

**EXPERIENCE D'UTILISATION D'UN SUPER-  
CALCULATEUR  
POUR LA MISE EN PLACE D'UN MODELE  
OCEANIQUE OPERATIONNEL**

**Alain Morlière**  
(Océanographie Physique UR 101)

Université Pierre et Marie Curie  
LODYC / Tour 14  
4, place Jussieu  
75252 Paris Cédex 5 France

**RESUME** - Les océans tropicaux jouant un rôle majeur dans les échanges énergétiques qui conditionnent l'évolution du climat de notre planète, il est apparu indispensable de pouvoir suivre en temps quasi-réel leur évolution de façon à améliorer la prévision climatique. Pour cela deux techniques complémentaires sont utilisées : l'une, ancienne, est basée sur l'observation systématique par navires marchands, elle se modernise avec l'usage des satellites ; l'autre, plus récente, repose sur la simulation numérique à l'aide de modèles.

L'objectif de notre travail est de fournir à partir des sorties d'un modèle numérique une description détaillée mensuelle de l'Océan Atlantique dans ses trois dimensions entre 20°S et 20°N. Le modèle utilisé a été mis au point par une équipe du LODYC ; il simule l'évolution de l'océan décrit comme un fluide en mouvement sous l'effet principalement du rayonnement solaire, des échanges de chaleurs liés aux changements d'état de l'eau et des échanges mécaniques dus aux vents. Les observations réalisées "in situ" seront assimilées dans le modèle pour en corriger les sorties.

Pour atteindre l'objectif visé, il faut maîtriser le fonctionnement du modèle dans un environnement de super-calculateur CRAY2, il faut maîtriser le flot des données nécessaires à l'excitation du modèle et enfin il faut définir et réaliser les produits terminaux les plus pertinents et les plus synthétiques. C'est cette expérience d'utilisation d'un super-calculateur que nous nous proposons d'exposer.

Dans ce genre d'opération, l'utilisation d'un ordinateur du type Cray1 (puis Cray2 à partir d'avril 1987) est indispensable, car seul ce type de calculateur permet de traiter d'énormes quantités d'information à travers un volume de calcul considérable.

Dans notre cas, la "grille" du modèle comporte 125 000 points auxquels sont attachés quatre paramètres qu'il faut conserver sur trois pas de temps, le tout en flottant double précision soit : 12 millions d'octets en mémoire (ou une gestion d'entrées-sorties très pénalisante). Les calculs qui permettent de passer d'un pas de temps à l'autre s'étalent sur plus de 4 000 lignes de Fortran. Pour traiter un mois de simulation il faut intégrer le modèle sur plus de 1 000 pas de temps. Le Cray2 avec ses 2 000 gigaoctets de mémoire centrale, sa capacité de vectorisation, ses quatre processeurs parallèles permet, moyennant quelques efforts de programmation, d'obtenir des temps de calcul tout à fait raisonnables.

En dehors de la partie proprement calcul, le reste est plus classique puisqu'il s'agit d'organiser, de valider des flots de données en entrée (notamment les données de vent issues du modèle atmosphérique du Centre Européen de Reading) ; en sortie, les produits graphiques sont élaborés à travers le logiciel NCAR.

## INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années l'océanographie évolue dans le sillage de la météorologie et s'est de ce fait considérablement transformée avec le développement de l'intérêt porté à la climatologie et à la prévision du temps. Ceci est du en grande partie aux résultats qui ont montré le rôle très important joué par l'océan dans la redistribution de l'énergie thermique à la surface de la planète.

La distribution des flux méridionaux d'énergie transportée par la circulation de l'atmosphère et des océans à travers les parallèles (Figure 1) montre que le rôle de l'océan est globalement équivalent à celui de l'atmosphère et qu'il domine très nettement aux basses latitudes. C'est lui qui assure l'évacuation de la chaleur en excès aux faibles latitudes vers les hautes latitudes. L'océan, avec sa capacité thermique très importante et ses vitesses de déplacement lentes joue le rôle de "mémoire" à moyen terme des événements climatiques. C'est cette caractéristique qui laisse augurer d'un allongement de la prévision du temps par une meilleure connaissance de l'océan et des mécanismes qui le régissent.

