

Halieutique, océanographie et télédétection



**BULLETIN DE L'INSTITUT
OCÉANOGRAPHIQUE
FONDATION ALBERT I^{er}, PRINCE DE MONACO**

Les études publiées dans le *Bulletin de l'Institut océanographique* sont analysées ou indexées dans :

The works published in the Bulletin de l'Institut océanographique are abstracted or indexed in :

Aquatic sciences & fisheries abstracts ;

Bibliographie géographique internationale ;

Biological abstracts ;

Marine science contents tables ;

Oceanic abstracts ;

Oceanographic literature review (Deep-sea research) ;

Referativnyi zhurnal ;

Zoological record.

*
**

Les commandes ainsi que les demandes de tarifs pour toutes les publications du Musée océanographique doivent être envoyées à l'adresse suivante :

The orders and any inquiries concerning the price-lists for all publications of the Oceanographic Museum should be sent to the following address :

**Musée océanographique (Service des publications)
Avenue Saint-Martin
MC 98000 MONACO**

*
**

Les publications envoyées en échange du *Bulletin de l'Institut océanographique* doivent être adressées à :

The publications sent in exchange for the Bulletin de l'Institut océanographique must be forwarded to :

**Musée océanographique (bibliothèque)
Avenue Saint-Martin
MC 98000 MONACO**

Halieutique, océanographie et télédétection

Contribution française aux colloques Franco-Japonais

Thème : Télédétection
3-13 octobre 1988, TOKYO et SHIMIZU (Japon)

éditeurs scientifiques

Michel PETIT et Jean-Michel STRETTA
Centre ORSTOM de Montpellier

MONACO
MUSEE OCEANOGRAPHIQUE
1990

Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco
n° spécial 6

Les éditeurs tiennent à remercier les personnes et les organismes qui, par leur aide et leur contribution, ont assuré le succès de ces Colloques franco-japonais et la réalisation de cet ouvrage :

- **Monsieur François Simard (Pensionnaire à la Maison franco-japonaise de Tokyo)**
- **Madame Marie-Christine Pascal (Secrétariat ORSTOM, Montpellier)**

- **SFJO (Société franco-japonaise d'océanographie)**
- **Maison franco-japonaise de Tokyo**
- **Université de Shimizu (Japon)**
- **Municipalité de Shimizu (Japon)**
- **Musée océanographique de Monaco**

Ils expriment également leur reconnaissance à tous ceux dont le dévouement et l'efficacité ont permis l'harmonieux déroulement de ces colloques et la publication de cet ouvrage.

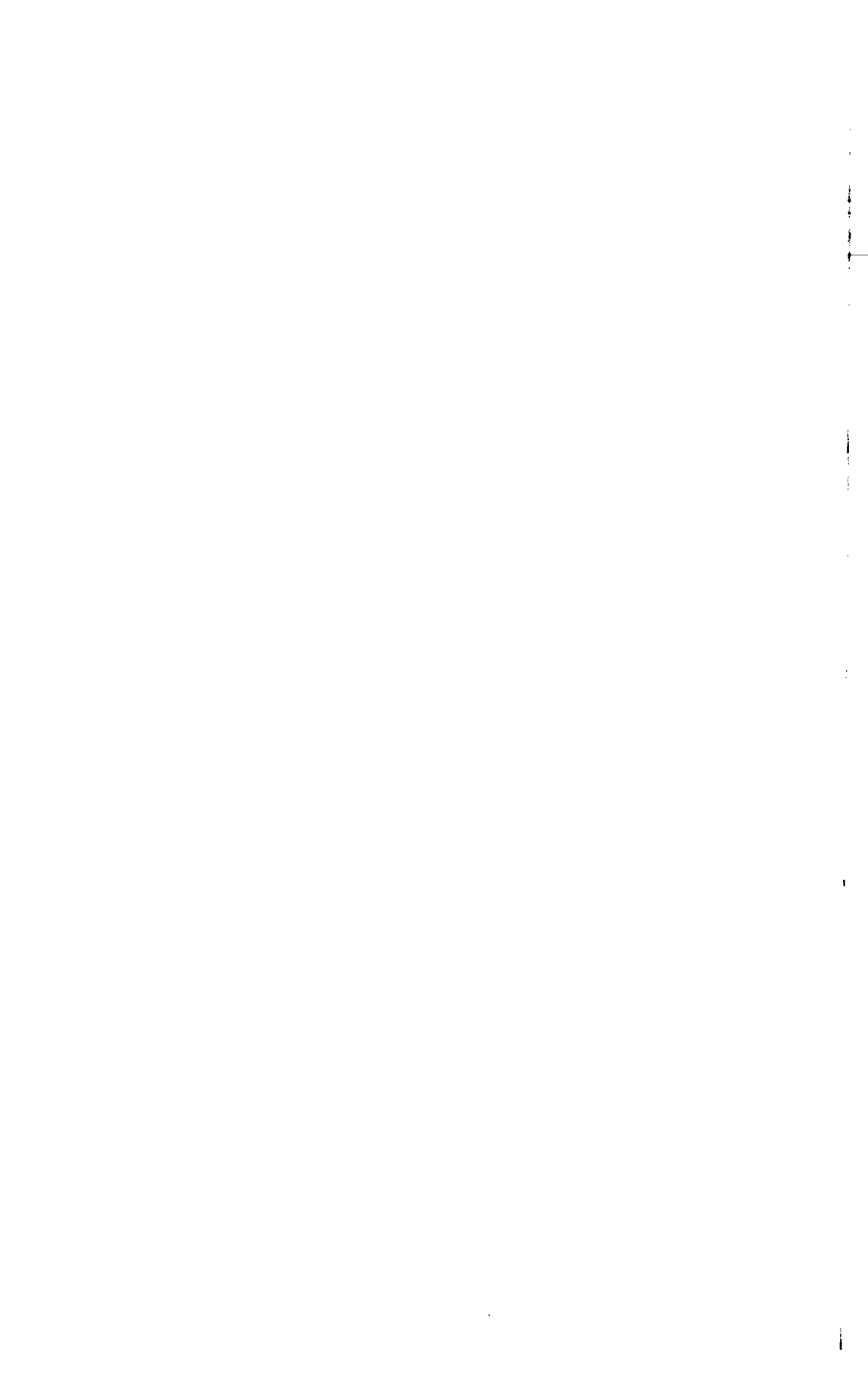
*
* *

Le V^{ème} Colloque Scientifique Franco-Japonais et le II^{ème} Colloque d'Océanographie ont eu lieu du 3 au 13 octobre 1988 à Tokyo et à Shimizu

ISBN 2-7260-0142-4

SOMMAIRE

	<i>Pages</i>
<i>Editorial</i> , par Michel Petit et Jean-Michel Stretta	5
Problématique générale	7
<i>La télédétection spatiale : un nouveau visage de l'océan</i> , par François Doumenge	9
<i>La composante télédétection dans le développement de l'océanographie opérationnelle des pêches</i> , par Michel Petit et Alain Wadsworth	27
Régions côtières	59
<i>Apport du satellite SPOT à la cartographie des végétaux marins</i> , par Thomas Belsher	61
<i>Cartographie par le satellite SPOT 1 de communautés benthiques littorales en Méditerranée occidentale</i> , par Gaston Fredj, Michel Meinardi, Serge Pierrot et Philippe Roy	71
<i>La haute résolution du satellite SPOT appliquée à l'inventaire et à l'évaluation des ressources récifales de la Nouvelle-Calédonie</i> , par William Bour	87
<i>Radiométrie de terrain pour le satellite SPOT sur un estuaire tropical</i> , par Jean Pagès, Bernard Mougenot et Jean Citeau	97
Zone hauturière	123
<i>La chlorophylle de surface observée par le satellite NIMBUS-7 dans une zone d'archipel (Nouvelle-Calédonie et Vanuatu). Une première analyse</i> , par Cécile Dupouy	125
<i>Restitution de la température de surface océanique en zone intertropicale à partir des données du satellite METEOSAT</i> , par Jean Citeau et Hervé Demarcq	149
<i>La télédétection infrarouge thermique peut-elle aider à la prévision des zones de pêche ? La réponse praxéologique</i> , par Jean-Michel Stretta	173
<i>Intégration de la télédétection aérospatiale dans la base de données d'un système expert dédié à la pêche thonière</i> , par Jean-Michel Stretta, Michel Petit et Monique Simier	199
<i>Index des auteurs cités</i>	209
<i>Index des sujets traités</i>	219



CONTENTS

	<i>Pages</i>
<i>Editorial, par Michel Petit et Jean-Michel Stretta</i>	5
General problematics	7
<i>Spatial remote sensing: a new aspect of the ocean, by François Doumenge</i>	9
<i>Remote sensing in the development of operational fisheries oceanography, by Michel Petit et Alain Wadsworth</i>	27
Coastal areas	59
<i>The contribution of the SPOT satellite to the cartography of marine vegetation, by Thomas Belsher</i>	61
<i>Cartography by the SPOT satellite of benthic littoral communities in the western Mediterranean Sea, by Gaston Fredj, Michel Meinardi, Serge Pierrot et Philippe Roy</i>	71
<i>The high resolution of the SPOT satellite applied to the inventory and assessment of reef resources in New Caledonia, by William Bour</i>	87
<i>Ground radiometry for the SPOT satellite over a tropical estuary, by Jean Pagès, Bernard Mougenot et Jean Citeau</i>	97
Open sea areas	123
<i>Surface chlorophyll observed by NIMBUS-7 satellite in an archipelago (New Caledonia and Vanuatu). A preliminary analysis, by Cécile Dupouy</i>	125
<i>Restitution of the sea surface temperature in an intertropical area based on METEOSAT data, by Jean Citeau et Hervé Demarcq</i>	149
<i>Is thermal infrared remote sensing useful for fishing area forecasting? The praxeological response, by Jean-Michel Stretta</i>	173
<i>Integration of aerospatial remote sensing into the data base associated with an expert system for tuna fishery, by Jean-Michel Stretta, Michel Petit et Monique Simier</i>	190
<i>Author index</i>	209
<i>Subject index</i>	219

Editorial

Parmi les grands domaines des applications classiques de la télédétection aérospatiale tels que les sciences agronomiques, la climatologie ou l'occupation des sols, l'halieutique est toujours restée relativement discrète, bien qu'elle ait été présente depuis la naissance de cette technique : les premières observations aériennes de thonidés ont été faites par des scientifiques avant... 1914 ! L'une des raisons principales de cette "discretion" est certainement la méconnaissance, liée à la complexité, ou plutôt complication, du système pêche, de la part des décideurs et techniciens. Cette méconnaissance a souvent abouti à une schématisation extrême de la problématique, particulièrement dans les années 70, schématisation où l'on souhaitait fortement, voire affirmait, que la mesure satellitaire correspondait directement à une capture...

Bien sûr, ces lacunes ont parfois transformé en leurre l'outil télédétection et en échec quelques programmes scientifiques, ou encore, avec des conséquences plus graves, elles ont engendré une certaine défiance vis-à-vis de l'outil de la part des professionnels ou des administrateurs de la pêche. Avec le recul des ans cependant, il s'avère qu'il ne s'agit que d'erreurs de jeunesse qui se retrouvent finalement dans d'autres domaines : par exemple, l'inadéquation bien connue en agriculture entre la possibilité d'avoir par télédétection une bonne prévision des rendements et celle d'exploiter cette donnée dans l'organisation professionnelle et administrative des marchés...

Erreurs de jeunesse, qui vont être oubliées rapidement, car, justement, l'halieutique opérationnelle est en train de naître sur des bases solides, des concepts scientifiques mêmes, des techniques de pointe dont la télédétection mais aussi l'intelligence artificielle.

Le contexte social, politique et économique est aussi en pleine évolution et dans la "nouvelle donne" il faut intégrer la responsabilisation des pays face à leurs zones économiques qui entraîne par exemple l'annulation du secret de la position de pêche, caractéristique jusqu'ici intouchable du système pêche.

Au cours des rencontres franco-japonaises d'octobre 1988, la Société franco-japonaise d'océanographie a choisi la télédétection comme thème de l'un de ses colloques et la plupart des textes de cet ouvrage ont été présentés dans ce colloque par les participants français. Ce choix nous a immédiatement enthousiasmés car il était l'occasion de

faire le point des connaissances. Ce colloque a démontré, comme d'autres qui ont suivi en 1989 : IGARSS *, ISOFO-CANADA ** que la télédétection aérospatiale se révélait être un outil de premier ordre dans l'optimisation de l'halieutique et que cette interface halieutique - télédétection était arrivée à maturité et prête à intégrer la masse de données, voire de concepts nouveaux, que vont générer les tout prochains programmes tels que TOPEX POSEIDON, ERS1 ou ADEOS.

Nous ne terminerons pas sans remercier de façon bien plus sincère que formelle, le docteur S. SUGIHARA et le professeur F. DOUMENGE co-présidents du colloque ainsi que les auteurs qui nous ont fait confiance pour cette édition, le Musée océanographique de Monaco qui en a assuré l'entière réalisation matérielle, la Société franco-japonaise d'océanographie sans le dynamisme de laquelle rien n'aurait pu être fait et les arbitres dont l'objectivité scientifique, conformément à ce que nous leur avons demandé, a permis de sélectionner des textes originaux à partir d'exposés oraux.

Michel PETIT

Jean-Michel STRETTA

* International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

** International Symposium on Operational Fisheries Oceanography.

PROBLEMATIQUE GENERALE

Cet ouvrage se doit de décrire les étapes de la télédétection en océanographie avant d'aborder les problèmes qui se posent au monde de la pêche et à son évolution.

Pour cerner cette problématique, le professeur F. DOUMENGE brosse un bref historique de la télédétection en océanographie. L'article de M. PEIT et A. WADSWORTH présente la télédétection dans le développement de l'océanographie opérationnelle des pêches. Cet article va introduire le concept de l'halieutique opérationnelle.

La télédétection spatiale : un nouveau visage de l'océan

par

FRANÇOIS DOUMENGE

*Musée océanographique de Monaco
MC 98000 Monaco*

Les travaux composant le présent ouvrage doivent se situer dans le contexte d'une recherche mal assurée car trop récente et encore peu pourvue d'outils éprouvés et performants.

Quand le premier satellite Spoutnik est mis sur orbite (4 octobre 1957), nul ne songe à l'utiliser comme plate-forme d'observation de l'océan !

Les photographies aériennes en blanc et noir sont certes pratiquées depuis plusieurs décennies pour obtenir une vision stéréoscopique de la surface terrestre et mettre en évidence des phénomènes peu ou pas perçus par un observateur au sol mais elles ne donnent des résultats probants que dans des conditions qui restreignent leur usage aux seules régions continentales et de préférence montagnardes, désertiques, méditerranéennes ou subtropicales.

Après la seconde guerre mondiale, les fusées fournissent des vecteurs atteignant des altitudes jusque-là inaccessibles. Les progrès de l'optique et des films couleurs permettent des prises de vues totalement nouvelles grâce aux V2 puis aux premières fusées Viking et Atlas (1944-1956).

Ce n'est qu'au début des années 1960 que des moyens d'observation nouveaux enregistrent des phénomènes par photographie spectrale ou

par image radar. Les missions des fusées Mercury et surtout les premiers satellites météorologiques TIROS, dont 8 seront lancés entre le 1er avril 1960 et le 21 décembre 1963, apportent alors une quantité considérable de données qui suscitent de multiples interrogations quant à leur fiabilité et aux différentes possibilités d'interprétation.

Pour la première fois, on peut appréhender la réalité et l'évolution de phénomènes océaniques de surface à moyenne échelle. L'imagerie satellitaire en fournit non seulement une vision globale mais surtout elle permet d'en suivre les modifications grâce à la répétitivité des vues. Cependant la saisie directe des caractéristiques de la dynamique de la surface des océans paraît encore incertaine. Aucun capteur spécifique des paramètres océaniques n'ayant été mis au point, quelques observations seront acquises par deux expériences avec TIROS 2, 4 et 8.

Pour répondre à ces interrogations quant à la fiabilité des données et pour faire le point en confrontant leurs méthodes d'analyses et leurs interprétations, 145 scientifiques des U.S.A., mais aussi du Canada et du Mexique, dont les laboratoires travaillent sur des données satellitaires pour la mise au point de traitement et pour l'exploitation de leurs résultats, se réunissent à Woods Hole pour tenir un symposium, du 24 au 28 août 1964, au moment où s'effectue le lancement de NIMBUS-1.

L'édition des travaux de ce symposium [EWING, 1965] témoigne déjà de la variété des approches et des capacités d'extraire des données fiables à partir de prises de vues qui au départ n'avaient pas une finalité océanologique. Mais aussi l'éditeur souligne les grandes réticences qui subsistent quant aux possibilités d'obtenir par des satellites autre chose que des relais. C'est ainsi que page VIII on peut lire : *"It was widely agreed by several panels that a most important use of satellites in oceanography would be in gathering and retransmitting information telemetered by various sensors located on the surface."*

De 1964 (NIMBUS-1) à 1970 (NOAA 1), 21 satellites seront mis en service dont 10 consacrés exclusivement à la recherche.

Grâce aux progrès des équipements d'observation, en particulier dans la série NIMBUS des satellites météorologiques, on peut obtenir des données procurant une meilleure assurance qui s'exprime au cours des symposiums tenus à l'Université du Texas en 1969 [BADGLEY *et al.*, 1969] et en 1971 [Texas A & M University].

Une première bibliographie publiée en 1970 [SINHA, 1970] réunit 428 publications et cite 470 auteurs.

Ce sont les observations des températures de surface par TIROS M (ITOS 1) lancé le 23 janvier 1970 qui vont révéler des configurations en méandres, tourbillons et panaches jusque-là insoupçonnées à la surface des océans ; bien que la précision des enregistrements ne soit que de 2°, les gradients observables conduisent à des interprétations nouvelles de la dynamique superficielle.

Par ailleurs, bien vite il apparaît que l'on peut tirer des enseignements multiples des images obtenues dans les régions littorales par LANDSAT 1 qui, lancé le 9 juillet 1972, fonctionne à jusqu'au 6 janvier 1978 avec le relais de LANDSAT 2 lancé le 22 janvier 1975 et LANDSAT 3 lancé le 5 mars 1978. Bien qu'il s'agisse de capteurs à

vocation terrestre (quatre bandes du vert au proche infrarouge), la morphologie et l'hydrologie littorales y trouveront des possibilités de discrimination particulièrement utiles pour les littoraux à marée [VERGER, 1977 ; GIERLOFF-EMDEM, 1977 ; REGRAIN, 1980] et pour les constructions récifales coralliennes [SMITH *et al.*, 1975 ; BINA *et al.*, 1978].

Des chercheurs inventifs ne pouvant disposer d'autres moyens d'observation facilement accessibles s'efforceront d'extraire des images LANDSAT des données océanologiques [HAMMACK, 1977] en particulier pour établir des cartes bathymétriques [LYONS, 1977] et hydrographiques [WARNE, 1978].

Mais, pour l'hydrologie océanique, le problème essentiel réside dans la précision des mesures permettant la cartographie dynamique de la surface de l'eau. L'altimètre de SKYLAB en service en 1973 n'apportait qu'une approximation grossière à plus ou moins 1 m. La précision indispensable aux interprétations des phénomènes apparaissant dans la topographie de surface avait été définie théoriquement dès 1971 par les spécialistes de la NASA, de la NOAA et de l'US Navy [APEL, 1972] et fixée à seulement quelques dizaines de centimètres.

C'est GEOS 3 lancé le 9 avril 1975 qui franchissait cette étape décisive. Cependant, de 1970 à 1977, sur 13 satellites lancés, seul celui-ci avait pour but l'enregistrement des phénomènes océaniques, tous les autres étant orientés vers la météorologie ou les continents.

Toutefois, par des biais divers, ces données permettaient d'enregistrer et d'étudier des phénomènes océaniques. Les relevés bibliographiques de BROWN [1977 ; 1978] mentionnaient, pour les propriétés physiques, chimiques ou géologiques des océans, 173 publications pour la période 1970-1975 et, pour la dynamique océanique, 114 publications de 1970 à juin 1977. Les satellites d'observation de la terre se révélaient être des instruments utilisables en océnologie [Centre national pour l'exploitation des océans, 1978].

Les colloques allaient alors se multiplier confrontant les méthodes et analysant les premiers résultats : gestion des ressources vivantes [Association européenne océanique, 1977 ; MONGET, 1979], navigation et géodynamique [European Space Agency, 1978], contrôle des pollutions [MASSIN, 1978 ; THOMSON *et al.*, 1980 ; VOLLMERS & MASSIN, 1981].

Il convient de remarquer qu'il s'est ainsi écoulé 13 ans depuis la première réunion tenue à Woods Hole et, pendant cette longue période, autant la télédétection des surfaces continentales a progressé en s'affirmant comme un élément essentiel de la connaissance des phénomènes physiques, humains et économiques, autant celle des surfaces des océans et des mers a paru à la traîne par manque d'outils appropriés.

L'accélération décisive va alors intervenir et elle sera réellement foudroyante grâce à la concentration sur un an de lancements d'une variété encore jamais égalée de satellites de tous ordres dont trois (SEASAT, NIMBUS-7 et TIROS-N) seront essentiellement consacrés à l'océanographie.

Mise en service des satellites de novembre 1977 à octobre 1978

Satellite	Lancement	Utilisation dominante	Observations
METEOSAT 1	22/11/77	Météorologie	
LANDSAT 3	05/03/78	Données terrestres	
HCMM	26/04/78	Données terrestres	
GOES	16/06/78	Météorologie	
SEASAT	27/06/78	Océanographie	arrêt 10/10/78
TIROS-N	13/10/78	Océano-Météo.	observations polaires
NIMBUS-7	24/10/78	Océano-Météo.	couleur de l'océan

Ce sont les progrès des techniques optiques [DUNTLEY, 1980 ; SLATER, 1980 ; GORDON, 1980 ; BEAL *et al.*, 1981] et acoustiques [SCHULKIN, 1980 ; MATHEWS & HICKS, 1982] et la mise au point des capteurs des radiations de la surface des océans [National Center for Atmospheric Research, 1981] qui permettent de doter les satellites d'instruments d'observation apportant des mesures fiables.

Malgré la fin prématurée de l'instrument exceptionnel fourni par SEASAT qui s'arrêtera de fonctionner le 10 octobre 1978, la communauté océanographique internationale dispose désormais d'une très grande variété de données autorisant des approches dans une multitude de secteurs grâce à une trilogie assurant un recouvrement presque total de tous les aspects de la surface océanique [SALTZMAN, 1985].

Il s'ensuit dès lors une multitude de réunions thématiques spécialisées en Europe et aux Etats-Unis [SØRENSEN, 1979 ; DEEPAK, 1980 ; CRACKNELL, 1980 ; ZAITZEFF *et al.*, 1980] et l'océanographie spatiale prend rang en tant que discipline technique dans les réunions thématiques [DUNTLEY, 1980] ou les traités spécialisés [ALLAN, 1983].

Pour une première exploitation des données SEASAT, sept réunions spécialisées se tiendront entre janvier 1979 et mars 1980 et deux publications volumineuses rendront compte rapidement des premières observations [BERNSTEIN, 1982 et KIRWAN *et al.*, 1983].

Dans cette conjoncture, 217 chercheurs venus de 20 pays se retrouvent à Venise en mai 1980 et l'éditeur des travaux [GOWER, 1981] note avec juste raison que, depuis la réunion de Woods Hole, seize ans se sont écoulés avant que l'on puisse disposer des méthodologies fiables de recueil et de traitement des données concernant les paramètres de la surface des océans.

Le début des années 1980 est ainsi marqué par un approfondissement théorique et une systématisation permettant désormais de diffuser les connaissances à travers un enseignement spécialisé dont l'édition des cours sert de support à une large information scientifique [CRACKNELL, 1981 et 1983 ; Centre national d'études spatiales, 1984].

Les publications se multiplient et les bibliographies enflent : pour les relations océans-atmosphère, WITTE [1984] propose 630 références (460 par 360 auteurs et 170 par les 14 auteurs les plus féconds sinon les plus spécialisés ayant plus de 8 citations chacun), tandis que les réunions se succèdent [European Space Agency, 1981 ; HOUGHTON *et al.*, 1983 ; BROWN *et al.*, 1984 ; GAUTIER & FIEUX, 1984 ; NIHOUL, 1984 ; BALLESTER, 1986].

Les observations satellitaires reprennent leur progression avec les connaissances obtenues à partir de la mi-1982 grâce à LANDSAT 4 disposant du scanner "Thematic Mapper". La dynamique littorale peut être analysée avec une grande précision (CUQ [1983] pour la Saintonge), la cartographie des récifs coralliens est renouvelée [PIRAZZOLI, 1982, 1984 et 1985], les phénomènes liés aux apports des grandes embouchures fluviales peuvent être localisés et décrits malgré leur grande complexité (CASSANET [1981] pour la Loire, DEMARCQ [1985] pour le Rhône).

Les pollutions désormais mieux détectables et situées avec précision peuvent faire l'objet d'interventions plus rapides et d'un contrôle plus efficace [MASSIN, 1984 ; TSAI, 1984 ; GILLOT & TOSELLI, 1985].

Mais surtout on peut cartographier et décrire un grand nombre de phénomènes hydrologiques mal connus ou même ignorés jusque-là : les températures de surface apportent des indications précises [Association européenne de laboratoires de télédétection, 1985 ; FROUIN, 1981]. Des descriptions nouvelles sont apportées aussi bien pour la Méditerranée [CHAMPAGNE-PHILIPPE & HARANG, 1982 ; NACINI 1985] que pour l'Antarctique [DANIAULT, 1984].

Il apparaît que certains domaines doivent être développés, en particulier les indications fournies par la couleur de la mer [GORDON & MOREL, 1983 ; DUPOUY, 1982 ; SHANNON, 1985] et les phénomènes d'interface et de limite des océans et de la troposphère [National Aeronautics and Space Administration, 1984 ; PHULPIN & LE BORGNE, 1984] ; désormais on fait appel aux observations satellitaires de l'océan pour de multiples usages [Marine Technology Society, 1986].

Des traités introduisent l'océanographie satellitaire comme une discipline classique de l'océanologie [ROBINSON, 1985 ; STEWART, 1985 ; MAUL, 1985 ; SALTZMAN, 1985] et l'on voit se multiplier les sources [BARTON *et al.*, 1986].

Cette période de définition classique n'aura finalement demandé que cinq ou six ans soit beaucoup moins longtemps que la phase préalable de montée en puissance.

L'épanouissement qui suivra à partir de 1985 orientera les réflexions et les recherches suivant deux grands axes :

- *la théorie, avec*
la définition des performances recherchées pour l'instrumentation des prochains vecteurs, à savoir ERS-2 et TOPEX POSEIDON prévus pour 1991,
la recherche de modèles et de systèmes permettant de valoriser les données [GOWER & APEL, 1986],
l'affinement de l'étude des vagues [TOBA & MITSUYASU, 1985 ; BEAL, 1987],
l'amélioration des capteurs optiques [BLIZARD, 1984 et 1986],
l'utilisation de l'acoustique [WEILL, 1986] et de la couleur [GUYENNE, 1987 ; GOWER, 1987 ; CHESSELET, 1987].
Cette réflexion est conduite dans la perspective de programmes s'étendant de 1985 à 1995 [Joint Oceanographic Institutions, 1984 ; GOWER & APEL, 1986].

- *la pratique, avec*
la recherche de toutes les corrélations susceptibles d'apporter des applications pratiques en intégrant l'ensemble des données en particulier dans l'aménagement du littoral [CLAASEN, 1986 ; COURBOULES, 1989] et surtout dans les pêches et la gestion des stocks [AMIDEI, 1985 ; MARSAC *et al.*, 1987 ; LE GALL, 1989],
l'utilisation de séries d'observations sur une longue durée (plusieurs mois ou plusieurs années) des AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) enregistrant les rayonnements infrarouges (NOAA 6 puis 8 et 10, depuis juin 1979, travaillant sur quatre canaux et NOAA 7 puis 9, depuis juin 1981, disposant d'un cinquième canal par dédoublement du quatrième),
(La superposition de très nombreuses images permet de faire ressortir les variations temporelles des structures à moyenne échelle moyennant des corrections dues aux déviations provoquées par les nuages et les divers aérosols [ZION, 1989]).

