

Groupe Mission MERCATOR / CORIOLIS

Rapport final 2003-2004

Correspondant du projet : Loic Petit de la Villéon

Eléphants de mer bio-échantillonneurs de profils de température et de salinité dans l'Océan Austral (Contribution française à l'étude de la partie indienne de l'Océan Austral)

Responsable scientifique du projet : Christophe Guinet

En collaboration avec Young-Hyang Park, Jean-Benoit Charrassin, Fabien Roquet, C. A. Bost et Frédéric Bailleul

Contexte Ecologique de l'Etude :

L'éléphant de mer austral est un prédateur important de l'Océan Austral, et bien que ses principales colonies soient séparées par plusieurs milliers de kilomètres, ces animaux entreprennent d'importantes migrations pour rechercher leurs proies. Alors que quelques populations sont stables voire même en légère augmentation, d'autres sont en déclin continu depuis les années 1950 (Boyd et al. 1996, Guinet et al. 1999, Slip & Burton 1999). Les raisons de ces différences ne sont pas claires, mais des changements régionaux d'abondance et de distribution des proies en relation avec des variations des conditions océanographiques pourraient en être la cause (Hindell et al. 1994 ; Weimerskirch et al. sous presse). L'influence des variations des conditions océanographiques à court, moyen, et long termes sur la distribution et l'abondance des proies et indirectement sur leurs prédateurs est une voie de recherche prioritaire en écologie marine.

Aspects océanographiques de l'étude

L'Océan Austral joue un rôle fondamental dans la régulation du climat mondial. Cet océan abrite aussi des ressources marines d'une très grande valeur économique et patrimoniale. Du point de vue de l'océanographie physique, l'Océan Austral est un système d'une très grande complexité et les processus biologiques qui y sont reliés -et très largement déterminés par ces caractéristiques océanographiques- le sont plus encore. D'importants efforts nationaux et internationaux sont dirigés vers la modélisation des processus d'océanographie physique afin de prévoir la réponse de l'Océan Austral aux changements climatiques globaux et le rôle joué à grande échelle par cet océan dans les processus climatiques. Cependant ces efforts de modélisation sont considérablement limités par le manque de mesures *in situ*, en particulier pour les zones de hautes latitudes et plus encore pour les périodes hivernales. Cette absence de données limite notre compréhension de processus clés à l'échelle de l'Océan Austral tels que la formation de la glace de mer et des eaux antarctiques profondes, mais aussi tels que la variabilité du Courant Circumpolaire Antarctique et des fronts associés, et celle des propriétés des couches de mélange océaniques (Stocker 2001). Les données récoltées nous permettent dans le même temps d'aborder 5 problèmes spécifiques de la circulation dans l'Océan Austral, (détaillés en annexe) portant sur :

- *Variabilité du Transport et localisation des fronts dans l’océan austral*
- *Comparaison avec les données hydrographiques historiques*
- *Propriétés et évolution de la couche de mélange en hiver*
- *Eau de fond Antarctiques et échanges au travers du plateau*
- *Hydrologie du plateau de Kerguelen-Heard*

Dans ce projet, nous utilisons des capteurs de température/conductivité montés sur des éléphants de mer, qui plongent continuellement à de grandes profondeurs et se déplacent sur l’ensemble de l’Océan Austral (figure 2), comme un moyen innovant et efficace pour obtenir, en temps réel et sur l’ensemble de l’année, des quantités importantes d’informations localisées dans le temps et dans l’espace sur les conditions océanographiques de l’Océan Austral. Entre 2003-2004 et 2005-2006 nous comptons procéder au déploiement de 10 balises Argos par an pour la zone Kerguelen. Les financements TOSCA-CNES ont été obtenus pour la période 2003-2004 et sont en cours d’obtentions pour la période 2004-2005.

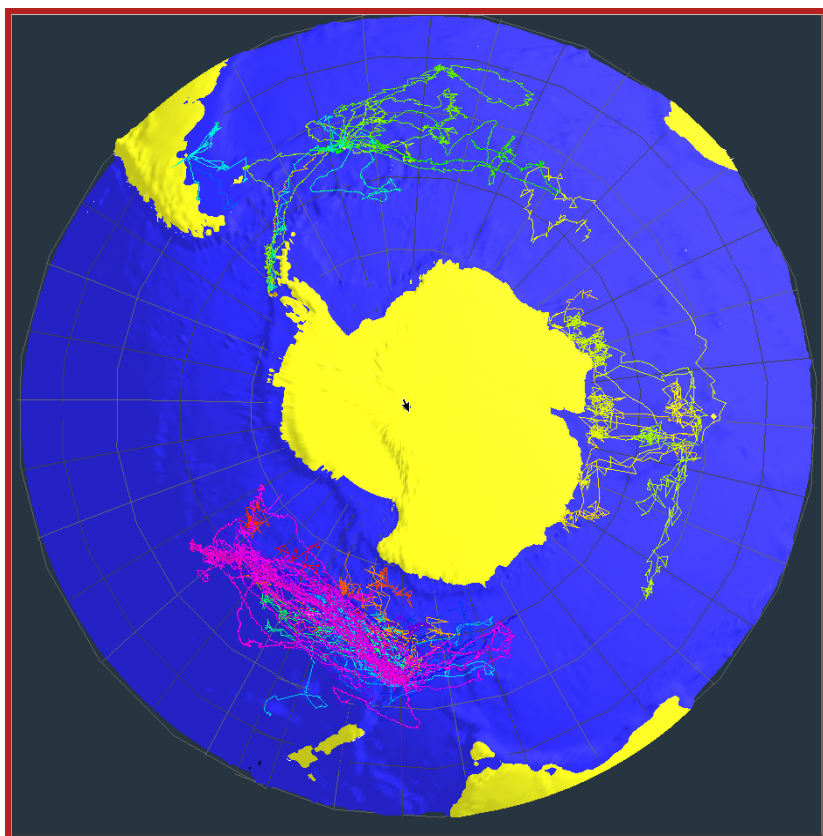


Figure 2 : Trajets en mer obtenus au moyen de balises argos et de systèmes de géolocalisation* d’éléphants de mer, mâles et femelles, issus des trois principaux sites de reproduction de cette espèce dans l’Océan Austral : Géorgie du Sud, Kerguelen-Heard, Macquarie. (Données SMRU ; H. Burton-ANARE). En équipant des animaux de différentes classes d’âge et de sexe et provenant des différentes colonies de reproduction, il est possible d’obtenir une couverture quasi-circumpolaire de l’océan Austral.

* calcul de la position à partir de la mesure de l’intensité lumineuse qui permet de définir l’heure exacte de lever et de coucher du soleil

