

P10

**CARTOGRAPHIE DES CHAMPS THERMIQUES DE SURFACE DE LA MER
PAR SYNTHÈSE D'IMAGES ET DE DONNÉES IN SITU MESURÉES
PAR BATEAUX**

**MAPPING SEA SURFACE TEMPERATURE FIELDS MERGING SATELLITE
IMAGERY AND SHIP IN SITU MEASUREMENTS**

F. GOHIN

Centre IFREMER - Brest FRANCE

RESUME

Du fait de la concentration importante de la vapeur d'eau de l'atmosphère, un suivi précis des températures de surface de la mer est particulièrement difficile en zones tropicales et équatoriales. Le rayonnement infra-rouge est altéré lors du trajet dans l'atmosphère. Cependant des contrôles et des calibrations sont possibles grâce aux données mesurées par les bateaux. Une fois que les pixels contaminés par les nuages ont été exclus, une carte de synthèse peut être réalisée à l'aide de techniques appropriées. La carte résultante est bien plus précise que celle qui ne proviendrait que de mesures in situ trop éparées.

ABSTRACT

In equatorial and tropical areas, problems to monitor accurately the sea surface temperature using the meteorological satellites may occur due to the important concentration of water vapour in the atmosphere. The infra red radiations of the sea may be affected by the atmospheric components. Nevertheless, checks and calibrations are possible if ship measurements are available. Once the pixels

19 FEV. 1996

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire 405

N° : 43073

ORSTOM Documentation



010003878

contaminated by clouds or vapour components have been excluded, a mixed chart made from several images may be produced using appropriate technics. The resulting chart is far more accurate than the maps derived from the useful but sparse in situ measurements.

INTRODUCTION

La température de surface de la mer (TSM) est un paramètre océanographique observé et étudié depuis longtemps. Son intérêt propre autant que la facilité de sa mesure sont à l'origine de l'importance du nombre des observations récoltées à ce jour.

A l'heure actuelle, les études prenant directement en compte la TSM privilégient deux types d'applications. Les premières sont d'ordre climatologique, la température de l'eau à l'interface Océan-Atmosphère génère des flux de chaleur radiative (infra-rouge) et participe, en particulier en fonction de son écart avec la température de l'air, aux échanges de chaleurs sensible et latente tels ceux provoqués par l'évaporation. La TSM joue donc un rôle direct dans le bilan radiatif des échanges entre l'océan et l'atmosphère. Mais on travaille aussi de plus en plus à la modélisation complète des échanges de flux intégrant les mouvements de chaleur verticaux induits par la turbulence et le brassage. La TSM, associée au vent, est un des principaux paramètres pris en compte dans les modèles de turbulence verticale. Considérée dans des modélisations dynamiques, la TSM permet aussi d'observer puis prévoir les évolutions des tourbillons d'origine profonde (tourbillons dits méso-échelle de l'ordre de 200-500km de diamètre) ainsi que les courants à tendance prédominance horizontale (type Gulf Stream ou Kurushio) ou verticale (upwelling côtier et équatoriaux).

Un autre type d'application cherche à mettre en évidence et comprendre les liens pouvant exister entre l'hydroclimat et les populations de poissons pélagiques (petits tels la sardine, le maquereau, l'anchois et le chinchard ou plus gros tel le thon). Nous sommes dans un domaine bien différent du précédent dans le sens où la température a rarement un rôle direct, simple à analyser, sur l'objet de l'étude qui est en fin de compte la capture par unité d'effort (c'est à dire la prise par bateau standard).

La température absolue joue un rôle indéniable sur les déplacements de certaines espèces effectuant des migrations saisonnières. D'après Kawasaki (1983), l'extension d'une population dominante, par exemple une population de sardine, doit toujours être maximale. Il y a donc des déplacements saisonniers ou plus fondamentaux, portant parfois sur des décennies en cas de changement climatique à long terme, de l'aire habitée par le stock. Plus qu'une sténothermie au sens strict, c'est à dire le besoin d'une température ambiante évoluant dans une gamme étroite, ce sont les conditions

nutritives qui vont influencer le déplacement des poissons. Hélas pour la gestion des pêches, il n'y a pas de relation directe entre la biomasse d'une population considérée globalement, sans prendre en compte la structure démographique, et la population disponible et accessible pour la pêche. En effet, on peut observer paradoxalement une augmentation des captures d'un stock qui se réduit mais se concentre dans les ultimes poches d'un upwelling se contractant en conditions de vent défavorables. Dans ces études, le rôle de la température absolue, réel mais complexe, cède parfois devant celui des simples températures relatives suffisantes pour évaluer les limites, marquées par des fronts, d'un écosystème instable.

Un exemple de l'intérêt de la température relative, indicatrice d'une situation particulière lorsqu'elle varie rapidement, est fourni par la pêcherie germonière. Dans l'Atlantique Nord-Est, on trouve le germon (*Thunnus alalunga*) l'été dans un voisinage assez large, de l'ordre de plus ou moins 2 degrés, autour de l'isotherme de surface 18°C. Sa présence est souvent remarquée par des captures plus importantes en zone de front. Dans ces situations (Lauris, 1984), le germon se situe généralement du côté chaud d'un front opposant des eaux claires et chaudes à des eaux froides et vertes. Les eaux vertes des eaux nouvellement brassées plus riches en phytoplancton alors que les eaux claires de la proximité seraient des eaux où le zooplancton et le micro-necton ont déjà pu se développer sans toutefois disparaître suite à l'appauvrissement du milieu en évolution. D'autre part, on observe dans ces zones de contraste des variations importantes de la profondeur de la thermocline ; ce qui a pour effet de concentrer parfois le poisson qui suit sa nourriture sur la couche la moins profonde. Enfin, il ne faut pas omettre de préciser le type de métier pratiquant la pêche. S'il s'agit de ligneurs, il est important que le poisson puisse voir l'appât de loin et les eaux doivent être suffisamment claires. Il apparaît ainsi que la complexité du processus est telle qu'une température relative, voire le simple vent dans bien des cas, fournit une indication suffisante pour comprendre les variabilités locales des captures. Ainsi, ont pu se développer des programmes d'aide à la pêche basés sur des observations de zones frontales. Ces travaux ont rarement eu une utilité dans la gestion à long terme des stocks car ils sont basés sur des représentations instantanées très fines des structures observables, largement minoritaires du fait de la couverture nuageuse.