Ainsi, la dynamique océanographique et la productivité biologique de quelques grands écosystèmes ont pu être analysées et cartographiées (Gulf Stream, courant de California, Oyashio-Kuroshio) et quelques régions sensibles ont pu être mieux appréhendées (plume de l'Amazone, Galapagos).

Dans cette phase de réflexion méthodologique et d'ouverture de nouveaux champs d'utilisation, une relance de l'océanographie satellitaire se produit grâce aux observations de GEOSAT mis sur orbite en mars 1985. Après 18 mois de mission couverte en majeure partie par le secret militaire, mais dont on pourra cependant tirer de nombreux enseignements, GEOSAT est mis à la disposition de la recherche scientifique le 8 novembre 1986. Ce satellite accomplira 62 révolutions de 17 jours avant d'être hors service à partir d'octobre 1989. Le traitement d'un nombre impressionnant de données (on dispose en particulier de 100 millions de relevés altimétriques) entraîne un renouveau de la recherche théorique. L'océanographie satellitaire est mieux en mesure de répondre aux exigences des modélisateurs [NEREM *et al.*, 1990 ; GEOSAT, 1990]. Les phénomènes dynamiques de la zone intertropicale

ont pu être ainsi suivis en particulier pendant l'oscillation El Niño de 1986-1987 [CHENEY & MILLER, 1988 ; MILLER *et al.*, 1988 ; CHENEY *et al.*, 1989].

Parallèlement, les progrès de la mise au point du Thematic Mapper de LANDSAT 5 permettaient de lancer en juillet 1985 31 expériences d'une durée de trois ans. Bien que l'étude des milieux strictement terrestres ait conservé une nette prépondérance (12 expériences dans le domaine géologique et 7 pour sols et végétations), il est symptomatique de voir que l'eau continentale et le milieu littoral intéressent 12 opérations, ce qui montre une tendance persistante à la valorisation des marges. La publication des résultats [LANDSAT Thematic Mapper, 1989] interviendra en période de crise aiguë provoquée par le passage de LANDSAT du service public scientifique gratuit à l'exploitation commerciale. On doit constater que les acquis propres à LANDSAT dans le domaine aquatique restent limités à la sédimentologie et à la courantologie lagunaire, deltaïque et littorale. On doit admettre qu'il reste encore bien des lacunes et des incertitudes dans de nombreux domaines aussi sensibles pour le développement que l'analyse des images des formations coralliennes [KUCHLER *et al.*, 1988] ou l'enregistrement des phénomènes hydrologiques de moyenne échelle [TOURNADRE, 1990].

La rencontre franco-japonaise qui s'est tenue en octobre 1988 à Shimizu (Japon) concernant les travaux relatifs à la télédétection marine, se situe donc dans une conjoncture hautement évolutive où l'on se pose encore de nombreuses questions quant aux meilleures voies permettant la valorisation des observations de la télédétection océanique.

En France, les actions thématiques programmées du CNRS bénéficiant de l'appui du CNES dans les perspectives des simulations SPOT puis des utilisations des images du nouveau satellite ont soutenu une recherche active en particulier sur le domaine littoral et ont servi de cadre aux réflexions méthodologiques [CHESSELET, 1987]. L'IFREMER poursuivant les actions du CNEXO s'est aussi impliqué dans des actions menées aussi bien sur les côtes européennes de la France que dans certains secteurs du Pacifique Sud [LOUBERSAC *et al.*, 1988]. Surtout l'ORSTOM s'efforçant d'intégrer la télédétection océanique à ses programmes appliqués à la gestion des pêches tropicales a mené un effort de longue haleine pour les pêches thonières tropicales tant dans le golfe de Guinée [CITEAU *et al.*, 1984] qu'en océan Indien et dans le Pacifique Sud [LE GALL, 1989]. La "Veille climatique satellitaire", publiée régulièrement depuis mai 1984 à Lannion par les chercheurs de l'ORSTOM et de la Météorologie nationale, apporte une vision synoptique des situations de l'océan et de l'atmosphère en Afrique de l'Ouest.

L'arrivée des images SPOT depuis 1987 n'a pas vraiment satisfait les demandes de l'océanologie bien que l'on ait pu en extraire des données fort originales grâce aux vues latérales de la surface de l'océan. L'essor ne pourra véritablement reprendre qu'avec la mise en service des satellites ERS-1 fournissant des images radar et TOPEX POSEIDON améliorant la finesse de la perception des signaux de la surface de

l'océan. Ceci permettra peut-être de résoudre des problèmes en suspens : poursuites d'observations sous champ de nuages, discrimination des signaux dans les bruits de fond, enregistrement fin des gammes de couleurs, etc.

Du côté japonais, l'intérêt du suivi des conditions hydrologiques des grands champs de pêche a suscité dès 1978 la formation d'une société pour les études de l'utilisation des vecteurs aériens et satellites pour l'océanographie physique et les pêches, forte de plus de 500 membres et publiant une revue "SORA to UMI" (l'Espace et la Mer). Les données satellitaires s'ajoutant à l'effort déjà ancien de la valorisation scientifique des données transmises par les bateaux en pêche ont amélioré le réseau d'appui aux pêches pélagiques dans le Pacifique Nord et d'un suivi dans le Pacifique intertropical [YAMANAKA *et al.*, 1988]. Mais le manque d'un vecteur national jusqu'au lancement de MOS 1 en 1988 a freiné les recherches théoriques.

Aussi bien du côté français que japonais, les temps sont venus de mettre en oeuvre une politique plus cohérente afin d'intégrer les acquis des données satellitaires dans la connaissance de l'océan mondial et dans la gestion de ses ressources.

L'apport des chercheurs français paraît susceptible de servir utilement à une meilleure estimation des possibilités, mais aussi des limites, des systèmes actuels. C'est le premier objectif retenu dans cette publication qui a aussi pour but de susciter des prises de conscience chez les décideurs et les utilisateurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

N.B. - Les références ci-dessous citées dans le texte ne sauraient constituer à elles seules une bibliographie. Il s'agit d'une sélection de titres et travaux qui ont paru les plus caractéristiques et qui sont accessibles aux lecteurs français (en particulier à la Bibliothèque du Musée océanographique de Monaco où ils peuvent tous être consultés). Les contributions d'auteurs dans les ouvrages collectifs n'ont pu faire l'objet de mention propre afin de ne pas trop alourdir le texte.

ALLAN (T.D.), ed., 1983. - *Satellite microwave remote sensing*. - Chichester : Ellis Horwood. - 526 p. - (Ellis Horwood series in marine science).

AMIDEI (R.), ed., 1985. - *Applications of remote sensing to fisheries and coastal resources : report of a California Sea Grant workshop, November 30, 1983, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego*. - La Jolla : California Sea Grant College Program. - 64 p. - (Report No. T-CSGCP-012).

APEL (J.R.), ed., 1972. - *Sea surface topography from space. Proceedings of a conference sponsored jointly by the National*

Oceanic and Atmospheric Administration, the National Aeronautics and Space Administration, and the United States Navy, Key Biscayne, Florida, October 6-8, 1971. *NOAA technical report ERL 228-AOML*, 7, 2 vol., pagination multiple.

Association européenne de laboratoires de télédétection, 1985. - *EARSeL workshop on sea surface temperature satellite measurements, CTAMN, Ecole nationale supérieure des mines, Valbonne, France, 9-12 October 1984*. - Paris : EARSeL. - III-137 p.

Association européenne océanique, 1977. - *Aerial/spatial remote sensing and marine living resources, present and future possibilities. Proceedings of the information/brainstorming session jointly organized by Association européenne océanique-Eurocéan and Centre national pour l'exploitation des océans-CNEXO; Centre océanologique de Bretagne, Brest, France, 14-17 March 1977*. - Monaco : Association européenne océanique. - II-396 p.

BADGLEY (P.C.), MILOY (L.) & CHILDS (L.), ed., 1969. - *Oceans from space. Proceedings of a symposium on the status of knowledge, critical research needs, and potential research facilities relating to the study of the oceans from space, Houston, Texas*. - Houston : Gulf publishing co. - IX-234 p.

BALLESTER (A.), ed., 1986. - *Seminario sensores remotos '84, Barcelona, junio-octubre 1984*. - Barcelona : Instituto de investigaciones pesqueras, Consejo superior de investigaciones científicas. - 63 p.

BARTON (G.), ROBERTS (B.), RICCIO (E.) & STACKPOLE (L.), 1986. - Satellite remote sensing of the marine environment : literature and data sources. *National environmental data referral service publication NEDRES*, 5, pagination multiple.

BEAL (R.C.), ed., 1987. - Proceedings of the symposium, Measuring ocean waves from space, held at the Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, April 15-17, 1986. *Johns Hopkins APL technical digest*, 8, 1, pp. 3-161.

BEAL (R.C.), DeLEONIBUS (P.S.) & KATZ (I), ed., 1981. - Spaceborn synthetic aperture radar for oceanography. *Johns Hopkins oceanographic studies*, 7, 215 p.

BERNSTEIN (R.L.), ed., 1982. - SEASAT I. *Journal of geophysical research*, 87, C5, pp. 3171-3438.

BINA (R.T.), CARPENTER (K.), ZACHER (W.), JARA (R.) & LIM (J.B.), 1978. - Coral reef mapping using LANDSAT data: follow-up studies, in : *Proceedings of the Twelfth international symposium*

on remote sensing of environment, 20-26 April 1978, 3, pp. 2051-2070. - Ann Arbor : Center for Remote Sensing Information and Analysis, Environmental Research Institute of Michigan.

BLIZARD (M.A.), ed., 1984. - Ocean optics VII, June 25-28, 1984, Monterey, California. *Proceedings of SPIE*, 489, VI-413 p.

BLIZARD (M.A.), ed., 1986. - Ocean optics VIII, 31 March-2 April 1986, Orlando, Florida. *Proceedings of SPIE*, 637, VI-373 p.

BROWN (E.H.), FIOCCO (G.) & MASTRANTONIO (G.), ed., 1984. - *Proceedings Second international symposium on acoustic remote sensing of the atmosphere and oceans, Istituto di fisica dell'atmosfera, Consiglio nazionale delle ricerche, Rome, Italy, August 29-1 September 1983*. - Rome : C.N.R. - pagination multiple.

BROWN (R.J.), ed., 1977. - *Remote sensing of the ocean. Part 2. Dynamics, a bibliography with abstracts, search period covered 1970-June 1977*. - Springfield : National Technical Information Service. - IV-114 p. - (NTIS/PS-77-0533).

BROWN (R.J.), ed., 1978. - *Remote sensing of the ocean. Part 1. Physical, chemical, and geological properties, a bibliography with abstracts, 1 : search period covered 1970-1975; 2 : search period covered 1976-May 1978*. - Springfield : National Technical Information Service. - V-198 p. + III-96 p. - (NTIS/PS-78/0562 ; NTIS/PS-78/0563).

CASSANET (J.), 1981. - *Etude par télédétection des températures et turbidités des eaux au large de la Loire Atlantique*. - Montrouge : Ecole normale supérieure. - II-200 p. - (Collection de l'Ecole normale supérieure de jeunes filles ; 21).

Centre national d'études spatiales, 1984. - *L'océanologie spatiale = Space oceanology, 1982*. - Toulouse : CEPADUES éditions. - 888 p.

Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), 1978. - *Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la terre, journées nationales d'études, Brest France, 6-8 février 1978. Publications du Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), Actes de colloques*, 5, 422 p.

CHAMPAGNE-PHILIPPE (M.) & HARANG (L.), 1982. - *Fronts superficiels en Méditerranée d'après les télé-mesures AVHRR, avril 1979-mars 1981. Note de travail de l'Etablissement d'études et de recherches météorologiques* 31, 172 p.

CHENEY (R.E.), DOUGLAS (B.C.) & MILLER (L.), 1989. - *Evaluation of Geosat altimeter data with application to tropical*

Pacific sea level variability. *Journal of geophysical research*, **94**, C4, pp. 4737-4747.

CHENEY (R.E.) & MILLER (L.), 1988. - Mapping the 1986-1987 El Niño with GEOSAT altimeter data. *Eos, transactions - American geophysical union*, **69**, 31 pp. 754-755.

CHESELET (R.), ed., 1987. - Océanographie spatiale, actes du colloque de l'action thématique programmée (ATP) "Télédétection spatiale", Brest, 19-20 nov. 1985. *Oceanologica acta*, vol. spécial **7**, 97 p.

CITEAU (J.), GUILLOT (B.) & LAE (R.), 1984. - Opération Listao : reconnaissance de l'environnement physique en Atlantique intertropicale à l'aide des satellites METEOSAT et GOES-E. *Initiation - documentations techniques, ORSTOM*, **63**, 28 p.

CLAASEN (D. Van R.), ed., 1986. - The application of digital remote sensing techniques in coral reef, oceanographic and estuarine studies. Report on a regional Unesco/COMAR/GBRMPA workshop, Townsville, Australia, August 1985. *Unesco reports in marine science*, **42**, III-151 p.

COURBOULES (J.), 1989. - Contribution de la télédétection à haute et très haute résolution spatiale à la perception des ressources naturelles renouvelables : exemples d'applications aux zones littorales tropicales de mer Rouge (données TM de LANDSAT 4, HRV de SPOT 1 et photographies aériennes numérisées). *Thèse Sciences de la vie, Nice*, 234 p.

CRACKNELL (A.P.), ed., 1980. - *Coastal and marine applications of remote sensing. Proceedings of the Sixth annual conference of the Remote Sensing Society, 18th-19th December, 1979, University of Dundee*. - Reading : Remote Sensing Society. - 119 p.

CRACKNELL (A.P.), ed., 1981. - *Remote sensing in meteorology, oceanography and hydrology*. - Chichester : Ellis Horwood. - 542 p. - (Ellis Horwood series in environmental science).

CRACKNELL (A.P.), ed., 1983. - *Remote sensing applications in marine science and technology*. - Dordrecht : D. Reidel. - XII-466 p. - (NATO ASI series ; series C, 106).

CUQ (F.), 1983. - *Télédétection du littoral saintongeais. Méthodes de traitements et interprétation d'images satellitaires*. - Montrouge : Ecole normale supérieure. - 192 p. - (Collection de l'Ecole normale supérieure de jeunes filles ; 23).

DANIAULT (N.), 1984. - Apport des techniques spatiales à la connaissance des courants de surface. Application à l'océan

- Antarctique. *Thèse docteur-ingénieur, Océanographie physique, Brest, (B) 17, 69-47 p.*
- DEEPAK (A.), ed., 1980. - *Remote sensing of atmospheres and oceans. Proceedings of the Interactive workshop on interpretation of remotely sensed data held in Williamsburg, Virginia, May 23-25, 1979.* - New York : Academic press. - XIV-641 p.
- DEMARCO (H.), 1985. - Applications de la télédétection infrarouge et visible en océanographie. Etude de la zone de dilution rhodanienne, observations des zones de production dans le golfe du Lion et estimation de l'éclairement solaire global en Méditerranée occidentale. *Thèse troisième cycle, Sciences de la mer et de l'environnement, Aix-Marseille II, 226 p.*
- DUNTLEY (S.Q.), ed., 1980. - Ocean optics VI, October 23-25, 1979, Monterey, CA. *Proceedings of the Society of photo-optical instrumentation engineers, 208, VIII-265 p.*
- DUPOUY (C.), 1982. - Etude des floraisons du phytoplancton sur la radiale Roscoff-Plymouth (Manche occidentale) en 1980 et 1981. Apport des images satellitaires de la couleur de l'océan. *Thèse troisième cycle, Lille, 974, pagination multiple.*
- European Space Agency, 1978. - *European workshop on space oceanography, navigation and geodynamics, organised by ESA, Council of Europe, EARSeL and Working party on geodynamics, Schloss Elmau, Germany, 16-21 January 1978.* - Paris : ESA. - VIII-350 p. - (ESA SP-137).
- European Space Agency, 1981. - *Application of remote sensing data on the continental shelf. Proceedings of an EARSeL-ESA symposium held at Voss, Norway, 19-20 May 1981 in co-operation with the Royal Norwegian Council for Scientific and Industrial Research (NTNF).* - Paris : ESA. - VIII-290 p. - (ESA SP-167).
- EWING (G.C.), ed., 1965. - *Oceanography from space. Proceedings of the conference on the feasibility of conducting oceanographic explorations from aircraft, manned orbital and lunar laboratories, held at Woods Hole, Massachusetts, 24-28 August 1964.* - Woods Hole : Woods Hole Oceanographic Institution. - XXI-469 p. - (Ref. No. 65-10).
- FROUIN (R.), 1981. - Contribution à l'étude de la température de surface de la mer par télédétection au moyen de l'expérience spatiale HCMM. *Thèse troisième cycle, Lille, 877, 145 p.*
- GAUTIER (C.) & FIEUX (M.), ed., 1984. - *Large-scale oceanographic experiments and satellites.* - Dordrecht : D. Reidel. - X-288 p. - (NATO ASI series ; series C, 128).

- GEOSAT. *Journal of geophysical research*, **95**, C3, pp. 2833-3179 (1990).
- GIERLOFF-EMDEN (H.G.), 1977. - *Orbital remote sensing of coastal and offshore environments, a manual of interpretation*. - Berlin ; New York : W. de Gruyter. - 176 p.
- GILLOT (R.A.) & TOSELLI (F.), ed., 1985. - *The Archimedes I experiment. Directorate General for Science, Research and Development, Joint Research Centre, Ispra Establishment*. - Luxembourg : Commission of the European Communities. - V-223 p. - (EUR 10216 EN).
- GORDON (H.R.), 1980. - Ocean remote sensing using lasers. *NOAA technical memorandum ERL PMEL*, **18**, VII-200 p.
- GORDON (H.R.) & MOREL (A.Y.), 1983. - *Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery, a review*. - New York ; Berlin ; Heidelberg ; Springer-Verlag. - 114 p. - (Lecture notes on coastal and estuarine studies ; 4).
- GOWER (J.F.R.), ed., 1981. - *Oceanography from space*. - New York ; London : Plenum Press. - XIX-978 p. - (Marine science ; 13).
- GOWER (J.F.R.), ed., 1987. - Oceanography from space. Proceedings of the topical meeting of the COSPAR interdisciplinary scientific commission A (meeting A3) of the COSPAR twenty-sixth plenary meeting held in Toulouse, France, 30th June-11th July 1986. *Advances in space research*, **7**, 2, 141 p.
- GOWER (J.F.R.) & APEL (J.R.), 1986. - Opportunities and problems in satellite measurements of the sea. *Unesco technical papers in marine science*, **46**, XII-70 p.(= Observation de l'océan par satellite : problèmes et perspectives. *Documents techniques de l'Unesco sur les sciences de la mer*, **46**, XII-113 p. (1989)).
- GUYENNE (T.D.), ed., 1987. - *Ocean colour workshop. Proceedings of an ESA workshop held at Villefranche-sur-Mer, France, 5-6 November 1986*. - Paris : European Space Agency. - 118 p. - (ESA SP-1083).
- HAMMACK (J.C.), 1977. - Landsat goes to sea. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, **43**, 6, pp. 683-691.
- HOUGHTON (J.T.), COOK (A.H.) & CHARNOCK (H.), ed., 1983. - The study of the ocean and the land surface from satellites. Proceedings of a Royal Society discussion meeting held on 10 and 11 November 1982. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, (A) **309**, 1508, pp. 241-464.

- Joint Oceanographic Institutions, 1984. - *Oceanography from space, a research strategy for the decade 1985-1995. (1) Executive summary. 2. Proposed measurements and missions.* - Washington, D.C. : JOI. - 20 + 32 p.
- KIRWAN (A.D.), AHRENS (T.J.) & BORN (G.H.), ed., 1983. - SEASAT II. *Journal of geophysical research*, **88**, C3, pp. 1529-1952.
- KUHLER (D.A.), BINA (R.T.) & CLAASEN (D. Van R.), 1988. - Status of high-technology remote sensing for mapping and monitoring coral reef environments, in : *Proceedings of the Sixth international coral reef symposium, Townsville, Australia, 8th-12th August 1988*, **1**, pp. 97-101.
- LANDSAT thematic mapper. *Remote sensing of environment*, **28**, 347 p. (1989).
- LE GALL (J.-Y.), 1989. - Télédétection satellitaire et pêcheries thonières océaniques. *FAO document technique sur les pêches*, **302**, VII-148 p.
- LOUBERSAC (L.), DAHL (A.L.), COLLOTTE (P.), LEMAIRE (O.), OZOUVILLE (L. d') & GROTTÉ (A.), 1988. - Impact assessment of cyclone Sally on the almost atoll of Aitutaki (Cook Islands) by remote sensing, in : *Proceedings of the Sixth international coral reef symposium, Townsville, Australia, 8th-12th August 1988*, **2**, pp. 455-462.
- LYONS (K.J.), 1977. - Evaluation of an experimental bathymetric map produced from LANDSAT data. *Cartography*, **10**, 2, pp. 75-82.
- Marine technology society. - Satellite remote sensing. *Marine technology society journal*, **20**, 2, pp. 3-100 (1986).
- MARSAC (F.), PETIT (M.) & STRETTA (J.-M.), 1987. - Radiométrie aérienne et prospection thonière à l'ORSTOM. Méthodologie, bilan et prospective. *Initiations - documentations techniques, ORSTOM*, **68**, 33 p.
- MASSIN (J.-M.), ed., 1978. - *Remote sensing for the control of marine pollution, preliminary inventory of available technologies = Télédétection appliquée à la lutte contre la pollution marine, premier inventaire des techniques et moyens.* - Bruxelles : Comité sur les défis de la société moderne. - non paginé. - (Rapport du CDSM ; 78).
- MASSIN (J.-M.), 1984. - *Remote sensing for the control of marine pollution.* - New York : Plenum Press. - XI-466 p. - (NATO challenges of modern society 6).

- MATHEWS (T.) & HICKS (R.B.), ed., 1982. - *Proceedings of the International symposium on acoustic remote sensing of the atmosphere and oceans, the University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, June 22-25, 1981.* - Calgary: University of Calgary. - pagination multiple.
- MAUL (G.A.), 1985. - *Introduction to satellite oceanography.* - Dordrecht : M. Nijhoff. - X-606 p. - (Remote sensing of earth resources and environment).
- MILLER (L.), CHENEY (R.E.) & DOUGLAS (B.C.), 1988. - GEOSAT altimeter observations of Kelvin waves and the 1986-87 El Niño. *Science*, **239**, 4835, pp. 52-54.
- MONGET (J.-M.), ed., 1979. - *Applications of remote sensing to fisheries research. Proceedings - ICES (CIEM) working group on aerospace remote sensing, Ecole nationale supérieure des mines de Paris, Valbonne, 13-14 June 1979.* - Valbonne: Ecole nationale supérieure des mines de Paris. - 89 p.
- NACINI (E.), 1985. - An atlas of original and Mercator-transformed satellite-data images of the Alboran Sea, August-October 1983. *SACLANTCEN report, SR-89*, I-129 p.
- National Aeronautics and Space Administration, 1984. - Frontiers of remote sensing of the oceans and troposphere from air and space platforms. Proceedings of the URSI commission F symposium and workshop, Shores, Israel, May 14-23, 1984. *NASA conference publication, 2303*, VIII-622 p.
- National Aeronautics and Space Administration, 1986. - *Oceanography from space.* - Washington, D.C. : NASA. - 16 p., 14 pl. en coul.
- National Center for Atmospheric Research, 1981. - *A collection of extended abstracts presented at the Symposium on the radiation transfer in the oceans and remote sensing of ocean properties, LAMAP third scientific assembly, 17-28 August 1981, Hamburg.* - Boulder : NCAR. - IX-221 p.
- NEREM (R.S.), TAPLEY (B.D.) & SHUM (C.K.), 1990. - Determination of the ocean circulation using Geosat altimetry. *Journal of geophysical research*, **95**, C3, pp. 3163-3179.
- NIHOUL (J.C.J.), ed., 1984. - *Remote sensing of shelf sea hydrodynamics Proceedings of the 15th International Liège colloquium on ocean hydrodynamics.* - Amsterdam : Elsevier. - XII-354 p. - (Elsevier oceanography series ; 38).
- Oceanography from space. *Oceanus*, **24**, 3, 75 p. (1981).

- Oceans 82, Conference record : industry, government, education ... partners in progress, Washington, D.C., September 20-22, 1982.* - Washington, D.C. : Marine technology society ; New York : IEEE council on oceanic engineering. - 1293 p. - (Cf. Program D : Remote sensing, pp. 371-493).
- PHULPIN (T.) & LE BORGNE (P.), 1984. - Utilisation de la radiométrie hyperfréquence dans les domaines océanographique et météorologique. *Notes techniques - Direction de la météorologie*, 7, 163 p.
- PIRAZZOLI (P.A.), 1982. - Télédétection en milieu récifal. Utilisation d'une image LANDSAT pour évaluer la bathymétrie dans l'atoll de Rangiroa (Polynésie française). *Océanis*, 8, 4, pp. 297-308.
- PIRAZZOLI (P.A.), 1984. - Cartographie des hauts fonds par télédétection dans l'archipel des Gambier (Polynésie française). *Espace géographique*, 1984, 3, pp. 277-284, 304.
- PIRAZZOLI (P.A.), 1985. - Bathymetric mapping of coral reefs and atolls from satellite = Cartographie bathymétrique de récifs coralliens et d'atolls par satellite, in : *Proceedings of the Fifth international coral reef congress, Tahiti, 27 May-1 June 1985*, 6, pp. 539-544. - Moorea : Antenne Muséum-EPHE.
- REGRAIN (R.), 1980. - Géographie physique et télédétection des marais charentais. *Thèse Géographie, Brest*, 1979, 512 p.
- ROBINSON (I.S.), 1985. - *Satellite oceanography, an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists.* - Chichester : Ellis Horwood. - 455 p. - (Ellis Horwood series in marine science).
- SALTZMAN (B.), ed., 1985. - *Satellite oceanic remote sensing.* - Orlando : Academic Press. - XVI-511 p. - (Advances in geophysics ; 27).
- SCHULKIN (M.), ed., 1980. - *NOAA workshop on ocean acoustic remote sensing, Seattle, Washington, January 21-24, 1980.* - Rockville : National Oceanic & Atmospheric Administration, Office of Sea Grant. - 2 vol., III-42 p. + pagination multiple.
- SHANNON (L.V.), ed., 1985. - *South African ocean colour and upwelling experiment.* - Cape Town : Sea Fisheries Research Institute. - IX-270 p.
- SINHA (É.), 1970. - Oceanography from space and aircraft, state of the art, technology/applications : an annotated bibliography. *Ocean engineering information series*, 2, XV-79 p.