L’utilisation de mammifères marins (Boyd & Arnborn 1991, Georges et al. 2000, Boehlert et al. 2001, Boyd et al. 2001, Hooker et Boyd 2003) et d’oiseaux marins (Weimerskirch et al. 1995, Koudil et al. 2000, Watakuni et al. 2001, Wilson et al., 2002, Charrassin et al., 2002) comme observateurs océanographiques est une nouvelle approche qui a débuté il y a seulement quelques années. Sans cette dernière, les données

hivernales concernant l’Océan Austral seraient difficiles et extrêmement coûteuses à obtenir. Toute tentative d’utilisation de navires océanographiques conventionnels pour collecter ces données, outre le fait de leurs coûts élevés, ne pourrait pas garantir l’accès aux zones de glace de mer pendant les mois hivernaux. La seule autre alternative serait l’utilisation de bouées dérivantes, cependant cette technologie ne peut pas garantir une couverture importante des zones de hautes latitudes. Par ailleurs les bouées dérivantes ne peuvent pas être dirigées vers des zones présentant un intérêt particulier alors que le choix d’éléphants mer de sexe ou de classes d’âge différents nous permet de cibler des régions précises. Les bathythermographes (XBTs) lancés depuis les bateaux de ravitaillement ou de commerce apportent elles aussi des informations importantes, mais l’obtention de ces données est limitée aux principales voies de navigation et ces appareils ne collectent seulement que les profils de température. Le coût des XCTDs, également déployés depuis les navires, est quant à lui 5 fois supérieur à celui des XBTs. Les mouillages fournissent des séries de données à long terme mais leur nombre est limité compte tenu de leur coût et des opérations logistiques associées à leur mise en œuvre. Une révolution dans les systèmes d’observation est actuellement en cours, basée sur les satellites et sur les flotteurs-profileurs autonomes (Koblinsky et Smith, 2001 ; Loec, G. et al. 1998) qui permettent d’obtenir pour la première fois des mesures globales pour étudier la circulation des océans. Mais même ces nouvelles technologies ne sont pas en mesure de collecter de telles données de façon routinière dans la zone de glace de mer : les mesures par satellite des températures de surface et de hauteur de la mer ne peuvent pas être faites en zone de glace de mer et les profileurs ne peuvent pas fonctionner dans ces conditions.

L’utilisation de prédateurs de grande taille et à grand rayon d’action pour l’acquisition de données océanographiques est actuellement en plein essor. Le Sea Mammal Research Unit est en pointe dans ce domaine. En 2003, en collaboration avec la société britannique Valleport, le SMRU a développé une nouvelle génération de balises argos-CTD suffisamment compactes pour être déployées sur des éléphants de mer sans compromettre leur performance de pêche (figure 2, photo M. Fedak SMRU). Ces balises disponibles fin 2003 ont ensuite subi une série de test afin de vérifier la qualité des données récoltées.

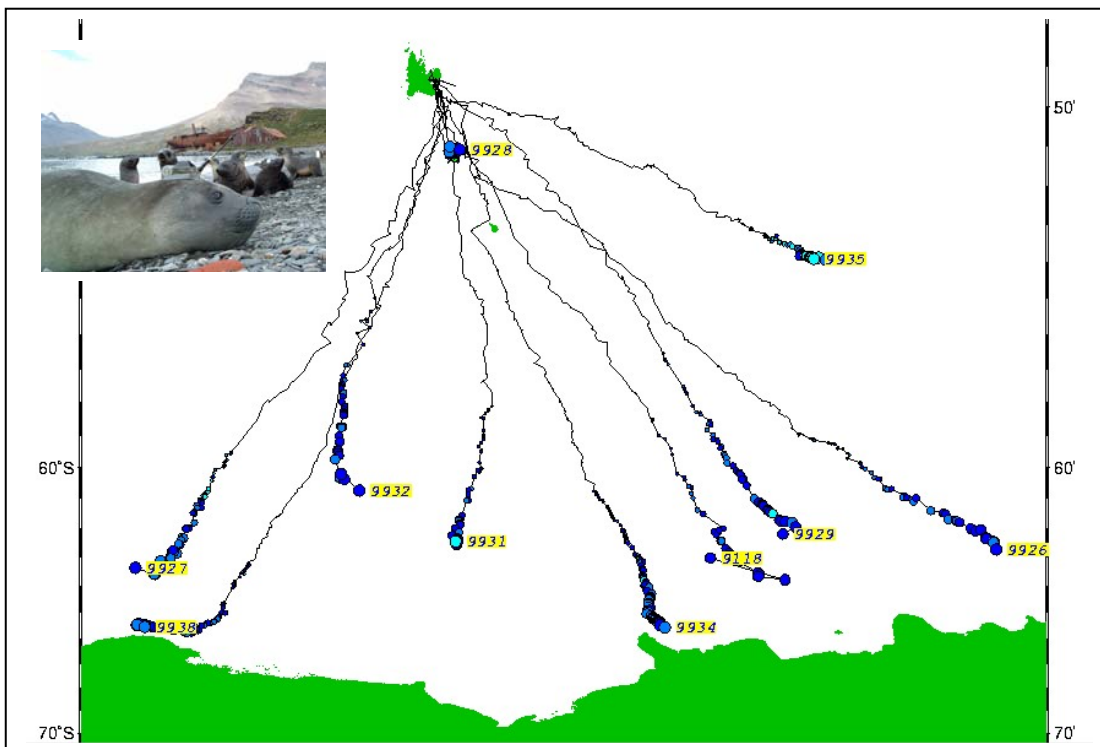


Figure 2 : Trajets effectués par 10 éléphants de mer de l’île Kerguelen équipés de Balises ARGOS-CTD (photo) ; février-mars 2004.

Les données produites par cette étude peuvent compléter utilement celles collectées par l'ensemble des systèmes conventionnels évoqués plus haut. Elles doivent ainsi être intégrées dans la base de donnée CORIOLIS et les schémas d'assimilation des données (MERCATOR) pour l'Océan Austral, et sont disponibles pour valider et améliorer les modèles de circulation océanique de cette région.

Dans cette optique, il a été nécessaire de procéder à un étalonnage très précis des balises-CTD et à la validation des mesures *in situ* par comparaison avec des mesures conventionnelles. A partir de ces expériences, nous procédons actuellement à la correction des données récoltées avant leur intégration à CORIOLIS.

Enfin ces « sondes mobiles », déployées sur plusieurs années, apporteront des données hydrologiques en séries temporelles qui compléteront celles du projet ARGO (flotteurs hydrologiques autonomes en cours de déploiement dans l'océan Austral dans le cadre de GODEA (océanographie opérationnelle)).

Méthodologie

Le développement d'appareils d'acquisition de données et d'émetteurs radios miniaturisés dans les années 1980 a permis aux biologistes de faire d'énormes progrès dans la connaissance du comportement en mer des mammifères marins, chose auparavant difficile sinon impossible à réaliser (Costa, 1993). Au cours de la dernière décennie en particulier, les biologistes ont bien mieux compris la manière dont les mammifères marins exploitent l'océan.

Les éléphants de mer austraux figurent parmi les mammifères marins les plus étudiés, en raison des facilités logistiques qu'ils présentent (e.g. l'accessibilité des lieux où ils reviennent à terre), et en raison de leur rôle clé dans l'écosystème marin antarctique du à leur position en fin de chaîne alimentaire. Les éléphants de mer entreprennent de très longues migrations à la recherche de leurs proies, et, bien que les différentes colonies de reproduction soient séparées de plusieurs milliers de km, ils présentent une distribution circumpolaire (McConnell et al. 1992, McConnell et al. 1996, Jonker et al. 1998, Bornemann et al. 2000).

Ces animaux se caractérisent aussi par les plongées profondes et ininterrompues qu'ils exécutent tout au long de leurs séjours en mer (Figure 3). Ils plongent en moyenne à 400-800 m de profondeur (selon l'heure du jour), et passent près de 90% de leurs séjours en mer (10 mois par an) sous l'eau. La plupart des individus peuvent aussi plonger bien plus profondément, le record étant détenu par un mâle de Kerguelen à 1850 m. La durée moyenne des plongées est de 20-30 minutes, et la fréquence est de 60 à 80 plongées par jour. Enfin, sont reçues en moyenne 8 localisations Argos par jour, l'émission devant avoir lieu lorsque les animaux sont à la surface.