Toutefois, dans le dispositif de prévision du climat, l'océan reste le point faible. Ceci est en grande partie du à la difficulté d'observations systématiques sur toute l'étendue maritime. Les satellites doivent fournir dans la prochaine décennie un élément de réponse à cette nécessité d'observations synoptiques systéma-

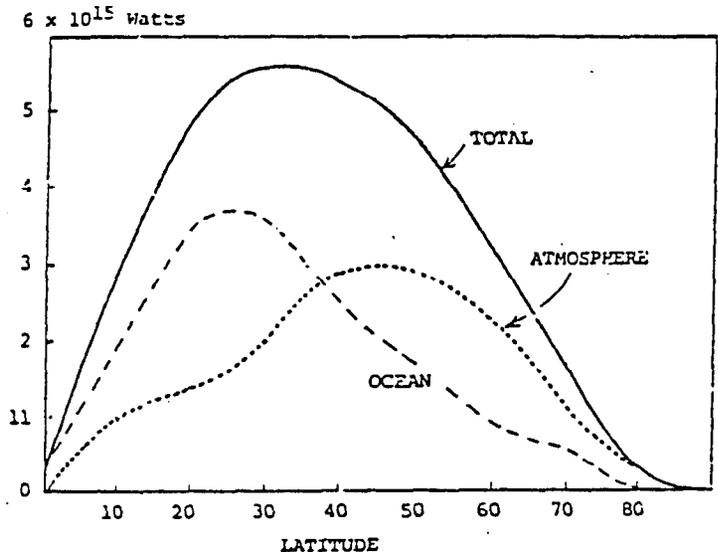


Fig. 1. Flux méridionaux d'énergie transportés par la circulation de l'atmosphère et celle des océans, à travers différents parallèles de latitude croissante.  
(D'après Carrissimo, Oort et Von der Haar, 1985, J.P.O. 15).

tiques. Parallèlement à cette voie, il existe deux autres voies complémentaires : l'observation systématique par l'intermédiaire des bateaux marchands (qui, contrairement aux satellites permettent l'observation en profondeur) et la simulation de l'océan à partir de modèles numériques.

Les océanographes physiciens de l'ORSTOM, ont, jusqu'à présent, surtout travaillé dans le domaine de l'observation. Ils ont mis en place un réseau de mesures par navires marchands qui est actuellement la pièce maîtresse du dispositif d'observation permanent de l'océan tropical du programme international TOGA. Ce programme prévoit un accroissement de l'effort d'observation de cette région pendant dix ans ainsi qu'un développement de la modélisation océanique en vue d'une amélioration de la prévision climatique à des échelles de temps comprises entre le mois et l'année.

Quelques uns tentent depuis peu de prospecter la voie de la modélisation en utilisant des modèles numériques soit pour des études de processus, soit pour une simulation périodique la plus réaliste possible. C'est la voie que notre équipe a choisi. L'objectif de notre travail est de fournir, à partir des sorties d'un modèle une description détaillée mensuelle de l'océan Atlantique dans ses trois dimensions entre 20 N et 20 S. Pour obtenir la description la plus réaliste possible, nous prévoyons de contrôler les sorties mensuelles du modèle à partir des observations réalisées pendant le mois écoulé ; cette assimilation de données doit éviter les "dérives" dues : soit à des problèmes numériques, soit aux approximations faites lors de l'écriture du modèle. Il faut noter que l'assimilation des données dans les modèles océaniques est un problème mal connu qui fait l'objet de nombreuses recherches.

Une expérience analogue à la nôtre fonctionne aux Etats-Unis sur le Pacifique à l'aide d'un modèle différent ; de même, une équipe britannique doit prendre en charge l'océan Indien.

