

## **Projet CIRENE**

### **"Climat Indien REcherche par la modélisation Numérique et l'Expérimentation"**

**(Jean-Philippe Boulanger, Groupe ECUME, LODYC)**

Les 16 et 17 octobre 2000 a été organisé à Paris une réunion dont l'objectif était d'évaluer l'intérêt de la communauté française à une implication dans le déploiement de moyens d'observations dans l'Indien Tropical. Après une présentation des divers modes de la variabilité climatique du bassin Indien, des missions d'observations satellite (existants et à venir) et des moyens possibles d'observations in-situ, une discussion a eu lieu permettant de dégager un certain nombre de recommandations :

- 1- intégration des projets d'observations dans un contexte international et éventuellement dans le cadre d'une coopération européenne renforcée
- 2- soutien aux activités existantes (mesures de courant dans les détroits indonésiens, maintien des lignes de thermosalinographes actuellement prises en charge par l'IRD Nouméa)
- 3- concentration des nouveaux moyens d'observations dans une région définie telle l'océan Indien tropical ouest (cf ci-dessous l'intérêt à documenter cette région)
- 4- préférence à l'utilisation de moyens "légers" d'observations tels les flotteurs lagrangiens PROVOR
- 5- évaluation de la faisabilité à instrumentaliser de nouvelles lignes de bateaux marchands à l'aide de thermosalinographes grâce auxquels nous disposerons d'une meilleure connaissance de la variabilité de la salinité de surface de la mer et des fronts océaniques

Du 13 au 15 novembre 2000, a eu lieu à Perth un workshop international sur "Sustained Observations of Climate in the Indian Ocean (SOCIO)". L'objectif de ce workshop était de faire le bilan des projets d'observations actuels, de promouvoir une coordination internationale de ces efforts et de favoriser le développement de réseaux d'observations dans l'Indien Tropical. Ainsi, les contacts entretenus avec Gary Meyers et Bob Molinari, participant à l'organisation de ce workshop, permettent d'intégrer le projet présenté par la suite dans une réflexion internationale actuellement en cours. Par ailleurs, des discussions avec des partenaires européens (F. Schott, Kiel) vont être menées pour évaluer la possibilité de placer le projet CIRENE dans un cadre plus large permettant de diversifier les moyens d'observations et valoriser les données recueillies. Il est important de noter que le déploiement de PROVOR dans l'Indien Ouest compléterait entre autres les projets de mesures équatoriales dans l'Indien Est par les japonais (mouillages TRITON) et de mesures extra-équatoriales dans l'Indien Sud-Est par les australiens (flotteurs PALACE).

#### *1. Présentation des objectifs du projet*

Les objectifs de ce projet sont de :

- 1- décrire et comprendre le rôle de l'océan dans les modes de variabilité climatique du bassin Indien aux échelles saisonnières et interannuelles
- 2- déterminer les relations et les interactions entre la variabilité du bassin Indien et d'autres modes de variabilité (tel ENSO) par une meilleure description de la variabilité de l'océan Indien (e.g. rôle du couplage sur les OIS donnant naissance à des coups de vent d'ouest dans le Pacifique ouest, importance des conditions océaniques dans le bassin Indien dans la réponse au forçage externe lié à El Niño)
- 3- améliorer la représentation grande échelle des modèles océaniques par la comparaison de ces modèles aux observations et également par l'utilisation de méthodes d'assimilation appropriées (applications à la fois à des objectifs de recherche et à l'océanographie opérationnelle)

4- représenter des états initiaux océaniques plus réalistes en vue d'améliorer les prévisions climatiques saisonnières à interannuelles (variabilité interannuelle de la mousson, précipitations en Afrique, déclenchement d'ENSO, téléconnexions)

## 2. Moyens d'observations

Suite aux recommandations de la réunion des 16 et 17 octobre 2000, deux types d'instrumentations ont été présentés comme prioritaires : les flotteurs PROVOR et les lignes de thermosalinographes.