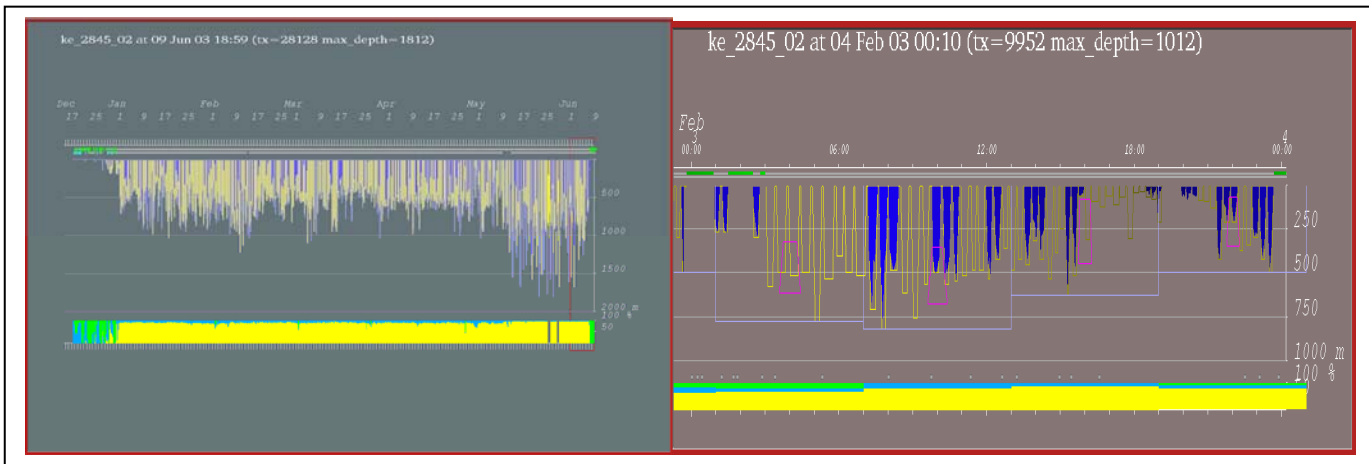


Figure 3 : Extraits de profils de plongées (profondeur en fonction du temps) pour le mâle éléphant de mer 2845 lors de son transit entre l'Île Kerguelen et le continent Antarctique (Décembre 2002-Juin 2003 avec un Zoom sur les plongées effectuées le 4 Février 2003). Données retransmises via Argos.

Nous connaissons bien maintenant la distribution en mer des éléphants de mer en fonction des différentes classes d'âge et de sexe de la population. Les individus les plus étudiés sont les femelles adultes, qui présentent deux phases marines au cours du cycle annuel (Hindell et Burton 1988). La première (voyage post-lactation) se déroule entre novembre et janvier, après la reproduction, et dure environ 70 jours. La deuxième (voyage post-mue) se déroule après la mue annuelle, et dure environ 220 jours de mi-février à mi-octobre. Durant cette période, les femelles adultes exploitent deux zones principales, (i) celle adjacente au continent Antarctique, et (ii) celle associée à la divergence antarctique. Les mâles concentrent leur activité de recherche alimentaire principalement sur le plateau péri-antarctique et/ou péri-insulaires et peuvent effectuer une migration de plusieurs milliers de kilomètres entre leur site de naissance et leur zone d'alimentation ce qui les amène à traverser et à échantillonner les structures frontales et des zones de convergences péri-antarctiques.

Les éléphants de mer explorent des zones très différentes en fonction de leur classes d'âge et de sexe. Pendant l'été, la plupart d'entre eux exploitent l'Océan ouvert, en utilisant différentes régions du CCA. Pendant l'hiver, les mâles et les femelles adultes se rendent dans la zone des glaces, tandis que les jeunes restent dans le CCA. C'est essentiellement au travers du CCA que s'effectuent entre les bassins océaniques les échanges d'eau, de chaleur, et d'autres propriétés. Les variations de la quantité de chaleur stockée dans les eaux du CCA ont été reliées à la variabilité climatique et à des modifications de la distribution et des effectifs du krill, des manchots et des phoques. En ciblant des sexes différents il est ainsi possible de réaliser des « transects » coupant le CCA, et d'obtenir des données à plus fine échelle, sur par exemple les tourbillons et la structure des courants dans les principales zones frontales du CCA, ainsi que dans la zone du « pack ».

La grande avancée technologique fut le développement technologique d'instruments de télémétrie par satellite. Les scientifiques et les techniciens du Sea Mammal Research Unit, Université de St Andrews, RU (<http://www.smru.st-and.ac.uk>) développent depuis les années 80 des appareils (« Argos Satellite Relay Data Loggers » (SRDLs)) pour l'enregistrement et l'envoi par satellite des données de plongée et de localisation d'animaux marins dans leur milieu naturel (McConnell 1986).

Des progrès récents ont permis d'incorporer dans ces appareils un capteur CTD (conductivité/température/profondeur) de haute précision. L'unité de base contient une plate-forme de transmission satellite, qui transmet les données de position via le Service Argos, ainsi que des capteurs de vitesse et de pression pour l'acquisition de données de comportement. Le capteur CTD qui sera utilisé pour cette étude est un appareil standard (valeport, Model 606+ Multiparameter CTD ; <http://www.valeport.co.uk/indexlayers.htm> ; résolution des mesures : 0.002 °C, 0.003 ms/cm, et 5 dbar). Les appareils SLDRs compressent les données selon la méthode de réduction par « lignes cassées » ; la méthode par moyenne par tranche a été envisagé mais n'a pas été retenue car elle ne permet d'optimiser le nombre de mesures sur un animal qui présente une grande variabilité dans la profondeur de ses plongées.

Les balises SRDLs ont été programmées pour d'échantillonner la pression, la conductivité et la température toutes les secondes pendant la phase ascendante de la plongées, selon un pré-programmation permettant d'obtenir des informations sur des plongées réparties sur une période de 24 heures et parmi ces périodes pour les plongées les plus profondes. La journée est divisée en quatre périodes de 6 heures qui débutent à minuit, GMT. La balise SRDL échantillonne les données de conductivité et température, à partir du point le plus profond, dès que la plongée est supérieure à 200 m. Il procède ensuite à l'enregistrement de données supplémentaires pour toute plongée effectuée pendant cette période de 6 heures et plus profonde que cette première plongée. Du fait des contraintes de transmission, résultant de l'interaction entre la longueur des messages Argos mais aussi du temps limité que les animaux passent à la surface, une compression des messages est nécessaire. Pour cela à la fin de la plongée, un algorithme de compression « ligne cassée » tel que ceux initialement utilisés pour les PROVOR est appliqué afin d'identifier et de retenir les 12 points d'inflexion les plus importants pour les profils de température et conductivité. Cette méthode applique un premier filtre avec une fenêtre de 5 m, suivi par un filtre lissant de Hanning (fenêtre de 11 m) avant d'appliquer la méthode de réduction par « ligne cassée » (voir Figure 5). A la fin de la période de 6 heures, le profile de pression, température et conductivité de la plongée la plus profonde est transmise.

Le SRDL est programmée pour envoyer des données pour une période d'environ 300 jours. La méthode des moyennes par tranche prédéfinies ne permet pas d'optimiser le nombre de points retransmis dans le cas des éléphants de mer, compte tenu de la grande variabilité des profondeurs atteintes.

Bilan des travaux effectués en 2003-2004 dans le cadre de l'appel d'offre Mercator-Coriolis.

En 2003, le GMMC nous a attribué 2 keuros H.T. sur 1 an hors budget pour la métrologie (SHOM). L'achat d'équipement a été couvert par le contrat TOSCA-CNES et les missions dans les TAAF et le soutien logistique ont été couverts par l'IPEV. L'INSU a contribué à hauteur d'une balise-an pour la couverture des coûts Argos.

