

**RAPPORT FINAL, PROJET FLOSTRAL**  
**Convention de recherche n° : 030138**  
**IFREMER/CNRS**

**Responsable scientifique : Rosemary MORROW**

laboratoire: LEGOS

N° de code de la formation (si CNRS) : UMR5566

adresse, tel, fax, courrier électronique: 18, av. Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

tel : 05.61.33.29.44; fax : 05.61.25.32.05; mail : Rosemary.Morrow@cnes.fr

**Durée du projet IFREMER : (Date de début et de fin) : 2002 - 2004**

**Date de remise du rapport final : août 2004**

-----  
**Rappel des objectifs et du calendrier**  
-----

Depuis une dizaine d'années, il a été reconnu que le secteur austral de l'Océan Indien est le siège d'importantes formations de l'eau modale. Ces eaux sont formées en hiver dans la couche de mélange profonde jusqu'au nord du front subantarctique (SAMW) et du front subtropicale (STMW) et ventilent la thermocline. Les analyses récentes ont montré que ces eaux sont les plus sensibles aux variations climatiques en région australe, et constituent un chemin privilégié pour le piégeage du CO<sub>2</sub> et le transport associé du carbone d'origine anthropique. L'objectif principal du projet FLOSTRAL est de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de la circulation des SAMW/STMW en identifiant in-situ les lieux et périodes de formation et leurs modifications en-route. Dans cet objectif, un élément essentiel du projet FLOSTRAL est de mettre en place un réseau de flotteurs PROVOR en 2003-2004 dans l'Océan Indien Sud-Ouest afin de suivre et quantifier la recirculation des eaux AAIW et SAMW/STMW. La première série de 15 flotteurs du programme FLOSTRAL-I ont été largués lors d'une valorisation de transit du Marion-Dufresne en janvier 2003. La deuxième série de 15 flotteurs de FLOSTRAL-II ont été largués dans l'océan Indien sud-ouest en janvier et avril 2004. Le projet FLOSTRAL constitue un complément au réseau ARGO international. Ces données et leur analyse pourront être utilisées ensuite pour la validation de MERCATOR "version globale".

**Calendrier**

2002	Analyses des traceurs lagrangiens issues du modèle ORCA2 ou ORCA05. Etudes préliminaires scientifiques (suivi des masses d'eaux modales, rôle du mélange tourbillonnaire sur la modification des masses d'eaux, et l'évolution de la couche de mélange) basées sur les analyses complémentaires des données satellitales et in-situ et des sorties du modèle ORCA05.
Début 2003	Mise à l'eau de la première série de 15 flotteurs PROVOR lors de valorisation de transit du <i>Marion Dufresne</i> , (Jan 2003).
2003	Analyse détaillée des profils PROVOR et qualification des données (suivi des capteurs, salinité notamment), éventuellement des corrections à proposer (comparaisons aux données historiques et celles recueillies durant les campagnes, OISO, etc...); suivi des flotteurs qui sont toujours à l'eau.
2004	Mise à l'eau de la deuxième série de 15 flotteurs PROVOR, Jan-Avr 2004. Premières analyses des masses d'eau issues des données flotteurs. Comparaisons aux données historiques pour l'analyse de l'évolution saisonnière des propriétés hydrologiques (T et S) et géochimiques.

---

## Etat d'avancement des travaux

---

### *Analyses des traceurs lagrangiens issus du modèle ORCA2, en préparation pour la campagne FLOSTRAL-I et FLOSTRAL-II.*

Nous avons entrepris l'étude du positionnement optimal des flotteurs à l'aide des modèles. Jusqu'ici nous avons exploité des simulations ORCA2 (en robuste-diagnostique et en pronostiques forcées par 50 ans de climatologie NCEP). Tout d'abord nous avons effectué des études qualitatives de dispersion des flotteurs dans la région de l'Océan Indien Sud-Ouest où se déroulent les campagnes OISO. Ces études ont montré dans le modèle la présence d'une circulation énergétique autour de 500 m de profondeur (profondeur typique pour les eaux modales), et une circulation plus lente autour de 2000 m, sauf dans l'axe du courant Circumpolaire Antarctique à 40-45°S. Des études supplémentaires sont en cours afin de permettre une quantification statistique de la dispersion de ces flotteurs par rapport à leur positionnement horizontal et vertical.