## 1. QU'EST-CE QU'UN MODELE OCEANOGRAPHIQUE ?

Pour construire un modèle numérique de l'océan, on part des équations de Navier-Stokes qui, pour un fluide en mouvement, expriment la conservation de la quantité de mouvement, de la masse et de la chaleur dans un repère lié à la terre. C'est un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires sur un domaine de géométrie complexe qu'il faut résoudre en tenant compte de conditions aux limites et d'un état initial donné. On fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (hypothèse de Boussinesq, incompressibilité, hydrostatisme, mélange vertical convectif, "toit rigide",...). On précise les conditions aux limites (fond plat, frontières fermées, non glissement à la côte,..). De toute façon,

on ne sait pas résoudre de façon analytique le système obtenu d'où le recours aux méthodes numériques pour trouver des solutions approchées. On utilise la méthode des différences finies qui conduit à transformer le milieu physique continu en un milieu discontinu représenté par une grille découpant l'espace en portions élémentaires. Ceci permet de remplacer le système aux dérivées partielles par un système d'équations algébriques. Avec ces équations, en partant d'un état initial connu, on calcule les états successifs des différents paramètres du milieu : on *"intègre"* le modèle.

La discrétisation du milieu est choisie en fonction de ce que l'on veut étudier puisque les phénomènes ne peuvent être résolus que si le temps de propagation entre deux points de grille est inférieur au temps d'intégration d'où un équilibre entre la dimension des mailles, le temps d'intégration et la gamme de phénomènes étudiés.

Actuellement, il n'existe dans le monde que deux modèles tridimensionnels aux équations primitives de l'océan : un mis au point aux Etats-Unis, l'autre en France par une équipe du Laboratoire d'Océanographie DYnamique et Climatique (LODYC). Le modèle que nous utilisons est celui du LODYC mis au point par P.Decluse, P.Andrich, M.Chartier et M.A.Foujols.

La discrétisation a été faite suivant une grille en trois dimensions (110 x 72 x 16). En chaque point de la grille, on calcule quatre paramètres principaux et il est nécessaire de disposer de trois pas de temps pour procéder à l'intégration d'un nouveau pas de temps. D'où la nécessité de disposer à chaque pas de temps de 1.5 million de variables codées sur 8 octets soit environ 12 millions d'octets rien que pour les variables principales. Ces données doivent être stockées en mémoire si l'ordinateur utilisé en est capable, ou alors il faut passer par un stockage externe et une gestion complexe et pénalisante d'entrées sorties.

L'exécution représente un grand nombre de données à traiter à travers un volume très important de calculs ; seuls les nouveaux super-calculateurs sont capables d'absorber de tels travaux avec des délais d'exécution raisonnables. En effet les calculs qui permettent de passer d'un pas de temps à l'autre s'étalent sur plusieurs milliers de lignes de FORTRAN. Pour traiter un mois de simulation du modèle, il faut intégrer le modèle sur plus de 1000 pas de temps.

## 2. CONDITIONS DE REALISATION DE L'EXPERIENCE

### 2.1. Personnel

L'expérience a débuté en février 1987. Le personnel ayant travaillé sur le projet en 1987 comprend : J.Merle (10%), S.Arnault (10%) et A.Morlière (80%). L'apport d'un informaticien n'a pu être obtenu mais a été en partie compensé par un ingénieur vacataire pendant 3 mois en fin d'année et par un effort de formation des participants.

### 2.2. Matériels et logiciels

L'autorisation de travail sur le Cray passe par la soumission tous les six mois de projets auprès du Conseil Scientifique du Centre de Calcul Vectoriel pour la Recherche (CCVR) qui doit donner son accord et fixer le quota d'heures allouées au projet.

Le calculateur Cray pour la recherche est situé à Palaiseau, dans les locaux de l'Ecole Polytechnique. La puissance de ce calculateur réside à la fois dans sa formidable mémoire centrale (2000 Méga ou 2 Giga octets), dans sa capacité de vectorisation qui permet des gains de temps très importants sur toutes les opérations entre vecteurs (dans notre cas, le traitement vectorisé d'un pas de temps nécessite 3.04 secondes, non-vectorisé il en demande 80.94), dans ses quatre processeurs parallèles qui permettent soit le traitement de quatre tâches en même temps, soit le découpage des programmes en quatre morceaux exécutés parallèlement ce qui peut diviser les temps de séjour en machine par un facteur trois (le code que nous utilisons n'est pas encore parallélisé). La vectorisation et la parallélisation surtout, posent quelques problèmes de programmation qui ne sont pas simplifiés par le fait que le numéro de série du Cray français est le 6, c'est dire les quelques "bugs" à débusquer.