- SLATER (P.N.), 1980. - *Remote sensing, optics and optical systems*. - Reading : Addison-Wesley. - XVI-575 p. - (Remote sensing ; 1).
- SMITH (V.E.), ROGERS (R.H.) & REED (L.E.), 1975. - Thematic mapping of coral reefs using LANDSAT data, in : *Remote sensing of environment, proceedings of the 10th international symposium on remote sensing of environment, Ann Arbor, October 6-10, 1975*, pp. 585-594.
- SÖRENSEN (B.M.), ed., 1979. - *Workshop on the EURASEP ocean color scanner experiments 1977 proceedings, Joint Research Centre Ispra 30-31 October 1979*. - Ispra : JRC of the Commission of the European Communities. - 200 p.
- STEWART (R.H.), 1985. - *Methods of satellite oceanography*. - Berkeley : University of California Press. - VIII-360 p. - (Scripps studies in earth and ocean sciences ; 1).
- Texas A&M University, 1971. - *Proceedings of the Symposium on remote sensing in marine biology and fishery resources, January 25-26, 1971, College Station, Texas*. - College Station : Texas A&M University Remote Sensing Center. - VII-299 p. - (TAMU-SG-71-106).
- THOMSON (V.), NEVILLE (R.A.) & O'NEIL (R.A.), 1980. - *A bibliography on the remote sensing of oil pollution*. - Ottawa : Canada Centre for Remote Sensing. - 92 p.
- TOBA (Y.) & MITSUYASU (H.), ed., 1985. - *The ocean surface : wave breaking, turbulent mixing and radio probing. Proceedings of the symposium held at Tohoku University, Sendai, Japan on 19-25 July, 1984*. - Dordrecht : D. Reidel. - XIII-586 p.
- TOURNADRE (J.), 1990. - Sampling of oceanic rings by satellite radar altimeter. *Journal of geophysical research*, **95**, C1, pp. 693-697.
- TSAI (J.J.), 1984. - Acoustic remote sensing of waste disposal in the ocean. *NOAA technical memorandum ERL AOML*, **59**, IX- 99 p.
- VERGER (F.), ed., 1977. - *Téledétection du littoral océanique de la France*. - Montrouge : Ecole normale supérieure. - 310 p. - (Collection de l'Ecole normale supérieure de jeunes filles ; 11).
- VERNBERG (F.J.) & DIEMER (F.P.), ed., 1982. - *Processes in marine remote sensing. Workshop, University of Manchester, 26-30 June, 1979*. - Columbia : University of South Carolina. - XIV-545 p. - (The Belle W. Baruch library in marine science ; 12).
- VOLLMERS (R.R.) & MASSIN (J.-M.), ed., 1981. - *Airborne remote sensing of oil spills in coastal waters = Téledétection des rejets*

d'hydrocarbures dans les eaux côtières. Proceedings of the First workshop, held at Washington, D.C., 18-20 April 1979. - Washington, D.C. : U.S. Coast Guard : Neuilly : Ministère de l'environnement et du cadre de vie. - V-344 p.

WARNE (D.K.), 1978. - Landsat as an aid in the preparation of hydrographic charts. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 44, 8, pp. 1011-1016.

WEILL (A.), ed., 1986. - *Proceedings - Third international symposium on acoustic remote sensing of the atmosphere and oceans, October 14/17, 1985, Issy-les-Moulineaux.* - Issy-les-Moulineaux : C.N.E.T./C.R.P.E. - IX-587 p.

WITTE (J.M.), ed., 1984. - *Winds over water : a bibliography.* - Fort Lauderdale : Nova University/NYIT Press. - V-178 p. - (Nova University/New York Institute of Technology Press research series).

YAMANAKA (I.), ITO (S.), NIWA (K.), TANABE (R.), YABUTA (Y.) & CHIKUNI (S.), 1988. - The fisheries forecasting system in Japan for coastal pelagic fish. *FAO fisheries technical paper*, 301, VIII-72 p.

ZAITZEFF (J.B.), CORNILLON (P.) & AUBREY (D.A.), ed., 1980. - *Remote sensing in the coastal and marine environment. Proceedings of the First U.S. North Atlantic regional workshop held at the W. Alton Jones Campus, University of Rhode Island, May 30-June 1, 1979.* - Kingston, R.I. : Center for Ocean Management Studies ; Woods Hole : Woods Hole Oceanographic Institution. - V-250 p. - (WHOI-80-10).

ZION (P.M.), 1989. - Remote sensing of large marine ecosystems : uses of CZCS and AVHRR data, in : *Biomass yields and geography of large marine ecosystems*, ed. K. Sherman & L.M. Alexander, pp. 345-376. - Boulder : Westview Press : Washington, D.C. : American Association for the Advancement of Science. - (AAAS selected symposium ; 111).

La composante télédétection dans le développement de l'océanographie opérationnelle des pêches

par

MICHEL PETIT

*Institut français de recherche scientifique pour le
développement en coopération (ORSTOM)
Centre ORSTOM
BP 5045, 34032 Montpellier Cedex (France)*

ALAIN WADSWORTH

*Institut français du pétrole (IFP)
1, avenue Bois Préau
92500 Rueil-Malmaison (France)*

RESUME

Un rapide bilan des acquis et surtout des limites de l'halieutique moderne met en évidence le hiatus existant entre les structures de gestion actuelles et les problèmes qui se posent aujourd'hui. Le cas de la pêche thonière de surface est approfondi compte tenu de sa spécificité et de son importance économique. Il en ressort que, désormais, des progrès décisifs, en matière d'halieutique thonière, passeront par la connaissance de la relation thon-environnement.

Dans une deuxième partie, l'analyse des potentialités et de l'apport de la télédétection aérospatiale en matière de pêche est faite au travers

de deux exemples originaux : l'apport du radar aéroporté de type SAR, dans le cadre de l'opération HAREM, en pêche thonière, et l'apport de SPOT, vu comme satellite océanographique.

Ces exemples démontrent clairement que la télédétection permet de bien "visualiser" des concepts essentiels de l'océanographie et de l'halieutique.

ABSTRACT

Through some analyses and examples, the limits of modern halieutics show the gap between present management structures and today's problems. The case of surface tuna fishery is thoroughly studied considering its specificity and its economical importance. From this, it appears that, today, conclusive strides will be made by halieutics through the knowledge of the relationship between tuna and its environment.

A second part analyses the potential and the contribution of aerospatial remote sensing in the halieutics field through two original examples : the contribution of SAR aerial radar within the framework of HAREM (HALieutics Radar Experiment in Mediterranean sea) for the tuna fishery and the contribution of SPOT satellite in halieutics and oceanology.

These examples point out clearly that remote sensing is one of the only tools able to "visualize" some essential concepts in oceanography and halieutics.

Au sens le plus concret et le plus général du terme, une pêcherie n'est qu'une zone de l'océan, découverte par les pêcheurs, où se trouve une concentration spatiale ou/et temporelle de matière vivante, source de protéines indispensables, de devises ou d'ingrédients gastronomiques. L'halieutique, ou théorie des pêches [POSTEL, 1973], est la science qui cherche à fournir les outils d'optimisation du rendement de ces pêcheries, incluant ainsi la biologie, l'économie et l'océanographie des pêches.

PROBLEMATIQUE

Rapide bilan des acquis et des problèmes de l'halieutique moderne

Avant d'introduire le concept d'halieutique opérationnelle et, de façon plus restrictive, d'océanographie opérationnelle des pêches, il est nécessaire de dresser un tableau bref, voire schématique, des

mécanismes d'exploitation d'une pêcherie et des méthodes d'établissement de diagnostic.

Les réactions des pêcheurs, plus ou moins encouragés par l'inefficacité des règlements, restant les mêmes que par le passé, l'exploitation d'une pêcherie se fait encore souvent de façon anarchique. Ceci n'avait pas grande importance tant que l'accroissement de l'effort de pêche était au plus proportionnel à l'accroissement du tonnage débarqué. Or, depuis les années cinquante, pour beaucoup de pêcheries, l'accroissement de l'effort de pêche est devenu nettement supérieur à celui du tonnage. Et, dans beaucoup de cas, faute de stabilisation, apparut un effondrement de la production suivi de l'écllosion de problèmes économiques qui, généralement, engendrèrent les premières mesures réglementaires sans fondement scientifique, une demande de recherche scientifique à pouvoir uniquement consultatif et, éventuellement, une nouvelle réglementation d'après les résultats des recherches (figure 1).

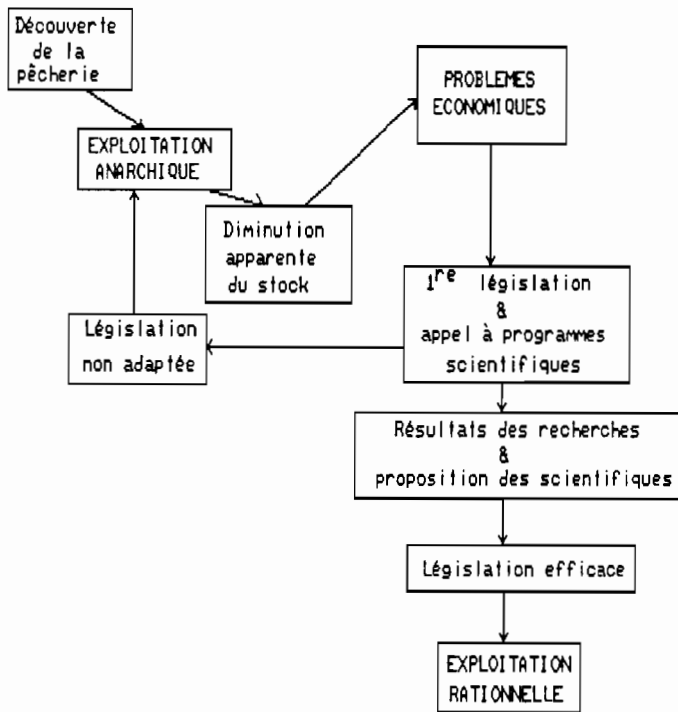


FIGURE 1: Schéma de l'évolution classique de l'exploitation d'une pêcherie au cours de la seconde moitié du XX^e siècle.

Remarquons que ce schéma, bien que dépouillé à l'extrême, n'en reste pas moins général et bien réel. En effet, les pêcheries dont la gestion est suivie dès le début par les scientifiques sont rares (cas des crevettes dans le golfe Persique ou de la langouste dans l'Ouest australien), relativement récentes et dans des zones traditionnellement inexploitées pour l'espèce considérée.

Par analogie avec les lois qui régissent les écosystèmes terrestres, il a été possible de trouver les paramètres - les - "symptômes" - de l'état des pêcheries, en tenant compte des caractéristiques propres au milieu marin (mortalité naturelle élevée, nombre d'oeufs souvent considérable...) La finalité des recherches étant d'évaluer le stock, afin de proposer la "posologie", les dynamiciens ont élaboré le concept d'unité de pêcheries ou population [LAUREC & LE GUEN, 1981], relativement indépendante d'événements extérieurs (critère d'isolement) et ne renfermant pas de sous-populations à caractéristiques très différentes les unes des autres (critère d'homogénéité). Pour procéder à l'évaluation d'abondance de cette population, il est alors nécessaire de connaître ou d'estimer les données suivantes que l'on peut répartir en trois groupes.

Le premier groupe comprend l'aire de répartition de l'espèce et les données statistiques sur les prises, l'effort de pêche et la composition par taille (âge). Il s'agit ici de s'assurer qu'à deux aires différentes de répartition correspondent bien deux populations et qu'une même population n'est pas exploitée dans deux pêcheries.

Le deuxième groupe affecte surtout les caractéristiques biologiques et physiologiques dont la localisation des zones de ponte.

Enfin, l'étude du comportement de l'espèce dans son environnement fournit les données du dernier groupe.

Dans chacun de ces trois groupes, une dynamique de recherche propre a généré un certain cloisonnement entre les études ... et les experts. Ainsi, depuis trente ans, l'investigation mathématique et les techniques informatiques ont donné la faveur aux modèles qui tentent de trouver une expression (E) pour traduire la relation entre le recrutement, la croissance, la mortalité naturelle et par pêche [BEVERTON & HOLT, 1957 ; DIEMIENIEVA, 1971]. Pour cela, on utilise surtout les statistiques de pêche et quelques expériences de marquage. Comme toute recherche nouvelle, la dynamique des populations a fourni des résultats remarquables et permis le diagnostic de l'état des pêcheries en activité.

De leur côté, les études de biologie se sont poursuivies classiquement, fournissant secondairement des éléments d'estimation de certains paramètres de l'expression mathématique (E).

Quant aux études de comportement et d'évaluation directe de stock (comptage), elles ont été délaissées compte tenu de la difficulté d'obtention de données, difficultés quasiment rédhibitoires, jusqu'il y a peu, pour les espèces pélagiques.

Application à la pêche des thonidés de surface

La pêcherie des thonidés de surface a suivi, avec ses spécificités propres, une évolution comparable à ce qui est décrit précédemment jusqu'à la fin des années 70 [FONTENEAU, 1985].

En effet, les problèmes se sont déplacés pour différentes raisons. Tout d'abord, si du point de vue de l'industrie des pêches, il est intéressant d'avoir des prévisions de stock pour chaque année, depuis l'augmentation spectaculaire des coûts d'exploitation, la prévision des zones de pêche est devenue une nécessité pour maintenir un rendement énergétique acceptable (matière vivante récoltée par unité d'énergie dépensée).

En second lieu, la gestion internationale a fait place à une responsabilisation par pays avec la création des zones économiques exclusives (ZEE) diminuant ainsi l'influence des organismes internationaux ICCAT*, IATTC**, CPS***. Pour s'en convaincre, il suffit d'étudier les débats parus dans la conférence électronique organisée sur le réseau EIES (Telenet) par la CPS, suite au texte de R. HILBORN et J. SIBERT: "*Is international management of tuna necessary?*".

TABLEAU 1 : *Bouleversements de la répartition mondiale des pêches thonières au début des années 80.*

	1977		1983	
Océan Atlantique	160 Mt	(95 S*)	200 Mt	(89 S)
Océan Indien	0 Mt	(0 S)	12,5 Mt	(6 S)
Pacifique Est	290 Mt	(202 S)	190 Mt	(130 S)
Pacifique Ouest	35 Mt	(18 S)	290 Mt	(120 S)

Mt : Quantités exprimées en milliers de tonnes
* Nombre de senneurs commerciaux de plus de 200 t de capacité ayant participé à ces captures

Enfin, pour faire face à des problèmes de restructuration technologique (Japon), de géopolitique (USA, Mexique) ou d'affaiblissement de stock (flottille franco-ivoiro-sénégalaise), il est apparu indispensable de prospecter et surtout d'évaluer les stocks en région vierge de toute pêcherie donc de statistiques de pêche. Sans ces

* ICCAT : International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas.

** IATTC : Inter-American Tropical Tuna Commission.

*** CPS : Commission du Pacifique Sud.

dernières, il a donc fallu développer les études d'environnement et de comportement. Déjà dans ce contexte, la télédétection aérienne et spatiale a fourni un outil de premier ordre pour mettre au point des méthodes de prévisions de pêche et d'évaluation directe du potentiel de pêche.

Pour illustrer ce point de vue, nous prendrons deux exemples :

Les opérations de radiométrie aérienne et prospection thonière dans le Pacifique Sud

Dans le Pacifique Sud, l'immensité de la zone occupée par les pêcheries est souvent rédhibitoire pour toute étude classique d'océanographie ou de biologie des pêches. Les changements très rapides observés dans le paysage halieutique thonier de la région rendent trop souvent ces études inadaptées ou amoindrissent leur intérêt. Ainsi le grand programme de marquage réalisé par la CPS à partir de la fin des années 70, a demandé, de par sa méthodologie propre, plusieurs années avant de pouvoir tirer des conclusions sur l'ensemble de la zone [KEARNEY, 1978 ; KLEIBER *et al.*, 1987]. Ce programme dont l'importance et l'intérêt ne sauraient être remis en cause, ne serait-ce que par son innovation régionale, a fourni des résultats qui serviront de bases solides à toute étude thonière ultérieure. Il a cependant eu quelques difficultés à répondre aux préoccupations socio-économiques des pays de la région qui assistaient à tous ces changements [PETIT, STRETTA & DUPOUY, 1989].

Entre 1979 et 1984, l'ORSTOM a développé un important programme de télédétection aéroportée sur l'ensemble des territoires français du Pacifique Sud ainsi qu'au Vanuatu et en Nouvelle-Zélande.

Historiquement, le territoire de Nouvelle-Calédonie a signé avec l'ORSTOM une convention plusieurs fois reconduite entre 1979 et 1982, pour exécuter des études de radiométrie infrarouge et d'observations aériennes. Le principal objectif de ces recherches était d'évaluer les potentialités des ressources thonières des régions centrées sur les ZEE de Nouvelle-Calédonie et de Wallis et Futuna en vue d'un développement de la pêche. Ces régions, comme l'ensemble du Pacifique Sud, avaient, à l'époque, une thermographie de surface mal connue et une pêche thonière limitée à celle des canneurs japonais. Dès 1979, les premiers résultats exposés à la Commission du Pacifique Sud ont suscité des demandes d'opérations du même type de la part de certains pays membres. L'ORSTOM a ainsi passé un accord avec le Vanuatu (1980) puis avec la Polynésie française (1981). Enfin, en été austral 1983, le gouvernement néo-zélandais a demandé à l'ORSTOM la mise en place de cette technique sur l'avion affrété par les senneurs américains, l'objectif devenant alors l'aide à la pêche directe. Au total, près de 2 400 heures de vol ont été réalisées dans la région. Une vue synthétique des matériels et de la méthode est présentée dans la figure 2.

TABLEAU 2 : Evaluation du potentiel thonier à partir des opérations de radiométrie aérienne et prospection thonière dans la région Nouvelle-Calédonie/Vanuatu (d'après PETIT, STRETTA & DUPOUY, 1989).

	NOUVELLE-CALEDONIE	VANUATU
Zone d'étude	14°30'-26°00'S 158°00'-175°00'E	12°50'-22°00'S 165°00'-174°00'E
Surface prospectée dans l'aire d'étude (1)	222 309 milles ²	121 431 milles ²
Surface de la ZEE (2) (lettre d'information n° 14 de la CPS)	1 540 000 km ²	670 000 km ²
Intersection de (1) et (2)	environ 200 000 milles ²	environ 100 000 milles ²
Tonnage estimé dans l'aire d'étude (tonnes)	88 848 t (51 988 t-126 055 t)	47 910 t (27 971 t-68 032 t)
et densité (tonnes/km ²)	0,117 (0,068 t-0,165 t)	0,115 (0,067 t-0,163t)
Tonnage estimé pour la ZEE	154 566 t (90 440 t-219 295 t)	67 663 t (39 502 t-96 082 t)

Brièvement, le mode opératoire est le suivant : le plan de vol est établi après examen des données historiques variées (hydrologie générale, statistiques de pêche), des divers documents décrivant la situation thermique superficielle récente transmise par les navires marchands ou les satellites, et des enseignements tirés des vols précédents quant aux températures de surface relevées à la pêche et à la météorologie locale. La zone à prospector est donc définie, mais le trajet au sein de cette zone peut toutefois être modifié au cours du vol en fonction des évolutions thermiques ou météorologiques qui se manifestent : la recherche des conditions optimales de prospection est un élément fondamental du succès et de la rentabilité des vols.

Un vol est composé d'une succession de trajets linéaires ou radiales effectuées à une altitude de 500 pieds (150 mètres). Le long de ces

FIGURE 2 : Le rack radiométrie, mis au point par l'ORSTOM pour le programme RAPT Pacifique, autorise des thermographies de surface précises en température (0,2°C) et en position (0,5 mille). Un matériel comparable a été utilisé en Atlantique tropical et dans la région des Seychelles. Parallèlement a été développée une méthode d'estimation du stock de thonidés de surface à partir de l'échantillonnage aérien. L'utilisation de ce matériel intéresse des expériences touchant tant à l'écologie (environnement des thons, cétacés...) qu'à la physique (thermographie de surface) ou à la pêche (prospection, évaluation, aide à la pêche). Au total, de 1979 à 1984, plus de 4 350 heures de vol ont été réalisées dans les trois océans par le Groupe de radiométrie aérienne de l'ORSTOM.

radiales, toutes les cinq minutes, soit tous les 10 milles, ou à chaque événement rencontré * sont relevés la nature de l'événement lui-même, l'heure, la nébulosité, utile pour la correction atmosphérique, la température de surface de la mer après les corrections instrumentale et atmosphérique, la position, le cap suivi, l'état de la mer, la couleur de l'eau, la vitesse et la direction du vent et enfin la distance d'observation des bancs par rapport à l'axe de vol.

Ces données sont saisies en cours de vol, en partie automatiquement en ce qui concerne la valeur de la température de surface issue du radiomètre et la position, en partie manuellement sur le micro-ordinateur pour les autres paramètres.

La radiométrie aérienne infrarouge, en permettant de localiser les anomalies thermiques de surface, focalise l'observation aérienne sur les zones privilégiées où les thonidés présents ont tendance à se rassembler. Par l'inventaire de ces sites, cette méthode de prospection donne trois types de résultats qui concernent l'écologie des thonidés, l'évaluation et la répartition d'abondance, et l'estimation, en temps réel, de la richesse de la région prospectée pour la pêche [PETIT & KULBICKI, 1983 ; PETIT & HENIN, 1982 ; PETIT, 1984].

Notamment, il a été confirmé que, dans la région, lorsque zones frontales et thonidés sont présents, ceux-ci se concentrent près de celles-là. L'effet agrégatif des îles et hauts-fonds a également été mis en évidence. L'ensemble de ces observations a permis d'élaborer une théorie cohérente sur le comportement des thonidés [PETIT, 1986].

L'évaluation en temps réel du potentiel halieutique des zones survolées et l'aide à la pêche directe ont été pratiquées à plusieurs reprises au cours de ces opérations : en Nouvelle-Zélande avec les senseurs américains, à Tahiti avec les bonitiers ou encore avec les compagnies locales de pêche à la canne en Nouvelle-Calédonie.

Le résultat principal de ces opérations est la mise au point d'une méthode d'évaluation du stock de thonidés de surface et son application à la Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu. Cette méthode intègre un modèle mathématique qui tente de tenir compte aussi bien de l'influence des différents paramètres du vol (heure, température de surface, nébulosité, état de la mer, distance à la côte, distance entre bancs, saison) que du caractère discontinu des observations (bancs de thons, oiseaux, baleines, dauphins...). Ce modèle définit une distance mathématique "d" qui ramène à une dimension l'ensemble des paramètres retenus pour l'analyse. Par ajustement d'une courbe à ces données, on peut alors calculer la relation existant entre cette distance d et la probabilité d'observation ("P.O. = potentiel observable"), utilisée comme indice d'abondance. Il s'en déduit une relation entre d et la densité en thons à partir de l'évaluation de la taille des bancs et de la surface prospectée. Il a été montré que ces deux relations sont de forme exponentielle. Enfin, à partir de cette densité estimée, l'évaluation du

* Par événement, nous entendons tout banc de thons, objet flottant ou phénomène particulier survolé, à savoir : les fronts thermiques, les changements de couleur de l'eau, les mammifères marins, les oiseaux, les épaves, les thoniers en pêche, etc.

potentiel en thons de surface peut être faite. Le tableau 2 donne le résultat de l'application de cette méthode à la région Nouvelle-Calédonie/Vanuatu [PETIT, 1984].

Selon ce modèle, le stock de surface s'élève pour la ZEE de Nouvelle-Calédonie à 155 000 tonnes (avec un intervalle compris entre 90 000 et 220 000 tonnes) et pour celle du Vanuatu à 68 000 tonnes (avec un intervalle compris entre 40 000 et 96 000 tonnes) ce qui représente une densité d'environ 0,12 tonne/km². Les résultats obtenus par le programme de marquage de la CPS, pour toute la zone CPS, donne une densité comparable pour l'ensemble du stock (surface et profondeur) de 0,1 tonne/km².

Le modèle de prévision de pêche PREVI-PECHE utilisé en Atlantique tropical

Nous ne citons cet exemple que brièvement et pour mémoire puisqu'il fait l'objet d'une présentation complète dans ce même ouvrage "La télédétection infrarouge peut-elle aider à la prévision des zones de pêche ? La réponse praxéologique" par Jean-Michel STRETTA [1990]. Ce modèle, en partant de l'analyse du passé hydrologique des masses d'eaux et nourri par les cartes de température de surface (NOAA et METEOSAT), a permis de distribuer de 1982 à 1985 auprès de la flottille thonière franco-ivoiro-sénégalaise un bulletin prévisionnel pour définir les zones favorables à la pêche thonière dans l'Atlantique tropical oriental [STRETTA & SLEPOUKHA, 1983 ; STRETTA & PETIT, 1989].

Le contexte de la recherche halieutique actuelle et le concept de l'halieutique opérationnelle :

Comme le laisse entrevoir ce qui précède, la pêche thonière à la senne constitue le cas typique où les bouleversements constatés dans la répartition mondiale des pêcheries devraient amener une réflexion pour essayer d'élaborer une véritable halieutique opérationnelle.

En effet, il est évident que dans les prochaines années la gestion des pêches ne pourra se contenter de quelques points rajoutés sur des courbes de prises par unité d'effort [DICKIE *et al.*, 1987]. Le caractère limité de la ressource halieutique* et la redistribution des bénéfices vers les pays riverains**, ajoutés à l'augmentation des coûts d'exploitation, devraient inciter les administrations et la science halieutique à agir non plus en adaptant tant bien que mal modèles et règlements existants aux problèmes posés mais plutôt en développant structures et recherches capables de fournir en temps quasi réel - *ipso facto*, sans attendre le développement anarchique des pêcheries - le maximum de données sur les ressources par l'utilisation de la technologie moderne (dont la

* Le taux d'expansion mondiale est passé de 7 % à 1 % en une dizaine d'années [TROADEC, 1982].

** Cette redistribution est directement dérivée de la réglementation des ZEE et particulièrement sensible pour la pêche thonière

téledétection aérospatiale). C'est le but que l'on doit fixer à l'halieutique opérationnelle.

ANALYSES DES POTENTIALITES ET LIMITES DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE

L'objectif des études thonières est de savoir comprendre la dynamique des bancs de thons par l'évaluation de leur nombre, de leur concentration et de leur déplacement. Comme il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'observer directement ces phénomènes, les études s'orientent vers le déterminisme des mécanismes physico-chimiques qui les régissent. La plupart du temps, les modèles employés [MAUGHAM *et al.*, 1972; PETIT, 1976; STRETTA & SLEPOUKHA, 1983; MENDELSSOHN & ROY, 1986] se ramènent à l'étude des cellules ou volumes optimaux dans lesquels les bancs de thons se répartissent et y trouvent des conditions euphoriques [POSTEL, 1969]. Les migrations se ramènent alors à un déplacement de ces cellules, déplacement qui peut être dû à :

- un déplacement "physique" du volume d'eau dans les trois dimensions,
- et/ou un déplacement continu des conditions optimales dans le temps,
- et/ou un déplacement continu des conditions optimales dans l'espace.

Bien entendu la téledétection aérospatiale n'est pas et ne peut pas être la panacée qui devrait résoudre tous les problèmes. De par sa méthodologie propre, la téledétection ne permet pas d'avoir des données directement utilisables. C'est là que la notion de modèle prend toute sa valeur, modèle où sont analysées simultanément les données principales et secondaires recueillies en temps réel et les données historiques. Cette intégration se fait de façon opérationnelle en météorologie et doit désormais prévaloir en halieutique. Il s'agit donc seulement de contribuer à l'étude de l'environnement des thonidés par la surveillance des paramètres météorologiques et océanographiques à moyenne échelle et en temps quasi réel (3 à 5 jours).

Aux modèles de type procédurier devraient, d'ici peu, se substituer des modèles intégrant, dans leur application, les techniques de systèmes experts comme l'ont proposé PETIT et STRETTA [1989 a]. Ce dernier point est évoqué par ailleurs dans cet ouvrage [STRETTA *et al.*, 1990].

La bonne adéquation des échelles spatiales entre la zone d'étude et les moyens actuels de la téledétection d'une part, le potentiel d'évolution de cette technique et son adaptation aux problèmes posés d'autre part, constituent les principaux atouts de la téledétection dans la pêche industrielle du thon. Les deux exemples pris dans la première partie sont désormais des études des plus classiques. Nous allons maintenant essayer de montrer au travers d'exemples originaux les propriétés d'évolution de

FIGURE 3 : Quelques résultats de l'expérimentation HAREM - août 1989 (voir texte).

a. L'avion du DLR équipé du E-SAR, survolant un senneur méditerranéen.

b. Senneur méditerranéen en action de pêche.

c. Banc de thons rouges en surface : on remarque l'angle fait par la trajectoire des poissons, lors de leur saut, compris entre 90° et 180° . Ceci est une bonne caractéristique du comportement des thons rouges et des thons tropicaux à nageoires jaunes.