Pour aller plus loin, approcher au mieux la température absolue et intégrer les images dans un ensemble plus complet d'observations, il peut être avantageux d'utiliser les données *in situ* fournies par le réseau météorologie mondial (Demarcq et Citeau, 1989). Nous préconisons dans ce texte l'utilisation des méthodes géostatistiques pour effectuer des synthèses d'images provenant d'un même capteur (par exemple NOAA) ou de capteurs différents (METEOSAT et NOAA) calibrées sur des données *in situ* mesurées par bateau.

PRETRAITEMENT DES DONNEES ET SCHEMA D'ENSEMBLE

Dans les applications proposées dans ce texte, portant sur le Nord-Ouest de l'Afrique et le Canal du Mozambique, nous avons utilisé deux types de satellites météorologiques. L'un, représenté par NOAA9 et NOAA11, est un défilant d'orbite polaire, alors que le second, METEOSAT 2, est un géostationnaire. Les données de l'Atlantique proviennent du Centre de Météorologie Spatiale de Lannion alors que les images de l'Océan Indien proviennent de la station ORSTOM de la Réunion. Le premier ensemble de données est traité sur VAX 11/780 et le second sur station SUN. Les données des navires sont issues du Système Mondial de Télétransmission et ont été acquises auprès de la Météorologie Nationale.

La température déduite des satellites est calculée par combinaison linéaire des températures radiatives des canaux 4 et 5. Cette méthode dite SPLIT WINDOW (Deschamps et Phulpin 1981) permet de filtrer une partie de l'effet atmosphérique en ajoutant à la température du canal 4 le double de l'écart des températures des canaux 4 et 5 équivalent à la majeure partie de l'absorption atmosphérique.

$$\text{Soit } T_s = 3T_4 - 2T_5 + C_0$$

La constante C_0 est évaluée sur chacune des images de façon à assurer le non biais entre les données *in situ* et les températures des pixels correspondant si ceux ci sont clairs.

Les données des satellites sont rectifiées géométriquement et donnent lieu par rééchantillonnage à la création d'images en projection Mercator dont la taille du pixel, est adaptée à l'échelle de la carte souhaitée. En pratique, du fait de l'utilisation de METEOSAT 2, dont le pixel est de 5 kilomètres, et compte tenu de la variabilité temporelle lors de la durée de la synthèse (de l'ordre d'une semaine dans nos exemples), la taille du pixel de l'image rectifiée est fixée à 5 kilomètres. La discrimination entre mer et nuage est une étape essentielle qui conduit, en situation ordinaire, à l'élimination de la majeure partie des pixels de l'image si la zone couverte par celle-ci dépasse le million de km². Si les données situées sous des nuages hauts sont facilement décelables par la très faible température restituée, les données sous des brumes diffuses et peu épaisses sont plus difficilement écartées.

De façon à éviter un écart général entre les données *in situ* et les images, les températures observées par les satellites sont calibrées à l'aide des observations des bateaux situées sous des pixels clairs. Un fichier mixte est créé par rééchantillonnage des images et adjonction des températures *in situ*. L'origine de la mesure est conservée dans le fichier et sera prise en compte dans l'estimation finale. La figure 1 représente les principaux modules du logiciel PESKET développé par l'IFREMER en collaboration avec l'ORSTOM conduisant à la réalisation de la carte de synthèse.

A l'expérience, il ressort que les contraintes de qualité des prétraitements qui doivent éliminer rigoureusement les pixels les plus douteux ne sont pas un obstacle à la cartographie automatique. Celle-ci est effectuée par estimation des températures aux noeuds d'un réseau régulier (maille de 20km) suivant une fréquence temporelle variable en fonction des conditions nuageuses et des besoins des utilisateurs. Afin de procéder aux mieux aux estimations, il est nécessaire d'évaluer les différentes erreurs associées aux divers capteurs et de connaître la structure spatiale de la température de surface. On pourra ainsi effectuer des estimations locales, aux noeuds du réseau, par combinaison linéaire des températures observées à proximité les coefficients affectés à chacune des températures du voisinage seront calculés en fonction de l'origine (bateau ou satellite), et des positions des mesures.

L'ANALYSE STRUCTURALE ET L'INTERPOLATEUR DU KRIGEAGE

L'analyse structurale

La température observée par satellite ($T_s(x,t)$) ou par bateau ($T_b(x,t)$) dépend de la position x et de la date t . La température que nous cherchons à évaluer est par définition la température à la profondeur moyenne des données *in situ* qui est à la base des atlas climatiques. La profondeur moyenne est mal connue. Elle correspond généralement à celle de la prise d'eau de refroidissement du moteur qui se situe entre 3 et 5 mètres.

Si la température $T(x)$ est la température réelle de la mer à l'instant t_0 , on pose les hypothèses suivantes :

$$(1) T_b(x,t) = T(x) + e_b(x,t)$$

e_b est un terme d'erreur dû à la variabilité temporelle et verticale des mesures ainsi qu'aux approximations du positionnement.

$$(2) T_s(x,t) = T(x) + e_s(x,t) + e's(x,t)$$

Le premier terme d'erreur e_s associe l'ensemble des erreurs sans corrélation spatiale et assimilables à un bruit blanc. Il s'agit du bruit instrumental et des contaminations par les nuages ou divers parasites affectant les pixels de façon isolée.

Le second terme d'erreur $e's$, plus élevé, prend en compte la part structurée des erreurs. La corrélation des erreurs locales provient du fait que pour une image les observations sont effectuées à un même instant et que les effets atmosphériques locaux ainsi que les réchauffements éventuels en surface apparaissant en l'absence de vent contaminent d'un effet très stable les pixels voisins.

On suppose donc que les termes eb et es sont de moyennes nulles (les images sont calibrées sur les données in situ de façon à éviter un biais global), indépendants, et de variance respectives δb^2 et δs^2 .

es' est supposé de moyenne nulle et de covariance $\delta s'^2$.

Ensuite, on pose que la température $T(x)$ est elle-même une fonction aléatoire sur laquelle on fait des hypothèses de répétitivité des structures indispensables pour les estimations. Ces hypothèses sont celles de la stationnarité des accroissements (Matheron, 1970).