Pour utiliser le Cray 1 puis le Cray 2 (depuis avril 87), il faut transiter par une station frontale où sont stockés, édités les programmes et les fichiers de données et où sont récupérés les sorties graphiques. La station frontale utilisée est le Centre Inter Régional de Calcul Electronique (CIRCE) situé à Orsay et doté de deux calculateurs (IBM 3090/200 et NAS 9080). Le CIRCE est attaqué depuis le LODYC à Paris, à travers une grappe de terminaux IBM, un concentrateur et une ligne spécialisée. La station CIRCE est également utilisée à travers le réseau TRANSPAC à partir de micro-ordinateur personnel. Dans l'avenir, le réseau Ethernet-Sun du LODYC sera relié directement à celui du CCVR et de là, au Cray 2, d'où l'économie du passage au CIRCE.

Le système d'exploitation du Cray est UNICOS, succédané d'UNIX en traitement par lots. Sur le CIRCE, nous utilisons le sous-système TSO du système VMS/XA. Le langage de program-

mation est FORTRAN 77 (hors dessin le modèle comprend 4600 lignes de FORTRAN). Les bibliothèques utilisées sont celle de vectorisation d'UNICOS et celle de tracé : NCAR. Les sorties du modèle sont visualisées sur écran, papier (Versatec) et film de 35mm (pour archivage et reproduction en temps décalé).

Quelques chiffres relatifs à l'exécution des travaux sur le Cray : une intégration du modèle sur un mois demande environ 20 minutes de CPU et 21 Mégabytes de mémoire centrale. Pour mener à bien nos expériences avant de passer à la phase opérationnelle nous prévoyons plus de 100 heures CPU.

### 2.3. Données

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle sont d'une part, les contraintes exercées par l'atmosphère à l'interface avec l'océan (vent et flux thermiques), d'autre part, les observations océaniques dont l'assimilation dans le modèle permet de rattraper les écarts éventuels à la réalité.

Les données vent ont, dans la phase préliminaire, deux origines. Elles proviennent du modèle de prévision climatique à moyen terme de Reading (Angleterre), elles sont acheminées par une ligne spécialisée vers la Météorologie Nationale à Paris qui les dispose en fichier sur le Cray à notre usage. Elles proviennent également des observations réalisées à bord des navires marchands et diffusées en temps réel sur le *Système Mondial de Transmissions* (SMT), elles doivent être sélectionnés, organisés après leur capture sur le SMT. Ces opérations sont encore dans leur phase expérimentale. Une fois disponible, le vent doit être contrôlé et mis à la maille du modèle avant d'être utilisé.

Les éléments des flux thermiques sont calculés à partir de séries climatologiques et ne posent pas de problème informatique. Ils posent par contre des problèmes physiques majeurs car de précision insuffisante.

Les données océaniques sont, pour l'instant, uniquement des profils thermiques verticaux entre la surface et 700m. Elles sont obtenues par les bateaux marchands le long des lignes de navigation et transmises par radio vers le SMT ou par balise Argos vers le Centre Argos de Toulouse. Nous les récupérerons par TRANSPAC auprès du Centre de données de sub-surface TOGA de Brest qui a la charge de regrouper et de valider ce type de données et devrait pouvoir nous les délivrer chaque mois dans des délais très courts.

## 2.4. Produits

Ce sont essentiellement des dessins sur film élaborés directement en sortie du Cray à partir du logiciel NCAR. Les produits restent à préciser mais ce sont principalement des planches à immersions fixes (Figure 2), des coupes est-ouest (Figure 3) et nord-sud (Figure 4) en fonction de la profondeur pour les principaux paramètres à savoir : température, vecteur courant et composantes du courant.