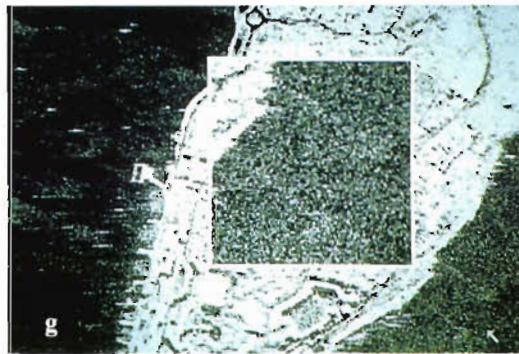
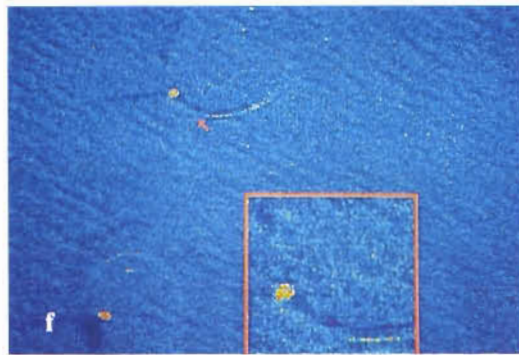
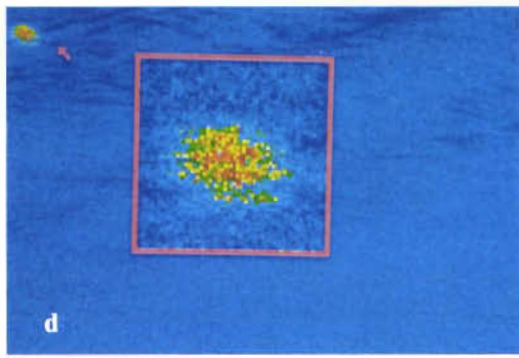
d. Détection SAR du banc de thons. Les opérateurs pour l'étude de la structure du banc sont en cours de définition.

e. Détection SAR de baleine.

f. Détection SAR de senneurs en action de pêche.

g. Détection SAR des pièges à poissons en zone côtière.





cette technique, son adaptation aux problèmes posés et finalement son potentiel à catalyser l'émergence d'une halieutique opérationnelle.

Exemple n° 1 : Le radar SAR en halieutique et l'expérimentation HAREM

L'expérimentation menée en août 1989 en Méditerranée occidentale intitulée HAREM (Halieutique et Radar : Expérimentation en Méditerranée) avait pour objectif l'évaluation du potentiel d'un radar aéroporté à synthèse d'ouverture (SAR : Synthetic Aperture Radar) dans le domaine de la pêche thonière pour la détection des bancs de thons de surface.

Qu'ils soient embarqués à bord d'avions ou de satellites, les radars imageurs sont des dispositifs qui fonctionnent dans le domaine des hyperfréquences. Ils permettent de restituer les données acquises sous forme d'images à deux dimensions, en niveaux de gris. Les longueurs d'onde utilisées, nettement en dehors du domaine du visible, jointes à la géométrie d'acquisition, font apparaître des phénomènes nouveaux ou vus sous un aspect différent de ce que fournissent des photographies classiques.

Schématiquement, un radar imageur émet une impulsion relativement étroite, qui se propage perpendiculairement à l'axe de vol du porteur (cela est dû à ce que l'antenne est fixée latéralement sur ce même porteur). Cette impulsion balaye ensuite les cibles et génère autant d'échos en retour, qui sont enregistrés après réception (ligne de l'image). Une autre impulsion suivra, créant en retour une autre ligne de l'image. L'émission des impulsions ayant lieu au fur et à mesure de l'avancement du porteur, donc de l'émetteur, engendrera une succession de lignes d'analyse du paysage, lignes qui, mises les unes à côté des autres, réaliseront l'image radar de la zone survolée [VAILLANT, 1985].

La plupart des radars opérationnels travaillent en mode "antenne réelle" ce qui limite leur résolution géométrique à quelques dizaines de mètres dans le meilleur des cas, alors que les largeurs de zones couvertes varient de 10 à 50 km. Une étape décisive a été franchie avec la mise au point du mode "synthèse d'ouverture" (SAR) qui utilise le déplacement de capteur à bord du porteur pour simuler une antenne fictive de très grande dimension ainsi que des techniques spécifiques de traitement du signal telles que la démodulation cohérente de l'écho. La résolution géométrique est alors typiquement de l'ordre du mètre et est indépendante de la distance entre le porteur et la cible. Le pouvoir discriminatoire, quant à la rugosité de la surface de la cible, est proche de la longueur d'onde, soit quelques centimètres.

Lors de la présentation du projet en octobre 1987, il avait été établi que le couple vecteur/capteur qui devrait être utilisé serait l'avion B17 de l'IGN et le radar VARAN-S du CNES. Suite à la défection du radar VARAN-S, puis du B17, nous avons utilisé le radar allemand E-SAR et l'avion Dornier 228 du DLR*.

* DLR : Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt.

Les différences essentielles du radar E-SAR par rapport au VARAN-S portent sur la fréquence utilisée (bande C au lieu de bande X), sur la fauchée (4 km au lieu de 10 km), sur une compensation inférieure des mouvements de l'avion, ainsi que sur un traitement en temps réel et en temps différé beaucoup moins optimisé. Issu d'une technologie moderne, le Dornier 228 est un monoplan à ailes hautes et train rentrant, mû par deux turbopropulseurs puissants. Il est remarquable par sa maniabilité très grande, ses possibilités de changement rapide d'altitude et une excellente visibilité tant à l'avant que sur les côtés.

Comme nous l'avons vu plus haut, au cours des vols effectués tant dans l'Atlantique tropical que dans le Pacifique Sud ou l'océan Indien, il nous a été donné d'observer, dans le cadre des programmes de radiométrie aérienne et prospection thonière (RAPT), confiés à l'ORSTOM, des centaines de bancs de thonidés à proximité ou non d'actions de pêche. Les milliers d'heures de vols réalisées ont constitué un échantillon suffisant pour une étude sur le comportement des bancs de thonidés en surface [PETIT & STRETTA, 1989 b].

Ces comportements se traduisent par des modifications de la surface de l'eau. Le but de HAREM a donc été de vérifier si, comme le laissaient penser les caractéristiques techniques du radar E-SAR, les bancs de thons et apparences associées (cétacés, épaves...) sont détectables et discernables du bruit radiométrique depuis l'avion volant en haute altitude et sur l'ensemble de la fauchée.

L'expérimentation a pu se dérouler en Méditerranée occidentale dans le golfe du Lion. Dans le Bassin liguro-provençal, au milieu de l'été, la stratification des masses d'eau est généralement bien en place et la plupart des fronts thermiques sont combinés à la circulation verticale et horizontale, les mouvements liés au courant modifiant les pentes des couches isothermes [PHILIPPE & HARANG, 1982]. A partir de là, les gradients thermiques horizontaux apparaissent. En période de mistral ou/et tramontane, des gradients thermiques dus à des upwellings locaux peuvent également donner naissance à des fronts. Enfin, d'autres fronts sont liés à la circulation cyclonique et se manifestent à la limite des eaux froides produites par la divergence et des eaux chaudes qui s'enroulent autour de ces dernières. L'amplitude atteinte par les gradients à cette saison peut aller jusqu'à 3 à 4°C pour 5 km particulièrement dans le sud du Bassin liguro-provençal. Compte tenu du comportement de concentration des bancs de thons près de ces forts gradients thermiques [STRETTA, 1977 ; PETIT, 1984], on comprendra pourquoi cette région, *a priori*, constitue pour notre expérimentation un excellent terrain d'essai, d'autant plus que les surfaces concernées sont restreintes.

La difficulté principale a été d'estimer le bon créneau météorologique d'abord, halieutique ensuite, de façon à avoir synchrones pêcheurs, bancs de thons ainsi qu'apparences et acquisitions radar. Dès les premiers vols, nous avons pu constater l'identification aisée des bancs, même sur l'épreuve-minute (*quick look*). Les premières scènes radar ont été enregistrées comprenant des cachalots, des bancs de thons d'environ 5 tonnes chacun, un banc de thon près d'une traînée d'huile

(pollution) et des bateaux en pêche. Ainsi, dès les vols suivants, nous avons pu réaliser l'expérience inverse : détecter par radar les bancs de thon dans une zone hors pêcherie, identifier ces bancs par descente rapide du Dornier et enfin transmettre ces informations aux pêcheurs.

En résumé, les bancs de thons, les cétacés (baleines et dauphins), les bateaux et leurs sennes, sont détectables et discriminables par un radar de type SAR. C'est le principal résultat de l'expérimentation HAREM qui a ainsi permis de lever le doute sur cette possibilité de détection. Pour des raisons de disponibilité de matériel, nous avons pu mettre en oeuvre un radar à fauchée limitée : seulement 4 km. Il n'est pas techniquement difficile de porter cette dernière à 20 km ou plus. De même, l'altitude choisie pour les vols - 1 500 à 2 000 m - nous a été dictée par la volonté de pouvoir vérifier avec le même avion la réalité des cibles repérées. Un survol à 3 000 m ou plus, par principe même du SAR, n'affecterait en rien la résolution des images.

Enfin, le traitement en cours des données acquises devrait autoriser la synthèse d'images à haute résolution et l'analyse du signal et de la texture de la cible-banc (figure 3).

Dans la mesure où HAREM est une expérience, nous n'avons développé ni matériel ni logiciel et avons cherché à utiliser ce qui était disponible. Les résultats étant positifs, si un véritable programme de recherche est initié, il serait indispensable d'améliorer le système capteur ou plutôt de l'adapter aux spécificités propres à la recherche halieutique.

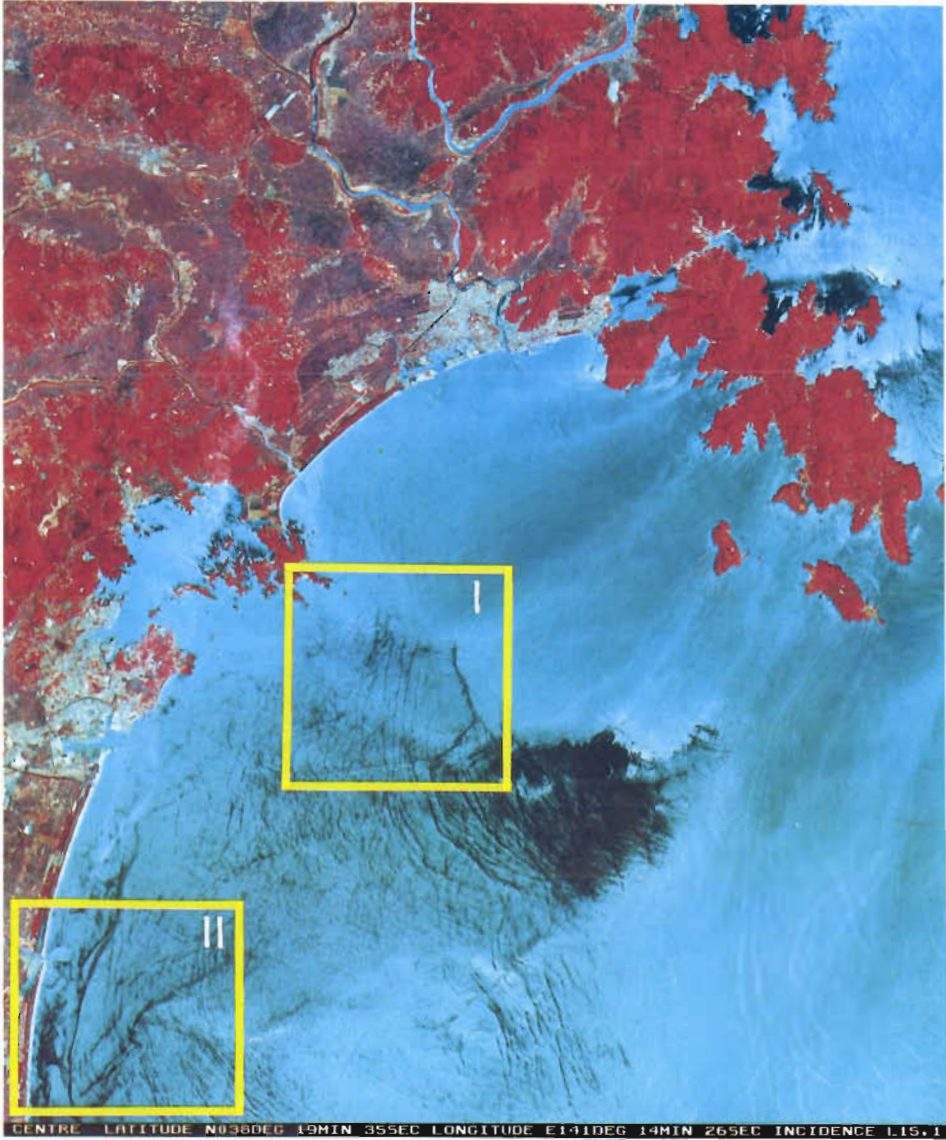
En passant d'une expérimentation à un programme de recherche, l'ensemble des méthodes qui tenteront d'évaluer le stock à partir de l'échantillon de surface (*transect line*, distance mathématique, etc.) devront être testées. Pour cela, il sera nécessaire également de réaliser des études quantitatives sur la relation existant entre le tonnage et l'espèce et le signal SAR reçu. Bien entendu, ceci devra être fait dans différents environnements météorologiques, océanographiques et halieutiques.

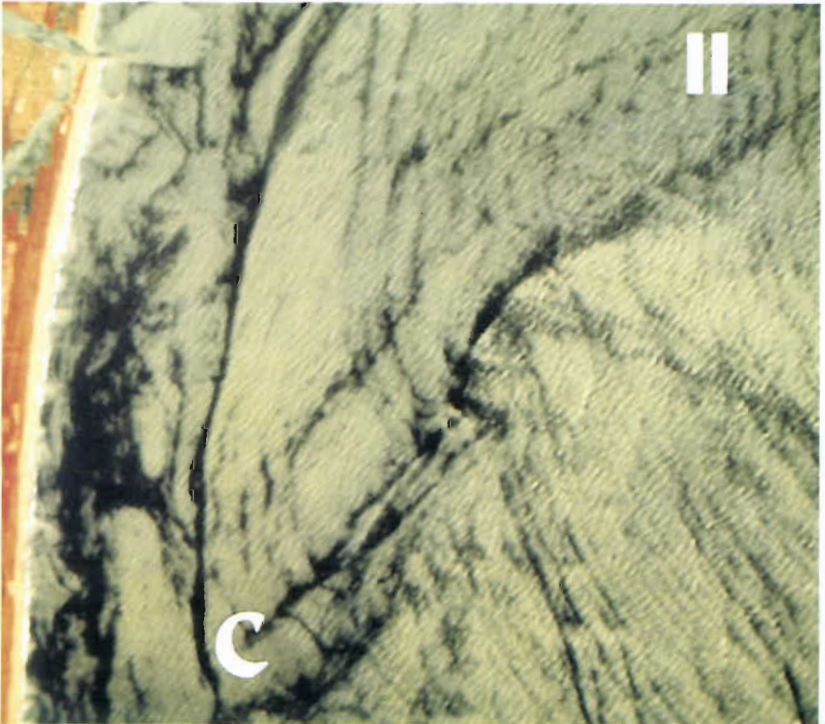
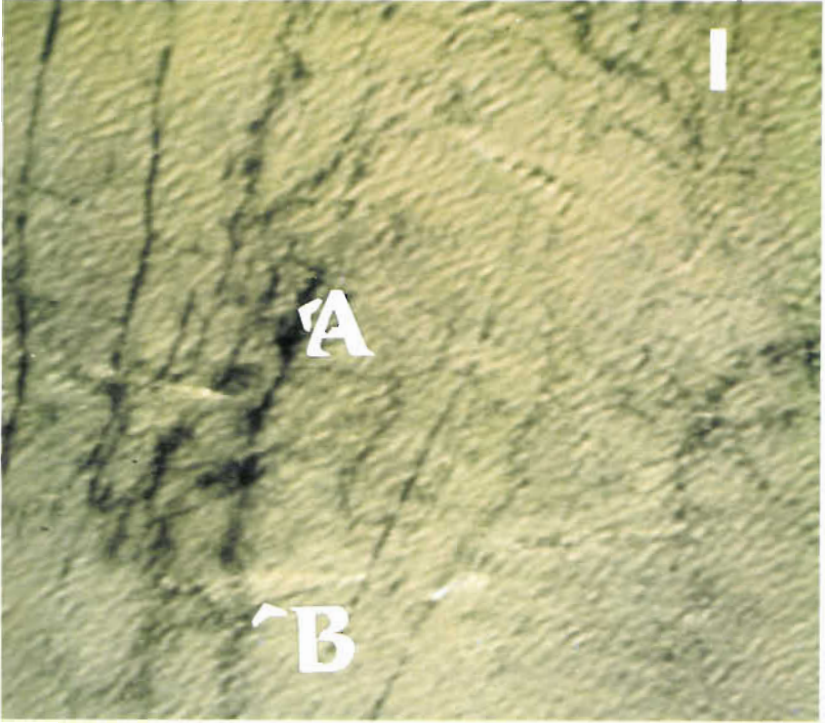
Exemple n° 2 : SPOT comme satellite océanographique

Observer la surface et l'état de la mer est une obligation, non pas seulement sur le plan de la connaissance fondamentale des phénomènes océanographiques mais surtout sur le plan économique (navigation, plate-forme pétrolière, pêche...). Jusqu'à présent, la visualisation par satellite de cette surface s'est faite surtout à partir de radar comme le capteur du type SAR qui équipait SEASAT ou le système SIR-A (Shuttle Imager Radar-A) embarqué sur la navette spatiale américaine en novembre 81, puis SIR-B par la suite. Ces radars visaient obliquement la surface de la mer et fournissaient des données sur la rugosité de surface, entre autres sur les vagues. De plus, dans la partie visible du spectre, les capteurs MSS (Multi Spectral Scanner) puis TM (Thematic Mapper) des satellites de la série LANDSAT ont déjà montré qu'ils pouvaient, dès occasionnellement, participer à l'observation de phénomènes océanographiques ou de l'état de la mer. Mais ce fut une réelle surprise de constater que le satellite SPOT 1 (Satellite pour l'observation de la

FIGURE 4 : Image SPOT du 18 juin 1987, baie de Sendai (Japon)

- A : ondes internes ;**
- B : sillage du bateau ;**
- C : début d'enroulement de tourbillon.**





terre), contrairement à ce qui avait été prévu ou même simulé, fournissait d'excellentes images de la surface des océans.

Ces performances inattendues ont alors été étudiées plus en détail [WADSWORTH & PETIT, 1988 ; WADSWORTH, 1988]. Certes, la haute résolution des images SPOT (vingt mètres sur les images couleur, dix mètres sur les images noir et blanc) pouvait sembler un atout, mais elle n'apporte en fait rien de plus pour l'océanographie spatiale, du fait de l'importance de l'échelle des phénomènes observés. En revanche, ce qui joue le rôle majeur dans l'efficacité surprenante de SPOT est la possibilité de dépointer le capteur, c'est-à-dire de viser non seulement verticalement mais obliquement la surface de la mer ; le dépointage angulaire peut atteindre plus ou moins 27 degrés, ce qui, du fait de la rotondité de la Terre, correspond à 29 degrés au sol environ. Les images multispectrales ainsi obtenues, en visée oblique face à l'est à proximité du reflet spéculaire, mémorisent certains phénomènes océanographiques de surface. Sur LANDSAT qui vise à la verticale ou sur SPOT lorsque le dépointage est nul ou faible, c'est la couleur de la mer que l'on enregistre. Cela n'est pas le cas pour les images SPOT en visée oblique. En effet, l'une des trois bandes spectrales, dont les réponses sont très corrélées entre elles, est située dans le proche infrarouge qui n'autorise aucune pénétration dans l'eau. Or de telles images montrent des signaux très voisins dans les trois bandes. Seuls les effets de surface sont ainsi observables. De plus, les phénomènes détectés ont une morphologie semblable à celle obtenue sur des images radar. Il est donc certain que ce que l'on étudie sur les images SPOT, en visée oblique face à l'est, est dû aux variations locales de la rugosité de la surface de la mer. Or l'on sait depuis l'existence des images radar que la rugosité de la mer est modulée par des phénomènes océanographiques de profondeur.

L'ouverture du faisceau est faible ($4^{\circ}13'$) et la détection, ainsi homogène sur une surface d'environ soixante par soixante kilomètres, correspond à une excellente échelle d'observation des phénomènes océanographiques. Ce champ est en effet plus restreint que celui obtenu jusqu'ici par des capteurs portés par avion ou même par satellite, comme LANDSAT, dont le champ d'observation généralement trop grand ne permettait pas une détection aussi homogène. De plus, le traitement numérique des images, nécessaire avec LANDSAT, du fait de la faible densité des images au-dessus de la mer, est inutile avec les images SPOT directement restituables et utilisables, toujours lorsque l'on dépointe le capteur face à l'est. Les images présentées ici illustrent bien les performances de SPOT. Ainsi la figure 4 représente une image SPOT prise le 18 juin 1987 dans la région de Sendai (Japon). Sur cette image, apparaît ce qu'on appelle des trains d'ondes internes (en A). Elles ont pour caractéristique une longueur d'onde bien supérieure à la houle ; sur cette image, elle est de l'ordre de un à deux kilomètres. L'oscillation de la thermocline en profondeur a un effet en surface sur les vagues dites capillaires, levées par le vent. Cette oscillation génère les ondes internes peuvent se déplacer à une vitesse d'environ un demi-mètre par seconde. Lorsque leur amplitude atteint plusieurs dizaines de mètres, elles exercent des efforts importants sur les structures d'exploitation

pétrolière ou aquacole "off shore". Il est donc nécessaire de les mieux connaître et de pouvoir les suivre aussi nettement sur une image satellite.

La figure 4 révèle également un début de tourbillon, d'enroulement océanographique bien connu et parfois étudié par des données de satellites météorologiques (en C). Ces tourbillons restent d'un grand intérêt pour les halieutes, car ils sont le lieu d'échanges privilégiés entre l'océan et l'atmosphère ainsi qu'entre masses d'eau. Enfin, sur cette image (en B), le sillage de bateaux est visible sur une longue distance ; ceci est l'indice d'une grande stabilité de la partie superficielle de la mer et donc d'une certaine stabilité météo-océanographique.

Toujours sur cette même image se remarquent immédiatement des zones sombres de faible intensité sur la surface de l'océan qui, comme dans une réponse de type radar, est alors particulièrement calme. Ceci est vrai dans les fonds de baies bien déventés et au centre de la scène qui correspond à une poche de remontée topographique rapide sur laquelle les ondes internes viennent se briser avant de continuer à se propager vers l'ouest. Comme dans les données radar, la partie sombre de ces ondes est doublée par une partie plus claire qui indique l'amont du sens de propagation. Dans le côté nord-est de la scène, les zébrures traduisent une houle entrecroisée liée pour partie au vent de secteur nord-est.

L'étude de la houle a une grande importance pour toutes les structures flottantes (tanker, plate-forme,...). Or, jusqu'ici, les modèles mathématiques de houle se sont révélés trop simples, ne prenant pas en compte certains phénomènes non linéaires. Longtemps, les paramètres sur la houle ont été obtenues uniquement à partir de bouées qui fournissaient des données trop ponctuelles débouchant sur des statistiques limitées dans le temps et l'espace. L'utilisation par tout temps des images radar par satellite permet aujourd'hui une bonne visualisation d'ensemble de la houle. Mais le passage de la visualisation à la modélisation est difficile, car il faut détecter la houle au milieu des autres mouvements de la surface de la mer qui agissent aussi sur l'élaboration de l'image radar, alors qu'avec SPOT on obtient une image instantanée qui donne directement la mesure de la longueur d'onde de la houle ou de sa direction.

Cette très brève analyse de la figure 4 montre qu'il est possible, dans certaines conditions, de décrire un paysage océanographique comme un paysage terrestre à partir d'une image SPOT et d'en tirer des hypothèses et des renseignements sur les phénomènes en présence. Ceci peut même amener à concevoir des applications opérationnelles. C'est ce que PETIT *et al.* [1989] ont fait en proposant une méthode de détection des hauts fonds en montrant l'utilité pour la pêche thonière (figure 5).

Bien sûr, SPOT présente des limites. Tout d'abord, il ne voit pas la nuit ni à travers les nuages, comme peut le faire un satellite muni de radar. D'autre part, pour observer la rugosité de surface liée à des phénomènes internes, il faut un minimum de rugosité au départ, c'est-à-dire un minimum de vent (vent de force un), ce qui n'est pas très limitatif ; en revanche, si le vent est trop fort (supérieur à force six), les vagues déferlantes masquent les variations de rugosité de surface.

Cependant, il faut insister sur le fait que personne ne s'attendait aux performances de SPOT sur la mer. Du reste actuellement, la société SPOT-IMAGE n'enregistre pas systématiquement les images en mer, car jusqu'ici la demande concerne exclusivement les images terrestres. Il existe donc pour les océanographes la possibilité, s'ils le demandent, d'accéder aux images prises au-dessus de la mer, images qui seront disponibles et ne poseront probablement pas de conflit de programmation des acquisitions. Ceci amène à repenser le système d'exploitation des données des satellites terrestres. En ce sens, nous pouvons reprendre ici la conclusion de l'article précédemment cité [PETIT *et al.*, 1989] : "*Cet article n'a que la prétention limitée d'essayer d'associer deux domaines - pêche et télédétection - sur le problème complexe des hauts-fonds et d'essayer d'adapter le plus possible l'outil et la donnée au but recherché, en l'occurrence la télédétection et la pêche en vue de l'amélioration du rendement.*"

"Dans ce but, se dessine une nouvelle stratégie d'exploitation des données SPOT qui pourrait être utile dans d'autres domaines. Les règles de financement des images d'une part et de leur exploitation de l'autre ne peuvent être les mêmes pour le domaine terrestre et côtier et le domaine océanique. Il n'est pas concevable de devoir payer une image complète alors que l'information utile n'est contenue que dans quelques centaines de pixels. De même, l'exploitation classique de l'image en passant par les quick-looks n'est pas utilisable ici. Il lui sera préféré un petit système expert simple, capable d'analyser les structures de surface, de façon systématique et automatique sur les images brutes de l'océan, et de sélectionner des images potentiellement intéressantes pour un examen ultérieur. C'est cette notion de système expert permettant la sélection automatique d'images pour un problème précis qui constitue une nouvelle stratégie d'exploitation des images. Par un tel système, on devrait pouvoir disposer, à moindre frais et à court terme, d'un inventaire exhaustif de hauts-fonds intéressant la pêche, et de son suivi, réalisant ainsi une bonne adéquation entre outil et données."