Soit x et $x+h$ deux points séparés par une distance h :
En notant E l'espérance mathématique (valeur moyenne)

$$E[T(x+h)-T(x)] = 0$$

$$E[T(x+h)-T(x)]^2 = 2V(h)$$

On fait ainsi l'hypothèse que les écarts de température sont en moyenne nulle et ne dépendent en moyenne quadratique (variance) que de la distance entre les points et non de la position des points eux-mêmes.

L'estimation sur un réseau régulier

Les estimations To^* vont se faire aux noeuds d'un réseau régulier à l'aide de l'interpolateur dit du krigeage.

A partir des n températures T_i les plus proches observées aux points (x_i, t_i) par bateau ou télédétection, on pose :

$$To^* = \sum_i l_i T_i$$

On recherche les pondérateurs l_i tels que :

$$E[\sum_i l_i T_i] = To \text{ (non biais)}$$

$$E[\sum_i l_i T_i]^2 = \delta K^2 \text{ minimale (optimalité)}$$

Ensuite, après avoir développé la variance de krigeage δK^2 suivant les hypothèses faites sur la structure spatiale (varigramme) et les erreurs de mesure, on retient les coefficients l_i assurant une valeur minimale de δK^2 . Ces coefficients, annulant les dérivées partielles de la décomposition de δK^2 sont solutions d'un système linéaire dit du krigeage (Gohin, 1987, 1990).

APPLICATION

L'analyse structurale

L'analyse structurale, par l'inférence du demi-variogramme, est une phase essentielle de l'analyse géostatistique. Le demi-variogramme est calculé par secteur et par saison. Ainsi, sur le Nord-Ouest de l'Afrique (cf. planches couleur P10A à P10D), la région est scindée en deux secteurs, le large et la côte séparées par l'axe 36°N, 5.30°W et 21°N, 19°W correspondant aux limites approximatives des déplacements d'eaux froides de l'upwelling côtier. Pour de faibles distances, compatibles avec la taille moyenne du demi-variogramme de krigeage, on ajuste les demi-variogrammes suivants :

Pour une T.S.M. exprimée en 0.1°C,
Large $V(h) = 1.5h$ où h est en pixels de 5km,
Côte $V(h) = 6h$.

Les structures fines sont moins bien évaluées par les données bateaux évoluant principalement au large. La valeur à l'origine du demi-variogramme expérimental (fig. 2) calculé à partir de couples de mesures prises par des bateaux distincts révèle la variance des erreurs et des variabilités dues aux imprécisions dans le temps et la position. Exprimé en 0.1°C², ce terme évolue entre 60, durant l'hiver, et 140 au coeur de l'été.

Pour l'image du 6 juin 1987 la constance C_0 résultant de la calibration sur les données *in situ* a été évaluée à 0.77°C. La variance des écarts entre les températures des pixels et les données des bateaux est égale à 1.1°C² ou exprimée en (dixième de degrés)² pour comparer avec les valeurs du variogramme, égale à 110. La valeur C_0 et la variance de dispersion sont très liées. En particulier, une valeur élevée de C_0 , supérieure à 3 et une forte variance de dispersion des écarts, au delà de 180 selon notre expérience sur la zone marocaine, traduisent une forte distorsion des situations observées. Il faut en chercher la cause dans les effets atmosphériques résiduels, associés parfois à des réchauffements diurnes apparaissant en situation de vent faible. En zone équatoriale et sur la région marocaine en juillet et de moindre façon en août, ces effets sont prépondérants et très peu d'images sont exploitables bien que les nuages ne soient pas apparents.

Revenant aux formules (1) et (2) dans Analyse structurale - Analyse Structurale et l'Interpolation du Krigage-, on identifie les variances des erreurs à l'aide des valeurs à l'origine des demi-variogrammes et de la variance de dispersion.

δb^2 = Valeur à l'origine du demi-variogramme des bateaux (effet de pépité).

δb^2 = Valeur à l'origine du demi-variogramme de l'image.

$\delta b^2 + \delta s^2 + \delta s'^2 =$ Variance des écarts satellites-bateaux.

Les variances ne sont pas évaluées systématiquement mais de façon saisonnière, on ne porte une attention particulière à ces variances que lorsqu'un effet atmosphérique résiduel est soupçonné suite à l'importance éventuelle de la variance de dispersion.

On choisit les valeurs suivantes :

$\delta b^2 = 90$, et pour NOAA : $\delta s^2 = 9$, $\delta s'^2 = 16$

Sur les situations de l'Océan indien (cf. planches couleur P10E à P10G), les constantes C_0 sont plus élevées et établies sur moins de mesures in situ. Les constantes sont évaluées à 2.5 (image du 26 août) et 3°C (image du 28 août) sur 6 et 12 couples respectivement, les variances de dispersion sont égales à 140 et 160 ($.1^\circ\text{C}$)². Les valeurs élevées des constantes laissent craindre un effet atmosphérique résiduel qui n'est pas flagrant si l'on considère les seules variance de dispersion, établies, il est vrai, sur peu de couples.

CONCLUSION

Partant des outils les plus simples de la géostatistique, il nous a été possible d'effectuer des systèmes d'observations de température de surface d'origines différentes. Outre la possibilité ainsi offerte de contrôler la qualité des températures restituées par satellites et de rejeter certaines images qui avait une apparence correcte, il nous a été permis d'intégrer efficacement toutes les observations de surface dans un même ensemble cohérent. Enfin, à terme, ces données calibrées et de bonne résolution pourront être introduites dans les modèles de circulation hydrodynamique.

BIBLIOGRAPHIE

DEMARCO H., J. CITEAU, 1989. Restitution de la température de surface de la mer à la résolution météosat par intégration de données exogènes. 67-71, *Téledétection satellitaire et pêcheries thonières océaniques. Doc. Tech. sur les Pêches N° 302*, FAO.

DESCHAMPS P.Y., T. PHULPIN, 1980. Atmospheric correction of infrared measurements of the sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μm . *Lay. Meteorology*, 18, 131-143, 1980.

GOHIN F., 1987. Analyse géostatistique des champs thermiques de surface de la mer. *Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris*.

