, où la plaque indo-australienne est affectée depuis ~16 millions d'années par une déformation compressive significative - on parle désormais des trois plaques Inde, Australie et Capricorne. Le séisme de magnitude 8.6 survenu en 2012 dans la partie orientale de cette région, peut-être en relation avec celui de Sumatra en 2004, montre que ces régions sont potentiellement vecteur de risque. L'étude de tels domaines demande une cartographie de grande échelle (bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques) ainsi que l'acquisition de données sismologiques (OBS, hydrophones) permettant de préciser l'activité sur les failles observées.

* rifting et marges passives

Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques, OBS, échantillonnage de roches et de fluides, engins d'exploration profonde (cartographie bathymétrique et géophysique HR, observation in situ), observatoires fond de mer

Les zones de rifting ainsi que les marges passives sont des zones de la croûte qui font l'objet d'études approfondies récentes. Elles ont enregistré des mouvements qui ont abouti (marges) ou non (rifting) à la fracture de plaques et à l'extension du domaine d'accrétion. En domaine marin, elles montrent les structures des marges amincies et peuvent ainsi mener à la compréhension du mécanisme de l'amincissement avant la rupture sous la pression thermique du manteau. Elles nécessitent des moyens d'investigation en profondeur car elles sont le plus souvent cachées par d'épaisses couches sédimentaires.

Les moyens nécessaires mais non exhaustifs sont : Bathymétrie et imagerie multifaisceaux, magnétisme, gravimétrie, sismiques rapide et/ou lourde, OBS, échantillonnage de roches et de fluides, engins d'exploration profonde (cartographie bathymétrique et géophysique HR, observation in situ), observatoires fond de mer.

Quels outils?

Nous ne discutons ci-après que les outils des géosciences installés sur le navire. Il est clair que des outils amenés, tels que les sismiques, ne relèvent pas de la jouvence du N.O. Marion Dufresne. Cette dernière devra cependant prendre en compte les évolutions les plus récentes des outils nationaux afin d'en permettre la mise en œuvre.

- Le sondeur multifaisceaux grands fonds doit offrir des performances maximales en terme de fauchée et de résolution des pieds de faisceaux. Une résolution de 1°x1° est préférable, ou à défaut de 1°x2°. Ces performances doivent être atteintes aux vitesses d'évolution normale du navire, généralement supérieures à celles des autres navires.
- Le maintien d'un système de mesures gravimétriques sur le Marion Dufresne demande un niveau d'exigence élevé dans la qualité de la mesure et la maintenance de l'instrument. Des mesures de qualité moyenne ne sont plus nécessaires dans la mesure où une qualité similaire est obtenue par l'altimétrie satellitaire.
- La présence d'un magnétomètre scalaire tracté sur le navire est souhaitée, et sa mise en œuvre en routine lors des longs transits est une demande expresse de l'International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA).

- Le navire devrait pouvoir effectuer les dragages sans reprise de bras lors des mises à l'eau et récupération, comme cela est le cas sur d'autres navires (Sonne).
- Les prélèvements d'échantillons par "wax core" devraient être facilités par l'adjonction d'ouvertures adaptées dans le bastingage et de la possibilité d'un dévirage plus rapide.
- La mise en œuvre des sismiques requiert des adaptations spécifiques qui devront être considérées.
- La mise à l'eau et la récupération d'instruments au fil de l'eau (par exemple OBS) doit faire l'objet d'une étude de manière à ce que la hauteur du navire ne soit plus un obstacle à leur déploiement.

Les recommandations sur le carottage et le prélèvement d'eau ont été exprimées de manière idoine par les autres communautés.

- Enfin, un point saillant de la jouvence est, pour les Géosciences, la possibilité de mettre en œuvre des engins d'exploration profonde. Ainsi, le déploiement d'AUV (Autonomous Underwater Vehicle) doit être étudié de manière à pouvoir être effectué malgré la hauteur du navire. La mise en œuvre d'un ROV lourd tel que le ROV Victor doit être envisagée, car elle permettrait l'ouverture de nombreux types de travaux sur les dorsales indiennes. Cette évolution importante pour la communauté scientifique demandera probablement un renforcement des structures de la plage arrière du navire.