Le financement attribué par le GMMC nous a permis de financer partiellement les opérations suivantes :

- Participation aux journées Mercator-Coriolis des 7 et 8 octobre à Toulouse où nous avons présenté un poster sur notre programme.
- Participation à une réunion de concertation et de préparation au SMRU du 18 au 21 novembre 2003 (Ecosse). Lors de cette réunion nous avons fait le point sur l'état d'avancement des travaux et de préparation des balises CTD en présence de nos collègues britanniques du SMRU, de M. Hindell de l'Université de Tasmanie et des ingénieurs de la compagnie Valeport (fabriquant de la partie CTD de la balise).

Afin que ces données puissent être intégrées dans la base de données Coriolis/Mercator il est indispensable de s'assurer de la qualité des données récoltées par le système balise-CTD. Ce travail a été conduit lors de deux étapes successives :

Etalonnage des sondes en température et conductivité

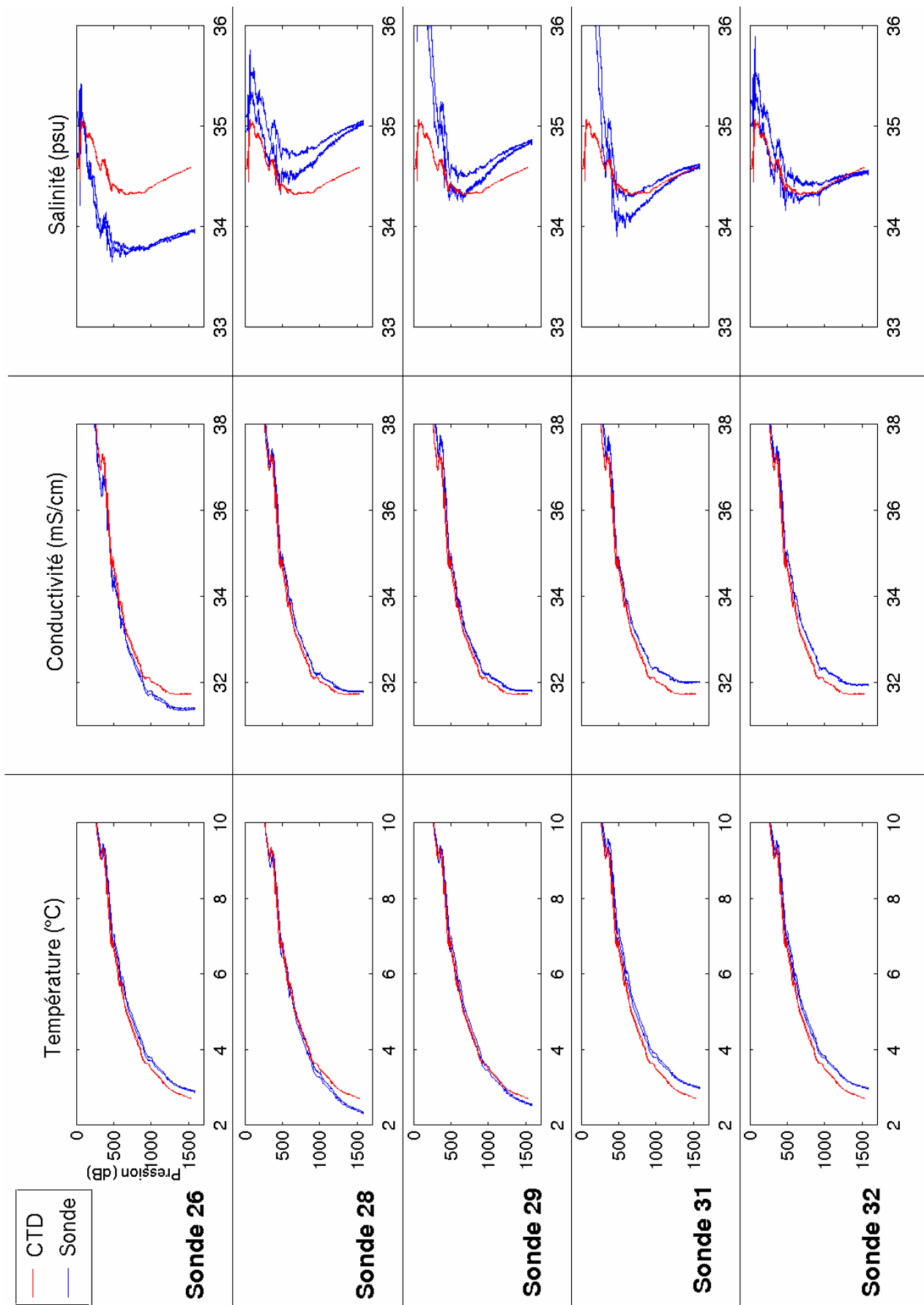
- Laboratoire de Métrologie du SHOM à Brest du 4 au 10 janvier pour l'étalonnage en température et conductivité (à pression atmosphérique) de 20 émetteurs Argos CTD selon les méthodes standard (voir rapport de M. Le Menn/SHOM ci-joint). Nous tenons à remercier ici chaleureusement Marc Le Menn et son équipe pour leur accueil et l'aide qu'ils ont apporté à la réalisation de ce travail.

Essais en mer et correction de l'effet de la pression sur les capteurs de C et T

- Essais en mer à bord du Téthys II au large de Nice, du 27 janvier au 1^{er} février. En collaboration avec D. Tailliez, des profils CTD à 1000 m ont été réalisés au moyen d'une sonde SBE9 sur laquelle étaient fixées les balises à tester. Nous tenons à remercier D. Tailliez pour son aide et D. Antoine pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ces tests pendant la campagne Boussole.
- Essais en mer à bord du Marion-Dufresne au nord de Kerguelen le 18 février. Des profils CTD à 1500 et 1000 m ont été réalisés au moyen d'une sonde SBE39 sur laquelle étaient fixées les balises à tester. Nous tenons à remercier B. Ollivier et l'IPEV pour leur collaboration. Dans les deux cas les balises étaient utilisées en mode acquisition (logger) ce qui nous a permis d'obtenir les profils verticaux complets nécessaires à cette étude.

La Figure 4 présente une comparaison entre 0 et 1500 m des données brutes de T et C issues de 5 des 10 sondes déployées, et des profils collectés simultanément par la CTD. Elle présente également les profils de S calculés à partir de ces données brutes. Une analyse préliminaire montre que les sondes étalonnées fournissent des profils verticaux de T et C comparables à la CTD en termes de précision et de réactivité, et sont donc tout à fait encourageants. Il existe cependant un effet de la pression sur les mesures de T et de C, car nous constatons un écart entre les sondes et la CTD qui augmente en fonction de la profondeur. Nous allons étudier la forme (linéaire ou polynomiale) de cet effet de la pression sur les mesures de C et T puis nous corrigerons systématiquement les données transmises par les éléphants de mer à partir de ces essais en mer. Nous faisons notamment l'hypothèse que l'évaluation de la salinité sera bien meilleure après correction de l'effet de la pression sur C et T (travail en cours de réalisation).

Figure 4 : Comparaison des profils bruts de T et C issus d'une CTD SBE 39 et de 5 sondes « éléphants de mer » fixées sur la CTD, réalisées en février 2004 à bord du Marion Dufresne au large de Kerguelen (NB : nos sondes étant étalonnées entre -1° et 10 °C et 26 et 38 mS/cm, et la couche 0-250 m étant plus chaude et plus salée que ces valeurs dans la région où a été réalisé le profil, la S calculée entre 0 et 250 m ne doit pas être dans ce cas prise en compte pour évaluer la qualité des sondes).



Février 2004 : déploiement de 10 balises sur 5 mâles et 5 femelles éléphants de mer à Kerguelen.