GOHIN F. The merging of *in situ* measurements and remotely sensed observations of the sea surface temperature, soumis à *Int. Jour of Rem. Sens.*

KAWASAKI T., 1983. Why do some pelagic fishes have wide fluctuations in their number ? Biological basis of fluctuation from the view point of evolutionary ecology. Expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish stock. *Pap 43 1065-1080 San José Costa Rica Av.*

LAURS R.M., P.C. FIEDLER, D.R. MONTGOMERY, 1984. Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep Sea Res. 31 1085-1099.*

MATHERON G., 1970. La théorie des Variables Régionalisées. *Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau.*

LOGICIEL

P E S K E T

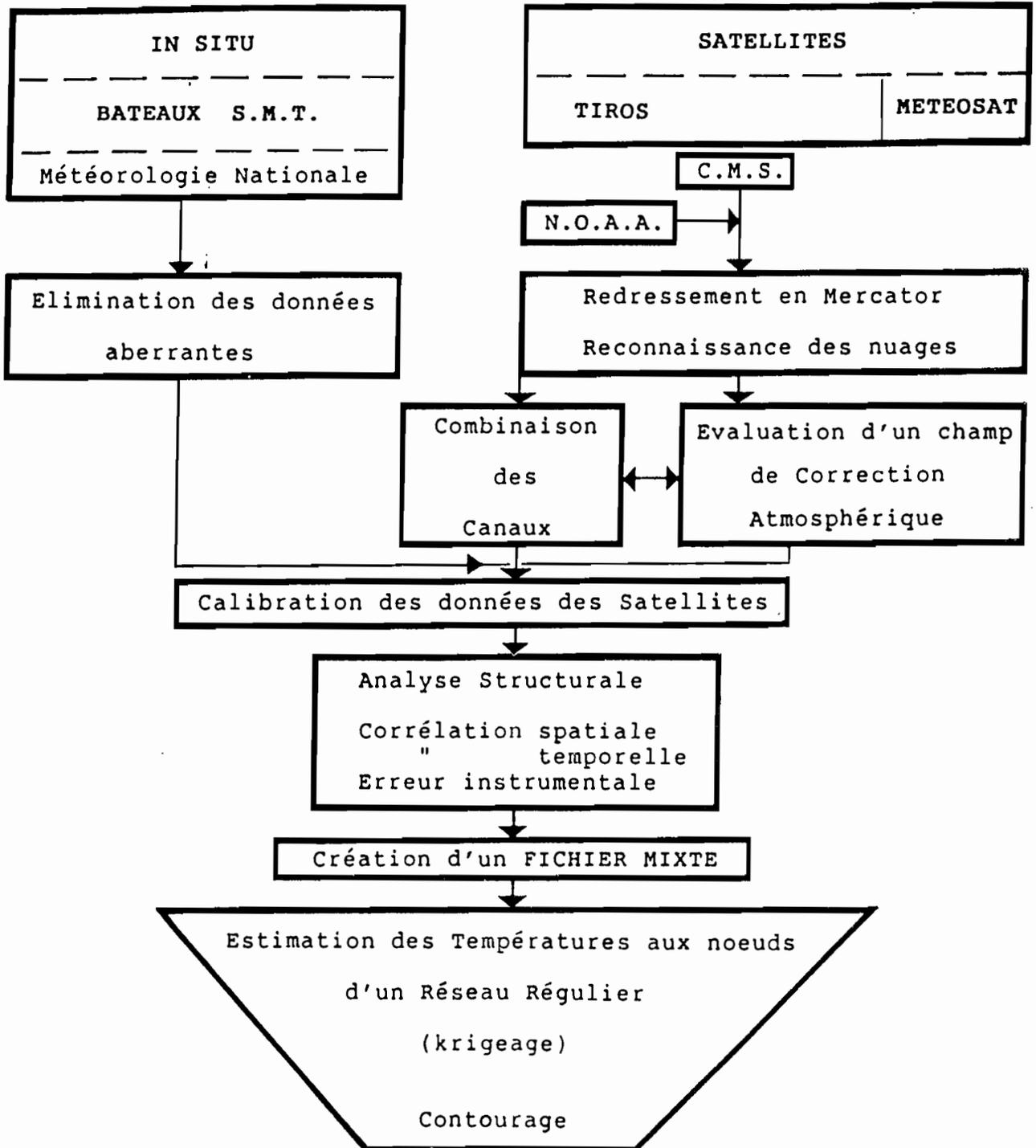
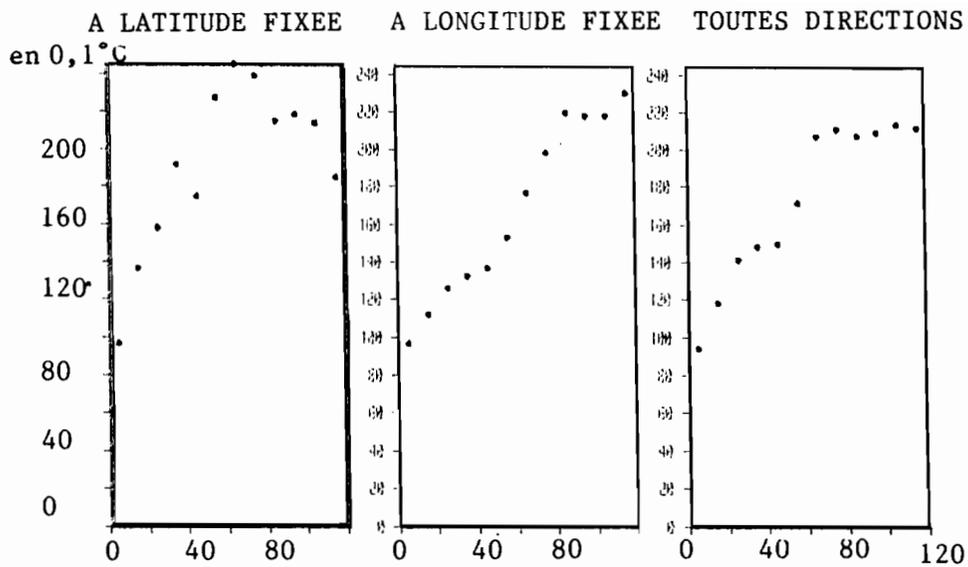


Figure 1 : Réalisation d'une carte de synthèse.