3 Biologie des faunes benthique et démersales.

Contexte

Au cours des quatre-vingts dernières années, plus de 30 campagnes ont été effectuées dans la zone subantarctique en particulier dans la zone sud de l'océan Indien sud, cependant peu de ces campagnes ont permis de récolter et d'étudier la biodiversité marine et en particulier le benthos. Le N.O. Marion Dufresne 1 s'était illustré par ses campagnes de bionomie benthique ou pélagique (MD 03, 04, 08, 24, 25, 30, 42, 50, 52....) dont certaines furent réalisées dans le cadre de programmes internationaux comme le programme BIOMASS centré sur le krill Antarctique (MD 24, 25, 42). Parmi celles-ci, deux campagnes MD03 (1974) et MD04 (1975) ont eu pour objectif l'analyse de la description et cartographie des différentes communautés benthiques et leurs habitats. La campagne MD04 a ainsi effectué dix radiales autour des îles Kerguelen totalisant 122 stations entre 17 et 4340 m de profondeur, à des profondeurs comprises entre 17 et 4340 m. Les spécimens récoltés lors de ces campagnes sont intégrés dans les collections du Muséum national d'histoire naturelle.

Les besoins actuels de connaissance tournés vers la gestion des stocks et vers la protection des écosystèmes fragilisés (anthropisation, changement climatique) nécessitent d'une part un inventaire précis des communautés et d'autre part un suivi régulier de la transformation des écosystèmes. Les données et les spécimens acquis lors des campagnes anciennes du Marion Dufresne, bien que précieux, ne sont pas adaptés aux dernières avancées technologiques, notamment pour le moléculaire. Si pour les campagnes pélagiques (Biomass, Antiprod, Aspara), les données physiques existent, en revanche elles sont absentes pour les campagnes benthiques. Cette absence de données notamment en termes de substrat, température, salinité, courantologie liée aux stations d'échantillonnage ainsi que l'absence de prise de vue des fonds nuisent aux approches intégratives indispensables à la compréhension des écosystèmes.

Quels objectifs de recherche ?

Dans le contexte actuel de changement global (avec l'élévation de température et l'acidification des océans), d'amélioration des moyens d'investigation et d'avancées conceptuelles, les principaux objectifs des campagnes biologiques vont être les suivants :

1. Comblent nos lacunes sur la biodiversité, par l'exploration de ses différents aspects (génétique, spécifique ou fonctionnelle). 70 à 80 % de la faune marine reste à découvrir selon les estimations les plus récentes. Ainsi, les méthodes de séquençage intensif démontrent que la diversité est sous-estimée avec la seule approche morphologique. De plus, des pans entiers de méconnaissance existent pour des organismes de petite taille tels que les nématodes, protistes, bactéries, archées, virus, etc..... Les approches de séquençage intensif permettent maintenant d'appliquer les techniques moléculaires à une échelle suffisante et répondront à nos problématiques de description et de quantification de la biodiversité. L'utilisation du « barcoding » doit être généralisée et prévue en amont lors des récoltes (prélèvement systématique de tissus et fixations adéquates). Enfin, l'océan Austral de même que le sud des océans Indien, Pacifique et Atlantique sont largement inexplorés. Ces mêmes zones sont encore peu impactées par la pression anthropique. L'exploration de la diversité devient urgente afin d'établir un état des lieux, point de départ indispensable pour toute comparaison avec toutes observations futures ;

2. caractériser les communautés benthiques avec intégration des problématiques liées aux interactions entre organismes (symbiontes, épibiontes, etc...), ainsi qu'aux relations spatio-temporelles des organismes avec l'environnement (connectivité, biogéographie, phylogéographie), à des échelles locales, régionales ou globales ;

3. caractériser les communautés pélagiques avec nécessité (1) d'élaborer une couverture spatio-temporelle à l'échelle des sous-systèmes (sub antarctique, Permanent Open Ocean Zone, Seasonal Ice Zone) et (2) d'aborder une approche intégrant le domaine du mesopélagique (200 à 1000 m) encore largement inexploré ;

4. comprendre le fonctionnement des écosystèmes (interactions trophiques; structure complète des réseaux trophiques et couplage benthopélagique, rôle des habitats et détermination des habitats essentiels), afin de permettre d'appréhender au mieux les capacités de résistance et de résilience des écosystèmes marins ;