Tous les animaux sont en mer à ce jour et nous recevons en temps quasi-réel en moyenne 1,9 profils de température et salinité par jour et par balise (en moyenne 1,7 profils de température et 2,2 profils de salinité) référencés dans l'espace, et ce pour une région où nous manquons de données conventionnelles (Figure 5).

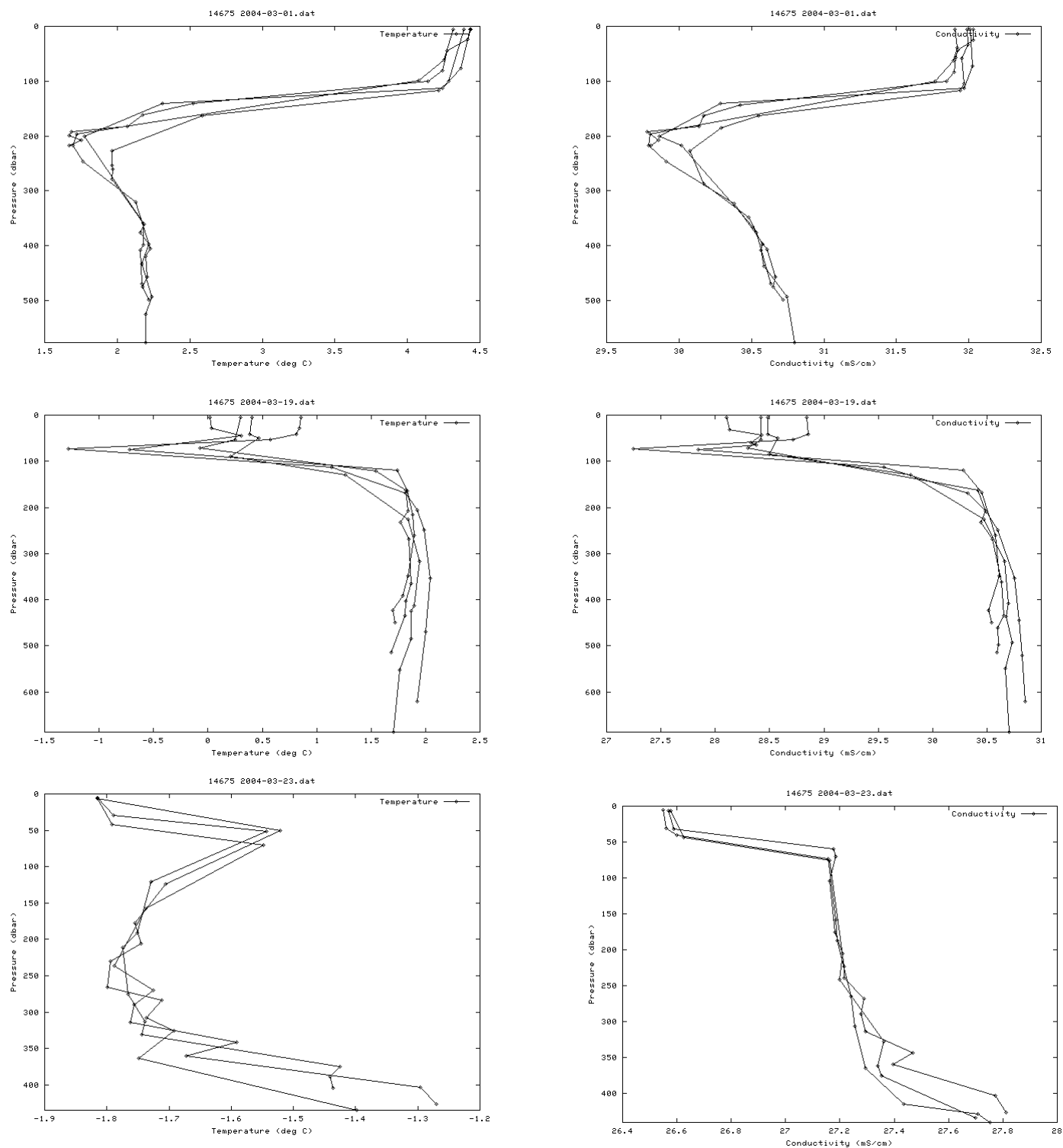


Figure 5 : exemples de profils de T et C bruts transmis par l'éléphant de mer 9934 lors de son transit entre Kerguelen et le continent Antarctique. Les profils du haut ont été obtenus près de Kerguelen, les profils centraux à [63.8°S 81.7E] et les profils du bas à [65.8°S, 83.1°E] près du continent Antarctique. Pour chaque profil les points d'inflexions obtenus par la méthode des « lignes cassées » sont représentés.

Ces données brutes nous permettent d'ores et déjà de reconstituer les sections verticales de température et de salinité le long de transects de plus de 500 km vers le sud de Kerguelen (Figure 6). Une analyse préliminaire indique que la structure hydrologique ainsi obtenue est tout à fait réaliste. La couche de mélange de surface (SML) constituée d'eau relativement chaude et peu salée se distingue nettement de la masse d'Eau d'Hiver (WW, ou couche de minimum de température de subsurface) sous jacente (relativement plus froide et plus salée), qui elle même surplombe l'Eau Profonde Circumpolaire (CDW) plus chaude et plus salée que l'Eau d'Hiver. La température de l'Eau d'Hiver baisse brutalement dans la partie Sud de la section, ce qui résulte probablement de la proximité de la banquise lors de son extension maximale pendant l'hiver précédent. Ces premières informations sont en accord avec ce que l'on sait de la couche superficielle (500 premiers mètres) dans cette région (Park et al. 1998).