## 3. PREMIERS RESULTATS ET AVENIR

Les premiers résultats concernent le savoir faire acquis en matière d'utilisation de modèles océaniques et d'utilisation de systèmes informatiques modernes et performants.

Nous avons choisi de mettre au point nos méthodes de travail sur une année de référence (1984) particulièrement bien documentée en données océanographiques du fait de nombreuses opérations à la mer liées à l'expérience franco-américaine FOCAL SEQUAL. Nous avons procédé à une intégration du modèle sur toute l'année dans des conditions identiques à celles utilisées lors d'une intégration de l'expérience FOCAL (P.Deleduse), excepté le vent que nous avons calculé à partir des données d'observations élaborées par J.Servain. Ceci nous a donné des résultats différents (Figure 5), mais beaucoup plus proches de la réalité. En particulier nous retrouvons les remontées d'eaux froides à l'équateur en été qui avaient disparues dans l'intégration FOCAL utilisant un produit vent élaboré à partir des sorties du modèle atmosphérique de Reading. Ce résultat montre le rôle déterminant de la contrainte vent sur le réalisme des sorties du modèle et le soin qu'il faudra porter au choix de cette information.

Nous avons maintenant entrepris nos expériences de pseudo assimilation lors de réinitialisations périodiques du modèle à partir d'un état antérieur du modèle corrigé objectivement à l'aide des observations réalisées pendant la période d'intégration. Nous pensons tirer les conclusions des ces expériences vers la mi 1988 et entreprendre les premiers essais en temps réel fin 1988 afin d'apprécier exactement les conditions de mise en place d'un produit opérationnel.