5. établir une éco-régionalisation des zones concernées, grâce à une approche véritablement interdisciplinaire et alliant les données spatiales (géographiques), biologiques (les présences ou probabilités de présence des espèces), abiotiques/environnementales (profondeur, salinité, température, DOM, POM, acidité, oxygène, pH, nitrates) ainsi que les actions anthropiques (pression de pêche, aménagements, pollutions, etc.) ;

6. mettre en place des suivis temporels et établir des observatoires à long terme de zones stratégiques afin de répondre à la demande sociétale (AMP, gestion des stocks, etc...) et scientifique (évolution de la diversité marine, recrutement, adaptations en réponse au changement global, etc...) en s'appuyant sur des protocoles dédiés aux observations éco-évolutives et sur des stratégies expérimentales en écologie. Le suivi régulier permettra de différencier les variations normales intersaisonnières ou interannuelles des variations dues à d'autres facteurs. L'inventaire s'appuiera sur les techniques modernes d'analyse qui ne peuvent pas être réalisées sur le matériel ancien. Le suivi régulier peut être envisagé à plusieurs échelles: de grandes campagnes de prélèvements tous les 10 ou 15 ans; un transect annuel ou bisannuel lors des transits du MD; relevé de mouillages instruments capables de mesurer un certain nombre de paramètres physico-chimiques voire biologique (T°, salinité, courants, turbidité, MES, chlorophylle, plancton). Ces observatoires permettront de proposer non seulement des scénarii évolutifs mais également des modèles de prédiction de répartition des espèces et de la ressource, enjeux de connaissances indispensables aux scientifiques et gestionnaires.

Pour atteindre de tels objectifs, nous disposons d'un réseau international de systématiciens et d'écologistes. Leurs compétences taxonomiques sont indéniables ainsi que leur savoir-faire en terme des collections, des données associées (bases BaseExp, Jacim). La mise en ligne de ces données dans les bases internationales telles que GBIF, Fishbase,

ScarMarBin, etc. assure le partage de la ressource scientifique. Cette communauté de chercheurs est particulièrement active dans l'océan Austral et a l'habitude de coopérer.

Le contexte international de la recherche dans l'océan Austral est attesté par nos nombreuses participations à des campagnes telles que ICEFISH sur le navire américain *Nathaniel Palmer*, CEAMARC sur 3 navires : l'australien *Aurora Australis*, le japonais *Umitaka Maru* et le français *Astrolabe*, BENTART sur le navire espagnol *Hesperides*, ANTXXIII/8 et ANTXXIX/3 sur le navire allemand *Polarstern*, ou JR230 sur le navire britannique *James Clark Ross*. A l'instar de ces navires et campagnes océanographiques cités, les nouvelles installations devront permettre au N.O. Marion Dufresne de s'ouvrir plus largement à la dimension internationale de la recherche et accueillir des collaborateurs étrangers dans le cadre de programmes internationaux. Cela implique également que ces transformations permettent un travail multi-disciplinaire incluant par exemple, en plus des équipements traditionnels, des installations d'aquarium pour le maintien d'organismes dans des conditions compatibles avec des expériences de physiologie ou pour le traitement nécessaire à la biologie moléculaire (barcoding, etc.).

Quelle(s) zone(s) d'étude ?

On observe que les progrès récents ont été obtenus dans des programmes en collaboration entre instituts de plusieurs nationalités, mettant à disposition des navires de mieux en mieux équipés et pouvant travailler de façon complémentaire.

A ce jour, l'océan n'est que partiellement exploré comme le montrent les résultats très inégaux, en qualité et en quantité, concernant les îles subantarctiques des secteurs atlantiques, indiens et pacifiques de l'océan Austral (Arc de la Scotia, Malouines, Bouvet, Gough, Marion et Prince Edwards, Crozet, Kerguelen, Heard et McDonald). Ce manque de données est encore plus marqué en ce qui concerne les monts sous-marins, malgré leur importance biogéographique avérée. La compréhension de l'origine et de l'évolution des faunes antarctiques nécessite également la prise en compte de l'océan Austral dans son ensemble (Antarctique maritime est et ouest). Cette approche à grande échelle ne sera possible que grâce à une flotte de navires internationaux qui travailleront de manière coordonnée et doivent être équipés de façon aussi efficace. Les campagnes futures se feront à partir de plusieurs navires qui appareilleront de Punta Arenas, de La Réunion, de Perth et/ou du Cap.