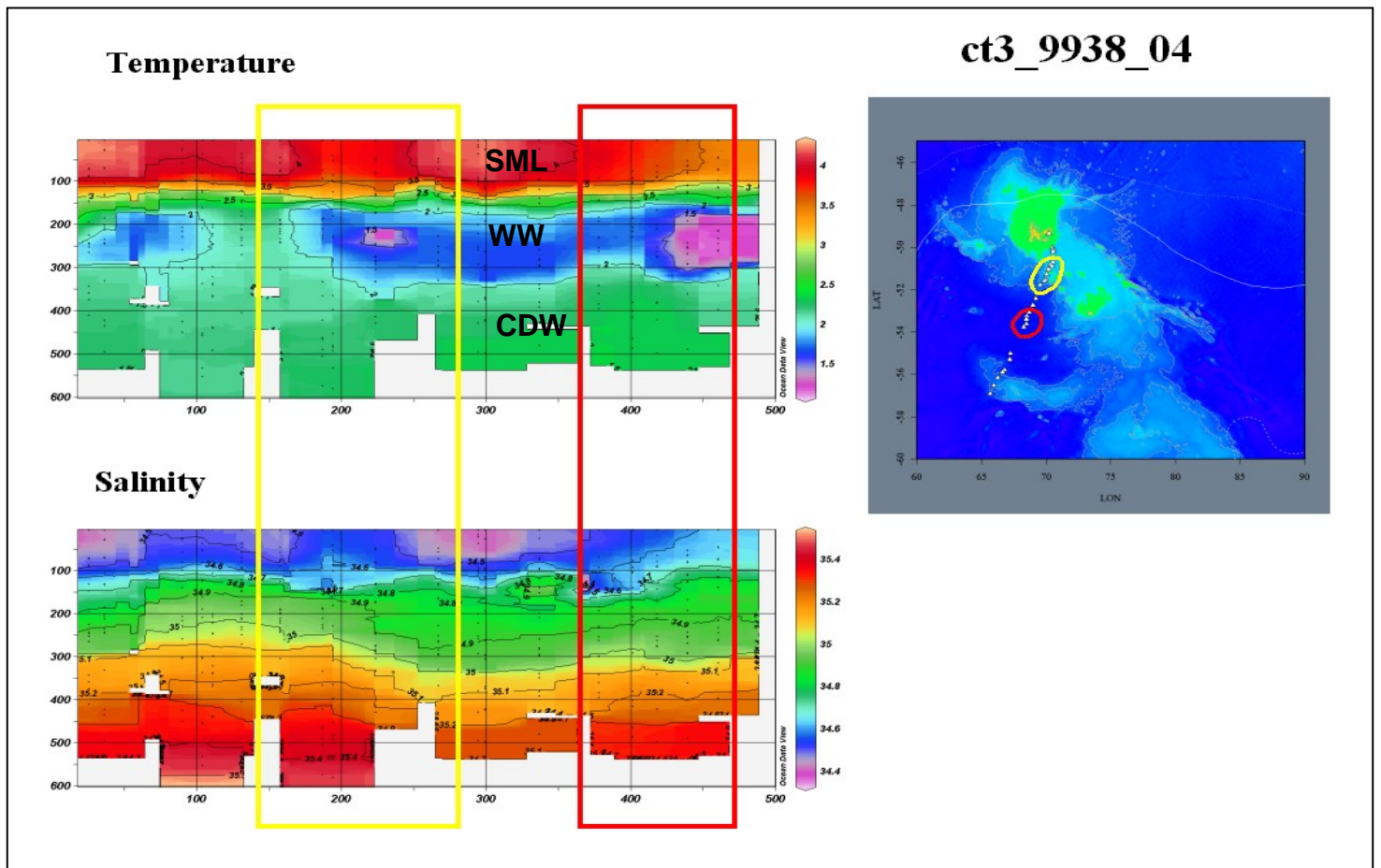


Figure 6. Reconstitution des sections verticales de température et de salinité le long du trajet de l'éléphant de mer équipé de la balise Argos-CTD 9938 du 1^{er} au 8 mars 2004. Les points pour lesquels nous disposons de profils verticaux de T et S sont indiqués par des triangles sur la carte. Les zones encadrées en jaune et rouge correspondent aux portions du trajets entourées des couleurs correspondantes.

Références bibliographiques celles de l'équipe sur le sujet de la demande sont indiquées en gras

- Aoki, S., 1997. Trends and inter-annual variability of surface-layer temperature in the Indian sector of the Southern Ocean observed by the Japanese Antarctic Research Expeditions. *Journal of Oceanography* 53: 623-631.
- Banks, H.T., Wood, R.A., Gregory, J.M., Johns, T.C. & G.S. Jones, 2000. Are observed decadal changes in intermediate water masses a signature of anthropogenic climate change? *Geophysical Research Letters* 27: 2961-2964.
- Bindoff, N.L. & J.A. Church, 1992. Warming of the water column in the southwest Pacific Ocean. *Nature* 357: 59-62.
- Bindoff, N.L. & T.J. McDougall, 1994. Diagnosing climate change and ocean ventilation using hydrographic data. *Journal of Physical Oceanography* 24: 137-1152.
- Blain, S., Tréguer, P., Belviso, S., Bucciarelli, E., Denis, M., Desabre, S., Fiala, M., Martin-Jezequel, V., Le Fèvre, J., Mayzaud, P., Marty J.-C., & S. Razouls, 2001. A biogeochemical study of the island mass effect in the context of the iron hypothesis. *Deep-Sea Research Part I* 48: 163-187.
- Boehlert, G. W., Costa, D. P., Crocker, D. E., Green, P., O'Brien, T., Levitus, S. & B.J. Le Boeuf, 2001. Autonomous pinniped environmental samplers: Using instrumented animals as oceanographic data collectors. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology* 18: 1882-1893.
- Bornemann, H., Kreyscher, M., Ramdohr, S., Martin, T., Carlini, A., Sellmann, L., & J. Plötz, 2000: Southern elephant seal movements and Antarctic sea-ice. *Antarctic Science* 12: 3-15
- Boyd, I. L., Hawker, E. J., Brandon, M. A. & I.J. Staniland, 2001. Measurement of ocean temperatures using instrument carried by Antarctic fur seals. *Journal of Marine Systems* 27: 277-288.
- Boyd, I. L., Walker, T. R. & J. Poncet, 1996. Status of southern Elephant seal at South Georgia, *Antarctic Science* 8: 237-244.
- Boyd, I. L. & T. Arnbohm, 1991. Diving behaviour in relation to water temperature in the southern elephant seal: foraging implications. *Polar Biology* 11: 259-266.
- Charrassin, J.-B., Y.-H. Park, Le Maho, Y. & C.-A. Bost, 2002. Penguins as oceanographers unravel hidden mechanisms of marine productivity. *Ecology Letters* 5 : 317-319.**
- Costa, D.P. 1993. The secret life of marine mammals: Novel tools for studying their behaviour and biology at sea. *Oceanography* 6:120-128.
- Daunt, F., Peters, G., Scott, B., Grémillet, D., & S. Wanless. Rapid-response recorders reveal interplay between marine physics and seabird behaviour. *Marine Ecology Progress Series*, sous presse.
- Field, I., Hindell, M.A., Slip, D.J. & K.J. Michael, 2001. Foraging strategies of southern elephant seals (*Mirounga leonina*) in relation to frontal zones and water masses. *Antarctic Science* 14: 371-379.**
- Georges, J.-Y., Bonadonna, F. & C. Guinet, 2000. Foraging habitat and diving activity of lactating subantarctic fur seals in relation to sea surface temperature at Amsterdam Island. *Marine Ecology Progress Series* 196: 291-304.**
- Guinet, C., Jouventin, P. & H. Weimerskirch, 1999. Recent population change of the southern elephant seal at îles Crozet and îles Kerguelen: the end of the decrease? *Antarctic Science* 11: 193-197.
- Hindell, M. A., Slip, D. J. & H.R. Burton, 1994. Possible causes of the decline of southern elephant seal populations in the southern Pacific and southern Indian Oceans. In: Le Boeuf, B. J. & Laws, R. M. (eds). *Elephant seals: population ecology, behavior and physiology*. Berkeley : University of California Press, 66-84.
- Hindell, M.A. & H.R. Burton, 1988. Seasonal haul-out patterns of the southern elephant seal (*Mirounga leonina* L.) at Macquarie Island. *Journal of Mammalogy* 69: 81-88.
- Hooker, S., H. & I. L Boyd. Salinity sensors on seals: use of marine predators to carry CTD dataloggers. *Deep Sea Research Part I*, sous presse.
- Johnson, G.C. & A.H. Orsi, 1997. Southwest Pacific Ocean water mass changes between 1968/69 and 1990/91. *Journal of Climate* 10: 306-316.
- Jonker, F.C. & M.N. Bester, 1998. Seasonal movements and foraging areas of adult southern female elephant seals, *Mirounga leonina*, from Marion Island. *Antarctic Science* 10: 21-30.

Koblinsky, C.J. & N.R. Smith (Eds), 2001. *Observing the Oceans in the 21st Century*. Bureau of Meteorology, Melbourne, 604 pp.

Koudil, M., Charrassin, J.-B., Le Maho, Y. & Bost, C. A. 2000. Seabirds as monitors of upper-ocean thermal structure : king penguins at the Antarctic Polar Front, East of Kerguelen sector. *Comptes Rendus Académie des Sciences. Paris, Series III 323: 377-384.*

Loaec, G., Cortes, N., Menzel, M., Moliera, J. 1998. PROVOR : A Hydrographic profiler based on MARVOR technology. <http://www.ifremer.fr/dtmsi/produits/marvor/o98-484.pdf>

Marsland, S., N.L. Bindoff, G.D. Williams & W.F. Budd, 2001. Modelling the circulation and processes controlling bottom water formation over the Adelie Depression, *Deep-Sea Research A*, en préparation.