### A- Les flotteurs PROVOR :

Les flotteurs PROVOR, si configurés selon les recommandations d'ARGO, dérivent en subsurface à une profondeur de 2000m. Ils remontent tous les 10 jours en surface avec des vitesses de remontée de l'ordre de 5m/mn (soit 7h pour la remontée), des vitesses de descente de l'ordre de 3m/mn (soit 12h pour la descente) et un temps de résidence de quelques heures en surface pour émettre les données du profil. La profondeur de dérive est choisie suffisamment profonde pour que le flotteur dérive peu spatialement. De plus, elle doit permettre une meilleure calibration des capteurs en salinité. Ce mode d'observations apparaît donc très intéressant car même si contrairement à un mouillage fixe, il ne permet pas de mesurer les champs atmosphériques à l'interface, il offre une possibilité d'observations quasi-eulériennes (si faible dérive spatiale) sur une grande portion verticale de l'océan et pour une longue durée de temps (durée de vie estimée à 3 ans) ne nécessitant aucun autre moyen à la mer que le déploiement. Par ailleurs, complété par des méthodes d'assimilation appropriées (telle l'assimilation variationnelle), cette technologie nous semble être un outil pertinent pour la reconstruction des caractéristiques thermodynamiques et dynamiques de l'océan superficiel et de subsurface à grande échelle. La mesure simultanée en température et salinité est un complément idéal à la mesure du niveau de la mer par les satellites altimétriques tels TOPEX/POSEIDON et prochainement JASON.

Par ailleurs, les caractéristiques du flotteur PROVOR (fréquence du profil, profondeur de dérive, profondeur maximale du profil) peuvent être ajustés. Ainsi, dans le cadre d'expériences de processus (tel VASCO, resp. Jean-Philippe Duvel, dont un objectif premier est la compréhension du rôle de l'océan sur les oscillations intrasaisonnières d'hiver boréal), un nombre restreint de flotteurs peuvent être programmés pour avoir une fréquence de profil un peu plus élevée permettant un meilleur échantillonnage de la couche de mélange et donc une meilleure compréhension de la structure océanique avant, pendant et après une oscillation intrasaisonnière dont la durée d'intensité effective n'est en fait de l'ordre de 10 à 15 jours. Ainsi, même si la majorité des flotteurs demandés répondra aux caractéristiques ARGO, il est envisagé, sauf avis contraire du PNEDC, qu'un nombre limité de flotteurs pourraient avoir des caractéristiques de fréquence de profil plus courtes que 10j afin de mieux échantillonner la couche de mélange.

### B- Les lignes de thermosalinographes

Un état des lieux des lignes de thermosalinographes (instruments mesurant température et salinité de surface et installés sur des bateaux marchands) a mis en évidence le manque de lignes croisant l'équateur. Il sera donc demandé à l'unité de service de l'IRD (Resp. Alain Dessier) une étude de faisabilité pour l'implémentation de nouvelles lignes de thermosalinographes (tels Golfe Persique-La Réunion, La Réunion- Makassar) permettant ainsi une meilleure connaissance in-situ des caractéristiques et des déplacements des fronts thermohalins dans l'Indien tropical. Si un tel projet est faisable, une demande budgétaire sera faite l'année prochaine pour une mise en place de ces nouvelles lignes en 2002. Ces discussions se feront en étroite collaboration avec Thierry Delcroix (IRD Nouméa).

### 3. Des observations pour quels enjeux scientifiques ?

Suite à la réunion des 16 et 17 octobre 2000, il est ressorti qu'une région d'intérêt à documenter est l'Indien Ouest. Cette région dont la variabilité de surface a des impacts continentaux sur les pays avoisinants (Mousson du Sud Ouest, précipitations en Afrique) est également le siège en surface et en subsurface de nombreux mécanismes océaniques potentiellement importants pour le climat Indien. Ces divers mécanismes sont décrits ci-dessous.

#### A- Rôle du sel

Le travail de thèse de Sebastien Masson a permis de diagnostiquer dans le modèle OPA un schéma de transport d'eaux de forte salinité depuis la Mer d'Arabie jusque dans l'est du bassin Indien où ces eaux en subsurface contribuent à la création d'une couche barrière susceptibles d'affecter significativement les interactions air-mer dans le réservoir Indien d'eaux chaudes. La mesure de la température et de la salinité depuis la mer d'Arabie jusqu'à l'équateur (et ce à différentes longitudes) nous permettra de mieux comprendre les processus océaniques d'alimentation de la thermocline équatoriale au regard de la variabilité saisonnière et interannuelle de l'Indien. Nous nous intéressons en particulier à évaluer comment la variabilité interannuelle des caractéristiques des masses d'eaux alimentant la thermocline équatoriale peut affecter la structure thermodynamique des parties central et est du bassin et les couplages océan-atmosphère dans cette région. Pour cela, nous utiliserons conjointement les observations fournies par les PROVOR et les mouillages TRITON japonais.