De nombreuses régions de l'océan Austral sont à ce jour encore inexplorées, de même pour toute la zone Sud de l'Océan Indien. Cependant, parmi les nombreuses zones à explorer, nous aimerions (en collaboration avec les partenaires privilégiés que sont les australiens, les sud-africains, les anglais, les allemands, les belges et les néo-zélandais) explorer plus complètement les îles subantarctiques de l'Océan Austral (Crozet-Kerguelen-Heard et possiblement Marion-Prince Edward) et ce en partant de La Réunion, Perth ou du Cap ce qui permettrait d'explorer aussi les *seamounts* de l'océan Indien sud qui se trouvent sur la route et d'explorer ainsi des zones biogéographiques/écologiques attenantes. Cette zone importante pour comprendre non seulement l'origine des faunes, la colonisation, le fonctionnement des différents écosystèmes mais également pour appréhender la relation entre structure des populations pélagiques et fronts physiques et structures des populations et processus advectifs, est un enjeu environnemental majeur dans les années à venir (aires marines protégées).

Expression des besoins.

Afin de répondre aux problématiques scientifiques des biologistes marins, il est nécessaire d'une part qu'un certain nombre d'engins soient opérationnels sur le MD et d'autre part que des locaux puissent être dédiés aux diverses analyses.

Engins de pêche (hors ceux pouvant être déployés par le petit treuil hydro latéral pour WP2, Omori...)

Dans la mesure où le Marion Dufresne n'est pas équipé d'un plan incliné qui faciliterait les manœuvres de chalutage à l'arrière et des arts trainants en général, l'installation de treuils et de grues judicieusement placés devrait permettre de compenser cette absence pour une mise à l'eau et un virage facilité de ces engins. Il est à noter toutefois que le CPR à cogné plusieurs fois sur la coque du navire. Actuellement l'angle de la poupe est droit et à plus de 5 m de la surface, ce qui rend très difficile la manœuvre des chalutages pélagiques et de fond (RMT, IKMT, IYGPT, multinappe (ce chalut se fait par le côté, pas par l'arrière, et si l'on veut tracter cela pose problème), Hydrobios, Mocness, chaluts à perche, chalut Agassiz, petit chalut de fond...), ainsi que des opérations avec des dragues diverses et bennes (Shipeck pour le sédiment et le benthos ; benne SmthMac-Intyre et Van Veen pour le benthos et la grande benne Hamon) à des profondeurs comprises entre 100 et 3000 mètres. De telles opérations impliquent au moins un treuil, et de préférence, deux treuils couplés, ainsi qu'un (deux) câble(s) de traction de 12 à 14 mm de diamètre et d'au moins 4000 m de long (voire de 15000 m comme pour le James Clark Ross http://www.antarctica.ac.uk/living_and_working/research_ships/rrs_james_clark_ross/technical_data.php). Il faut compter 2 à 3 fois la profondeur visée pour la longueur de câble. Ce câble doit pouvoir supporter une CMU (charge maximum utile) d'au moins 8 tonnes, compte tenu de la taille du navire, de la longueur du câble une fois déroulé ainsi que celle des engins susceptibles d'être déployés. Un rail avec treuil de levage ou bien portique de chalutage est indispensable. Une grue de manœuvre est indispensable sur l'un des côtés arrière ! Il faut également envisager la mise en œuvre et l'utilisation d'engins tels que les ROV ou les caméras tractées, qui sont des outils indispensables (1) pour l'identification et la caractérisation des habitats benthiques, des faciès sédimentaires voire la détection d'espèces dispersées ou mobiles ; (2) pour faire des relevés instrumentés proches du fond (vidéo, sondeurs et/ou divers capteurs) ; (3) pour faire du profilage vertical en milieu pélagique.

D'une façon générale, pour chaque campagne, un équipage formé à leurs besoins spécifiques (ex: pêche vs géologie) doit être prévu.