Martinson, D.G. & R.A. Iannuzzi, 1998. Antarctic ocean-ice interaction: implications from ocean bulk property distributions in the Weddell Gyre. In: Antarctic Sea Ice: Physical Processes, Interactions and Variability, *Antarctic Research Series 74: 243-271*, American Geophysical Union, Washington.

McConnell, B.J., Chambers, C., & M.A. Fedak, 1992. Foraging ecology of southern elephant seals in relation to the bathymetry and productivity of the Southern-Ocean. *Antarctic Science 4: 393-398.*

McConnell, B.J. & M.A. Fedak, 1996 Movements of southern elephant seals. *Canadian Journal of Zoology 74: 1485-1496.*

McConnell, B.J., 1986. Tracking grey seals, *Halichoerus grypus*, using Service ARGOS. *Mesogee 46: 93-94.*

Nicol, S., T. Pauly, N.L. Bindoff, S. Wright, D. Thiele, G.W. Hosie, P.G. Strutton & E. Woehler, 2000. Ocean circulation off East Antarctica affects ecosystem structure and sea-ice extent. *Nature 406 : 504-507.*

Park, Y.-H., L. Gambéroni. & E. Charriaud, 1993. Frontal structure, water masses, and circulation in the Crozet Basin. *Journal of Geophysical Research 98: 12361-12385.*

Park, Y.-H. & L. Gamberoni, 1997. Cross-frontal exchange of Antarctic Intermediate Water and Antarctic Bottom Water in the Crozet Basin. 1997. *Deep - Sea Research Part II - Topical Studies in Oceanography 44: 963-986.*

Park, Y.-H., Charriaud, E., Ruiz-Pino, D. & C. Jeandel, 1998. Seasonal and interannual variability of the mixed-layer properties and steric height at station KERFIX, southwest of Kerguelen. *Journal of Marine Systems 17: 571-586.*

Park, Y.-H., 2001. Interannual sea level variability in the southern ocean within the context of global climate change. *AVISO Newsletter 8: 75-77.*

Park, Y.-H., Charriaud, E., Craneguy, P., & A. Kartavtseff, 2001. Fronts, transport, and Weddell Gyre at 30°E between Africa and Antarctica. *Journal of Geophysical Research 106 : 2857-2879*

Rintoul, S. R., 1998. On the origin and influence of Adelie Land Bottom Water. In: Jacobs S. & R. Weiss (eds). Ocean, Ice and Atmosphere: Interactions at the Antarctic Continental Margin, *Antarctic Research Series 75: 151-171*, American Geophysical Union, Washington.

Rintoul, S. R. & S. Sokolov, 2001. Baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia (WOCE repeat section SR3). *Journal of Geophysical Research 106: 2795-2814.*

Rintoul, S.R., S. Sokolov, & J. Church, 2002. A six year record of baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current at 140° E, derived from XBT and altimeter measurements. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

Stocker, T.F. (ed), 2001. Physical Climate Processes and Feedback, Ch. 7 of *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, 881 pp.

Slip, D. J. & H.R. Burton, 1999. Population status and seasonal haulout patterns of the southern elephant seal (*Mirounga leonina*) at Heard Island. *Antarctic Science 11: 38-47.*

Watanuki, Y., Melhum, F., & A. Takahashi, 2001. Water temperature sampling by foraging Brünnich's Guillemots with bird-borne data loggers. *Journal of Avian. Biology 32: 189-193.*

Weimerskirch, H., Wilson, R.P., Guinet, C. & M. Koudil, 1995. The use of seabirds to monitor sea-surface temperature and validate satellite remote-sensing measures. *Marine Ecology Progress Series 126: 299-303.*

White, W.B., 2000. Influence of the Antarctic Circumpolar Wave on Australia precipitation from 1958-1997. *Journal of Climate 13: 2125-2141.*

Wilson R. P., Grémillet, D., Syder, J., Kierspel, M.A.N., Garthe, S., Weimerskirch, H., Schäfer-Neth, C., Scolaro, J. A., Bost, C. A., Plötz, J. & D. Nel, 2002. Remote-sensing systems and seabirds: their use, abuse and potential for measuring marine environmental variables. *Marine Ecology Progress Series* 228: 241-261.

Wong, A.P.S, N.L. Bindoff & J.A. Church, 2001. Freshwater and Heat Changes in the North and South Pacific oceans between the 1960s and 1985-94. *Journal of Climate* 14: 1613-1633.

MOYENS DONT DISPOSE LE PROPOSANT ET QUI SERONT AFFECTÉS À LA RÉALISATION DU PROJET ET CONTRIBUTION DES DIFFERENTS PARTENAIRES FINANCIERS

1. Chercheurs et ingénieurs impliqués, et unités de rattachement (établir une liste nominative avec indication précise du rôle de chacun et du pourcentage de temps qu'il consacrerà au projet. Si l'équipe prévoit une demande de bourse à un organisme partenaire de MERCATOR ou CORIOLIS, indiquer la nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) ainsi que l'organisme auquel la demande sera adressée).

Composante française

<i>Nom, prénom</i>	<i>Titre ou grade, âge</i>	<i>Unité de rattachement</i>	<i>Contribution au projet (%>10%)</i>
GUINET Christophe	CR1, 39 ans	CEBC-CNRS	30 %
BOST Charles André	CR1, 42 ans	CEBC-CNRS	30 %
PARK, Young-Hyang	MCM1, 54 ans	MNHN	30 %
CHARRASSIN Jean-Benoît	MCM, 34 ans	MNHN	100 %
ROQUET Fabien	IE CDD, 22 ans	MNHN	100 %
BAILLEUL Frédéric	Doctorant, 25 ans	CEBC-MNHN	100 %

Collaborateur étrangers

<i>Nom, prénom</i>	<i>Titre ou grade, âge</i>	<i>Unité de rattachement</i>	<i>Contribution au projet (%>10%)</i>
FEDAK Mike	Chercheur	SMRU	30 %
BIUW Martin	Post-Doc, 34 ans	SMRU	100 %
LOVELL, Phil	Ingénieur	SMRU	50 %
McCONNEL, Burney	Chercheur	SMRU	10 %
HINDELL, Mark	Professeur	Uni-Tasmania	20 %

DEMANDE BUDGETAIRE

N.B. : Sur toutes les lignes budgétaires, une ventilation annuelle est demandée dès lors qu'il s'agit d'une proposition pluriannuelle

1. Fonctionnement :

Frais de fonctionnement et gestions du projet (téléphone, fax, courrier...)	1 000 €
Participation conférences internationales	3 000 €

2. Missions :

Réunion de travail et de concertation au SMRU (Ecosse) Septembre 2004 . Billet d'avion + logement pour une ou deux nuits (4 personnes).	1 700 €
Mission entre le MNHN et le centre de Métrologie du SHOM trajet + frais de séjour. Oct-Nov. 2004 (5 jours pour 2 personnes) calibration des balises-CTD	800 €
Réunions de travail et de concertation au MNHN CEBC-CNRS : discussion des résultats et le gestion dans le cadre de Coriolis (chercheurs du CEBC-CNRS). 8 billets de train aller retour Paris-Niort	800 €
Mission entre le MNHN et Nice (Nov. 2004). Validation des mesures Argos CTD versus la CTD du Téthys II (2 personnes train + séjour, 4 jours)	800 €
Réunion GMMC et assemblées plénières (2 personnes)	400 €
Réunions de travail et de concertation avec le groupe de les responsables de la base de données Coriolis Octobre 2004 et Avril 2005 (3 personnes)	1 000 €