Afin de bien cibler l'étude amont du lancé des flotteurs et la réalisation expérimentale, nous avons commencé aussi l'étude des régions de formation des eaux modales (subtropicales et subantarctiques) dans ORCA2, ainsi que leurs routes, transformation et interaction. Des résultats préliminaires montrent deux régions de formation pour la IOSTMW qui correspondent aux deux cellules principales de re-circulation du gyre subtropical. Nous sommes en train d'évaluer leurs occurrences respectives en terme de saisonnalité et de variabilité interannuelle. En ce qui concerne la EISAMW de l'Océan Indien, nos résultats semblent suggérer que une contribution importante provienne de la couche de mélange au nord du front subantarctique de l'Océan Indien Ouest mais aussi du Pacifique Sud.

Le gyre subtropical de l'Indien et, de manière moins importante, celui du Pacifique Sud, semblent influencer de manière considérable non seulement le chemin suivi par ces masses d'eau mais aussi leur interaction et transformation. Nous souhaitons poursuivre notre démarche afin de quantifier ces processus dans les simulations ORCA2. Nous espérons que ces résultats nous permettront de guider les premiers lâchés de flotteurs dans le cadre des buts scientifiques de FLOSTRAL. Ils représenteront aussi l'état de contrôle par rapport à des résultats issus de simulations à plus haute résolution (dans un futur immédiat la configuration ORCA05). Dans ce cadre, pour l'instant, nous cherchons de détailler de manière le plus complet possible, la dynamique du gyre subtropical de l'Océan Indien en terme d'origine, transformation et devenir des masses d'eau dont il se compose.

En parallèle, nous avons aussi lancé les flotteurs simulés sur une section zonale à 32°S en début de 2002, pour imiter et faire suivre les trajectoires des flotteurs anglais. Notre choix de largage sur les sections méridiennes sera choisi selon le but de répondre à nos objectifs scientifiques et d'utiliser la distribution des flotteurs anglais à 32°S comme réseau complémentaire.

En complément des analyses de modèle, une campagne OISO a été effectuée en Janvier-Février 2002.

### **Qualification de données**

Le premier déploiement de flotteurs (FLOSTRAL-I) a tout d'abord impliqué un contrôle qualité pour tester la fiabilité des mesures recueillies. Sur les 15 flotteurs PROVOR déployés au cours de ce programme, nous avons pu constater qu'une dizaine d'entre eux semblent fonctionner correctement et recueillir des données correctes.

Il nous a fallu ensuite comparer les données in situ transmises par nos flotteurs de différentes manières :

- L'altimétrie nous a permis de visualiser l'évolution de nos flotteurs dans l'Océan Indien Sud et d'appréhender les mesures recueillies par nos flotteurs par rapport à leur dérive
- L'intercomparaison entre les données des 6 paires de flotteurs nous a permis de mesurer les premiers écarts entre deux flotteurs d'une même paire. Ces écarts nous ont donné une première estimation des différences d'étalonnage entre les capteurs.
- La comparaison avec les données climatologiques de Lévitus 1998 a confirmé les résultats que nous avons déjà obtenus avec les données in situ et nous a rappelé qu'il restait toujours à calibrer les profils initiaux de température et de salinité pour corriger les petits écarts que nous pouvions retrouver.

Le but de cette analyse a été d'identifier les problèmes relatifs aux données FLOSTRAL-I. Voici ce que nous avons retenu :

- FLOSTRAL-I est un des rares déploiements où les données en température et en salinité sont enregistrées au cours de la dérive en immersion. Nous avons identifié un léger problème au niveau des dates de début d'immersion, où la date est réglée un ou deux jours trop tôt quand l'heure est réglée à 23h59. Nous pourrions corriger cela nous-même durant la phase post-processing.
- Les flotteurs n°1900123, 1900125, 1900126, 1900129, 1900133-1900137 semblent recueillir des profils verticaux satisfaisants, dans la gamme de variabilité de l'Océan, pendant 2003.
- Pour le flotteur 1900124, les données en température paraissent bonnes, dans la gamme de variabilité de l'Océan. Le capteur de salinité montre un écart avec une dérive croissante entre 0 et 1900 m et avec une différence de moyenne de 0.2 psu entre les cycles 000 et 008. Sa dérive en temps continue et à partir du cycle 7 les données sont classées « fausses » par Coriolis.
- Flotteur 1900126 s'éteint après 33 cycles.
- Pour le flotteur 1900127, les données de salinité font apparaître un écart important de 1.0 à 1.3 psu et une dérive non constante entre 0 et 1900 m. La salinité est classée « fausse » par Coriolis pour tous ses cycles.
- Les données du flotteur 1900128 sont bonnes, dans la gamme de la variabilité de l'Océan dans cette région frontale, bien que le léger écart de salinité d'au moins 0.08 psu nécessite une étude plus approfondie. Le flotteur s'éteint après 16 cycles.
- Pour le flotteur 1900130, les données de température paraissent correctes, dans la gamme de variabilité océanique. Cependant, le capteur de salinité montre un écart négatif sur toute la colonne d'eau. La salinité est classée « fausse » par Coriolis pour tous ses cycles.
- Flotteur 1900131 s'éteint après 12 cycles.
- Flotteur 1900132 a un problème avec sa salinité à partir du cycle 9 et sa salinité est classée « fausse » par Coriolis pour le reste de ses cycles.