Exemple n° 3 : la détection d'efflorescences phytoplanctoniques par des capteurs satellitaires

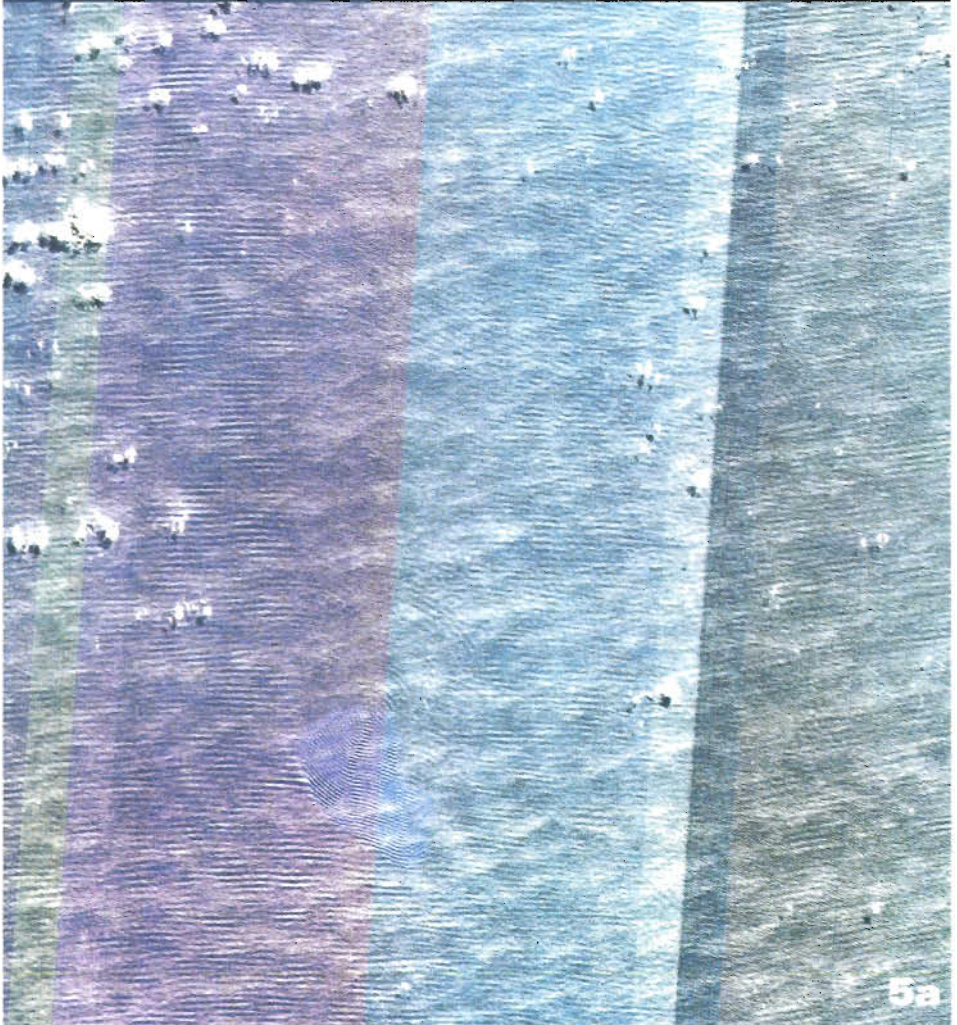
Une des clés de l'halieutique des prochaines années sera de comprendre comment se répartit, s'élabore et se déplace, l'environnement euphorique des espèces pêchées. Ceci sera particulièrement vrai pour le thon. De là, la détermination des zones riches en production primaire, à la base de la chaîne alimentaire, leur évaluation, leur répartition spatio-temporelle, leur rôle dans le cycle du carbone et de l'azote, seront des points clés de l'océanographie et de l'halieutique opérationnelle. Un exemple de l'efflorescence phytoplanctonique dont l'ampleur et les conséquences dans le cycle des éléments fondamentaux n'avaient jamais été soupçonnées concerne le développement de cyanobactéries dans la province néo-calédonienne, détecté par le capteur CZCS du satellite NIMBUS-7. Cet exemple est développé plus loin dans l'article de DUPOUY [1990].

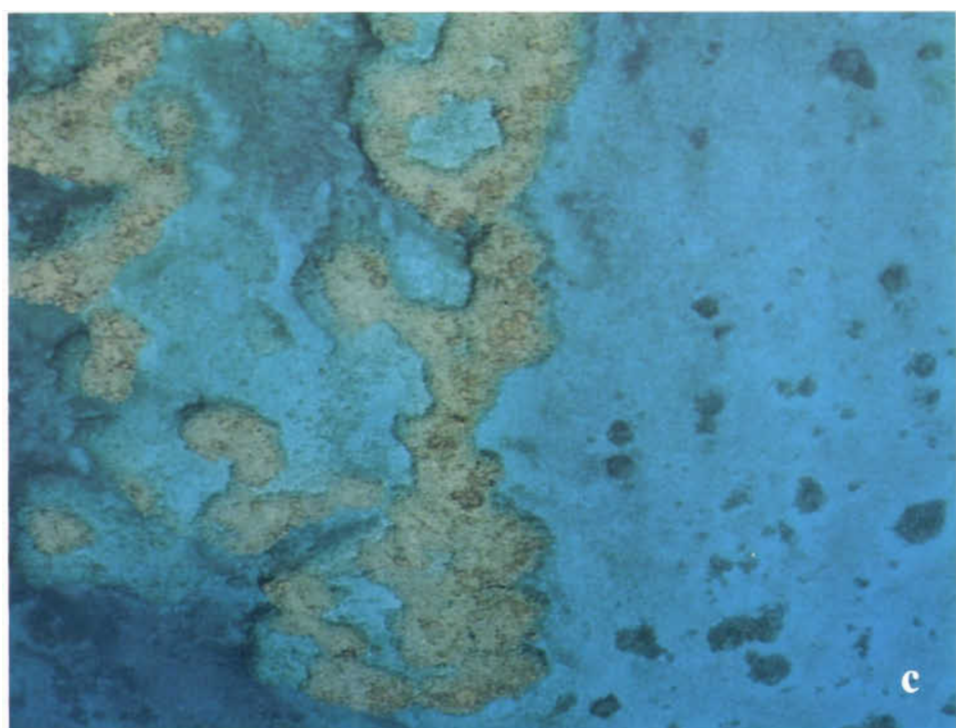
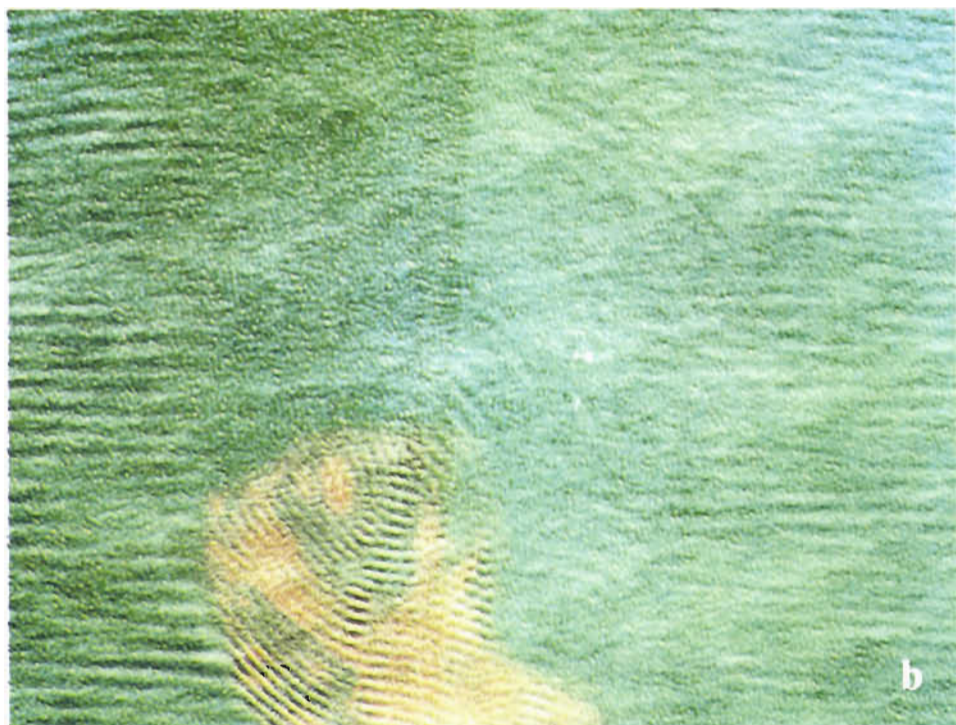
FIGURE 5 : Image SPOT du 16 mai 1986 - Banc Clark, îles Marquises (d'après PETIT *et al.*, 1989). Coordonnées du centre de l'image : latitude : 8° 00' 57" Sud, longitude : 139° 35' 35" Ouest.

a. Sur cette image, quasiment brute (le décalage inter-barrette n'est même pas redressé), la déformation de la houle, en forme d'empreinte digitale, est bien visible au centre et la perturbation générée dans le train d'onde se propage sur plus de la moitié de la scène, soit 30 km.

b. Après un traitement simple qui consiste à combiner le canal XS1 (en rouge) pour laisser apparaître les traces du haut-fond corallien et le canal XS2 qui ne pénètre pas dans l'eau, la concordance entre la présence du haut-fond et l'origine de la modification de la houle est ainsi mise en évidence.

c. Vue du haut-fond dans sa partie la moins immergée (environ 3 m), photographié à une altitude de 150 m au cours des opérations de radiométrie aérienne et prospection thonière.





SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Volontairement, les exemples choisis ci-dessus ne correspondent pas à des études "classiques" qui, telles les analyses de températures de surface, bénéficient d'une abondante littérature. Par là, nous avons voulu montrer que la télédétection aérospatiale est un outil précieux dont il faut savoir se servir non seulement avec habileté mais en plus avec imagination et qu'alors seulement elle peut quantifier et "visualiser" certains concepts essentiels de l'océanographie et de l'halieutique. Elle doit, de ce fait, concourir à leur surveillance spatio-temporelle.

L'océanographie hauturière et l'halieutique thonière présentent des spécificités analogues quant aux échelles spatio-temporelles des mesures nécessaires à cette surveillance et aux éléments essentiels des bases de leur recherche. Dans la prochaine décennie seront lancés plusieurs satellites (ERS-1 ; JERS-1 ; RADARSAT ; EOS) très largement destinés à l'océanographie hauturière. Il semble donc qu'avec les moyens spatiaux, une nouvelle ère s'ouvre, à très court terme, à l'océanographie, donc à l'halieutique, planétaire.

Cependant, pour devenir réellement opérationnelles, halieutique et océanographie devront reconsidérer les stratégies d'informations - qu'il s'agisse d'observations en mer ou par satellite - et de transmission de ces données.

La télédétection aérospatiale devrait donc être l'outil qui favorisera le réel développement des méthodes directes. Il est classique de dire que le satellite est le premier moyen d'étude à l'échelle d'un océan et qu'il peut voir pour prévoir. Au-delà de cette assertion, nous pensons que l'outil télédétection permettra d'observer pour gérer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEVERTON (R.J.H.) & HOLT (S.J.), 1957. - On the dynamics of exploited fish populations. *Fishery investigations*, (2) **19**, 533 p.
- DICKIE (L.M.), KERR (S.R.) & SCHWINGHAMER (P.), 1987. - An ecological approach to fisheries assessment. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, **44**, suppl. 2, pp. 68-74.
- DIEMENTIEVA (T.F.), 1971. - Considérations sur la formation des stocks exploités et sur les fluctuations des propriétés biologiques des populations de poisson en vue de l'établissement de prévisions de pêche, in : *Evaluation des stocks exploités, techniques des pêches*, pp. 3-18. - Biarritz : Centre d'études & de recherches scientifiques. - (Traductions des travaux du VNIRO Moscou).
- DUPOUY (C.), 1990. - La chlorophylle de surface observée par le satellite NIMBUS-7 dans une zone d'archipel (Nouvelle-Calédonie et Vanuatu). Une première analyse. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco*, n° spécial **6**, pp. 125-148.

- DUPOUY (C.), PETIT (M.) & DANDONNEAU (Y.), 1988. - Satellite detected cyanobacteria bloom in the southwestern tropical Pacific. Implication for oceanic nitrogen fixation. *International journal of remote sensing*, **9**, 3, pp. 389-396.
- FONTENEAU (A.), 1985. - Panorama de l'évolution de la pêche thonière dans le monde (1946-1984). *Pêche maritime*, **64**, 1283, pp. 90-94.
- KEARNEY (R.E.), 1978. - Le programme d'étude et d'évaluation des stocks de bonites de la CPS. *Document de travail - Conférence annuelle de la CPS*, **11**, 8 p.
- KLEIBER (P.), ARGUE (A.W.) & KEARNEY (R.E.), 1987. - Assessment of Pacific skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) resources by estimating standing stock and components of population turnover from tagging data. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, **44**, 6, pp. 1122-1134.
- LAUREC (A.) & LE GUEN (J.-C.), 1981. - Dynamique des populations marines exploitées. Tome 1. Concepts et modèles. *Publications du Centre national pour l'exploitation des océans, Rapports scientifiques et techniques*, **45**, 117 p.
- MAUGHAN (P.M.), MARMELSTEIN (A.D.), TEMPLE (O.R.) & GAROFALO (D.), 1972. - *The impact of remote sensing data on the U.S. menhaden and shrimp fisheries*. - Washington, D.C. : Earth satellite corporation. - 128 p. - (Final report prepared for Spacecraft oceanography project, contract No. N62306-71-C-0173).
- MENDELSSOHN (R.) & ROY (C.), 1986. - Environmental influences on the French, Ivory Coast, Senegalese and Moroccan tuna catches in the Gulf of Guinea, in : *Proceedings of the ICCAT conference on the International skipjack year program*, ed. P.E.K. Symons, P.M. Miyake & G.T. Sakagawa, pp. 170-188. - Madrid : International commission for the conservation of Atlantic tunas.
- PETIT (M.), 1976. - Ecologie du germon et télédétection aérospatiale. *Mémoire d'ingénieur (Diplôme d'agronomie approfondie - halieutique) Ecole nationale supérieure d'agronomie, Rennes*, 72 p.
- PETIT (M.), 1984. - Aerial radiometry and tuna survey: a method for evaluation of surface tuna stocks in New Caledonia-Vanuatu area, in : *Proceedings of the 35th annual tuna conference*, pp. 17-18. - La Jolla : Inter-American tropical tuna commission.
- PETIT (M.), 1986. - Coherent theory on tuna behavior, in : *Proceedings of the 37th annual tuna conference, May 18-21, 1986*, ed. R.W. Brill, p. 14. - Honolulu : Southwest fisheries center NMFS.

- PETIT (M.) & HENIN (C.), 1982. - Radiométrie aérienne et prospection thonière. Rapport final. *Note et documents d'océanographie - Mission ORSTOM de Port-Vila*, 3, ' 6 p.
- PETIT (M.) & KULBICKI (M.), 1983. - Radiométrie aérienne et prospection thonière dans la zone économique exclusive de Polynésie française. *Notes et documents - ORSTOM Tahiti, océanographie*, 20, 98 p.
- PETIT (M.) & STRETTA (J.-M.), 1989 a. - Deux outils disponibles pour une halieutique thonière opérationnelle : la télédétection aérospatiale et la modélisation par système expert. *Collective volume of scientific papers - International commission for the conservation of Atlantic tunas*, 30, 2, pp. 500-505.
- PETIT (M.) & STRETTA (J.-M.), 1989 b. - Sur le comportement des bancs de thons observés par avion. *Collective volume of scientific papers - International commission for the conservation of Atlantic tunas*, 30, 2, pp. 488-490.
- PETIT (M.), STRETTA (J.-M.) & DUPOUY (C.), 1989. - Contribution de la télédétection aérospatiale à l'étude des thonidés du Pacifique occidental. *FAO document technique sur les pêches*, 302, pp. 127-140.
- PETIT (M.), STRETTA (J.-M.), SIMIER (M.) & WADSWORTH (A.), 1989. - Anomalies de surface et pêche thonière : SPOT et la télédétection de zones de pêche par l'inventaire des hauts-fonds. *Mappemonde*, 89, 3, pp. 13-19.
- PHILIPPE (M.) & HARANG (L.), 1982. - Surface temperature fronts in the Mediterranean Sea from infrared satellite imagery, in : *Hydrodynamics of semi-enclosed seas, proceedings of the 13th international Liège colloquium on ocean hydrodynamics*, ed. J.C.J. Nihoul, pp. 91-128. - Amsterdam : Elsevier. - (Elsevier oceanography series ; 34).
- POSTEL (E.), 1969. - Répartition et abondance des thons dans l'Atlantique tropical, in : *Proceedings of the Symposium on the oceanography and fisheries resources of the tropical Atlantic, Abidjan, Ivory Coast, 20-28 October 1966, review papers and contributions*, pp. 109-138. - Paris : Unesco.
- POSTEL (E.), 1973. - *Théorie des pêches (dynamique des populations exploitées)*. Fascicule I. - Rennes : U.E.R. des sciences biologiques, Biologie halieutique. - IV-116 p.
- STRETTA (J.-M.), 1977. - Température de surface et pêche thonière dans la zone frontale du cap Lopez (Atlantique tropical oriental)

en juin et juillet 1972, 1974 et 1975. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, **15**, 2 pp. 163-180.

STRETTA (J.-M.), 1990. - La télédétection infrarouge thermique peut-elle aider à la prévision des zones de pêche ? La réponse praxéologique. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco*, n° spécial **6**, pp. 173-198.

STRETTA (J.-M.) & PETIT (M.), 1989. - Télédétection aéro-spatiale et pêche thonière en Atlantique inter-tropical. *FAO document technique sur les pêches*, **302**, pp. 99-109.

STRETTA (J.-M.), PETIT (M.) & SIMIER (M.), 1990. - Intégration de la télédétection aérospatiale dans la base de données d'un système expert dédié à la pêche thonière. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco*, n° spécial **6**, pp. 199-207.

STRETTA (J.-M.) & SLEPOUKHA (M.), 1983. - Les satellites, l'ordinateur et l'aide à la pêche thonière. *Pêche maritime*, **62**, 1258, pp. 38-40.

TROADEC (J.-P.), 1982. - Introduction à l'aménagement des pêcheries : intérêt, difficultés et principales méthodes. *FAO document technique sur les pêches*, **224**, V-65 p.

VAILLANT (D.), 1985. - *An airborne synthetic aperture radar for research in microwave remote sensing*. - Paris : European space agency. - 45 p. - (ESA SP-233).

VAILLANT (D.) & WADSWORTH (A.), 1987. - Preliminary results of some remote sensing campaigns of the French airborne SAR VARAN-S, in : *IGARSS 87, remote sensing: understanding the earth as a system*, ed. M.C. Dobson, pp. 495-500. - New York : IEEE.

WADSWORTH (A.), 1988. - SPOT-1, un satellite qui n'a pas peur de l'eau ! *La recherche*, **19**, 198, pp. 536-538.

WADSWORTH (A.) & PETIT (M.), 1988. - SPOT, un satellite pour l'océanographie ? , in : *SPOT 1, utilisation des images, bilan, résultats*, pp. 1087-1094. - Toulouse : CEPADUES.

REGIONS COTIERES

Les responsables des pêches côtières ne doivent pas perdre de vue que de nombreuses espèces de poissons capturés par les flottilles de pêche ont une phase de leur vie qui se déroule près des côtes dans des biotopes particuliers tels les herbiers, les zones rocheuses, les estuaires ou les zones récifales.

Ces milieux ont la particularité d'être difficiles d'accès avec les moyens classiques de l'océanographie ; la télédétection se révèle être un outil puissant pour mieux les connaître, en calculer la superficie et même évaluer par télédétection satellitaire la biomasse d'une espèce de coquillage importante dans l'économie des îles du Pacifique.

Si la télédétection apporte une aide certaine dans la connaissance de ces biotopes, elle nécessite toutefois un important travail de terrain. C'est ce travail de terrain de très grande précision qui est proposé par G. FREDJ et son équipe dans une baie de Sardaigne. L'article de T. BELSHER dresse une cartographie des végétaux marins en Europe occidentale et dans une île du Pacifique. De son côté W. BOUR utilise la haute résolution du satellite SPOT pour faire l'inventaire et évaluer les ressources récifales en Nouvelle-Calédonie. Enfin J. PAGES et son équipe présentent une étude originale sur un estuaire tropical dans lequel le travail de terrain, là encore, a permis de préciser le rôle des zones peu profondes dans cet estuaire.

Apport du satellite SPOT à la cartographie des végétaux marins *

par

THOMAS BELSHER

*IFREMER, Centre de BREST
BP 70, 29263 Plouzané (France)*

RESUME

L'utilisation du satellite SPOT permet de montrer que la majorité des problèmes d'inventaire, de surveillance et d'évaluation de stocks de macrophytes marins des océans du globe peuvent être résolus par la télédétection satellitaire à haute résolution.

ABSTRACT

The use of SPOT satellite shows that most problems of inventory, survey and standing crop of seaweeds in the World Ocean can be solved by high-resolution satellite remote sensing.

* Cette étude a été soutenue par l'action thématique programmée (ATP) "Télédétection spatiale 1985" dans le cadre des programmes d'évaluation préliminaire du satellite SPOT (PEPS) : VEGMA, n° 97. Elle a été réalisée avec la collaboration de P. ARZEL, H. BEN MOUSSA, J.Y. PIRIOU, V. CHAPRON, L. DREVES G. YOUENOU (IFREMER, Centre de Brest), et M. VIOLLIER (CNRS) pour la scène BRETNOR ainsi que de A. MEINESZ (Laboratoire de biologie et d'écologie marine, Université de Nice), et de C. PAYRI (Antenne du MNHN/EPHE, Moorea) pour la scène TAMORA.

Le projet "Végétaux marins" (PEPS "VEGMA") visait à démontrer que la majorité des problèmes d'inventaire, de surveillance et d'évaluation de stocks posés par les macrophytes marins pouvait être résolue par la télédétection satellitaire répétitive à haute résolution de type SPOT [BELSHER, 1987]. Nous proposons de commenter deux scènes SPOT, l'une acquise en Bretagne nord le 25 mai 1986 à 11h 28mn 28s T.U. (intitulée "scène BRETNOR"), l'autre en Polynésie française (intitulée "scène TAMORA") le 11 août 1986 à 20h 14mn 44s T.U.

SCENE "BRETNOR" (BRETAGNE NORD, FRANCE)

Sur ce secteur, lieu principal de récolte des algues françaises, les résultats obtenus concernent la zone intertidale exondée et la zone sublittorale.

Zone intertidale exondée

La couverture végétale est mise en évidence à partir de l'indice de végétation classique $(XS3 - XS2)/(XS3/XS2)$ ce qui permet d'en calculer la superficie. Les études radiométriques de terrain montrent que la différenciation entre espèces paraît possible grâce à leur équipement pigmentaire [VIOLLIER *et al.*, 1985 ; BEN MOUSSA *et al.*, 1989].

Aussi, un indice pigmentaire défini par le rapport $XS1/XS2$ et des classifications, par traitement statistique de l'image, autorisent la discrimination, au sein de cette couverture, plusieurs peuplements, en particulier ceux à dominantes de Chlorophycées et de Fucales. Ainsi, dans l'archipel de Molène, la superficie de l'estran découvert par la marée du 25 mai 1986 représente 7,94 km² dont 6,54 km², soit 80 %, sont recouverts par la végétation marine. Les Chlorophycées occupent environ 0,85 km² avec une couverture moyenne de 92 %.

Pour le secteur allant des abers à Brest, la couverture végétale à dominante de Fucales s'élève à 10,7 km², soit 74 % de la zone découverte traitée. A lui seul, le secteur s'étendant de Plouguerneau à Porspoder en comprend 9,06 km², soit 85 % de la végétation télédéetectée. La radiométrie de terrain a également montré que l'épaisseur végétale sondée est faible et qu'en conséquence, la biomasse représentée ne peut toujours pas être déterminée directement (figure 1).

Zone sublittorale

La végétation immergée est perceptible, à l'aide de l'expression $(XS1)^2/XS2$, qui constitue un véritable indice de transparence jusqu'à la profondeur de - 12 m [BEN MOUSSA, 1987].

Pour l'archipel de Molène, la cartographie de la couverture végétale a été levée. La zone concernée correspond à 64,95 km². La superficie du secteur qui s'étend entre + 1 m et - 10 m (par rapport au zéro des cartes marines) et où la couverture végétale atteint au moins 70 %, a été estimée à 32,27 km² (± 5 %). Au sein de cette couverture végétale, *Laminaria digitata*, principale espèce exploitée, entre + 1 et - 3 m, représenterait 18,37 km², soit 28,3 % du secteur traité. Les

emplacements occupés par plusieurs espèces d'algues calcaires, dont l'association forme les gisements de maërl eux aussi exploités, sont également indiqués.

Pour les secteurs des abers, les peuplements à dominante de Laminaires sont évalués à au moins 24 km². Une houle bien formée, déferlant sur le secteur côtier, pénalise le traitement (figure 1).

La perception de la végétation algale, dans cette région où la transmission optique de l'eau est très élevée ($K(550 \text{ nm}) = 0,05 \text{ m}^{-1}$), est théoriquement possible jusqu'à - 15 m.

Un suivi rationnel de l'exploitation de la végétation marine peut donc, enfin, grâce à la télédétection satellitaire à haute résolution, être envisagé.

SCENE "TAMORA" (TAHITI-MOOREA, POLYNESIE FRANCAISE)








Dans les écosystèmes coralliens, les fluctuations de la végétation marine qui peuvent être de grande ampleur, sont liées, en majeure partie, à l'état de santé de l'écosystème. Encore faut-il, pour pouvoir juger de l'effet d'une pollution, dégager la part due aux variations naturelles. La scène TAMORA constitue donc la première étape d'une cartographie répétitive destinée à diagnostiquer l'état de l'écosystème et son évolution probable.

Une décorrélation des deux premiers canaux de SPOT et le remplacement du canal XS2 par l'expression $(XS1)^2/XS2$ permet une classification des principaux composants de l'écosystème corallien. Seize thèmes sont discriminés, dont dix bionomiques. La couverture végétale immergée, implantée sur le platier corallien et ses micro-atolls, ainsi que celle du récif barrière découverte irrégulièrement et sporadiquement, sont distinguées des autres constituants du lagon (figure 2).






Dans les eaux généralement calmes et très claires du lagon, la superposition des données bathymétriques issues de la carte SHOM (n° 6658 - île de Moorea) au traitement réalisé sur l'image SPOT, est spectaculaire. Celui-ci traduit, de manière colorée, la bathymétrie des fonds en fonction, non seulement de la profondeur, mais de leur nature. Ainsi, les éléments détritiques sont identifiés devant la passe Taotoï jusqu'à - 16 m, ainsi que les hauts-fonds des baies de Haumi, Afareaitu, Vaïare. Cette profondeur ne constitue pas la limite des performances de SPOT dans les écosystèmes coralliens, l'étude ayant été volontairement restreinte, pour des raisons logistiques, au lagon, où les profondeurs sont généralement plus faibles. La perception de SPOT est très certainement bien supérieure.

Par ailleurs, pour la scène TAMORA, la superficie des terres émergées est officiellement de 133,50 km². Le calcul, quasi instantané, à partir de la donnée SPOT, permet de chiffrer la superficie de l'île à 133,84 km² d'où une précision de 0,25 %. Mais il n'est pas dit, compte tenu des erreurs de mesure au sol, que le chiffre officiel soit exact. La précision serait alors celle correspondant au niveau de l'acquisition satellitaire.




DOMAINE SUBLITTORAL

-  Végétation à fleur d'eau
-  Substrat sans végétation
-  Substrat sans végétation
-  Substrat profond sans végétation
-  Végétation à faible profondeur
-  Végétation dense à dominante de laminariales (dont *L. digitata*)
-  Végétation dense à dominante de laminariales (dont *L. hyperborea*)

DOMAINE INTERTIDAL

-  Substrat sans végétation
-  Végétation dense à dominante de fucales (dont *A. nodosum* et *F. serratus*)
-  Végétation
-  Retenue d'eau (avec ou sans végétation), végétation en épave
-  Végétation en épave

DOMAINE TERRESTRE

-  Parcelle terrestre
-  Végétation terrestre des îles
-  Limite du domaine émergée le 25/05/1986 à 11h 28mn 28s T.U.