Les demi-variogrammes issus des bateaux de juin 1987.
 Les demi-variogrammes sont calculés à partir de comptes établis pour des observations issues de bateaux différents et séparées de moins de 8 jours.

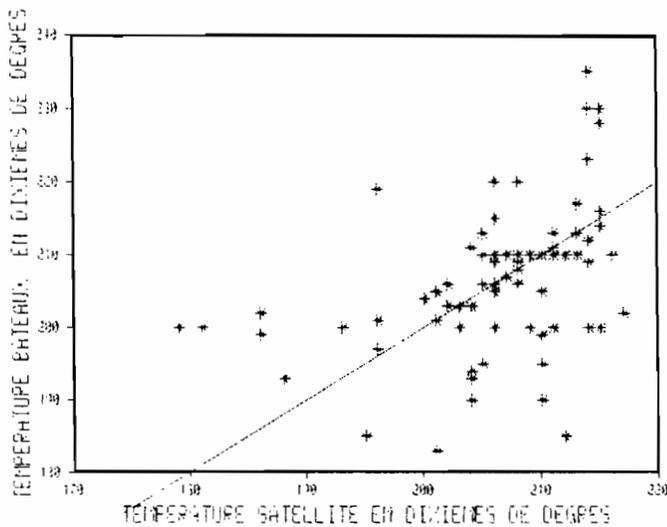
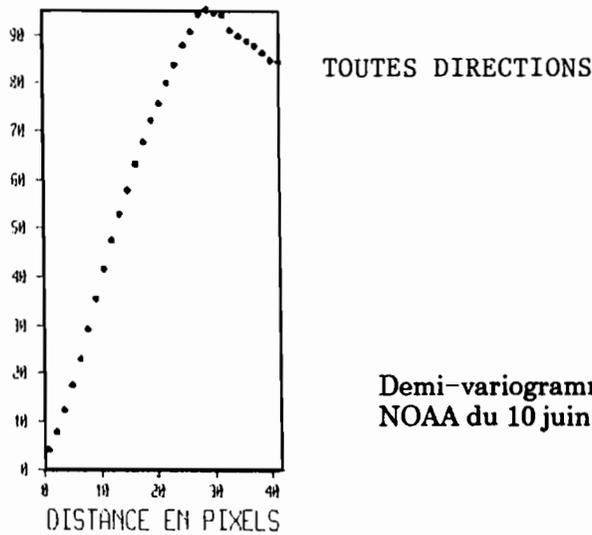
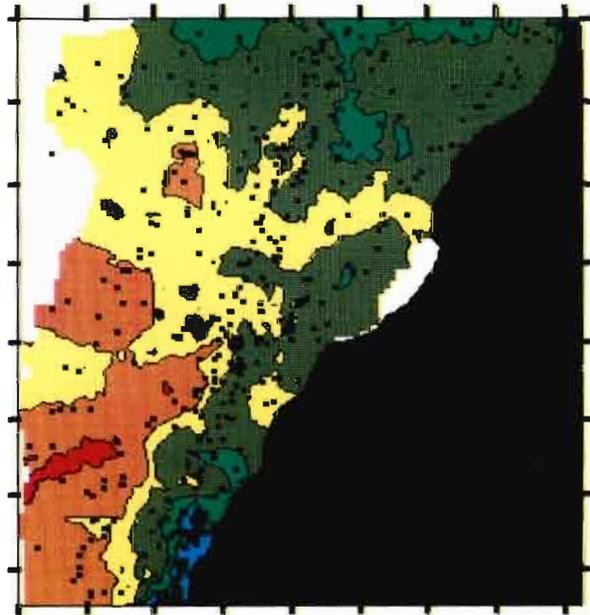


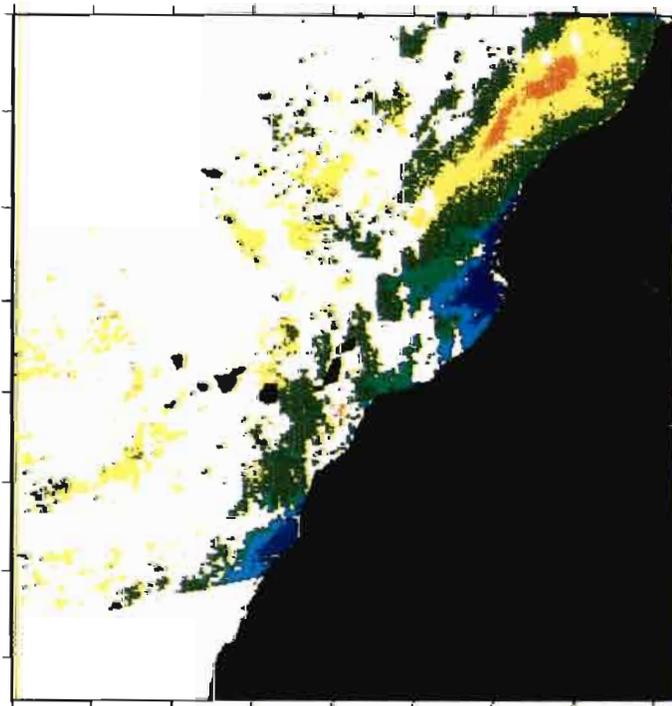
Diagramme représentant les températures des bateaux et les températures restituées par satellite.

Figure 2 : Structures.