- Flotteur 1900134 montre les problèmes de température et de salinité à partir du cycle 32, et ses données sont classées « fausses » par Coriolis pour le reste de ses cycles.

Il reste de nombreux tests à réaliser car cette mission demande une vérification constante des données recueillies par les flotteurs. Une série de tests de contrôle qualité a été mise en place dans une chaîne de traitement « semi-automatique », à partir des nouvelles données relevées tous les 10 jours. A partir de cette première étude, nous avons pu recenser les problèmes importants (notamment pour le capteur de salinité). Par la suite, les tests d'intercomparaison avec les données de Lévitus doivent aussi être mis en place dans un processus « automatique » du contrôle qualité sur les profils de température et de salinité.

Une partie clé de cette première étude a été d'informer les techniciens et les ingénieurs à l'IFREMER du premier bilan de ces mesures en mer car les essais en bassin au laboratoire ne peuvent pas incorporer toutes les conditions de mesures océaniques. Nos résultats du projet FLOSTRAL-I ont été utilisés par les ingénieurs pour améliorer les capteurs de salinité mais aussi par les administrateurs pour prendre la décision de changer de constructeur pour les futurs projets PROVOR. Ce rapport de stage de fin d'études a déjà été envoyé à l'IFREMER pour remplir une partie du contrat FLOSTRAL-Coriolis.

Cette interaction entre les chercheurs et les ingénieurs d'IFREMER semble être efficace ... la deuxième série de flotteurs de FLOSTRAL-II, déployé en janvier et avril 2004, ont tous bien marché, sans problème marquant du capteur de salinité. A ce jour (fin d'août 2004), nous avons 26 flotteurs profilants actives dans l'océan Indien Sud ; parmi eux il y a 3 flotteurs de FLOSTRAL-I avec les capteurs de salinité « fausses ». Il reste un travail continu à faire pour surveiller l'éventuelle dérive de ces capteurs par apport des données hydrologiques indépendant (CTDs, autres flotteurs ARGO ...).

### **Premières résultats scientifiques**

Avec l'ensemble des flotteurs ARGO (FLOSTRAL et autres), nous avons commencé nos études scientifiques sur les eaux modales et intermédiaires de l'océan Indien Sud. La toute récente couverture spatio-temporelle nous a permis de délimiter les frontières spatiales de la zone de formation des eaux modales qui jusqu'à maintenant n'était que présumée. Elle nous permet aussi de bien nous rendre compte de la recirculation des eaux modales et intermédiaires. Nous avons ainsi pu mettre en exergue plusieurs zones du bassin différenciées par leurs caractéristiques moyennes en température, salinité et densité (Figure 1). Il ressort de cette découpe une évolution claire des caractéristiques hydrologiques dans le sens de la circulation de la gyre subtropicale. Les eaux passent ainsi de la couche de mélange où elles sont formées en hiver juste au-dessus du front subantarctique à l'Est de Kerguelen, puis sont advectées dans circulation de Sverdrup en s'enfonçant petit à petit et en devenant de plus en plus denses, pour finir à l'Ouest dans le courant des aiguilles à une profondeur moyenne de 600 mètres et une densité de 26.75. Nous avons ainsi retrouvé dans nos résultats les conclusions des recherches effectuées sur la ligne à 32 Sud, mais avec une vision beaucoup plus large. Cette première vision 3D de données in-situ a par ailleurs confirmé des hypothèses de la circulation des eaux modales et intermédiaires. Il se dégage ainsi, à l'Est du bassin, une zone qui semble en dehors de la circulation dominante du bassin. Elle est peut-être associée à un autre type de circulation venant du Sud de l'Australie et mérite que l'on s'y intéresse de plus près dans de futures études sur le sujet.