PEPS VEGMA

CARTOGRAPHIE DES VEGETAUX MARINS DE LA BRETAGNE NORD

Produit par IFREMER à partir de données SPOT (R) sous licence SPOT IMAGE (R)-
CNES(C) et IFRÉMER (DERO/EL et DRU/P)
Conception et réalisation : T.BELSHER (DERO/EL)

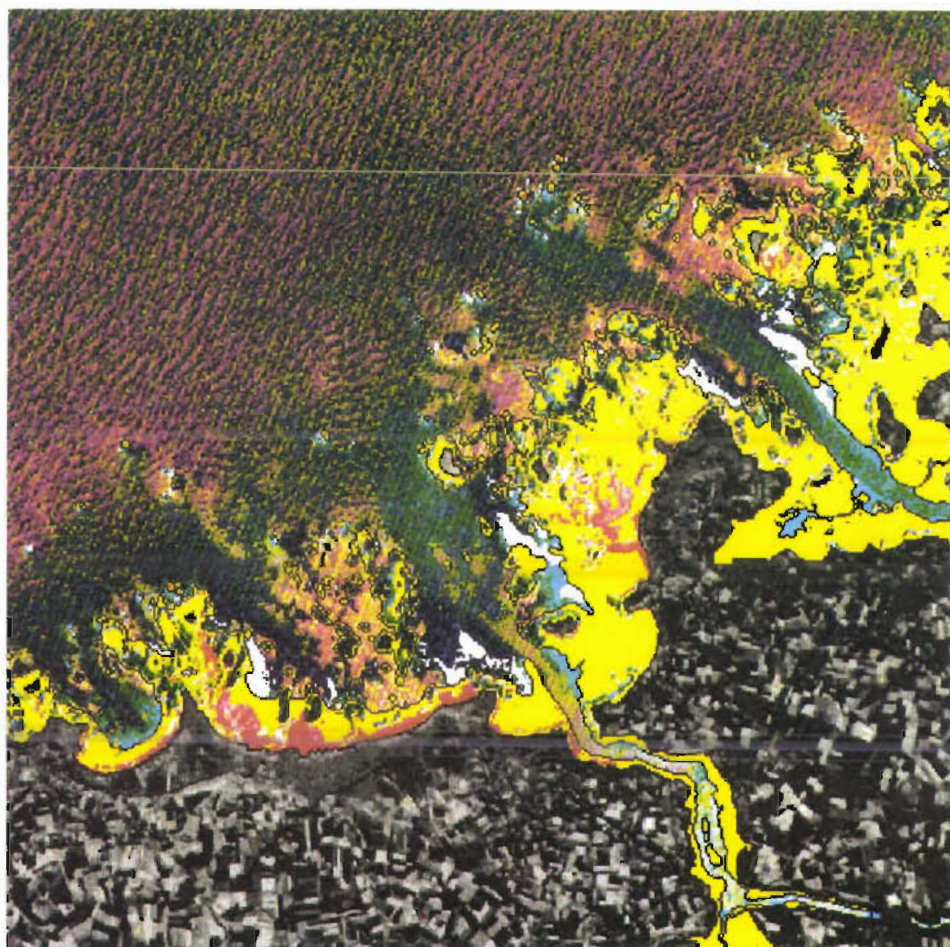







FIGURE 1 : Secteur des Abers

SCENE DU 25/05/1986, 11h 28mn 28s










BARRIERE RECIFALE - PENTE EXTERNE

-  Substrats durs à végétation clairsemée
-  Végétation dense
-  Substrats meubles sans végétation



BARRIERE RECIFALE

-  Barrière sans végétation ou recouverte par les vagues
-  Végétation dense émergée (dominants : *Turbinaria*, sargasses)

LAGON

-  Eaux turbides ou de profondeur supérieure à 15 m ; nuages
-  Végétation dense (pente interne de la barrière, coraux morts dominants)
-  Platier à végétation clairsemée
-  Végétation dense sur platier
-  Substrats durs sans végétation (coraux vivants dominants)
-  Substrats meubles sans végétation (sable dominant)
-  Substrats meubles sans végétation
-  Substrats meubles sans végétation (vase dominante)
-  Végétation dense (platier côtier)

DOMAINE TERRESTRE

-  Nuages
-  Zone émergée

PEPS VEGMA

CARTOGRAPHIE DES VEGETAUX MARINS DE L'ILE DE MOOREA (POLYNESIE FRANCAISE)

Produit par IFREMER à partir de données SPOT (R) sous licence SPOT IMAGE (R)-CNES(C) et du Service de l'Aménagement (Polynésie française), de l'université de Nice, du Muséum national d'histoire naturelle. Scène du 11/08/1986, 20 h 14 mn 44s T.U.
Conception et réalisation : T.BELSHER (IFREMER,DERO/EL).

FIGURE 2 : Ile de Moorea

SCENE DU 11/08/1986, 20h 14mn 44s t.u.
COMPOSITION XS3, XS1 • 2/XS2, XS1



CONCLUSION

Les moyens et méthodes de validation de l'imagerie spatiale pour le thème "Végétaux marins" peuvent se résumer ainsi :

Dans un premier temps, il est nécessaire de localiser les principales populations intertidales et sublittorales. L'acquisition de données de terrain complémentaires sur site d'entraînement (par la télédétection aérienne, la photo et la vidéo sous-marines, le sonar latéral, les plongées, les dragages, la spectroradiométrie de terrain...) conduit à la création d'indices de végétation.

En ce qui concerne le traitement de l'imagerie spatiale, après les corrections éventuelles, il faut séparer les domaines émergé et immergé. Pour calculer les superficies du domaine émergé, les indices de végétation permettent, dans un premier temps, d'éliminer le domaine terrestre et la couverture végétale intertidale. Il est possible, en utilisant l'indice pigmentaire XS1/XS2, de discriminer les dominants végétaux et de calculer leur superficie ; on aboutit alors à une classification en fonction de la densité et des espèces.

Pour le traitement du domaine immergé, l'estimation de la couverture végétale se fait en utilisant l'indice $(XS1)^2/XS2$ et doit être confrontée aux données bathymétriques.

En l'absence de données de références quantitatives pour les végétaux marins sur de telles étendues, la donnée SPOT constituant un premier jalon, il n'est possible d'estimer la précision des résultats que de manière indirecte.

Etant donné l'ampleur des secteurs concernés, le traitement de données satellitaires, permet d'aborder la perception de l'écosystème de façon inédite et amène à la définition de nouveaux standards que seule la répétitivité permettra de critiquer.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes plus vifs remerciements à G. BELBEOCH, G. LEGRAND, M.J. RUE, B. TOULLEC, P. MORIZUR (Développement Logiciel et Systèmes du Département Informatique du Centre IFREMER de Brest) ainsi qu'au Service d'aménagement du Territoire de Polynésie française et au personnel de l'Antenne du MNHN à Moorea (Polynésie française)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELSHER (T.), 1987. - Apport du satellite SPOT à la cartographie qualitative et quantitative des végétaux marins de la Manche, de l'Atlantique Nord, de la Méditerranée occidentale et du Pacifique Sud. *Rapport IFREMER/DERO/EL*, 193 p. + 6 annexes.

- BEN MOUSSA (H.), 1987. - Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins : archipel de Molène (Bretagne/France). *Thèse Ecologie, Aix-Marseille II*, 118 p. + annexes.
- BEN MOUSSA (H.), VIOLLIER (M.) & BELSHER (T.), 1989. - Télédétection des algues macrophytes de l'archipel de Molène (France) : radiométrie de terrain et application aux données du satellite SPOT. *International journal of remote sensing*, 10, 1, pp. 53-69.
- VIOLLIER (M.), BELSHER (T.) & LOUBERSAC (L.), 1985. - Signatures spectrales des objets du littoral, in : *Proceedings of the Third international symposium of spectral signature of objects in remote sensing, Les Arcs*, pp. 253-256.

Cartographie par le satellite SPOT 1 de communautés benthiques littorales en Méditerranée occidentale

par

GASTON FREDJ

*Laboratoire d'océanographie biologique
Université de Nice
28, avenue de Valrose, 06000 Nice (France)*

MICHEL MEINARDI

*Service informatique de la Bibliothèque universitaire
Université de Nice
28, avenue de Valrose, 06000 Nice (France)*

SERGE PIERROT

PHILIPPE ROY
*Musée océanographique de Monaco
MC 98000 Monaco*

RESUME

Une carte des communautés benthiques littorales de la baie d'Alghero (Sardaigne) a été dressée à partir d'une image SPOT. Grâce au prétraitement de l'image, les trajets de plongée ont été choisis de manière à réaliser une réalité de terrain de grande précision. A partir des radiales parcourues en plongée, la classification dirigée de l'image SPOT a permis de déduire les surfaces occupées et de cartographier chacune des douze biocénoses reconnues jusqu'à une profondeur de quinze mètres.

ABSTRACT

A map of littoral benthic communities of the Bay of Alghero (Sardinia, Italy) has been drawn up based on data from a SPOT satellite image. Through image preprocessing, diving tracks were selected in order to collect high precision ground-truth data. From transects covered by divers, it has been possible to realize a supervised classification of the SPOT satellite image. This way, the surfaces occupied by each of the twelve identified biocenoses mapped down to fifteen meters deep have been calculated.

INTRODUCTION

Les prairies de Phanérogames marines figurent parmi les écosystèmes les plus productifs du monde marin [McROY, 1973].

Cinq espèces de Phanérogames existent en Méditerranée, dont la plus commune, *Posidonia oceanica* (Linné), est exclusivement méditerranéenne [DEN HARTOG, 1970] et constitue la majeure partie des grands herbiers. La cartographie de ces herbiers a déjà fait l'objet de multiples travaux dont un grand nombre a été publié (cf. la bibliographie détaillée de BOUDOURESQUE *et al.*, 1979 ; 1980).

Jusqu'à l'avènement de la télédétection aérienne et spatiale, les levés étaient effectués soit en plongée en scaphandre autonome, soit par utilisation de submersibles d'observation ou de sonars latéraux, cette dernière technique permettant déjà d'obtenir directement un document de travail.

Actuellement, les techniques de la télédétection, reconnues avantageuses ou même indispensables dans d'autres domaines, commencent seulement à être appliquées aux peuplements benthiques de la frange marine littorale [LÉFÈVRE *et al.*, 1984], mais avec les difficultés inhérentes à l'obtention de données précises de réalité de terrain et plus particulièrement relatives à leur positionnement.

Le but de ce travail est donc, tout en utilisant une technique conventionnelle de télédétection, d'accroître la fiabilité de l'interprétation en mettant en oeuvre des moyens précis de positionnement des plongées d'observation directe.

ZONE ETUDIÉE, MATERIEL ET METHODES

Zone étudiée

La baie de Porto Conte proche d'Alghero en Sardaigne qui a fait l'objet de ce travail (figure 1) a été choisie pour la facilité de mise en

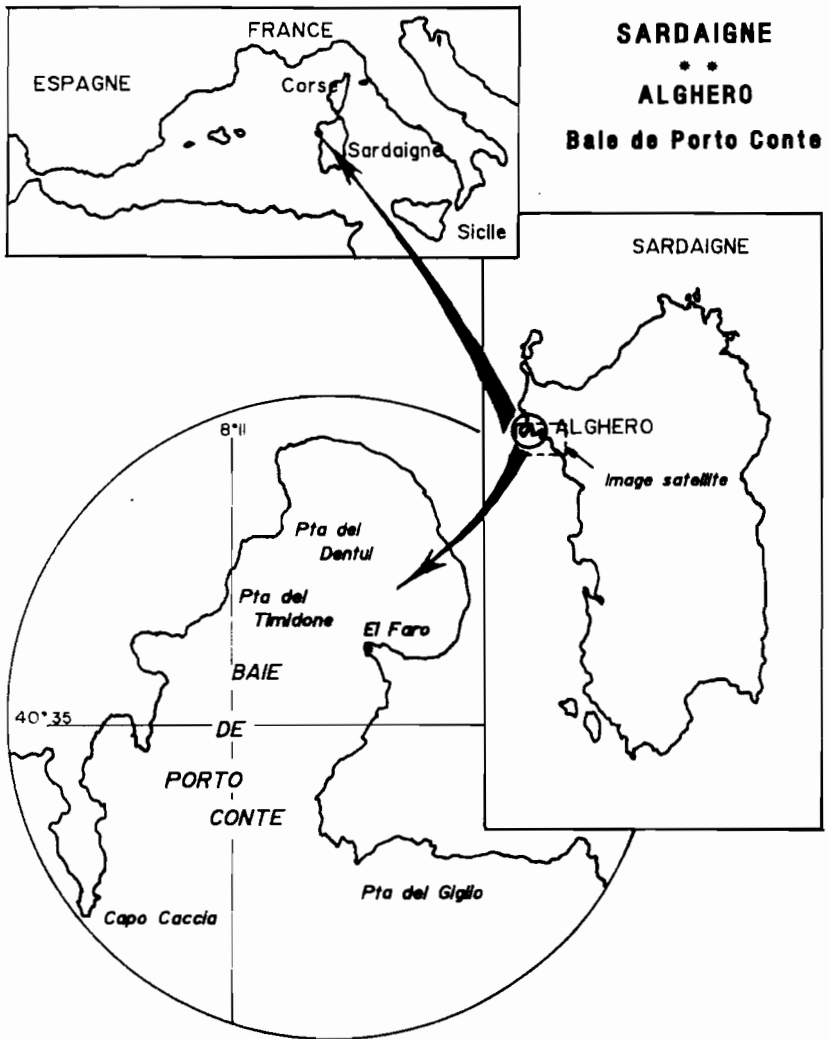
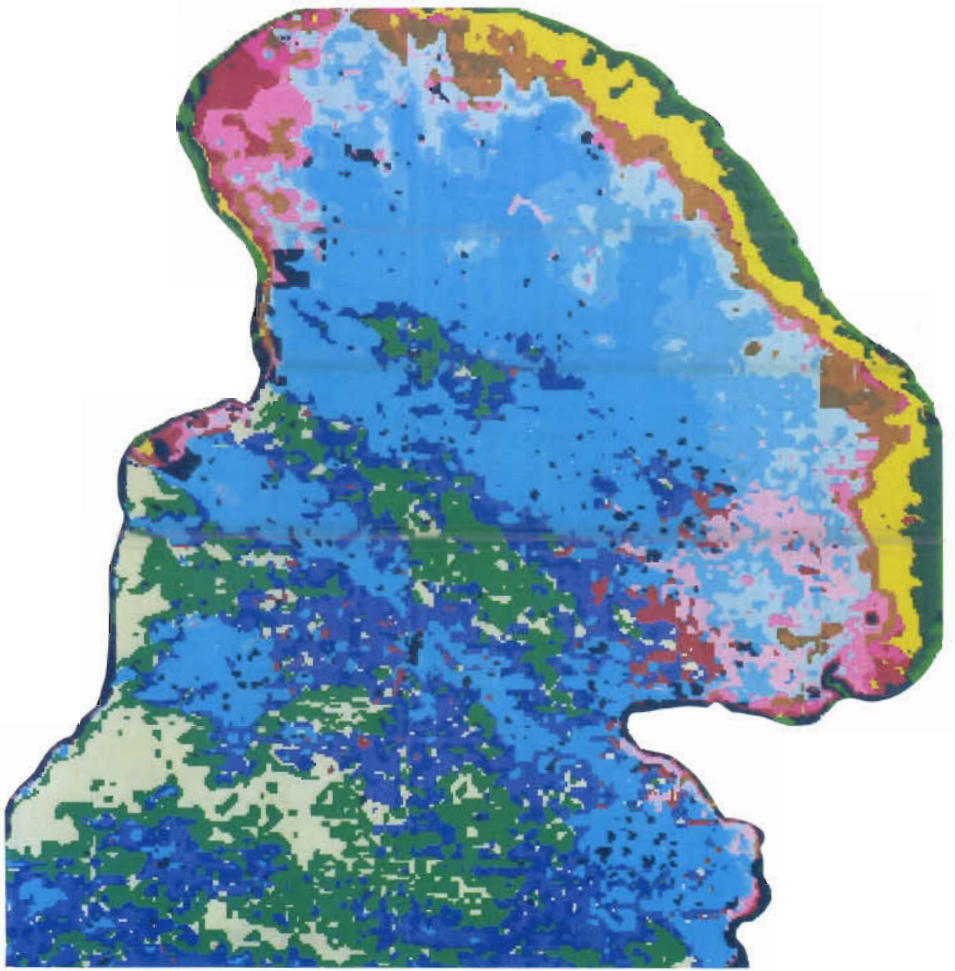


FIGURE 1 Carte de situation de la baie de Porto Conte en Sardaigne (Méditerranée occidentale)

FIGURE 2 : Classification non dirigée pour le choix des trajets de plongées nécessaires à l'établissement de la réalité de terrain.



oeuvre des moyens matériels mais surtout pour l'état actuel satisfaisant de son herbier de Posidonies.

En effet, la baie de Porto Conte présente encore des prairies bien conservées sur lesquelles ne pèsent que des menaces récentes liées au développement encore harmonieux du tourisme balnéaire et nautique.

Toutefois, comme en d'autres zones qui possèdent les mêmes potentialités d'urbanisation accélérée, les risques sont importants pour l'écosystème complexe de la prairie de Posidonies qui, à la fois robuste et fragile, aurait à subir les atteintes de la pollution, de l'aménagement du littoral, des destructions mécaniques.

Il était donc particulièrement avisé de faire, dès maintenant, avec des méthodes d'évaluation globale, un état des lieux qui servirait de référence et pourrait être répété dans le futur.

Matériel et méthodes

Image satellitaire

Les caractéristiques de l'image choisie, réalisée par le satellite SPOT 1, figurent dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : *Caractéristiques de l'image SPOT 1 utilisée.*

Noeud de référence	058 268
Numéro d'identification de la scène	0236374 R
Date de prise de vue (A.M.J.)	87 05 22
Heure de prise de vue (GMT)	9 h 22
Coordonnées géographiques du centre de la scène	Long. : 08° 21' 33" E Lat. : 40° 45' 56" N
Mode spectral	XS Mode multispectral avec instruments jumelés
Valeur du pixel	20 m
Prise de vue	Verticale
Couverture nuageuse en quadrants	0000
Qualité technique	Excellente

Indépendamment des corrections habituelles de "SPOT-IMAGE" ont été effectués avant la campagne en mer :

- un prétraitement de la sous-scène à étudier,
- une amélioration des contrastes en éliminant les signaux correspondant à la partie terrestre,
- une classification non dirigée.

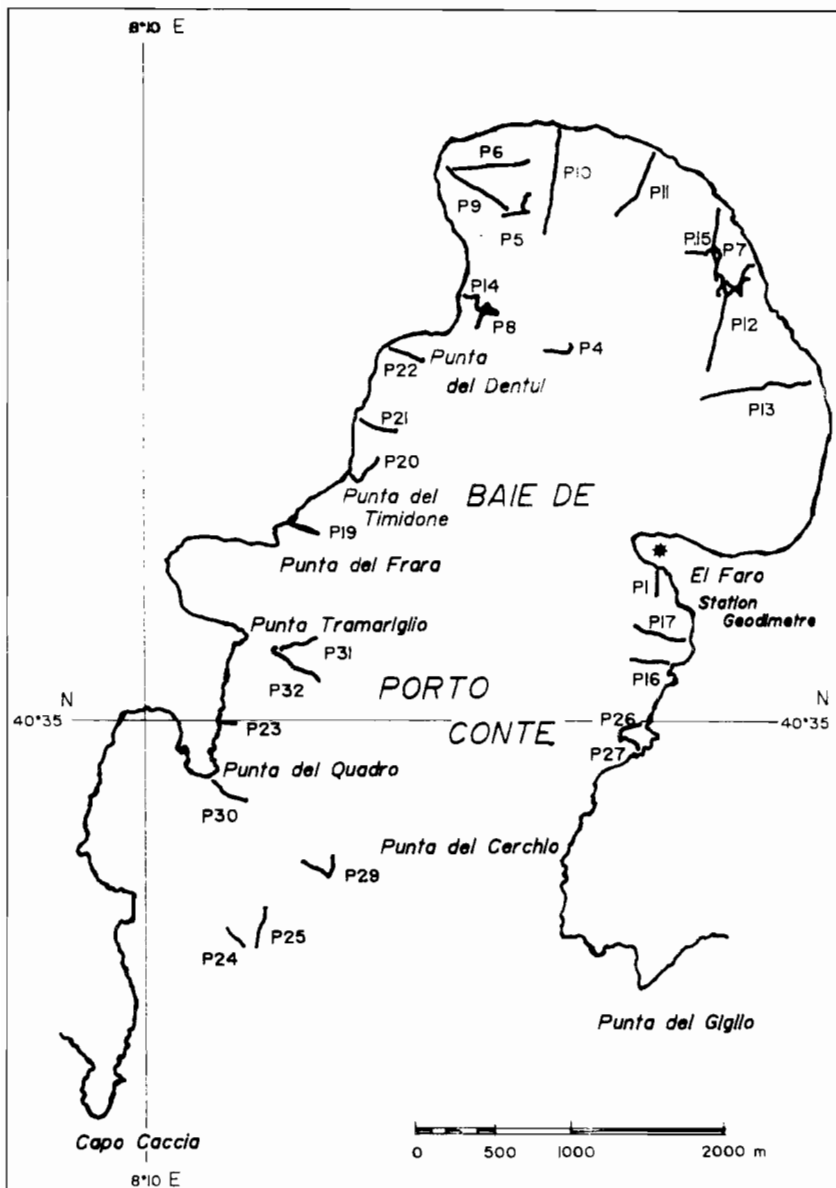
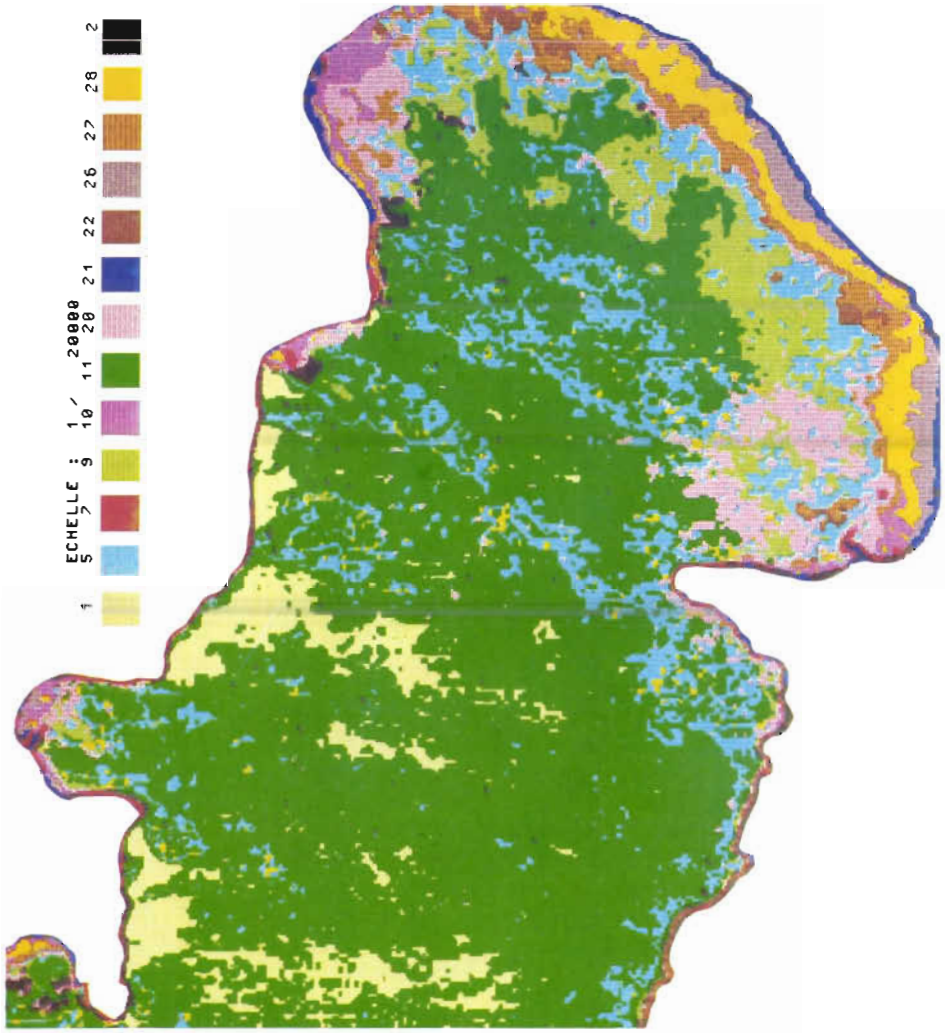


FIGURE 3 : Parcours sous-marins choisis

FIGURE 4 : Classification dirigée pour caractériser les faciès reconnus en plongée.

1	Artefacts liés à l'état de la mer
5	Matte morte
7	Roche émergée - falaises
9	Touffes de Posidonies éparées sur matte morte
10	Caulerpes denses
11	Herbier de Posidonies
20	Caulerpes éparées et Algues photophiles
21	Ligne de rivage sur substrat meuble (plage)
22	Roche submergée
26	Zone sablo-vaseuse
27	Sable à ripple-marks et à débris
28	Sable fin terrigène
2	Non interprété



L'aboutissement a été la réalisation d'un document cartographique (figure 2) qui nous a guidés dans le choix des trajets de plongées nécessaires à l'établissement de la réalité de terrain exécutée avec une grande précision.

Réalité de terrain

Les relevés en plongée ont été effectués à partir de la côte ou à partir de navires * au mois d'octobre 1987.

Par rapport à la scène totale fournie par SPOT (60 x 60 km), la zone effectivement reconnue en plongée (baie de Porto Conte) ne couvre qu'une surface de 5 x 3 km.

43 radiales de longueur variable ont ainsi été parcourues en plongée (figure 3) avec, comme extrémité, la limite supérieure de l'herbier bien établie.

La position de ces radiales a été déterminée en fonction de la topographie, mais aussi des renseignements fournis par la composition colorée (figure 2). Le choix d'un système de positionnement précis a donc été nécessaire [ROY *et al.*, 1988].

L'instrument utilisé (GEODIMETER 140) permet un calcul de distance avec une précision d'environ 5 mm et une mesure d'angle, par rapport au nord ou à des points connus ou reconnus de la côte à prospecter, de l'ordre de 0,6 milligrade.

Au cours des plongées, chaque changement de faciès du fond est matérialisé en surface par une bouée numérotée larguée par le plongeur. Ces bouées qui marquent les points caractéristiques de chaque trajet sont ensuite repérées grâce à des prismes réflecteurs fixés sur des embarcations légères. Ces prismes permettent le retour du faisceau infrarouge émis par le GEODIMETER vers l'appareil qui affiche distance et valeur de l'angle.

A partir des observations réalisées, l'intégration de la réalité de terrain a exigé de nouvelles opérations consistant principalement dans l'introduction de points géodésiques caractéristiques, la numérisation de la ligne de côte et celle de polygones-tests.

Une classification dirigée a permis d'aboutir à la caractérisation des faciès reconnus et à l'établissement du document définitif figurant sur la figure 4.

RESULTATS

Résultats obtenus en plongée

Douze substrats ou biocénoses ont été identifiés par les plongeurs. Ce sont :

- Limite de rivage sur substrat meuble (plage) ;
- Roche supralittorale (ligne de rivage) ;
- Sable fin terrigène ;

* *Winnaretta Singer* de l'Institut océanographique de Monaco, et *Santa-Anna* de l'Azienda autonoma di soggiorno e turismo d'Alghero.

- Sable à ripple-marks et débris végétaux ;
- Substrat sablo-vaseux à Cymodocées ;
- Pelouse de Caulerpes denses ;
- Zone à Caulerpes éparses et Algues photophiles ;
- Matte * morte de Posidonies ;
- Prairie de Posidonies clairsemée sur matte morte ;
- Prairie de Posidonies bien établie ;
- Chenaux d'intermattes ;
- Roche submergée.