#### B- La variabilité équatoriale

##### B1- Les Jets de Wyrтки

L'étude des simulations océaniques et des observations altimétriques a mis en évidence la forte variabilité aux échelles intra-saisonnière et interannuelle des Jets de Wyrтки de printemps et d'automne. Ces jets induisent des transports zonaux de 30 à 40 Sverdrup affectant la structure verticale de l'océan sur 80 à 100 mètres. La mesure des profils de température et de salinité autour de l'équateur contribuera à la compréhension du rôle des Jets de Wyrтки sur les transports de chaleur et de sel. Il est évident que les flotteurs PROVOR déployés à l'équateur divergeront même avec des profondeurs de dérive à 2000m. Toutefois ces Jets de Wyrтки ont une extension méridienne de l'ordre de 1° à 2° en latitude vers le nord et le sud permettant d'espérer observer les signatures des Jets de Wyrтки de plusieurs saisons. Cette question sera abordée dans l'étude sur la stratégie de déploiement.

##### B2- La variabilité interannuelle

La variabilité interannuelle de l'océan Indien peut se résumer schématiquement à la variabilité bisannuelle, à l'impact d'ENSO et au Dipôle Indien.

La variabilité bisannuelle de la Mousson du Sud-Ouest se caractérise par la persistance après la Mousson d'une année donnée d'anomalies de température de surface au cours de l'automne et l'hiver boréal suivants. Ces anomalies sont en fait corrélées à l'intensité et aux caractéristiques de la Mousson suivante au contraire des anomalies de température de surface de la mer au printemps précédent cet événement de Mousson. Il est supposé que des mécanismes océaniques de persistance d'anomalies en subsurface pourraient expliquer ce paradoxe. La mesure pluriannuelle de profils de

température et de salinité dans l'Indien Ouest peuvent être à même de diagnostiquer le rôle joué par l'océan dans cette variabilité bisannuelle.

L'impact d'ENSO est caractérisé par un réchauffement global de l'océan Indien. Les mesures PROVOR permettraient de mieux comprendre comment ces anomalies affectent également la structure verticale de l'Indien et sont à même d'influencer au cours des mois suivants les modes de variabilité dans l'Indien.

Enfin, le Dipôle Indien est un phénomène couplé océan-atmosphère pouvant renverser le gradient zonal de température de surface à l'échelle du bassin Indien (tel au cours de l'événement 1997-1998) créant alors une structure proche des états moyens observés habituellement dans les autres bassins tropicaux : vents d'est à l'équateur, eaux chaudes dans l'ouest, upwelling côtier intense à l'est responsable d'une langue d'eaux froides équatoriales, présence d'un Sous-Courant Equatorial intense en subsurface advectant les eaux salées de l'ouest du bassin vers l'est. Bien que cet événement ait donné lieu à de nombreuses et récentes publications, celles-ci reposent soit sur l'étude de champs de surface ou la modélisation. Le manque de données en subsurface de la structure océanique manque à la compréhension du rôle de l'océan dans le déroulement et la terminaison du Dipôle. Les mesures PROVOR (si déployées au cours d'un événement Dipôle), en complément des mouillages TRITON dans l'est, contribueraient de manière significative à cette compréhension.

### B3- Le positionnement de la région de convergence

La région de convergence des vents est située en moyenne entre l'équateur et 10°S dans la partie ouest de l'Indien. Il s'avère en particulier à 5°S que l'étude de la structure thermodynamique de l'océan présente une décorrélation entre la variabilité de la température de surface de la mer et celle du déplacement vertical de la thermocline suggérant un mécanisme d'entretien semblable à celui observé dans le Pacifique où les processus d'advection verticale sont compensés par des processus d'advection zonale. De tels équilibres sont en fait le résultat de mécanismes couplés océan-atmosphère (Vintzileos et al., 1999a,b). La description de l'évolution de la structure océanique en température et salinité en surface et subsurface complétée par l'utilisation de l'assimilation variationnelle (méthode 4D-Var développée au LODYC) et des outils de modélisation forcée et couplée devrait nous permettre de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans le positionnement de la région de convergence (i.e. position moyenne et variabilité aux échelles saisonnières et interannuelles) et ses interactions avec la thermocline équatoriale.