P10

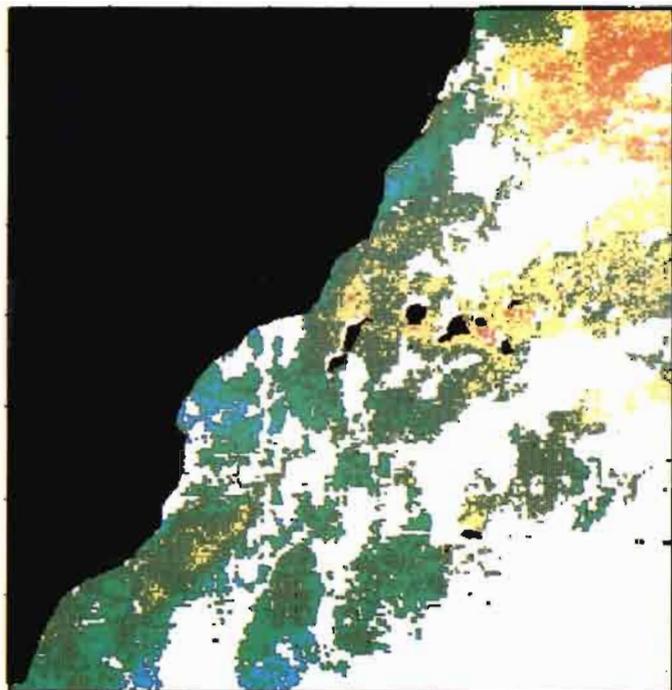


P10A : Les données in situ du 8 au 15 juin 1987. Les observations sont représentées par des points.

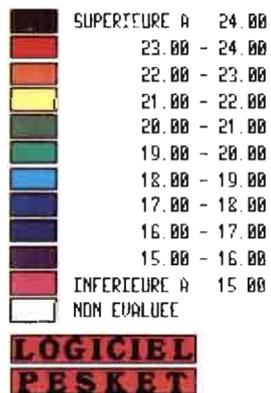
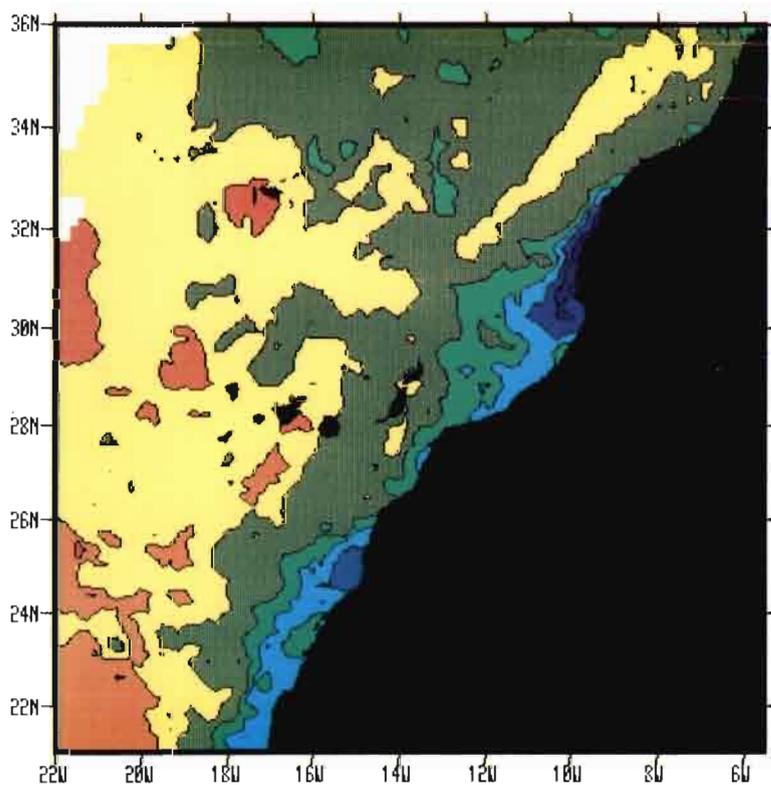


P10B : Image NOAA-9 du 10 juin 1987 à 15h. Les nuages apparaissent en blanc.

P10



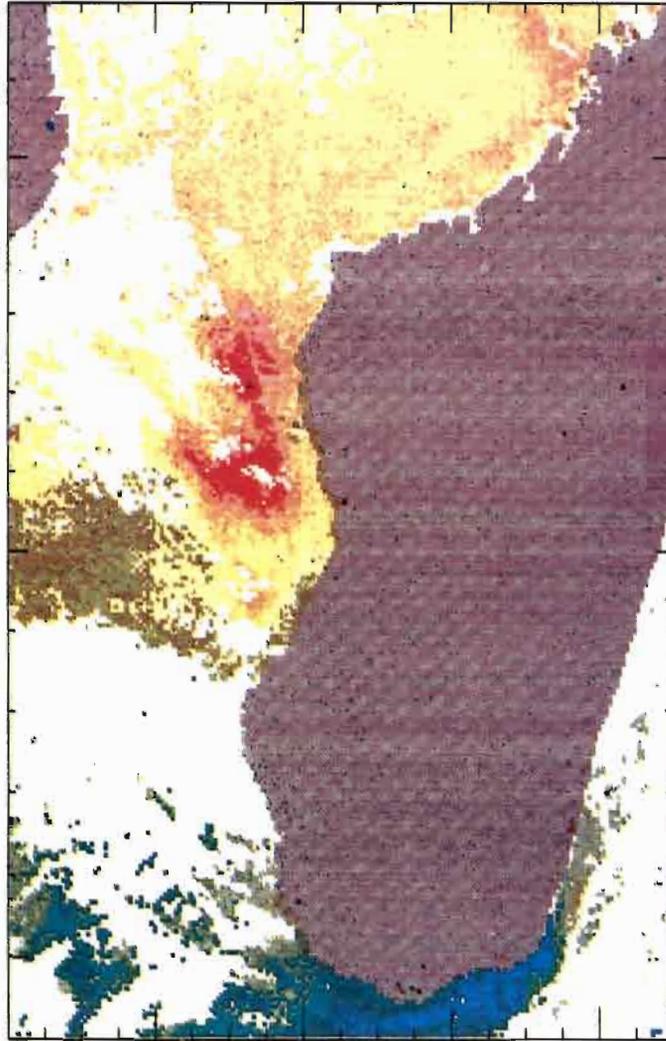
P10C : Image METEOSAT du 10 juin à 12h.