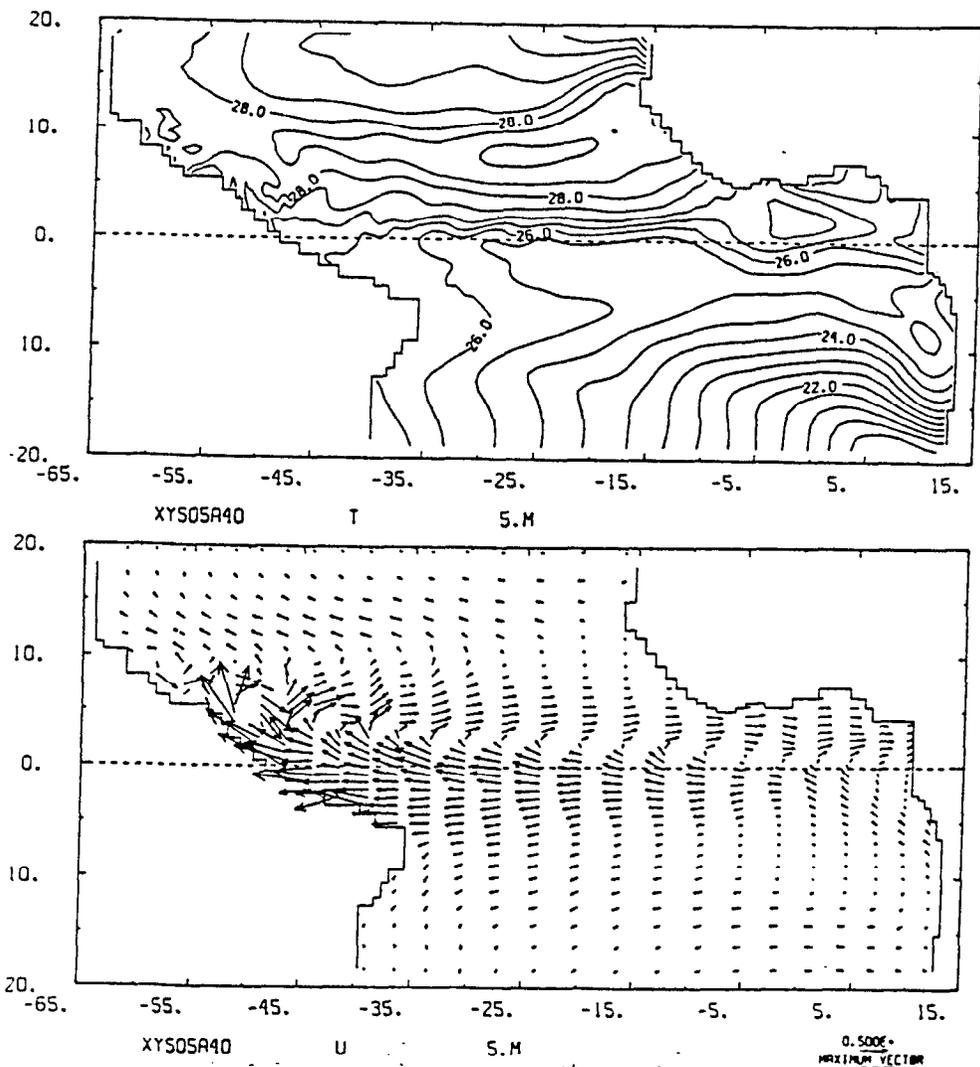


Fig. 2. Exemple sortie du modèle. Température et courant à 5M en octobre 1984.

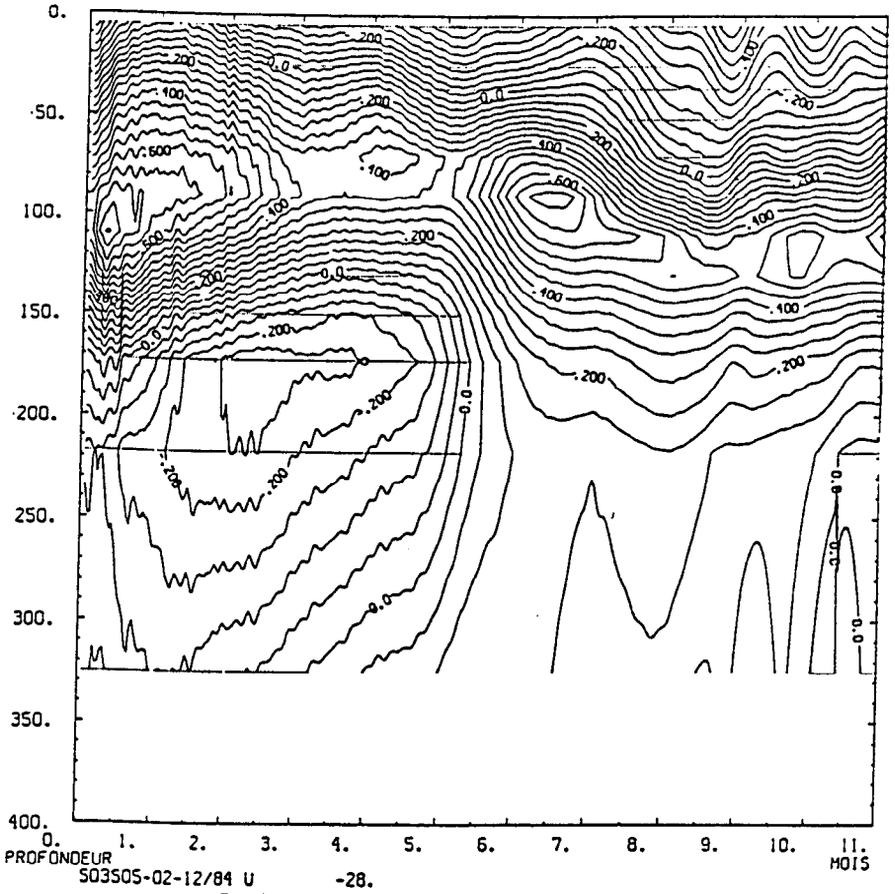


Fig. 3. Exemple de sortie du modèle. Evolution en fonction du temps de la composante zonale du courant sur l'équateur à 28° ouest.