### B4- Rôle de l'océan dans les caractéristiques des Oscillations Intrasonnières

Les oscillations intrasonnières hivernales (pouvant jouer un rôle sur ENSO via le déclenchement de coups de vent d'ouest dans le Pacifique ouest) prennent le plus souvent leur origine dans la partie ouest du bassin aux latitudes de température de surface maximale corrélée à la position de la région de convergence. Ensuite, elles se déplacent vers l'est le long d'une diagonale remontant vers l'équateur dans l'Indien est. Bien que ces oscillations soient le plus souvent au sud de l'équateur, certaines ont des signatures équatoriales non négligeables susceptibles de jouer un rôle significatif dans la variabilité du bassin Indien. Ainsi en Novembre 1994, une oscillation intrasonnière a générée de fortes anomalies de vent d'ouest à l'équateur ayant forcée une onde de Kelvin downwelling potentiellement responsable de la fin de l'événement de Dipôle alors en pleine croissance. De même en Mai 1997, une autre oscillation a créé des gradients zonaux de SST à l'équateur ayant pu générer des anomalies de vents d'est dans l'est du bassin potentiellement initiateurs de l'événement Dipôle ayant suivi. Comprendre le rôle de l'océan dans les caractéristiques de ces oscillations et tout particulièrement sur leur positionnement est donc important à la fois pour analyser la variabilité du bassin Indien mais également dans le cadre des téléconnexions sur le Pacifique.

### C- Caractéristiques des masses d'eaux de l'Indien tropical sud (sud de 10°S)

Dans la région 10°S-25°S, les courants moyens sont caractérisés par le Courant Equatorial Sud ayant une faible variabilité. Se retrouvent ainsi dans l'Indien ouest à la fois les eaux du Throughflow indonésien et des masses d'eaux subtropicales formées dans l'Indien sud. La mesure de la structure thermodynamique de l'océan devrait contribuer à une meilleure compréhension des apports respectifs de masses d'eaux qui ensuite vont alimenter soit la région équatoriale, soit le courant des Aiguilles. Toutefois, l'étude des caractéristiques des masses d'eaux au regard des processus de formation dans les subtropiques répondent principalement aux problématiques du Thème Océan Austral. Après discussions avec Rosemary Morrow et Nicolas Metzl, les déploiements dans cette région seront décidés en commun afin d'être également adaptés à un prolongement éventuel dans le futur vers l'océan Indien austral.

#### 4 Stratégie de déploiement des PROVOR

La stratégie de déploiement des flotteurs n'est pas encore arrêtée, toutefois de grandes lignes ont pu être dessinées (cf carte de déploiement). Tout d'abord, le déploiement suivra une direction nord-sud depuis la Mer d'Arabie jusqu'à la latitude de la Réunion (entre 20°S et 25°S). Le méridien de déploiement se situera très certainement entre 55°E et 65°E (éventuellement 70°E). Cette stratégie permettra d'accéder à la structure thermohaline climatique en fonction de la latitude et de réaliser une description de la thermocline et des masses d'eaux qui la constituent.

Entre 5°N et 10°S, des flotteurs seront déployés à différentes longitudes permettant de mieux couvrir l'aspect zonal (importance pour la variabilité équatoriale, position de la région de convergence, rôle de l'océan sur les caractéristiques des oscillations intrasaisonniers). Comme indiqué précédemment et sauf avis contraire du PNEDC, un nombre limité de flotteurs pourraient avoir des caractéristiques de fréquence de profil plus courtes que 10j afin de mieux échantillonner la couche de mélange. A priori, il n'est pas envisagé de modifier la profondeur de dérive pour les raisons évoquées précédemment (faible dérive spatiale en profondeur, calibration des instruments).