Si ces peuplements littoraux sont bien connus des océanographes méditerranéens et bien décrits [PERES & PICARD, 1964], la principale originalité de la zone étudiée est de présenter une grande diversité d'associations sur une surface relativement restreinte. Elle est donc particulièrement intéressante pour l'analyse de l'image satellitaire SPOT 1.

TABLEAU 2 : *Extension des principales associations reconnues en pourcentage de la surface totale de la zone cartographiée (de Punta del Timidone à Punta del Faro)*

Biocénose ou substrat	Couleur de la légende	Pourcentage
Falaises et ligne de rivage sur substrat meuble	7 & 21	2,94
Zone sablo-vaseuse à Cymodocées	26	2,97
Sable fin terrigène	28	5,29
Sable à ripple-marks ou à débris	27	3,76
Roche submergée	22	0,94
Caulerpes denses	10	2,64
Caulerpes éparses et Algues photophiles	20	8,82
Matte morte	5	14,70
Posidonies éparses	9	9,41
Herbier de Posidonies	11	46,47
Non interprété	2	0,88
Artefacts	1	1,17

* Les "mattes" sont une formation organogène construite par les Posidonies dont les rhizomes sont en grande partie imputrescibles. La constitution de ces formations a été bien étudiée [MOLINIER & PICARD, 1954].

Résultats de la classification dirigée

L'analyse des signaux recueillis dans les polygones-tests digitalisés, choisis parce que situés au coeur des douze biocénoses reconnues, a permis d'identifier nettement leurs caractéristiques*.

La carte finale (figure 4) résulte de l'attribution d'une fausse couleur à chacune de ces associations et ceci en fonction de la corrélation maximale entre différents points de ces associations.

Le tableau 2 donne l'extension des principales associations reconnues en pourcentage de la surface totale de la zone cartographiée.

Seuls les chenaux d'intermattes n'ont pu être retrouvés. En effet, ces chenaux, dus à l'érosion de la matre, ont une largeur de moins de 20 mètres donc inférieure à la taille d'un pixel.

Il faut ajouter que seule la zone la moins profonde de la baie, entre la Punta del Faro et la Punta del Timidone, a pu être interprétée de façon cohérente : au-delà de 15 mètres de fond, l'état de surface de la mer et la profondeur trop grande ne permettent plus d'effectuer de corrélations significatives.

Une couleur particulière a été attribuée aux artefacts liés en grande partie à l'état de surface de la mer (houle résiduelle).

Enfin, même dans la zone qu'il a été possible de cartographier, un signal représentant moins de 1 % du total n'a pu être interprété.

Ce faible pourcentage explique qu'aucune des 43 plongées ne l'ait repéré.

DISCUSSION

Nous ne nous attarderons pas ici sur les avantages et les inconvénients globaux de l'utilisation des images satellitaires.

Il est à souligner toutefois que l'un des problèmes majeurs pour l'interprétation de ce type de document lorsqu'il se rapporte à des zones à forte hétérogénéité de composants est, sans conteste, le positionnement exact de ces composants, donc des biocénoses ou des peuplements remarquables.

Il fallait donc pouvoir disposer d'un document synoptique interprétable au mieux en fonction de parcours de réalité de terrain extrêmement limités en largeur (trajets sous-marins des plongeurs) qui fournissent des profils et non des contours ou des surfaces.

Pour obtenir une cartographie équivalente à celle que nous fournissons en figure 4, il eût été nécessaire de multiplier considérablement le nombre des trajets sous-marins. Malgré la mise en oeuvre de moyens onéreux, la photographie aérienne que nous avons également utilisée pendant la campagne (Service photographique de l'Armée de l'air italienne) n'a pas donné de résultats exploitables en raison de l'état de la mer. En revanche, la permanence des prises de vue par satellite permet d'éviter cet inconvénient.

* Les classifications dirigées ont été réalisées avec le concours de la SODETTG-TAI (06650 Valbonne, France).

Dans notre cas, même si la date de l'image SPOT exploitée en raison de sa qualité ne correspond pas à la période d'investigations sur le terrain, nos résultats restent valables car les Posidonies se présentaient dans la même phase de leur cycle de végétation.

A l'avenir, il serait cependant souhaitable que réalité de terrain et prise de vue par satellite soient simultanées.

Si la télédétection spatiale en milieu marin a fait l'objet de nombreuses applications [GIRARD & GIRARD, 1989], les travaux de cartographie de communautés benthiques côtières sont encore rares [COURBOULES *et al.*, 1987 ; BEN MOUSSA, 1987 ; BELSHER *et al.*, 1988 ; COURBOULES, 1989].

Notre tentative montre que des résultats positifs peuvent être obtenus au moins dans des conditions de clarté des eaux et d'état de la mer favorables telles que celles rencontrées dans les eaux sardes et qui sont susceptibles d'être retrouvées sur de nombreuses zones littorales méditerranéennes.

Dans de telles conditions, il est possible d'envisager un suivi de la dynamique de peuplements benthiques remarquables.

C'est, à notre sens, l'un des intérêts majeurs de l'exploitation de l'image satellitaire.

CONCLUSION

Pour des océanographes de terrain, cette première tentative d'utiliser la télédétection satellitaire montre que, dans des conditions optimales, il est possible d'aboutir à une cartographie des peuplements benthiques littoraux en Méditerranée jusqu'à une profondeur d'environ 15 mètres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELSHER (T.), MEINESZ (A.), LEFEVRE (J.R.) & BOUDOURESQUE (C.-F.), 1988. - Simulation of SPOT imagery for charting shallow-water benthic communities in the Mediterranean. *Marine ecology*, 9, 2, pp. 157-165.
- BEN MOUSSA (H.), 1987. - Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins : archipel de Molène (Bretagne/France). *Thèse Ecologie, Aix-Marseille II*, 118 p. + annexes.
- BOUDOURESQUE (C.-F.), GIRAUD (G.) & PERRET-BOUDOURESQUE (M.), 1979. - Bibliography on vegetation and ecosystems of *Posidonia oceanica*, part I. *Excerpta botanica*, (B) 19, 2, pp. 145-161.
- BOUDOURESQUE (C.-F.), GIRAUD (G.) & PERRET-BOUDOURESQUE (M.), 1980. - Bibliography on vegetation and

ecosystems of *Posidonia oceanica*, part II. *Excerpta botanica*, (B) 20, 2, pp. 125-135.

COURBOULES (J.), 1989. - Contribution de la télédétection à haute et très haute résolution spatiale à la perception des ressources naturelles renouvelables : exemples d'applications aux zones littorales tropicales de mer Rouge (données TM de LANDSAT 4, HRV de SPOT 1 et photographies aériennes numérisées). *Thèse Sciences de la vie, Nice*, 234 p.

COURBOULES (J.), MANIERE (R.), JAUBERT (J.), MANDURA (A.S.), KHAFFAJI (A.K.), ESHKY (A.A.) & SAIFULLAH (S.), 1987. - Cartographie d'une zone littorale en mer Rouge par traitements numériques des données HRV de SPOT 1. *Photo-interprétation*, 4, 5, pp. 35-43.

DEN HARTOG (C.), 1970. - The sea-grasses of the world. *Verhandelingen der Koninklijke Nederlandse akademie van wetenschappen*, afd. natuurkunde, (2) 59, 1, pp. 1-275.

GIRARD (M.C.) & GIRARD (C.M.), 1989. - *Télédétection appliquée : zones tempérées et intertropicales*. - Paris : Masson. - XVIII-260 p. - (Collection sciences agronomiques).

LEFEVRE (J.-R.), VALERIO (C.) & MEINESZ (A.), 1984. - Optimisation de la technique de la photographie aérienne pour la cartographie des herbiers de Posidonies, in : *International workshop on Posidonia oceanica beds, Porquerolles/France, 23-25 October 1983*, ed. C.-F. Boudouresque, A. Jeudy de Grissac & J. Olivier, pp.49-55. - Marseille : GIS Posidonie.

McROY (C.P.), ed., 1973. - *Seagrass ecosystems: research recommendations of the International seagrass workshop, Leiden, the Netherlands, 22 to 26 October 1973*. - III-62 p.

MOLINIER (R.) & PICARD (J.), 1954. - Nouvelles recherches bionomiques sur les côtes méditerranéennes françaises. *Recueil des travaux de la Station marine d'Endoume*, 13 (= bulletin 8), pp. 9-23.

PERES (J.M.) & PICARD (J.), 1964. - Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. *Recueil des travaux de la Station marine d'Endoume*, 47 (= bulletin 31), pp. 3-137.

ROY (P.), PIERROT (S.), FREDJ (G.), MEINARDI (M.) & BELLAICHE (G.), 1988. - Une méthode originale de positionnement des plongeurs en vue de terre. *Rapports et procès-verbaux des réunions - Commission internationale pour l'exploration scientifique de la mer Méditerranée*, 31, 2, p. 118.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont heureux de remercier ici l'équipe de scientifiques, ayant mené à bien la campagne sur le terrain, qui comprenait, outre les signataires : le docteur G. BELLAICHE, Directeur de recherches CNRS (Station de géodynamique sous-marine de Villefranche-sur-Mer, France), les docteurs L. CHESSA et S. LIGIOS (Istituto di zoologia dell'Università di Sassari, Italie), les docteurs MAZZELLA, C. GAMBI et G. RUSSO (Stazione zoologica di Napoli, Italie), le docteur F. WERNERUS (Université de Liège, Belgique).

La haute résolution du satellite SPOT appliquée à l'inventaire et à l'évaluation des ressources récifales de la Nouvelle-Calédonie

par

WILLIAM BOUR

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre ORSTOM
B.P. A5, Nouméa (Nouvelle-Calédonie)*

RESUME

Dans le Pacifique Sud, les pays insulaires souhaitent évaluer et gérer leurs ressources vivantes récifales. Les images du satellite SPOT, analysées par les techniques du traitement d'images, fournissent un moyen performant pour atteindre ces objectifs. A titre d'essai, les données SPOT du récif Tetembia (Nouvelle-Calédonie) ont été exploitées. Le résultat est une carte thématique de l'intégralité du récif et une estimation de la surface couverte par chaque biotope identifié qui a rendu possible la quantification de deux ressources importantes pour le Territoire calédonien : les trocas (*Trochus niloticus*) et les coraux vivants de la famille des *Faviidae*.

ABSTRACT

South Pacific islands are becoming increasingly aware of the need to assess and manage their living coral reef resources. The high resolution images produced by the SPOT satellite, after being processed, supply a most performing tool for this task. The SPOT data of Tetembia reef (New Caledonia) were analysed on a trial basis. They result in a thematic mapping of the whole reef and an estimate of the surface area covered by each identified biotope. On this basis, it was easy to assess the total biomass of two major resources exploited in New Caledonia : *Trochus niloticus* and living *Faviidae* corals.

INTRODUCTION

Pouvoir cartographier les récifs coralliens et les biotopes ou milieux écologiques qui les composent, c'est apporter une aide appréciable à la navigation et accéder à l'estimation des ressources biologiques qu'ils renferment.

Les récifs coralliens du Pacifique Sud-Ouest, dont la Grande Barrière australienne et la ceinture récifale de Nouvelle-Calédonie, sont les plus importants. Ils ont depuis plusieurs années fait l'objet d'études par télédétection. En effet, les eaux généralement claires qui recouvrent ces formations bioconstruites permettent l'accès aux images de satellites, primitivement conçues pour la cartographie des terres émergées. Depuis 1986, le satellite SPOT fournit des images très importantes pour la poursuite de ces études ; en effet, sa haute résolution, la meilleure actuellement, rend plus facile l'interprétation des cartes thématiques.

ORIGINE DES DONNEES

Comme beaucoup de récifs de la Nouvelle-Calédonie, celui de Tetembia comporte un platier externe favorable à la présence d'un gros coquillage commercialisé pour le marché de la nacre : le troca (*Trochus niloticus*). Chaque année, la Nouvelle-Calédonie exporte des centaines de tonnes de trocas vers l'Europe et l'Asie. Pour cette ressource, la carte thématique doit permettre d'identifier le milieu favorable (ou biotope) et d'en connaître la superficie. Par ailleurs, des mesures de densité effectuées *in situ* conduiront à une évaluation de la biomasse de trocas présente sur le récif Tetembia.

Ce récif est un élément du grand récif barrière qui entoure l'île principale de Nouvelle-Calédonie (figure 1). Il est situé au large de la baie de Saint-Vincent, non loin de Nouméa ; il mesure 20 km de long et représente une entité biotomique entre deux passes du lagon. Le choix s'est porté sur ce récif car c'est le seul où l'extraction des coraux boules (*Faviidae*) est autorisée pour des activités artisanales et touristiques. Les *Faviidae* ont une croissance très lente [JOANNOT & BOUR, 1988] ; il

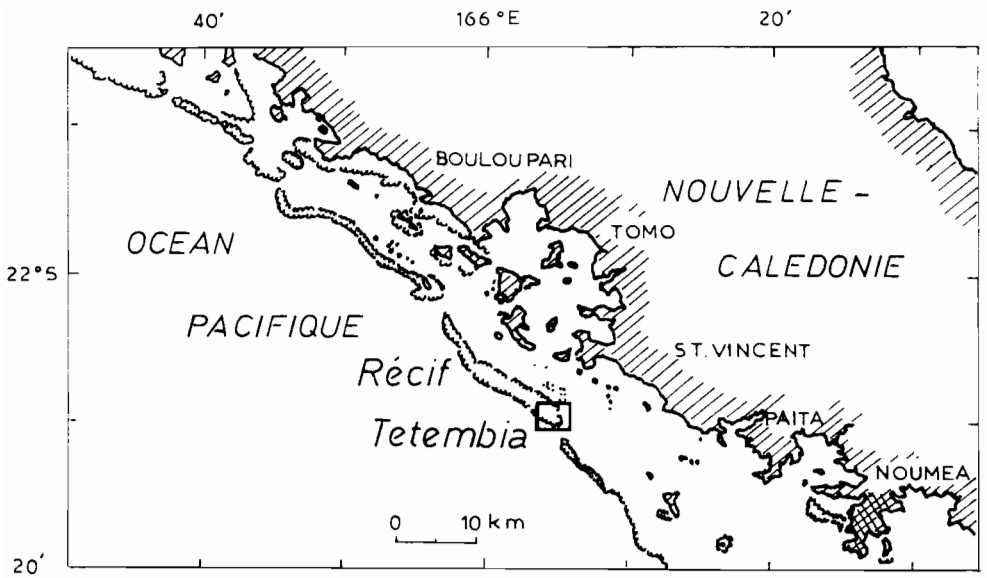


FIGURE 1: Carte de situation du récif de Tetembia en Nouvelle-Calédonie.

est donc important d'en évaluer la biomasse pour en gérer correctement la fraction exploitable.

Une simulation antérieure effectuée en 1985 [BOUR *et al.*, 1986] avait démontré qu'il était possible, avec les techniques informatiques du traitement d'images, de réaliser une cartographie thématique d'une portion du récif barrière et de mettre en évidence le milieu favorable à ce gastéropode exploité.

Depuis 1986, le satellite SPOT est en orbite ; il a donc été possible d'acquérir la scène recouvrant la zone testée par simulation. D'autre part, la création en 1988 d'un laboratoire de télédétection au Centre ORSTOM de Nouméa (LATICAL) a rapproché considérablement le traitement d'images de son sujet d'étude. Cette conjoncture favorable a permis d'achever la cartographie complète du récif Tetembia (elle n'était que partielle lors de la simulation), puis d'estimer les superficies riches en *Faviidae* et favorables aux trocas.

La scène SPOT utilisée a les caractéristiques suivantes :

- numéros dans la grille SPOT : K = 413, J = 394 ;
- date de la prise de vue : 18 septembre 1986 à 10h 07mn heure locale ;
- marée descendante ;
- angle de visée : 8° ;
- mode XS (trois bandes couleur) ;
- résolution : 20 m ;
- prétraitement de niveau 2 : rectification sur carte topographique au 1/1 000 000.

METHODOLOGIE

Le principe du traitement que nous avons utilisé pour cette étude est une classification supervisée sur les canaux XS1 et XS2* de SPOT. L'histogramme bidimensionnel de l'ensemble des pixels du récif (figure 2) se présente sous la forme d'une structure dite en "boomerang" qui a déjà été constatée lors de l'étude des données simulées [BOUR *et al.*, 1986]. Rappelons que cette structure particulière est due à une décorrélation des canaux XS1 et XS2 provoquée par la traversée de la couche d'eau recouvrant le récif. En effet, XS2 est le canal rouge dont l'absorption augmente très rapidement avec la profondeur. L'atténuation rapide de ce canal rouge a une autre conséquence moins avantageuse ; elle limite la distinction des thèmes jusqu'à une profondeur d'une dizaine de mètres ; au-delà, son information ne peut plus être croisée avec celle du canal XS1 (beaucoup plus pénétrant) pour reconnaître les thèmes. Comme le récif, objet de cette étude, s'inscrit largement dans cette tranche bathymétrique, son étude thématique est donc possible.

La classification supervisée employée suppose que l'on puisse définir les seuils de classes radiométriques sur les deux canaux. Le seuillage s'appuie sur les signatures spectrales (ou serpts

* Canal XS1 : 0,50 - 0,59 μm (couleur verte) ; Canal XS2 : 0,61 - 0,68 μm (couleur rouge).

radiométriques) des thèmes recherchés. A cette fin, une dizaine de parcelles d'entraînement ont été reconnues sur le terrain et repérées ensuite sur l'image SPOT.

Pour chaque parcelle, l'histogramme bidimensionnel a été calculé ; quelques exemples sont présentés à la figure 3.

RESULTATS

Sur la carte thématique obtenue (figure 4), chaque thème est identifié par une couleur arbitraire. Nous présentons six d'entre eux : trois sont relatifs à des fonds durs coralliens, les trois autres sont relatifs à des fonds sédimentaires sablonneux. Leur situation bathymétrique et leur surface respective sont précisées dans le tableau 1.

A titre de contrôle, nous avons mesuré la surface occupée par les fonds durs (Thèmes 1, 2 et 3) avec un planimètre sur une photographie aérienne au 1/40 000 du récif Tetembia (document Institut géographique national, France). Le résultat de la planimétrie donne une superficie de 1 300 ha. En additionnant les superficies des trois thèmes relatifs aux fonds durs reconnus sur la carte thématique issue de l'image SPOT, on aboutit à une superficie de 1 369 ha. Il y a donc une bonne concordance entre les deux méthodes mais il faut souligner que la photo aérienne ne permet pas de distinguer nettement les trois thèmes obtenus par la classification de l'image SPOT.

TABLEAU 1 : *Thèmes identifiés, situations bathymétriques et surfaces occupées.*

Thème n° 1	Coraux vivants denses (331 ha)
Thème n° 2	Platier à débris et coraux vivants (818 ha)
Thème n° 3	Platier à débris et sable (220 ha)
Thème n° 4	Fonds blancs à pinacles > 5m (1 837 ha)
Thème n° 5	Fonds blancs à pinacles < 5m (371 ha)
Thème n° 6	Fonds blancs < 5m (824 ha)

Biomasse totale des trocas sur le récif

Des mesures de densité de trocas sur tous les récifs calédoniens ont été publiées par BOUR et HOFFSCHIR [1985]. Il ressort de cette étude que la densité moyenne des trocas évaluée sur Tetembia est de 45 coquilles par hectare avec un poids vif moyen de 418 g soit une biomasse de 18,8 kg à l'hectare. Par ailleurs, les deux thèmes identifiant le milieu favorable aux trocas sont le thème n° 2 (Platier à débris et coraux vivants avec une superficie de 818 ha) et le thème n° 3 (Platier à débris et sable avec une superficie de 220 ha). La surface totale de ces deux thèmes est de 1 038 ha. On peut donc en déduire qu'en 1984 la biomasse totale estimée des trocas sur le récif Tetembia s'élevait à 19,5 tonnes.

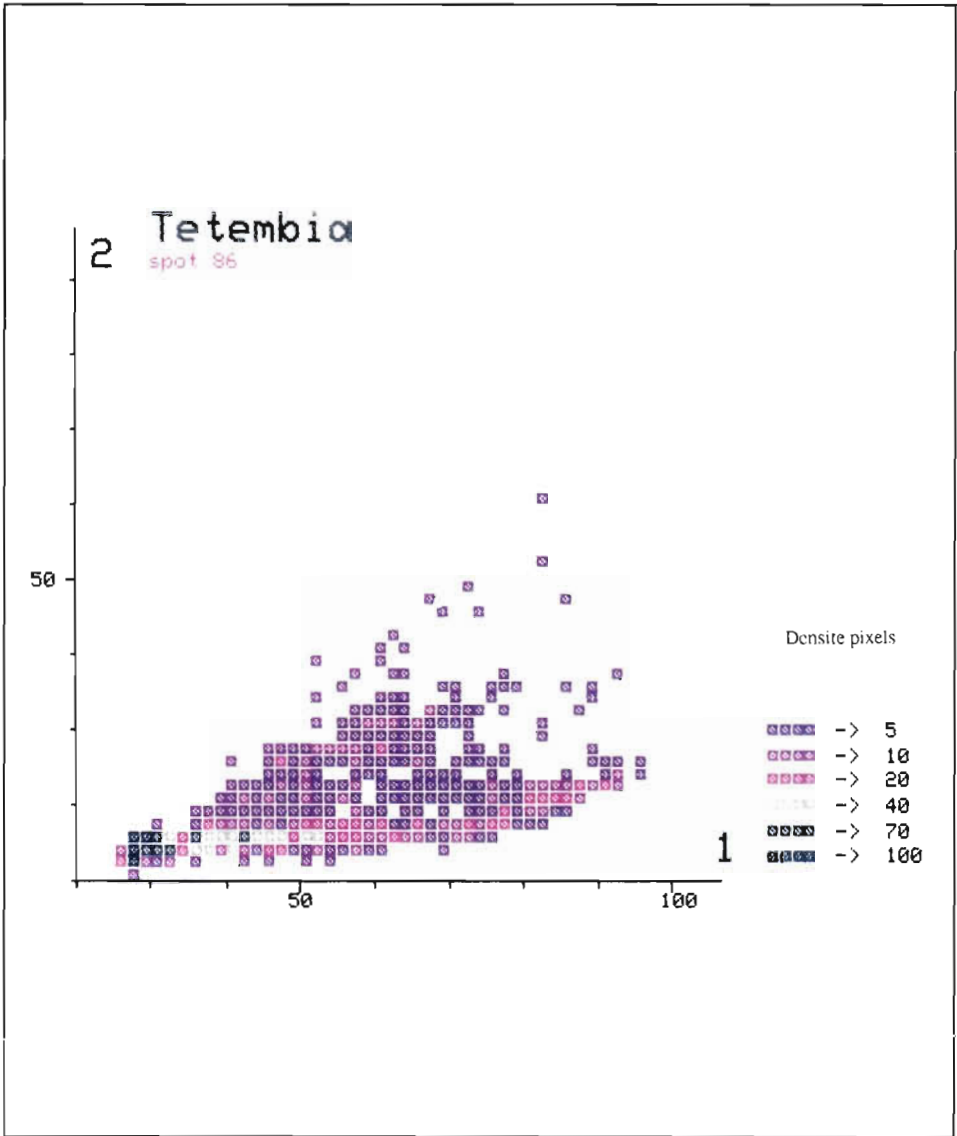


FIGURE 2 : Histogramme bidimensionnel du récif Tetembia

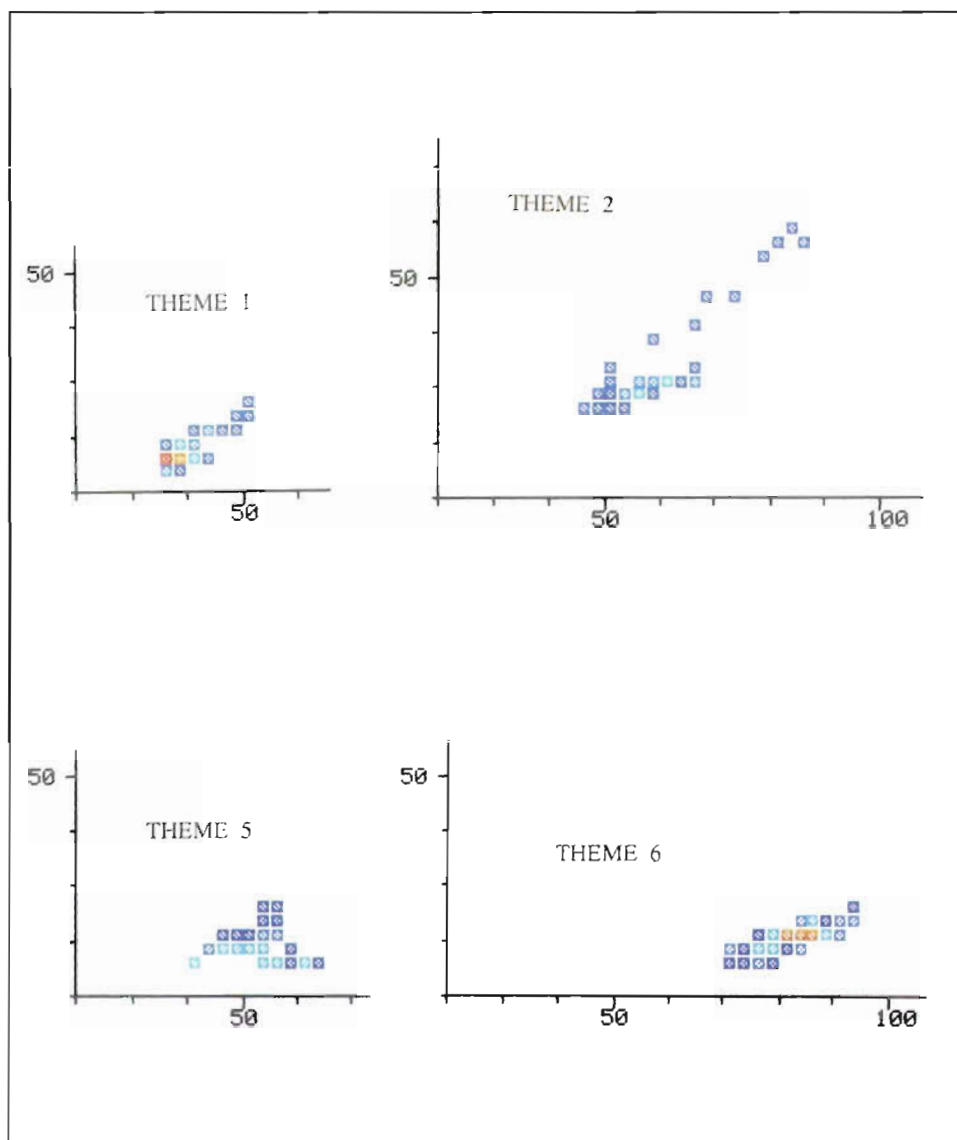


FIGURE 3 : Exemples d'histogrammes bidimensionnels représentatifs de divers thèmes

Biomasse exploitable des *Faviidae*

Les coraux boules de la famille de *Faviidae* sont exploités par l'artisanat local pour la confection d'objets de décoration proposés aux touristes. Une étude récente [JOANNOT & BOUR, 1988] souligne la lenteur de la croissance des représentants de cette famille, environ 2 cm par an (en diamètre). La connaissance de la biomasse en place est donc importante pour la gestion rationnelle de cette ressource. Les quatre thèmes identifiant le milieu renfermant des *Faviidae* correspondent aux numéros 1, 2, 4 et 5 du tableau 1.

Par ailleurs, les travaux réalisés sur le terrain [JOANNOT & BOUR, 1988] ont donné des poids moyens de *Faviidae* exploitables par hectare différents selon le substrat. C'est ainsi que, sur les fonds durs (thèmes 1 et 2), le poids moyen s'élève à 2 t/ha. En revanche, sur les fonds meubles (thèmes 4 et 5), le poids moyen s'élève à 0,3 t/ha. A partir de ces résultats, on en déduit une biomasse de 2 298 t sur les fonds durs et une biomasse de 662 t sur les fonds meubles : soit une biomasse totale de 2 960 t.