4. Total général des crédits demandés (HT):

9 500 €

5. Autres financements attribués ou demandés qui concourent à la réalisation des mêmes objectifs que la proposition (mentionner notamment le soutien via les programmes nationaux et les programmes Européens)

- **TAOB : Demandé 156 K€ pour l'année 2004-2005 couvrant :**
 - L'achat des balises-CTD du SMRU (10)
 - Coût des localisation (250 jour/an/balise)
 - Station de travail (2)
 - CDD (trois ans, analyse et gestions des données collectées)

Projet évalué le 18/06/2004 par le comité du TAOB, classé A et mis en priorité 1. Mais toujours pas d'attribution de financement au 20/03/2004

- **SHOM : Prise en charge des coût de métrologie (10 balises CTD an avant et après déploiement)**
- **INSU : (coût de localisation 1 balise an et accès au Téthys II pour la validation sur CTD.**
- **IPEV : Programme évalué favorablement par le comité scientifique de l'IPEV (A+)**

Les financements attribués couvrent les missions de personnels dans les TAAF (4 campagnes d'été en 2004-2005), coût de la curieuse (2000 €/jour) + essais CTD sur Marion Dufresne et Curieuse pour validation des mesures et soutien logistique sur le terrain.

Annexes à l'Appel d'offre Mercator-Coriolis

1.1. Pertinence en Océanographie

Ce programme d'observation, basé sur l'utilisation des éléphants de mer comme « plates-formes » d'échantillonnage océanographique, fournira des données de hautes résolutions spatiale et temporelle, et ce pour des régions jusqu'ici peu échantillonnées. Après validation de leur précision, ces données pourront être assimilées dans des **banques de données océanographiques globales**. Elles nous permettront dans le même temps d'aborder 5 problèmes spécifiques de la circulation dans l'Océan Austral, détaillés ci-dessous.

- *Variabilité du Transport et localisation des fronts dans l'Océan Austral*

Les anomalies de température transportées par le CCA ont été reliées à la variabilité climatique observée en Australie (White, 2000). Les variations du transport au sein du CCA pourraient aussi avoir un impact sur la variabilité climatique locale et globale, en influençant le budget thermique à l'échelle du bassin (*e.g.* Rintoul et Sokolov, 2001). La plus grande partie du transport du CCA est assurée par les fronts océaniques. Ces derniers forment aussi les frontières des différentes masses d'eau et définissent des zones biogéographiques. La position, la structure, et la variabilité des fronts sont donc importantes à la fois pour le climat et pour l'écologie. Au cours de la dernière décennie, les fronts océaniques du CCA ont été étudiés au sud de l'Australie (*e.g.* Rintoul et al., 2002), dans le bassin de Crozet (Park et al. 1993, Park et Gambéroni 1997) et au sud de l'Afrique du Sud (Park et al. 2001), grâce aux sections réalisées par des navires océanographiques dans le cadre de WOCE et JGOFs. Alors que ces mesures ont contribué à une meilleure compréhension du CCA, peu d'observation eurent lieu en hiver. Les données « éléphants » vont donc permettre de déterminer, pour la première fois en hiver, le transport et la variabilité des fronts dans la partie sud du CCA.

- *Comparaison avec les données hydrographiques historiques*

Des analyses de l'Océan Austral au nord et au sud du Front Sub-Antarctique (FSA) ont montré qu'il y a eu un réchauffement significatif entre les années 1950 et 1990 dans la région située entre 60° E et 150°E (Aoki 1997).

Bien que les variations décennales au nord du FSA soient bien documentées, (*e.g.* Bindoff et Church 1992, Bindoff et McDougall 1994, Johnson et Orsi 1997, Wong et al. 2001), on en sait relativement peu sur l'évolution des masses d'eaux au sud du FSA. Selon les scénarios de changement climatique des modèles couplés océan-atmosphère, l'eau profonde circumpolaire (CDW) devrait subir des changements la rendant plus chaude et plus salée au niveau des surfaces de densité (Banks et al. 2000). Nous allons comparer les observations obtenues via les éléphants de mer, ainsi que d'autres mesures récentes, aux données historiques disponibles, pour déterminer si la signature du changement climatique prédit par les modèles climatiques peut être observée.

- *Propriétés et évolution de la couche de mélange en hiver*

Il n'y a que peu d'observations directes dans l'océan ouvert concernant les changements saisonniers de la couche de mélange (*e.g.* Park et al. 1998). Les estimations de l'épaisseur de cette couche étaient basées jusqu'à présent sur des mesures du forçage atmosphérique à la surface, et sur quelques rares mouillages et profils CTD. Dans la zone des glaces, la couche de mélange est également un élément essentiel des écosystèmes marins (Nicol et al. 2000), étant connue pour contrôler la croissance et l'étendue de la glace de mer pendant la saison hivernale. (Martinson et Lannuzzi 1998). Les informations hivernales sur la couche mélangée dans cette zone des glaces sont cependant très limitées.

- *Eau de Fond Antarctique et échanges au travers du plateau*

Une partie des rares données hivernales disponibles pour l'Océan Austral a été collectée entre la divergence antarctique et le continent, dans la région située entre 130° et 154 °E. Cette région est particulièrement intéressante car il s'y forme l'Eau de Fond de la Terre Adélie, dont on estime qu'elle

représente 25% du volume total de l'Eau de Fond Antarctique (Rintoul 1998). Cette région est ainsi, en terme de volume, la seconde source d'Eau de Fond, excédant même la mer de Ross.

Les expériences du navire *Aurora Australis* sur les processus hivernaux dans cette région (Bindoff et Williams 2000), les données des mouillages, et les modélisations numériques (Marsland et al. 2001) ont montré qu'il devait y avoir un fort échange d'eau du plateau au travers de la zone de rupture du plateau pour compenser un départ de 1 Sv ($10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) de l'eau dense de fond pendant l'hiver, et de moyenne annuelle de 0.2 Sv. Il existe cependant des années pendant lesquelles il n'y a pas de formation l'eau de fond, ce qui suggère que ce processus est très sensible aux conditions de forçage. Cette sensibilité apparente de la formation des masses d'eau a des conséquences importantes pour la réponse de la circulation méridionale « overturning » au changement climatique. Les observations hivernales obtenues grâce aux éléphants de mer permettront d'appréhender pour la première fois les changements saisonniers et interannuels du volume et des propriétés de l'eau de plateau Antarctique. En reliant les changements observés aux variations du forçage atmosphérique et de l'étendue de la glace, nous étudierons en détails la sensibilité de la formation de l'eau de fond aux changements du forçage.

- ***Hydrologie du plateau de Kerguelen-Heard***

Les animaux équipés à Kerguelen permettront d'augmenter considérablement le nombre de données hydrologiques au sud et à l'est de Kerguelen, actuellement peu nombreuses. Le plateau péri-insulaire de Kerguelen joue un rôle majeur dans l'Océan Austral, aux plans physique et biologique. Très étendu au nord et au sud-est, il s'oppose à la circulation vers l'est du Courant Antarctique Circumpolaire, qui est majoritairement (75 %) détourné vers le Nord (Park et al. 1993). Le Front Polaire se positionne alors près des côtes (30-40 km), à l'est de l'archipel (Park et Gambéroni 1997). Cette bathymétrie pourrait faire bénéficier l'écosystème pélagique d'une circulation océanique ralentie, et d'une importante production biologique sur le plateau, comme indiqué par les fortes concentrations de chlorophylle mesurées par les images SeaWiFS (Blain et al. 2001, Charrassin et al. 2002).