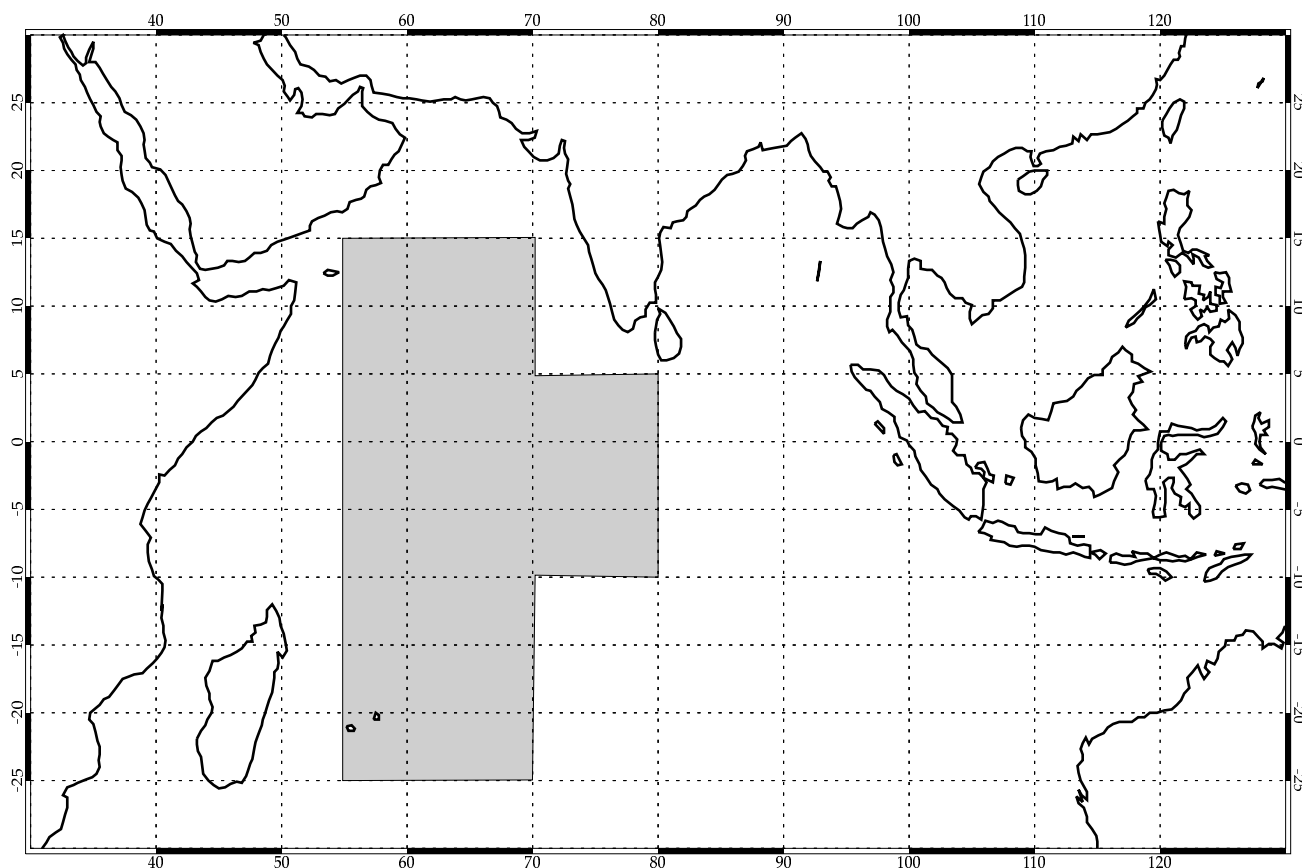
Une distribution des flotteurs nécessaires aux objectifs précédents peut être proposée (mais les positions finales du déploiement seront définies au cours de l'année 2001) :

- région nord (15°N-5°) : 3 à 5 flotteurs
- région sud (15°S-25°S) : 3 à 5 flotteurs
- région équatoriale (5°N-10°S) : 5 à 7 flotteurs par longitude en visant un déploiement sur trois méridiens différents (e.g. 60°E, 70°E, 80°E) soit entre 15 et 21 flotteurs

d'où un total compris entre 21 et 31 flotteurs.

En conclusion, un nombre minimal de 21 flotteurs est nécessaire à l'échantillonnage d'un méridien allant de la Mer d'Arabie à la Réunion et à une concentration dans la région équatoriale et sud-équatoriale où se forment les OIS. Une demande de 25 flotteurs permettant de déployer les flotteurs en deux phases afin de combler d'éventuelles défaillances de PROVOR ou une trop forte divergence de ces flotteurs (en particulier à l'équateur) semble être un compromis satisfaisant.