Température en C°

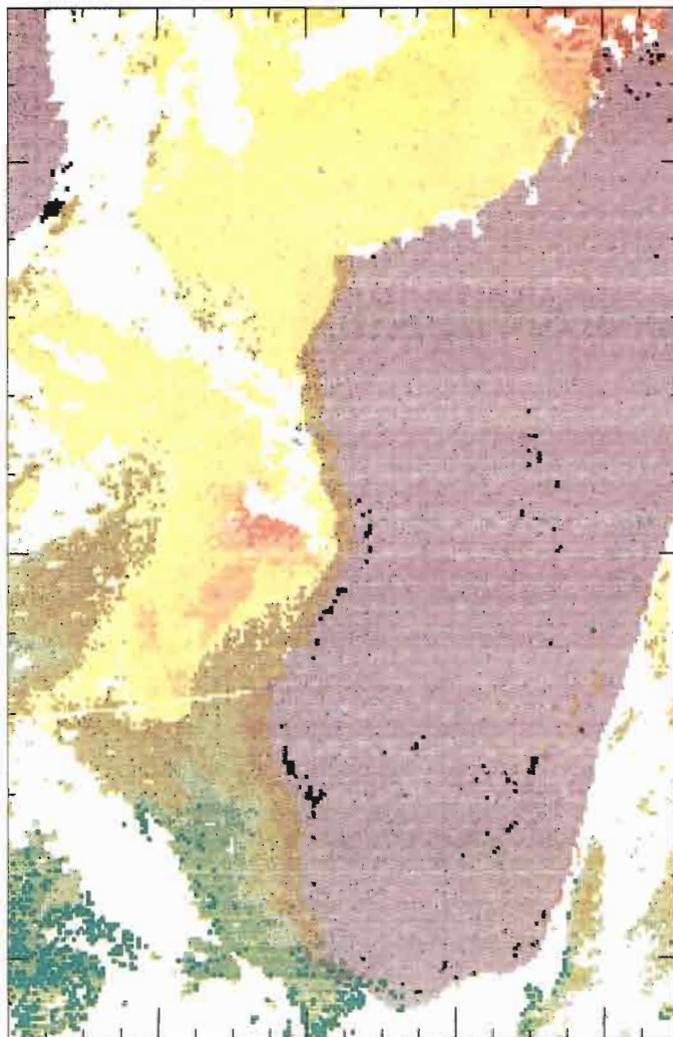
P10D : Carte de synthèse.

P10



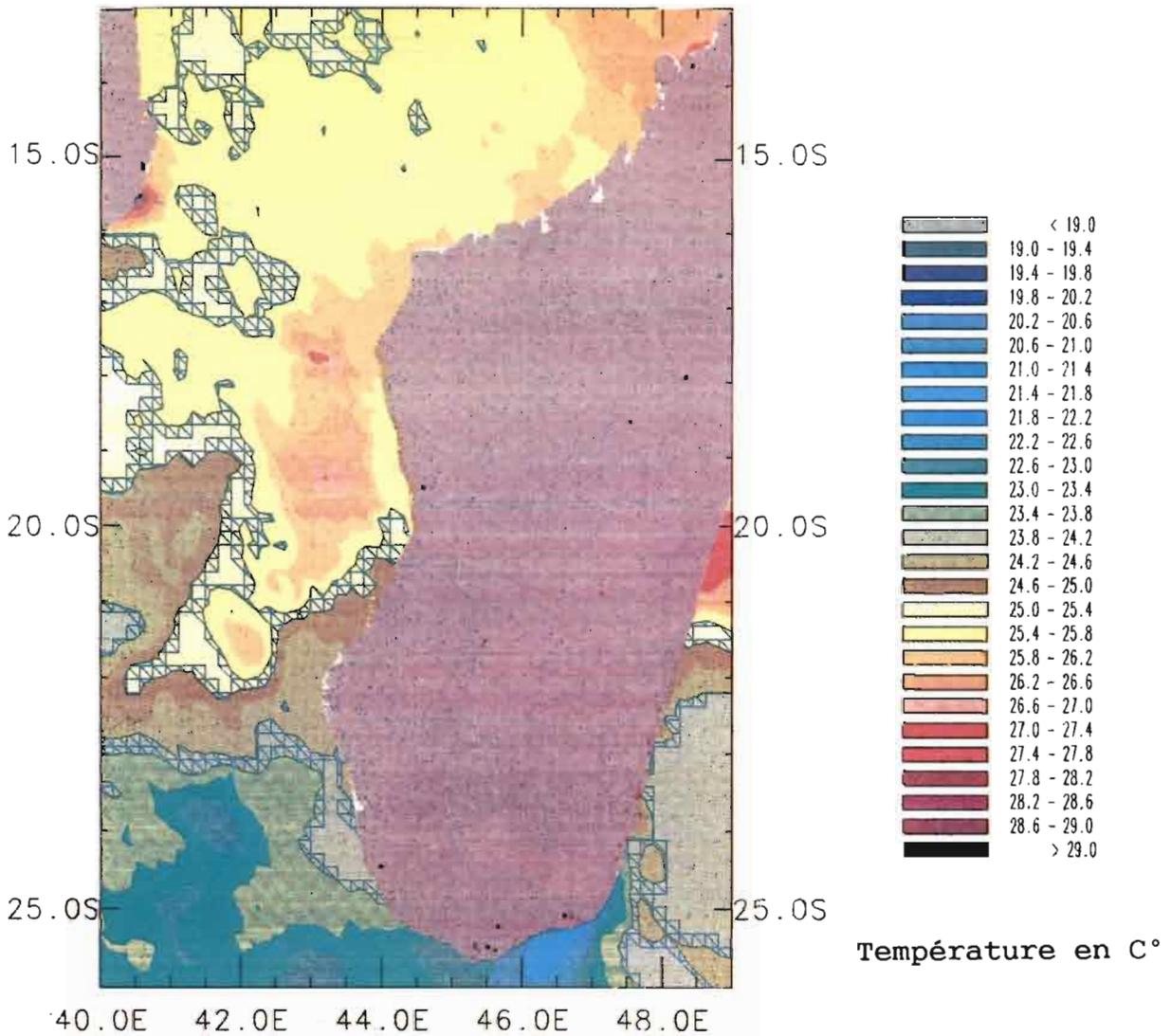
P10E : Le canal du Mozambique : image du 26 août 1990.

P10



P10F : Le canal du Mozambique : image du 28 août 1990.