Nous avons aussi pu mettre en évidence une ligne de mélange diapycnale le long de la circulation de ces eaux modales et intermédiaires (Figure 2). En effet, après la subduction et les modifications hydrologiques isopycnales que subissent ces eaux au moment de leur formation au Nord du front subantarctique, elles se mélangent de façon diapycnale le long d'une ligne de mélange pendant leur circulation dans la gyre.

ARMOR est le deuxième produit sur lequel nous nous sommes penchés. Tout nouvellement développé par Mercator, il est issu d'une combinaison des données satellitales et in-situ (notamment les données in-situ ARGO). Ce jeu de données nous promettait ainsi l'association de la couverture méso-échelle et hebdomadaire des satellites, et de la précision et projection verticale des données in-situ. Il était donc naturel de s'y intéresser. Nous avons malheureusement eu quelques problèmes dans l'exploitation de ces données. Si la représentation des caractéristiques océaniques à grande échelle est bonne, la représentation méso-échelle contient des erreurs notamment sur les profils de densité. En effet, les phénomènes sont le plus souvent trop brusques et leur amplitude trop importante par rapport à la réalité. De plus, la couche de mélange est mal représentée. Les profils de densité dans cette couche sont souvent instables, et ceci particulièrement en période de destratification hivernale.

Ce dernier point est très important pour notre étude car la couche de mélange peut aller jusqu'à 500-mètres de profondeur et les données ARMOR s'arrêtent à 700 mètres. Il ne nous reste ainsi plus beaucoup de données à analyser sur la colonne d'eau. Par ailleurs, si nous retirons de notre étude ces profils erronés où la densité est instable nous perdons la bonne couverture spatiale qui nous a poussés à utiliser ce produit. Mais ces erreurs repérées sur, rappelons-le, le tout nouveau produit ARMOR sont en cours de correction par l'équipe de G.Larnicol et S.Guinehut du CLS avec qui nous avons pu s'entretenir de ces problèmes.

Pour ceux qui sont intéressés par le rapport de DEA complète sur les eaux modales de Jean-Baptiste Sallee, merci de contacter Rosemary Morrow (Rosemary.Morrow@cnes.fr).

Parallèlement au travail scientifique, 2 réunions ont été faites avec l'équipe technique du LPO et du DT-INSUE à Brest en mars 2002 et octobre 2002 pour préparer FLOSTRAL-I. Le compte rendu de la dernière réunion est disponible au près de la responsable scientifique.

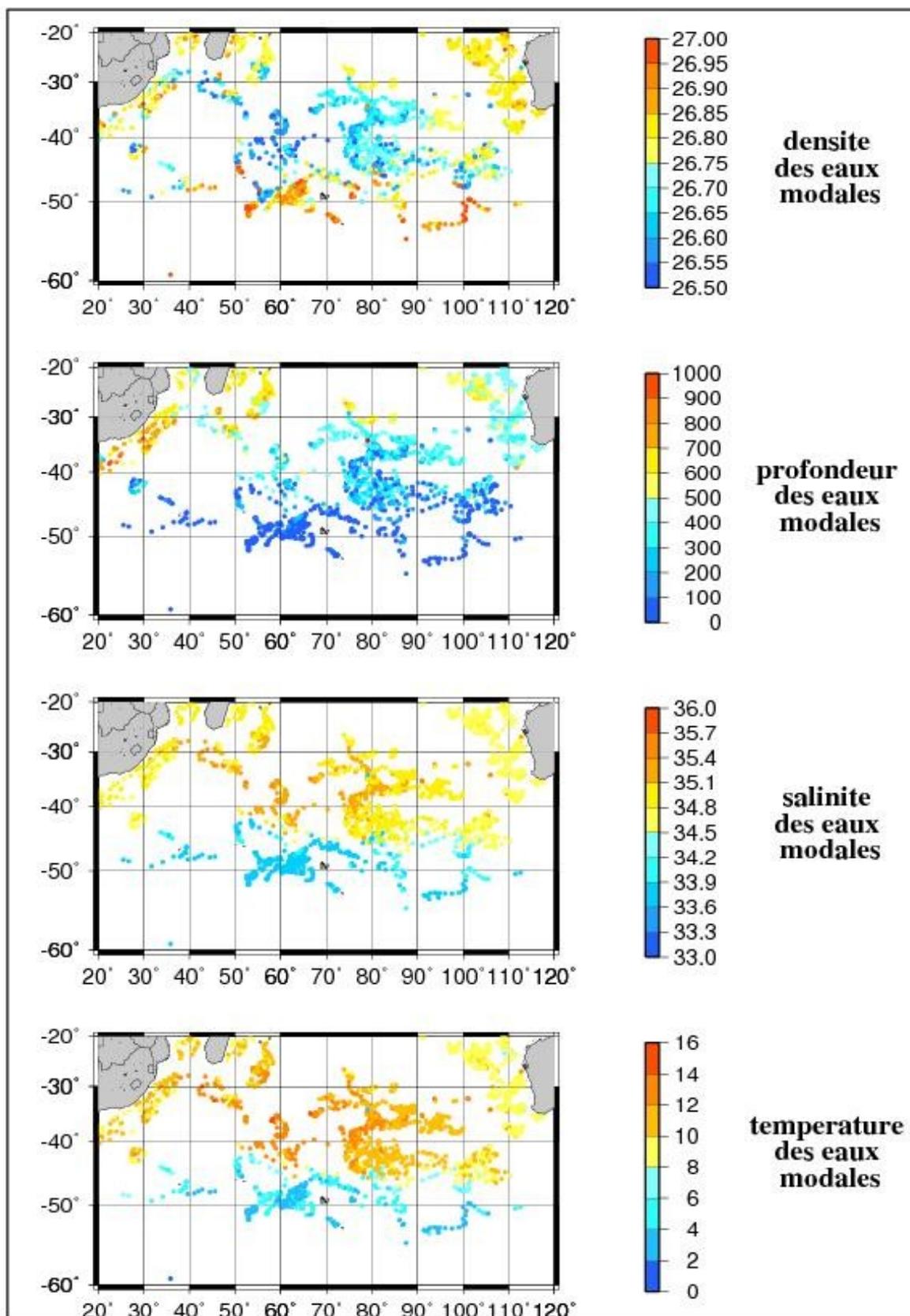
**Une demande GMMC-Flostral a été déposée en 2003 et 2004 pour financer la valorisation scientifique et les frais supplémentaires ARGOS. Nous prévoyons de faire une demande PATOM en 2005-2006.**