Autres engins

Il faut un tensiomètre pour estimer et compenser l'effet de la houle bien présente dans l'océan Austral et un système de mesure de la longueur de câble filé lesquels sont plus performants qu'une poulie compteuse.

L'utilisation d'un ROV doit pouvoir être complétée par des systèmes vidéo ou photo installés sur les parties fixes de certains engins tels que les chaluts.

L'installation de nouveaux sondeurs apparaît nécessaire pour envisager l'exploitation des profils d'échosondage pour de l'écho-intégration (30, 80, 120 ...kHz) avec des dalles d'émission/réception fixes. L'information importante pour les chercheurs, en complément de la bathymétrie, est le profil du fond permettant la corrélation position GPS et profondeur (association type MAXSEA 3D).

Les prélèvements biologiques sont incomplets sans des informations physiques de qualité sur le milieu, telles que l'hydrologie (par CTD, bouteilles Niskins), la nature du fond (carottiers petite et grande section ainsi que la benne Shipeck à grande ouverture).

Locaux et espaces de travail

Le PC scientifique doit être amélioré par une meilleure insonorisation ainsi que par une communication directe avec la passerelle (caméras vidéo et son), avec relais de la position GPS et échosondeur. Ce lieu indispensable pour le chef de mission et les chefs d'équipes mériterait d'être le plus proche possible de la plage arrière.

Sur le navire, un certain nombre d'espaces dévolus au traitement de la récolte par engin de pêche est aussi indispensable. Comme fréquemment les récoltes peuvent être substantielles (particulièrement en benthos) les charges peuvent être lourdes ce qui implique l'obligation de ne pas emprunter des escaliers (risque élevé d'accidents). Un engin de manutention serait bienvenu.

Espaces de travail

Un espace de tri pour le benthos qui sera aménagé le plus proche possible de la plage arrière (pour éviter les transports d'échantillons lourds). Devant celui-ci, il doit y avoir plusieurs arrivées d'eau (eau douce et eau de mer) et une évacuation afin d'avoir la possibilité de pré-tamiser et rincer hors de l'espace de travail pour enlever le gros des sédiments associés aux prélèvements. Il faudra par ailleurs :

- un espace labo ou un conteneur insonorisé avec une paillasse de tri centrale en inox (avec arrivée et évacuation d'eau de mer) à bonne hauteur (permettant le tri debout sans se casser le dos), creuse, étanche (avec rebords) et une évacuation au sol, prévue pour éviter les problèmes de colmatage par boues et autres résidus.

- des étagères à rebords, des rails de fixation sur les cloisons (pour les rouleaux de film, etc...), ainsi que des paillasses aux deux extrémités du container afin d'installer un poste photo, des postes pour mise en sacs plastiques soudés, et sur un espace séparé au minimum un poste (avec une arrivée électrique stabilisée, cf. onduleur) pour poser un ordinateur/+ imprimante, et minimum un autre poste pour une loupe binoculaire.

- un espace de tri et de mensurations dédié aux poissons dans un autre labo ou container insonorisé pouvant être mitoyen. Il y a de nombreuses mensurations et dissections sur les poissons qui prennent beaucoup de place. Sur les grands navires style Polarstern, Palmer ou *Aurora Australis*, cet endroit se situe souvent dans des labos distincts: les poissons les plus gros et visibles sont triés en premier sur le pont et emportés, tandis que les petits qui sont ensuite retrouvés dans le benthos sont démenagés dans des seaux au fur et à mesure du tri de celui-ci. L'équipement intérieur (s'inspirer de la Thalassa qui est un navire de pêche industrielle adapté aux recherches scientifiques, très bien organisé notamment pour le poisson) devrait être le même que pour le tri de benthos avec en plus un espace de mensuration (2 m linéaire minimum) et un poste de pesée (balance à compensation de houle) et un congélateur coffre.

- un espace labo analyses "fines" (dissections et prélèvements délicats, cytogénétique, physiologie, microbiologie, observations en microscopie et fixation des échantillons) avec paillasses à rebord, placards, étagères à rebords, rails de fixation, hotte à flux laminaire et de chimie, eau courante douce et eau de mer, branchements électriques pour divers appareils de mesure, centrifugeuse, frigo, machine à glace etc... Ces appareils peuvent être amovibles. Cet espace peut être situé plus à l'intérieur du navire, le volume de matériel traité y étant beaucoup plus faible.