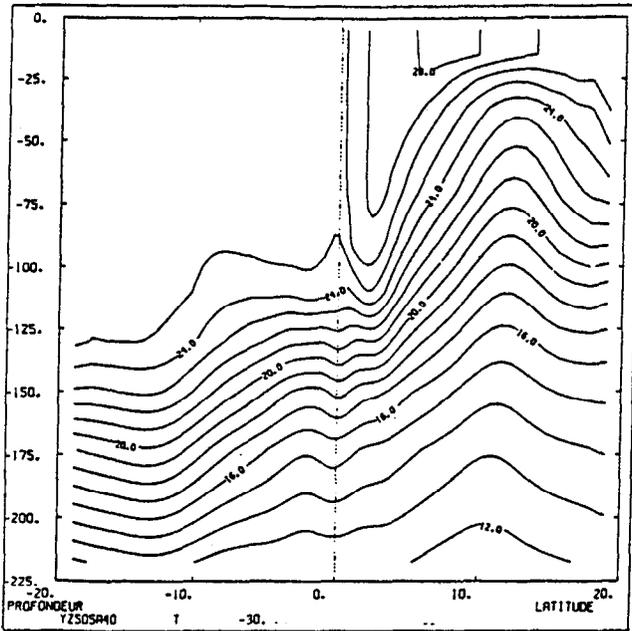


Fig. 4. Exemple de sortie du modèle. Coupe nord sud de température à la longitude 30° ouest.

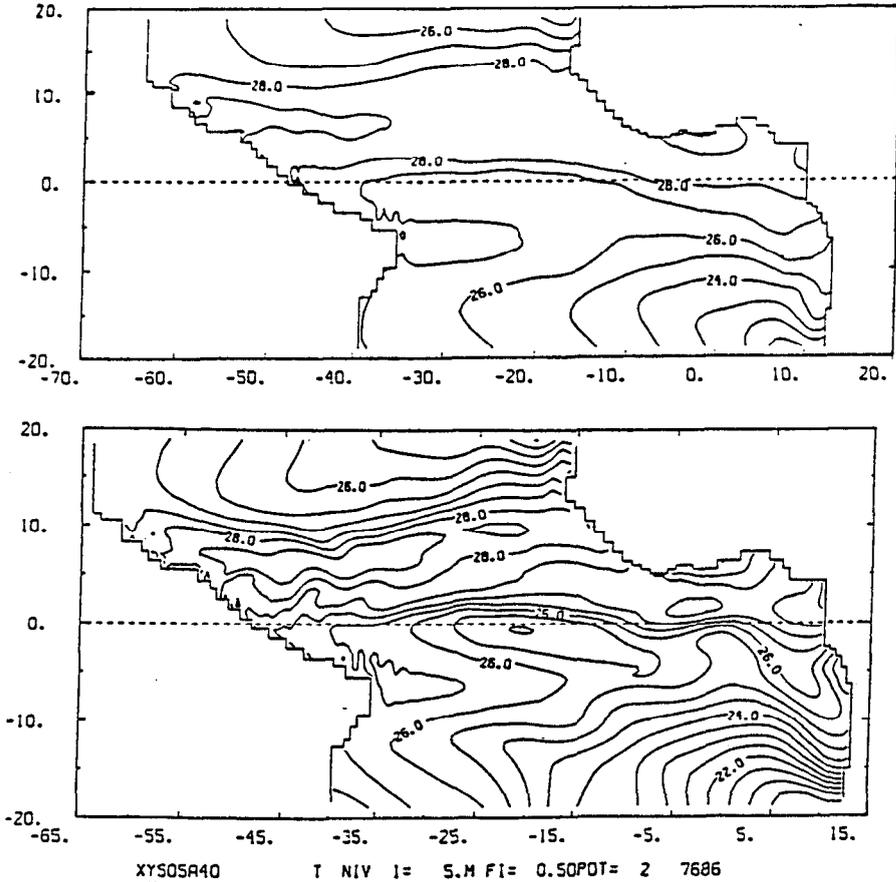


Fig. 5. Comparaison des sorties du modèle avec des vents différents au 1er août 1984.

a) Expérience FOCAL avec vent SEQUAL/FOCAL 2b.

b) Notre expérience avec vent Servain corrigé de la stabilité de l'air.

Remarque: - isolignes tous les 1° sur a)  
 - isolignes tous les 0.5° sur b)