### *Conclusions et l'avenir du projet*

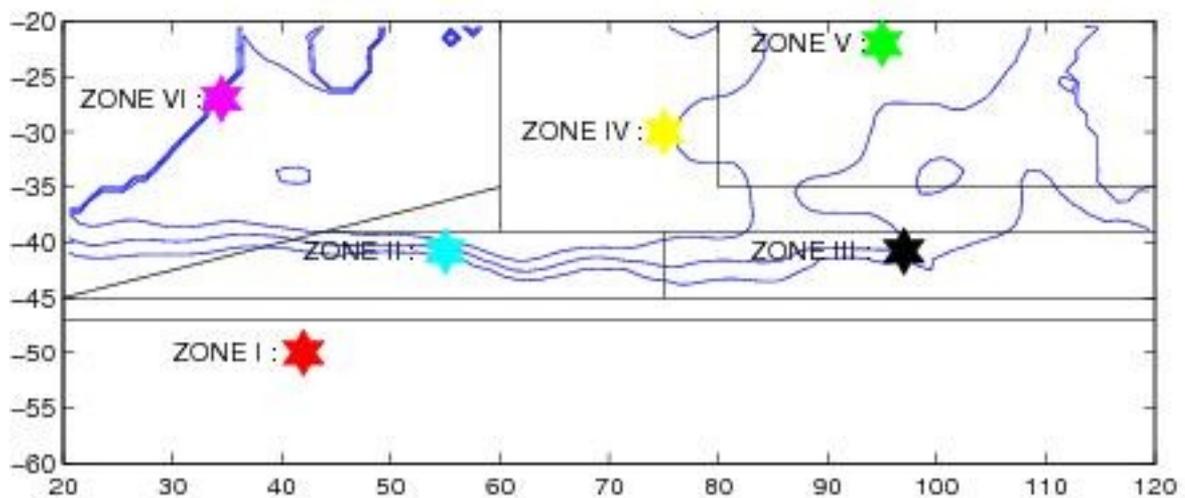
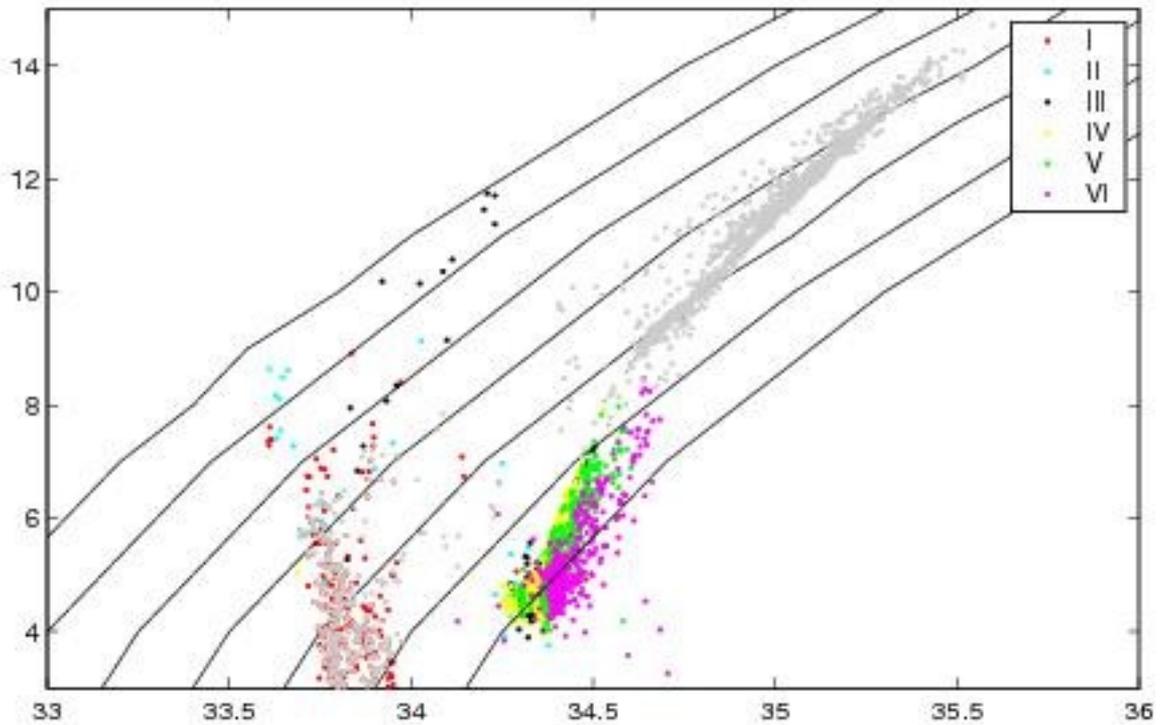
Ce travail constitue une étape préliminaire dans l'utilisation de ces nouvelles données. Il nous reste aussi à vérifier que les capteurs des flotteurs ARGO ne subissent pas de dérive. Nous avons vérifié les "flags" de qualité des données, mais ces "flags" peuvent laisser passer d'éventuelles petites dérives de capteurs que l'on pourra repérer avec de plus grandes séries temporelles (plus d'un an). Par ailleurs, avec des données portant sur de plus larges périodes nous pourrions repérer des évolutions interannuelles, et affiner nos résultats sur les évolutions saisonnières.

Nous avons pu dresser un premier état des lieux de la circulation, de la distribution et de la formation des eaux modales et intermédiaires à partir de données brutes, in-situ. Mais le plus intéressant reste à venir. Nous pourrions ainsi étudier avec plus de précision la circulation dans le bassin, notamment à l'Est. Il serait aussi captivant d'étudier les processus de mélange des eaux. Nous avons pu cartographier différentes zones, mais les modifications entre ces zones se font-elles progressivement par un mélange tourbillonnaire, ou la bathymétrie et les ondes internes jouent-elles aussi un rôle ?

Pour répondre à ces questions, nous devons développer de nouvelles techniques pour cartographier les données satellitales et in-situ telles que, par exemple, l'interpolation optimale isopycnale des données ARGO sur notre zone ou la reprise d'ARMOR une fois corrigée. Ensuite, pour faire les bilans complets des interactions tourbillonnaires et de la circulation moyenne, il sera judicieux d'utiliser des sorties de modèles globaux tels que MERCATOR ou DRAKKAR.



**Figure 1.** Carte de a) la densité, b) la profondeur, c) la salinité et d) la température des eaux modales, au point du minimum de la vorticité potentielle pour chaque profile en 2003.



**Figure 2.** a) Diagramme T-S des valeurs des eaux antarctique intermédiaires défini par le point avec un minimum de S dans le profil verticale à la surface pour zone 1, et vers 800 m de profondeur au nord. Les points en grises sont les points des eaux modales, défini par le minimum de PV dans la colonne d'eau.

### *Les positions de déploiement pour FLOSTRAL-I*

Les positionnements définitifs de déploiements sont listés dans la Table 1, et présentés sur la Figure 3a.