- un espace avec étuve et four à moufle pour y sécher des échantillons organiques ou non.

- un aménagement nouveau et indispensable consiste en une pièce climatisée pour des aquariums alimentés en eau de mer naturelle courante près de la plage arrière. Une telle

installation est indispensable pour maintenir dans de bonnes conditions les organismes devant être photographiés, préparés pour la biologie moléculaire ou devant être acclimatés avant expérimentation physiologique par exemple. La température de l'eau de mer devrait idéalement être aussi contrôlée.

Espace de stockage

Pour les engins de pêche ainsi qu'une place pour le matériel de ramandage.

Un espace stockage des contenants vides (fûts/bidons/piluliers)

Espace stockage fûts/bidons/piluliers échantillons alcool et eau formolée dans un lieu sécurisé, à l'extérieur dans un premier temps (cage palette amarrée, ou autre), proche de l'espace tri puis en climatisation ou protégé lors du passage vers la zone tropicale.

Stockage liquide/échantillons fixés à +4°C, congelé à -20°C et -80°, azote liquide.

Synthèse des principales propositions d'aménagements techniques de la communauté scientifique.

Cette liste est présentée sans degré de priorité et sans considération sur la faisabilité du point de vue technique ou des coûts. Elle ne reprend pas les aspects traités dans CLIMCOR.

Instruments

Sondeur multifaisceaux grands fonds	Une résolution de 1°x1° est préférable, ou à défaut de 1°x2°
Gravimètre	niveau d'exigence élevé dans la qualité de la mesure et la maintenance de l'instrument
Capteur pour mesures des caractéristiques des eaux de surface	Thermosalinographe, fluorescence, système de « plug and play » sur le flux d'eau » pour d'autres instruments.
Station météo	Incluant la mesure du PAR
Sondeur pour écho intégration	38,120 kHz, 70 et 200kHz ?
ADCP	Standard CORIOLIS
Sondeur de sédiment	

Déploiement et récupération d'engins et mouillages

Magnétomètre scalaire tracté	
Sismique	
Déploiement AUV	
Déploiement ROV Victor	
Déploiement mini ROV	
Engins de pêche, dragues et bennes pour opérer en 100 et 3000m.	Compenser l'absence de plan incliné par un système de treuil et grue adapté. CMU 8 t.
Système pour largage acoustique.	
Système pour triangulation.	
Canon lance amarre	Crochetage à distance des mouillages
Dragues	sans reprise de bras lors des mises à l'eau et récupération (type Sonne)
"wax core"	
Tirs des XBT	

Locaux, appareils associés et circulation des échantillons

Nouveau local CTD-rosette	Pour rosette 24 bouteilles
Nouveau local	Pour des aquariums alimentés en eau de mer naturelle courante près de la plage arrière
Nouveau local de tri benthos/poissons	Localisation à proximité de la plage arrière Cela pourrait être aussi un container insonorisé.
Rénovation laboratoires actuels avec des équipements de base y compris les aspects hygiène et sécurité.	Hottes Sorbonne, hottes à flux laminaire, Etuve, four à moufle. Rénovation alimentation et sortie fluide
Locaux de stockage	Engins de pêche
Stockage des échantillons « froids »	2 congélateurs et 2 surgélateurs dédié »sciences «

Amélioration du PC scientifique

Réorganisation du pont arrière et optimisation de la circulation entre lieux de prélèvement et de traitements des échantillons.

Alimentation en eau de mer à gros débit sur la plateforme hélico.

Insonorisation et climatisation

Communication avec la passerelle

Vision sur les zones de travail améliorée.

Transport extérieur des échantillons lourds (>10 kg) entre les différents ponts. Plateforme hélico, pont principal, cale océano.

Implantation de containers ou treuils mobiles

Indépendante du circuit incendie.

Informatique et accès aux données

Transfert bi directionnel mer/terre de grandes masses de données

Accès aux données de base (nav, météo...) dans les laboratoires et les containers laboratoires

Capacité à distribuer à bord d'autres données

instruments apportés par les scientifiques.