De manière générale, au cours de l'année 2001, une première étude avec le modèle ORCA en mode forcé nous permettra d'estimer les dérives de ces flotteurs en fonction des points de déploiement et qualifier les mesures que nous pourrions obtenir. Nous examinerons en particulier les difficultés d'interprétation provenant d'un échantillonnage à 10jours par rapport à la variabilité intrinsèque de l'océan.



Carte des régions de déploiement possibles des PROVOR

Une coordination entre les équipes de modélisation du LODYC, du LEGOS (L. Gourdeau avec SEEK), du CERFACS (P. Rogel avec 3D-Var) et du LPO (B. Ferron par méthode variationnelle, différente de 4D-Var ou 3D-Var) permettra d'évaluer l'impact dans la représentation de la structure océanique via assimilation de données "artificielles" caractéristiques des données que devraient recueillir les flotteurs (expériences jumelles dont l'échantillonnage sera caractéristique des flotteurs lagrangiens).

Ainsi, au cours de l'année 2001, la stratégie de déploiement sera définie ce qui nous permettra de déployer une partie des flotteurs en 2002 (en fonction du degré de fiabilité des flotteurs et du temps bateau disponible). L'autre partie des flotteurs sera déployée ultérieurement afin de compléter le déploiement initial selon les recommandations faites et selon les divergences de flotteurs observées ou les pertes de flotteurs.

De plus, dès 2002, nous serons également prêts à valoriser l'ensemble de ces données en les assimilant par la méthode 4D-Var dans le modèle OPA. Au cours des dernières années, a été développé au LODYC une méthode d'assimilation variationnelle dite 4D-Var. Cette méthode validée dans le Pacifique tropical est en cours de validation dans la configuration globale ORCA du modèle OPA. En plus de l'assimilation actuelle des profils de température, nous assimilerons le niveau de la mer grâce en particulier au développement de l'opérateur de background (dit B). Cet opérateur doit représenter l'ensemble des relations physiques et statistiques reliant les différents champs du vecteur de contrôle (en l'occurrence: niveau de la mer, température, salinité, courants horizontaux). Une fois cet opérateur mis en place, nous serons à même d'introduire les profils de

salinité dans le système d'assimilation et ainsi de valoriser pleinement les données recueillies par les PROVOR. A ce titre, il est important de noter que les données recueillies par ce déploiement seront en fait complétées par les données de mouillages Triton dans l'Indien Est et par les flotteurs PALACE (ayant des caractéristiques similaires) déployés par les australiens dans l'Indien Sud-Est. La couverture ainsi assurée par l'altimétrie, les lignes XBT, les flotteurs (PROVOR et PALACE) et mouillages devraient permettre de fournir un nombre de données conséquent pour contraindre le modèle océanique par assimilation. L'avantage de la méthode 4D-Var au contraire des méthodes d'OI est que l'assimilation est réalisée sur une fenêtre temporelle (1 mois) sur laquelle l'ensemble des champs de modèle sont optimisés dans leur condition initiale permettant de propager l'information des données à la fois statistiquement (via l'opérateur B) et dynamiquement (via les équations du modèle).

Pour conclure, il est important de préciser que cet effort de déploiement de flotteurs lagrangiens PROVOR s'intégrera dans la contribution française à ARGO. Le traitement des données recueillies par les flotteurs sera effectué par l'antenne CORIOLIS du centre IFREMER de Brest. De plus, en collaboration avec les équipes impliquées dans le projet CORIOLIS, nous réfléchirons aux moyens de séparer dans la mesure de profil en température et salinité la variabilité haute-fréquence liées aux ondes internes de la variabilité climatique qui nous intéresse plus particulièrement. Dans l'océan Indien, la variabilité simulée par le modèle OPA semble indiquer des amplitudes de variation saisonnière et interannuelle de la thermocline suffisamment marquées pour espérer faire cette séparation. De plus, la répétitivité des profils en des points quasi-invariants spatialement devrait aider à distinguer ces échelles de variabilité distinctes après plusieurs profils et en utilisant notre connaissance de l'état de base de l'océan (données WOCE, données XBT, données altimétriques).