**Table 1 : FLOSTRAL-I déploiements**

Numéro de Flotteur	Déploiement Position		Profondeur de dérive	Commentaires
	Latitude	Longitude		
1	28°S	54°20'E	500 m	OISO # 01
2	28°S	54°20'E	1900 m	Idem
3	35°S	53°29'E	500 m	OISO # 03
4	35°S	53°29'E	1900 m	Idem
5	38°S	53°06'E	500 m	Au nord de OISO # 04
6	38°S	53°06'E	1900 m	idem
7	42°30'S	52°29'E	1900 m	OISO # 05.
8	47°56'S	60°E	1900 m	OISO # 08.
9	40°S	76°25'E	500 m	OISO #15
10	40°S	76°25'E	1900 m	idem
11	36°S	81°E	500 m	Trajet Amsterdam-Perth
12	36°S	81°E	1900 m	idem
13	36°S	86°E	500 m	Trajet Amsterdam-Perth
14	36°S	86°E	1900 m	idem
15	25°S	54°41'E	1900 m	Au sud de la Réunion

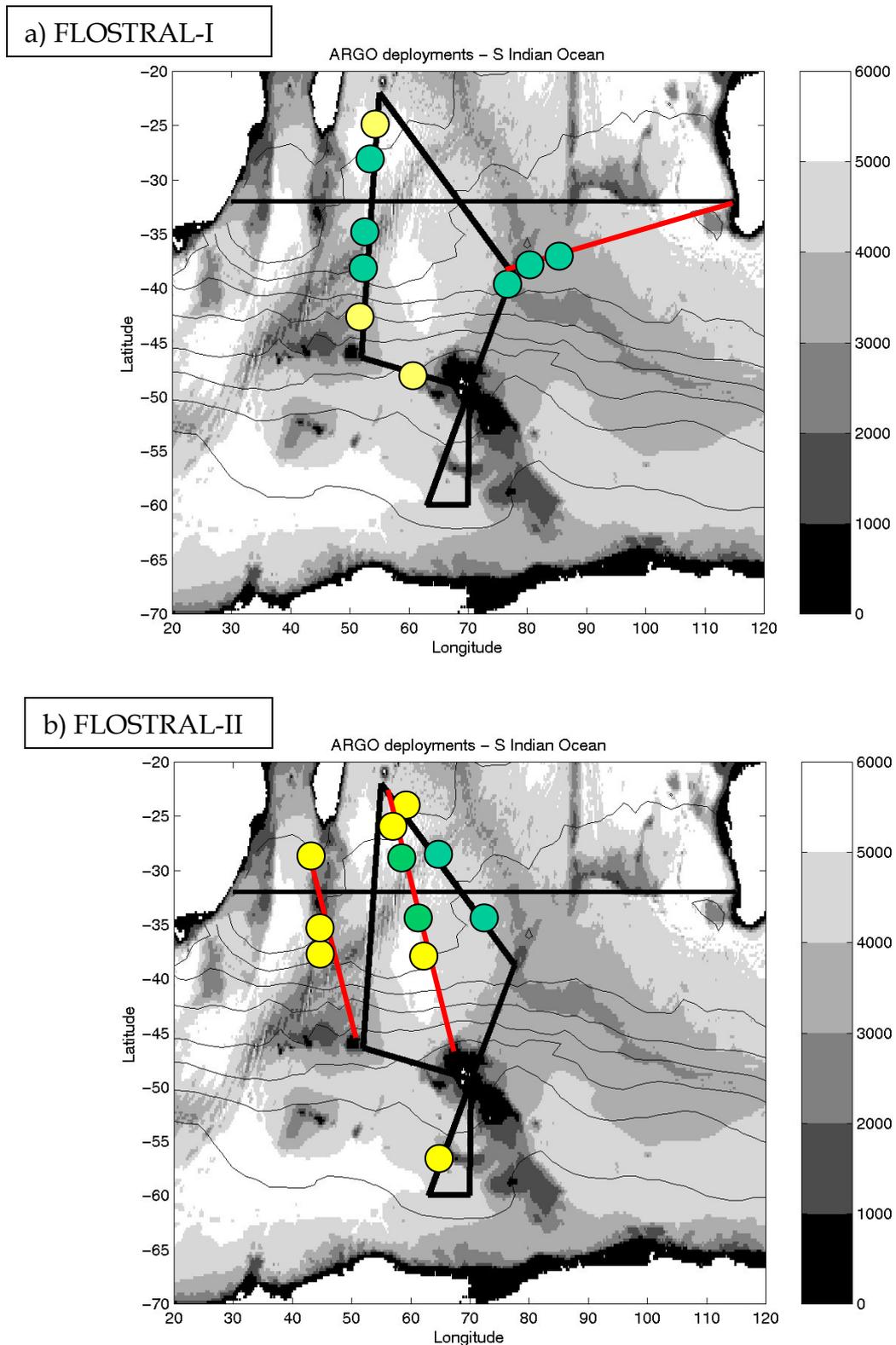
### *Les positions de déploiement de FLOSTRAL-II*

Les positionnements de déploiements sont listés dans la Table 2, et présentés sur la Figure 3b.