P10



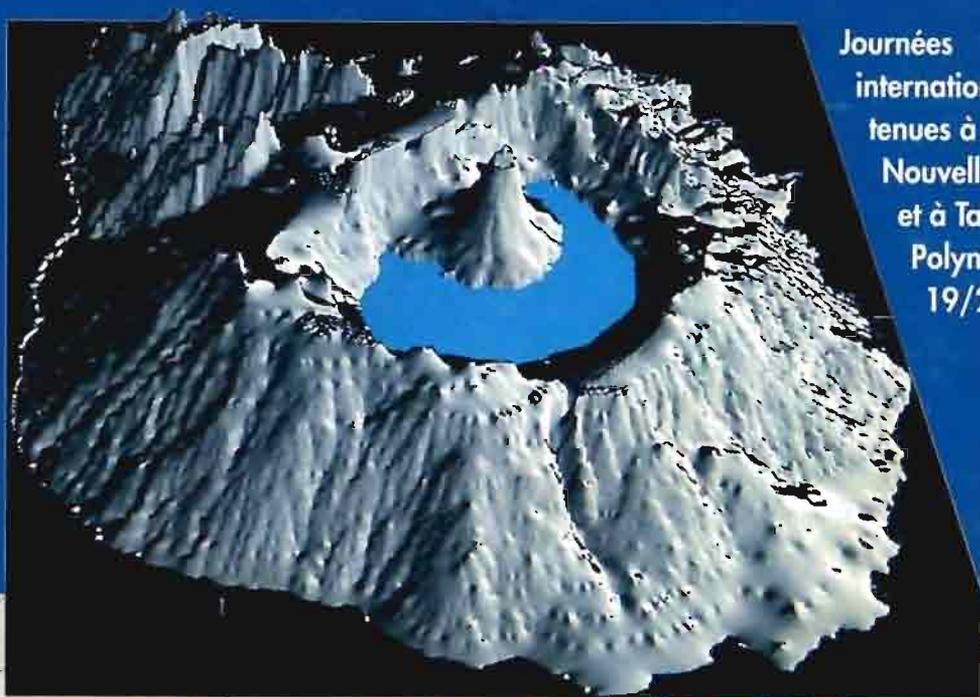
P10G : Le canal du Mozambique, carte de synthèse.

"PIX'ILES 90"

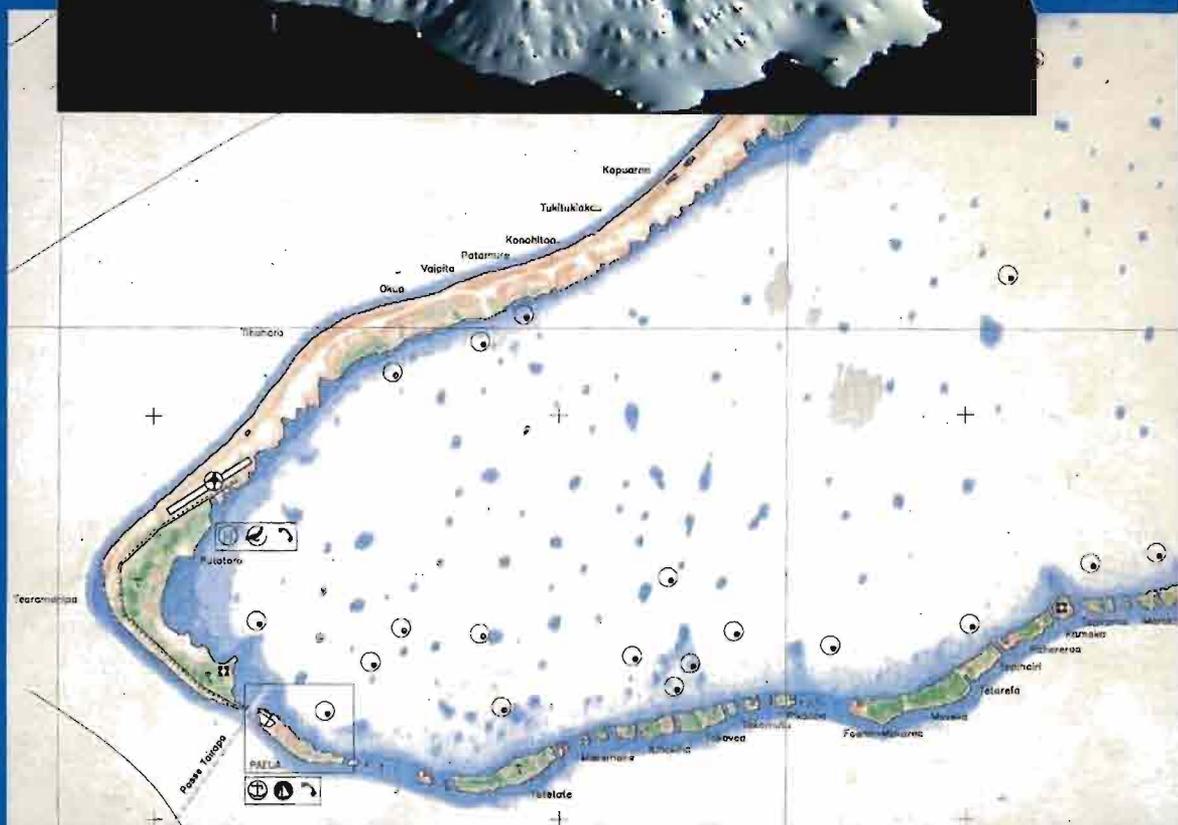
TELEDETECTION ET MILIEUX INSULAIRES DU PACIFIQUE : APPROCHES INTEGRES

REMOTE SENSING AND INSULAR ENVIRONMENTS IN THE PACIFIC :
INTEGRATED APPROACHES

International
workshop
held at Noumea
New Caledonia
and Tahiti
French Polynesia
Nov. 19/24 1990



Journées
internationales
tenues à Nouméa
Nouvelle-Calédonie
et à Tahiti
Polynésie Française
19/24 nov. 1990



ORSTOM



TERRITOIRE DE
POLYNÉSIE FRANÇAISE

"PIX'ILES 90"

**Journées internationales tenues à Nouméa - Nouvelle-Calédonie
et à Tahiti - Polynésie Française
19 / 24 novembre 1990**

**International workshop held at Noumea - New Caledonia
and Tahiti French - Polynesia
November 19 / 24 1990**



© ORSTOM, Nouméa, 1992

Imprimé par le Centre ORSTOM
de Nouméa
Septembre 1992