**Table 2 : FLOSTRAL-II déploiements**

Numéro de Flotteur	Déploiement Position		Profondeur de dérive	Commentaires
	Latitude	Longitude		
16	29°S	42°30'E	1900 m	Au sud du Canal de Mozambique
17	35°30'S	44°30'E	1900 m	idem
18	38°S	44°30'E	1900 m	idem
19	56°30'S	63°E	1900 m	Ouest du plateau de Kerguelen
20	38°S	64°12'E	1900 m	Trajet - Kerguelen - La Réunion
21	35°S	62°21'E	500 m	idem
22	35°S	62°21'E	1900 m	idem
23	29°S	59°24'E	500 m	idem
24	29°S	59°24'E	1900 m	idem
25	26°S	57°30'S	1900 m	Au sud de la Réunion
Déploiement en avril – rotation TAAF du MDII :				
26	35°S	73°28'E	500 m	OISO # 16
27	35°S	73°28'E	1900 m	idem
28	29°S	67°83'E	500 m	Au nord du OISO #17
29	29°S	67°83'E	1900 m	idem
30	25°S	60°E	1900 m	Au sud de la Réunion

**Figure 3.** Positionnement du déploiement de flotteurs PROVOR du a) projet FLOSTRAL-I et b) projet FLOSTRAL-II. La bathymétrie est affichée en grise. Le trajet en noir est le trajet initialement prévu du Marion Dufresne II lors d'un campagne OISO entre la Réunion, Crozet, Kerguelen, Amsterdam, et de retour à la Réunion (OISO n'est pas programmée pour FLOSTRAL-I). Les points jaunes sont les PROVORs à larguer à 1900 m de profondeur. Les points verts correspondent aux paires de PROVORs à larguer à 500m et 1900 m de profondeur. La ligne solide à 32°S représente la latitude où 25 flotteurs ARGO/UK ont été largués en début 2002. Les lignes rouges représentent a) le trajet modifié du MDII entre Amsterdam et Perth, Australie en janvier 2003 et b) le trajet Cape Town - Kerguelen et La Réunion - Kerguelen.



---

### **Publications récentes concernant le projet (articles, communications, thèse)**

---

Morrow, R.A., G. Valladeau et P. Techine. Preliminary Report on the FLOSTRAL data – January – May 2003. Rapport Technique, LEGOS, 2003.

Sallee, J.B., Les eaux modales de l'Indien Sud. Rapport de DEA, « Océans, Atmosphère et Environnement », UPS Toulouse III, 2004.

Valladeau, G. Control de qualité des flotteurs FLOSTRAL. Rapport de stage de fin d'études, ESIM, option Génie Marin., 2003.

---

### **Détails complémentaires**

---

En 2002-2003, j'ai fait une demande PATOM pour la validation scientifique des données ARGO du projet FLOSTRAL. J'ai aussi fait une demande à l'IPEV pour utiliser le MDII pour ces déploiements, une demande au DT-INSU pour le temps de travail d'un ingénieur pour la recette et déploiement des flotteurs, et pour certain équipement. Et en plus, j'ai appris tardivement que les frais supplémentaires concernant les transmissions ARGOS des flotteurs n'étaient pas couverts par le contrat INSU global, et chaque responsable du projet avait besoin de payer ces frais individuellement (1605 Euros pour 15 flotteurs en 2003 ... 2900 Euros pour le 27 flotteurs en fonction pour 2004). J'ai fait une demande GMMC pour couvrir ces 1600 Euros en 2003. Mais j'ai fait 4 demandes scientifiques auprès des différentes organisations en 2003 pour FLOSTRAL et j'ai trouvé que c'était beaucoup.

En 2004, je n'ai pas fait une demande PATOM, mais j'ai regroupé la demande de valorisation scientifique et la demande de support pour les frais supplémentaires dans une seule demande au GMMC. Si j'ai bien compris, le GMMC et PATOM préfère que je fais 2 demandes séparées, donc en 2005 je propose de refaire la demande de finance pour la valorisation scientifique au PATOM.