La biomasse exploitable des *Faviidae* sur le récif Tetembia avoisine donc les 3 000 t. Une gestion équilibrée de cette ressource autoriserait un prélèvement d'environ un dixième de la biomasse exploitable soit 30 t par an [JOANNOT & BOUR, 1988], or l'extraction en 1987 a été de 180 t (source SICNC *) ; le prélèvement sur le seul récif autorisé a donc été notoirement excessif à cette époque.

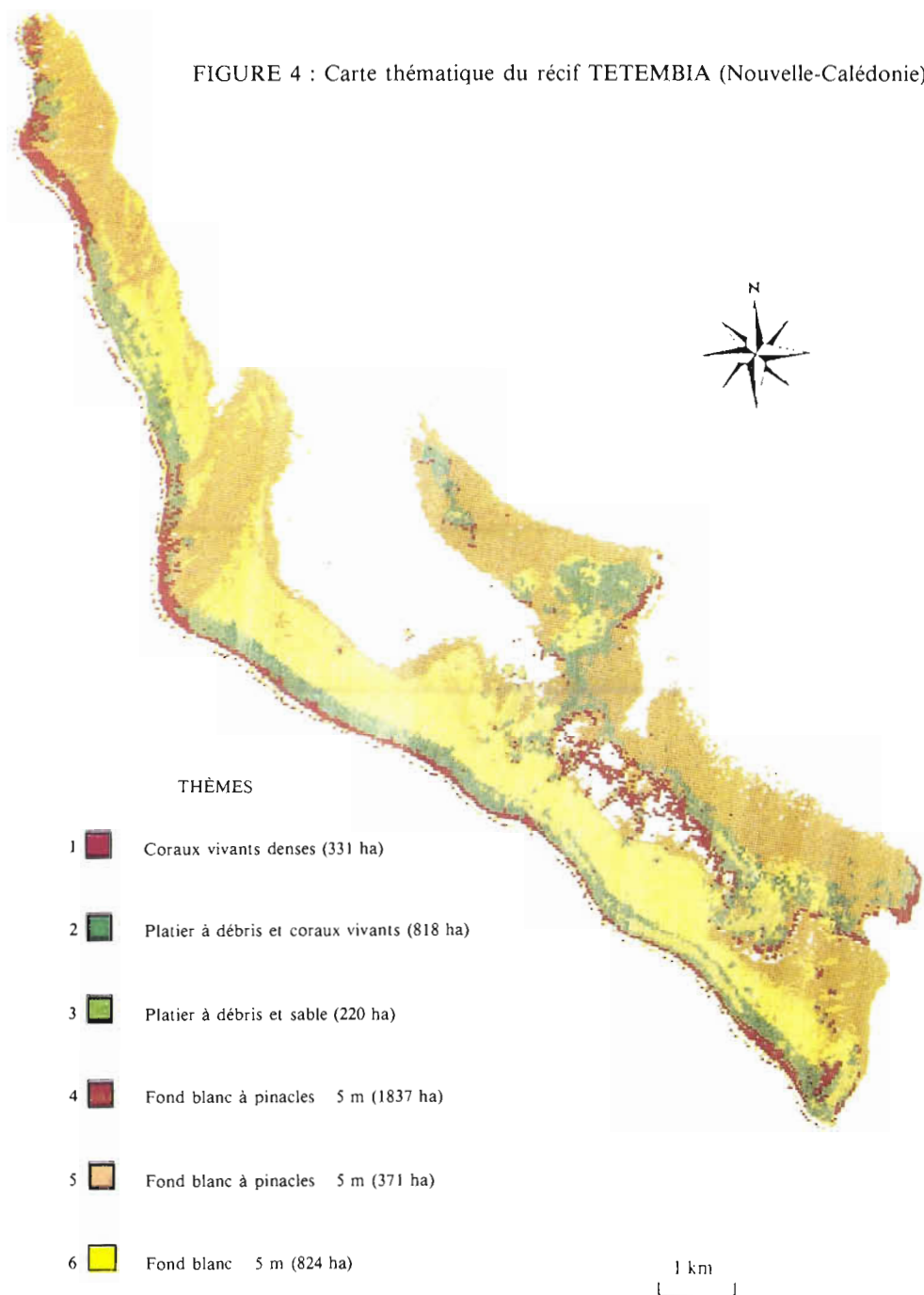
Dans ce cas précis, la télédétection et les possibilités du traitement informatique d'images ont apporté une réponse rapide et fiable au Service des pêches du Territoire.

CONCLUSIONS

Les deux exemples précédents démontrent l'aisance avec laquelle des ressources très fragiles, comme le sont toutes celles des systèmes des récifs coralliens, peuvent être appréciées en biomasse si l'on possède quelques observations de terrain. Le traitement des images numériques SPOT fournit aux biologistes, gestionnaires et aménageurs, une base informationnelle de toute première importance pour la connaissance et la gestion de ces milieux difficiles d'accès. Le travail commencé sur le récif Tetembia se poursuivra sur tous les récifs de Nouvelle-Calédonie. Le produit final prendra la forme d'un atlas thématique de ce vaste lagon améliorant le savoir sur la répartition des principaux biotopes et la quantification des ressources potentielles qu'il renferme.

* Société immobilière de crédit de Nouvelle-Calédonie

FIGURE 4 : Carte thématique du récif TETEMBIA (Nouvelle-Calédonie)



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOUR (W.) & HOFFSCHIR (C.), 1985. - Evaluation et gestion de la ressource en trocas de Nouvelle-Calédonie. *Résumés des travaux - Centre ORSTOM de Nouméa, océanographie*, p. 28.
- BOUR (W.), LOUBERSAC (L.) & RUAL (P.), 1986. - Thematic mapping of reefs by processing of simulated SPOT satellite data : application to the *Trochus niloticus* biotope on Tetemia Reef (New Caledonia). *Marine ecology-progress series*, 34, 3, pp. 243-249.
- JOANNOT (P.) & BOUR (W.), 1988 - Estimation de la biomasse de la famille des Faviidae d'un récif exploité de Nouvelle-Calédonie, in : *Workshop on Pacific inshore fishery resources, Nouméa, 14-25 March 1988*, 12 p.

Radiométrie de terrain pour le satellite SPOT sur un estuaire tropical

par

JEAN PAGES

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre de recherches océanographiques de Dakar Thiaroye (CRODT)
B.P. 2241, Dakar (Sénégal)*

Adresse actuelle
Centre ORSTOM
B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex (France)

BERNARD MOUGENOT

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre de Dakar-Hann
B.P. 1386, Dakar (Sénégal)*

Adresse actuelle
Centre ORSTOM
70-74, route d'Aulnay, 93143 Bondy (France)

JEAN CITEAU

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre de recherches océanographiques de Dakar Thiaroye (CRODT)
B.P. 2241, Dakar (Sénégal)*

RESUME

L'estuaire "inverse" de la Casamance (Sénégal, Afrique de l'Ouest) a été étudié de 1984 à 1987, afin d'évaluer les relations entre l'environnement et les ressources halieutiques. Cet estuaire hypersalé présentait un gradient longitudinal prononcé des caractéristiques de l'eau, avec augmentation vers l'amont de la salinité, de la biomasse phytoplanctonique, de la matière organique dissoute et du coefficient d'atténuation verticale.

Une série de mesures de radiométrie de terrain (réalité de terrain pour des données du satellite SPOT) a permis d'établir des corrélations entre les caractéristiques ci-dessus et le signal radiométrique de l'eau. Le rapport des canaux 1 et 3 (H3/H1) donne les meilleurs résultats. Un traitement préliminaire des données satellitaires confirme la valeur de ce rapport de canaux (XS3/XS1) pour suivre la répartition spatiale des caractéristiques de l'eau.

Le rapport H3/H1 est également sensible à la profondeur de l'eau (Z), avec une relation de la forme $H3/H1 = a - b \log Z$. Les premiers résultats de l'exploitation des données satellitaires confirment l'importance relative des zones peu profondes dans les zones humides, qui interviennent dans le bilan hydrique de l'estuaire.

ABSTRACT

A multi disciplinary study of fisheries was carried out on the "inverse estuary" of the Casamance (Senegal, West Africa) between 1984 and 1987, during its hyperhaline phase. Along the 240 km of the tide-influenced part, water characteristics show a strong positive gradient from the sea upwards. We witnessed an increase of salinity (up to 172 ‰), of dissolved organic matter, and of phytoplankton chlorophyll.

Ground-truth radiometry measurements were carried out. Reflectances (Hi) in the three visible channels were correlated with the above water characteristics. Channel ratio H3/H1 gave the best results. The preliminary treatment of satellite digital counts (XSi) confirmed that channel ratio XS3/XS1 allows an assessment of the spatial distribution of water quality.

Channel ratio H3/H1 is also influenced by water depth (Z) following a relation $H3/H1 = a - b \log Z$. In the highly light-absorbing waters of the estuary, ground radiometry was useful in the 0.01 - 0.6 m depth range. Preliminary results of satellite data treatment confirmed the wide extent of swamps and other humid zones, which partake in the overall water budget.

INTRODUCTION

L'action favorable des estuaires et des marais côtiers sur les ressources halieutiques est bien connu [BOESCH & TURNER, 1984; SNEDAKER, 1989]. En dehors de l'effet du gradient de salinité, les estuaires agissent par leur bathymétrie et par la végétation des rives. Les zones peu profondes représentent un abri, protégeant les poissons de petite taille et les juvéniles [BLABER, 1985; ROZAS *et al.*, 1988]. Les apports nutritifs interviennent également. Dans le cas particulier des écosystèmes tropicaux, plusieurs travaux indiquent que les exportations par la mangrove ne sont pas négligeables dans le bilan trophique des eaux côtières [TWILLEY *et al.*, 1986; HARRIGAN *et al.*, 1989].

L'estuaire d'un petit fleuve côtier tropical, la Casamance, a fait l'objet d'une étude pluridisciplinaire menée par le CRODT (Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye) entre 1984 et 1987. Cet "estuaire inverse" [PRITCHARD, 1967] est hypersalin depuis plusieurs années [BRUNET-MORET, 1970; LE RESTE, 1984], avec des conséquences adverses sur les ressources halieutiques [ALBARET, 1987]. Les zones marécageuses, fréquentes, sont d'accès malaisé et la télédétection semblait intéressante, dès le début de l'étude, dans une double application. D'une part, la bathymétrie joue un rôle déterminant dans le renforcement de l'hypersalinité. Il était donc utile d'obtenir des relevés bathymétriques détaillés, pour lesquels le satellite SPOT était le plus adéquat par sa bonne résolution. D'autre part, les populations locales pratiquent traditionnellement une pisciculture extensive dans les rizières conquises sur la mangrove [CHABOUD *et al.*, 1987]. Un inventaire général des sites pouvait être profitable à différents projets d'aquaculture, portant aussi bien sur les poissons que sur les huîtres ou les crevettes.

Nous présentons ici les résultats des travaux de réalité de terrain orientés vers la bathymétrie et la qualité de l'eau. La reconnaissance des différents thèmes terrestres et l'exploitation des données satellitaires elles-mêmes seront rapidement mentionnées, mais feront l'objet de publications ultérieures.

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

L'estuaire de la Casamance est situé par 13°N (figure 1). Ses caractéristiques et son fonctionnement trophique ont été décrits par ailleurs [PAGES *et al.*, 1987]. Nous rappellerons ici quelques traits pertinents.

Climat et géographie

Le climat est sub-guinéen, avec une seule saison des pluies. Le bilan hydrique est fortement déficitaire dans la phase actuelle de sécheresse qui concerne tout le Sahel depuis environ 1970 [LAMB *et al.*, 1986]. Les

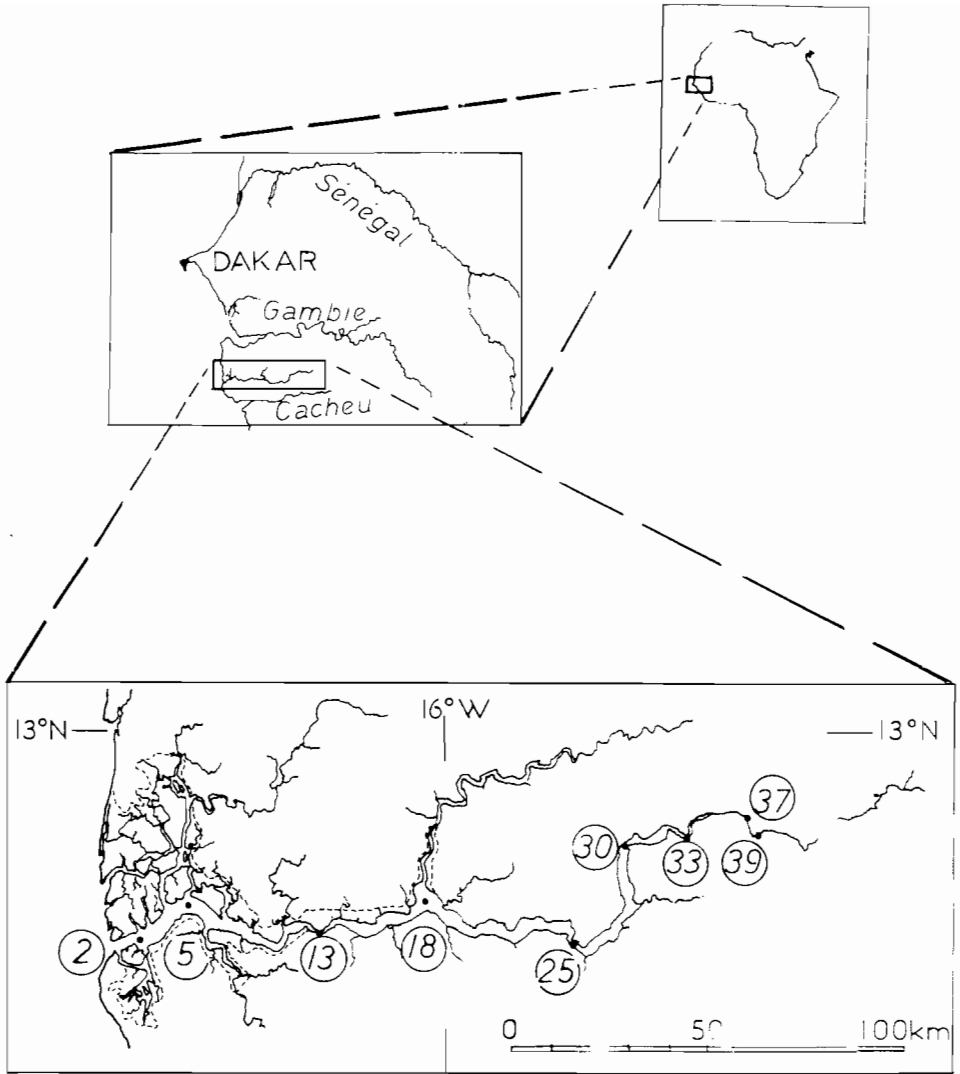


FIGURE 1 : Carte de situation de la Casamance et emplacement de quelques stations.

précipitations annuelles sont de 1 000 mm environ, alors que l'évaporation est de 1 600 mm par an en moyenne.

Le relief de toute la région est faible. L'estuaire de la Casamance est une ria, dont la portion aval, sur plus de 60 km, est constituée de vastes marécages colonisés par la mangrove. Les eaux libres ont une largeur de 1 à 10 km, sans compter les multiples canaux parcourant la mangrove. Les bancs de vase et les hauts-fonds sont nombreux. Dans la partie amont, la largeur du chenal principal se réduit. C'est ainsi que, à 220 km de la mer, les eaux libres font 20 à 40 m de largeur et sont bordées de vasières à *Phragmites australis*.

Physico-chimie des eaux (figure 2)

La marée, semi-diurne, est encore sensible à 230 km de la mer (station n° 37). Les courants de marée sont assez forts en aval ($1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ en jusant) et maintiennent les sédiments en suspension.

L'hydroclimat est dominé par le confinement sous climat sec. La sursalure en est la conséquence la plus perceptible. Un pic de salinité est toujours présent, analogue au "bouchon salin" observé dans d'autres estuaires tropicaux [WOLANSKI, 1986]. La salinité, au niveau de ce maximum, passe de 50 ‰ en fin de saison des pluies à 120-150 ‰ en fin de saison sèche. L'année 1986 fut exceptionnelle, avec une salinité extrême de 180 ‰. La salinité au maximum (S_M) et la position de ce maximum (repérée par sa distance à la mer (D) en km) sont liées [PAGES & DEBENAY, 1987] :

$$\ln S_M = \ln(527) - 0,46 \ln(240 - D).$$

La biomasse phytoplanctonique, estimée par la concentration en chlorophylle, (B) (en $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$; sans correction des phéopigments), est de 10 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ dans la portion aval et médiane. Elle augmente dans l'amont jusqu'à 100-300 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Le coefficient d'atténuation due au phytoplancton (K_b) (calculé avec une atténuation spécifique de $0,016 \text{ mg}^{-1} \cdot \text{m}^2$) [BANNISTER, 1974; KIRK, 1983; WEIDEMANN & BANNISTER, 1986] peut atteindre 3 m^{-1} en amont.

L'atténuation verticale de la lumière, (K_d) (mesurée *in situ*, entre 400 et 700 nm) est assez élevée dans tout l'estuaire. Les valeurs les plus fortes sont observées en amont ($K_d = 2 - 5 \text{ m}^{-1}$). Aucune tendance saisonnière significative n'est apparente. Les profondeurs de disque de Secchi (SD) sont de l'ordre de 1 m dans la portion médiane; elles diminuent vers l'amont jusqu'à 0,3-0,5 m. En aval, les valeurs de SD varient entre 0,5 et 2,0 m selon la marée.

L'absorption de la lumière par l'eau et les substances dissoutes a été mesurée en laboratoire sur des échantillons filtrés. L'absorption à une longueur d'onde donnée (375 nm par exemple) est un estimateur de la concentration en matière organique dissoute (MOD) [DAVIES-COLLEY & VANT, 1987]. Dans la portion aval et médiane, cette absorption est modérée ($A_{375} = 0,5 - 1,0 \text{ m}^{-1}$), mais elle augmente en amont ($A_{375} = 5,0 \text{ m}^{-1}$). Nous pouvons calculer le coefficient d'atténuation due à la MOD et à l'eau (K_w) par intégration du spectre

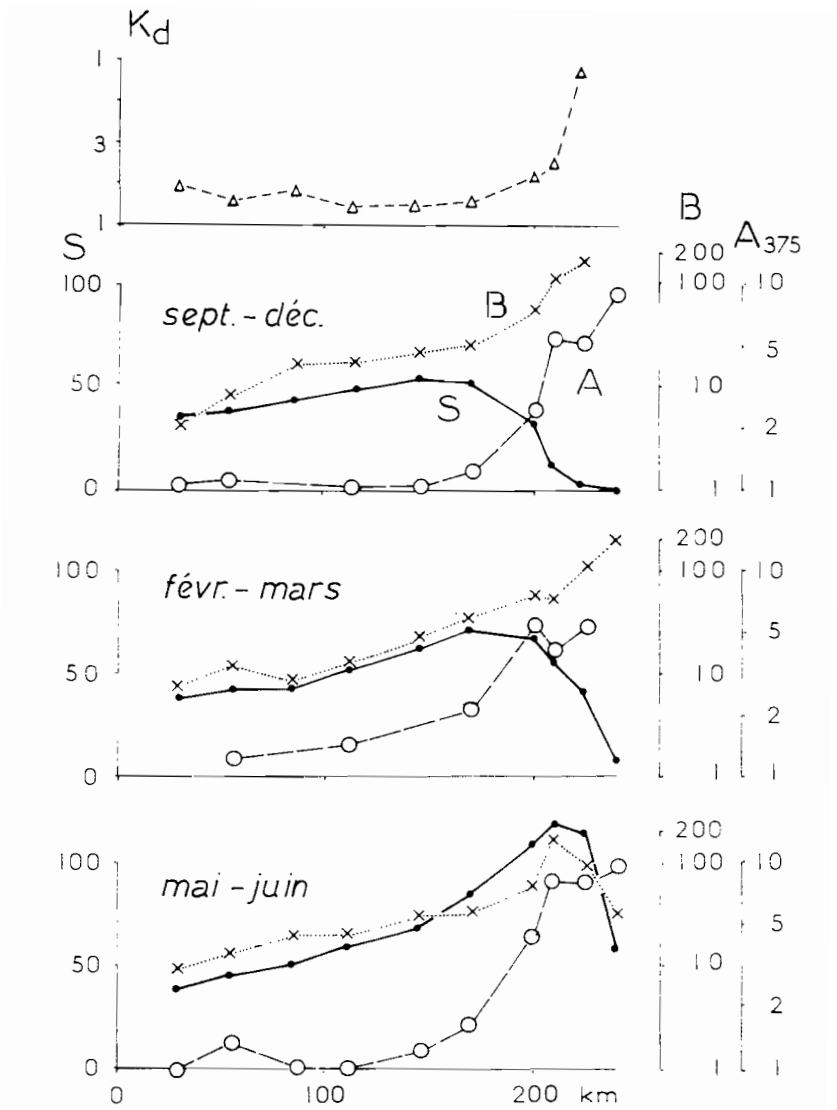


FIGURE 2: Distribution géographique des caractéristiques de l'eau le long de l'estuaire (distance à la mer en abscisses). En haut, coefficient d'atténuation verticale (K_d , en m^{-1} ; Δ - - Δ), moyennes 1984-1987. Les trois autres schémas sont des moyennes saisonnières de salinité (S, en $g \cdot kg^{-1}$; \bullet - \bullet), de chlorophylle (B, en $\mu g \cdot l^{-1}$; $x \cdots x$), et de MOD (estimée par l'absorption de la lumière (A_{375} , en m^{-1} ; O - - O). Les trois subdivisions saisonnières correspondent respectivement à la fin de la saison des pluies, au milieu de la saison sèche et à la fin de la saison sèche.

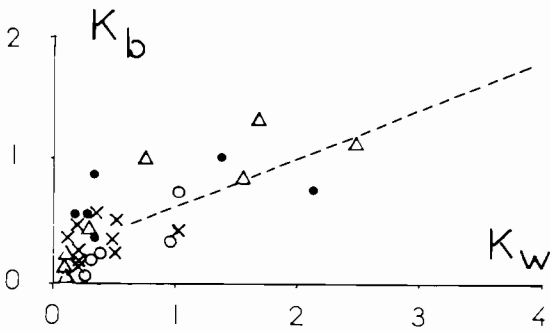
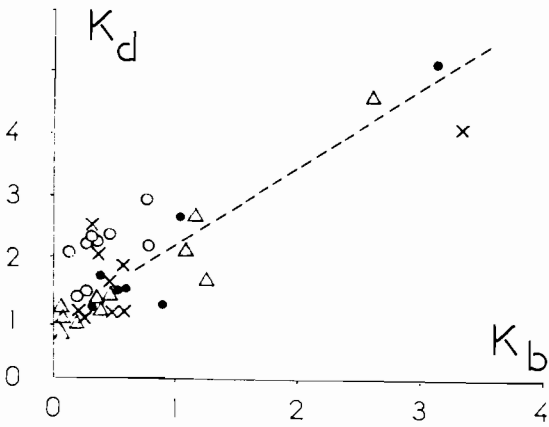
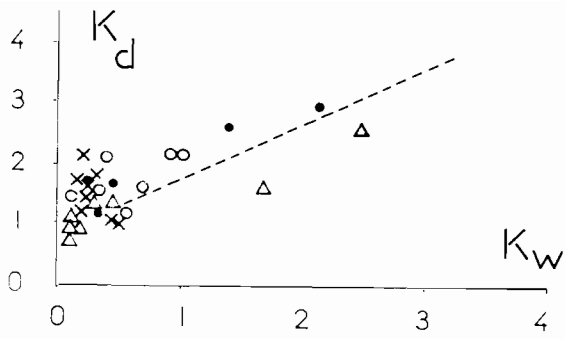


FIGURE 3 : Corrélations entre les caractéristiques optiques des eaux : coefficient d'atténuation verticale *in situ* (K_d), atténuation due aux substances dissoutes (K_w) et au phytoplancton (K_b), tous coefficients exprimés en m^{-1} . Les mesures ont été effectuées en octobre 1986 (.), novembre 1986 (x), mars 1987 (o) et mai 1987 (Δ).

d'absorption entre 400 et 700 nm. Nous obtenons des valeurs de $K_w = 0,2 \text{ m}^{-1}$ en aval, et de $K_w = 2,0 \text{ m}^{-1}$ en amont.

L'évolution parallèle des différentes caractéristiques optiques de l'eau (figure 3) peut être décrite par les corrélations suivantes (toutes significatives à plus de 99 %) :

	r	n	
$K_b = 0,21 + 0,42 K_w$	0,74	37	(R 1)
$K_d = 0,90 + 1,27 K_b$	0,73	48	(R 2)
$K_d = 0,85 + 0,90 K_w$	0,65	42	(R 3)
$K_d = 0,81 + 1,0 K_b + 0,4 K_w$	$r^2 = 0,50$	36	(R 4)

La répartition de ces divers paramètres est également liée à celle de la salinité. En utilisant les moyennes saisonnières (figure 2), la valeur absolue du gradient spatial de salinité (dS/dD) présente une corrélation (corrélation de rang de Spearman) significative à 95 % avec le gradient de la MOD (dA_{375} / dD) aux trois saisons. La corrélation de dS/dD avec le gradient de chlorophylle, dB/dD , n'est pas toujours significative.

MATERIEL ET METHODES

Les mesures de réalité de terrain en radiométrie ont été faites au cours de 4 missions entre septembre 1986 et mai 1987, donc couvrant une saison sèche complète. Nous avons employé un radiomètre CIMEL CE 310, opérant dans les trois canaux de SPOT : XS1 : 500-590 nm; XS2 : 610-680 nm; XS3 : 790-890 nm. La réflectance H_i dans les trois canaux est obtenue par lecture directe, après comparaison automatique entre l'éclairement (au zénith) et la luminance (au nadir). La tête d'éclairement mesure la lumière diffuse dans un angle de 15° . Les capteurs étaient maintenus à 1,5 m au-dessus du sol (ou de l'eau). L'ouverture des capteurs de luminance (12°) correspond alors à un champ de visée au sol d'environ 0,3 m de diamètre. Les profils "bathymétrie" étaient réalisés à pied, en se déplaçant perpendiculairement au rivage. La profondeur de l'eau sous le capteur (de 5 mm à 80 cm environ) était mesurée au moyen d'une règle tenue verticalement.

Les scènes SPOT employées ont été acquises en octobre 1986 (donc en fin de saison des pluies) : scènes 23-324,325 et 24-325 le 12 octobre, scènes 25-324,325 le 18 octobre. Nous avons utilisé les comptes numériques bruts (XSi) sans correction des effets atmosphériques.

RESULTATS

Qualité des eaux et signal radiométrique

Radiométrie de terrain

Dans chaque canal pris séparément, les valeurs de réflectance (H_i) varient peu sur un trajet entre l'aval et l'amont de l'estuaire. H_1 et H_2 montrent une tendance (non statistiquement significative, selon le test de rang de Spearman) à diminuer vers l'amont, tandis que H_3 augmente (figure 4). Le rapport H_3/H_1 augmente, parfois de façon significative, vers l'amont.

En comparant ce rapport avec les caractéristiques des eaux, nous obtenons une série de corrélations très hautement significatives, tant pour chaque paramètre isolément que pour leurs combinaisons (tableau 1).

TABLEAU 1 : *Corrélations du rapport de canaux H_3/H_1*

	r	n	
Avec la biomasse			
$H_3/H_1 = 0,20 + 0,18 K_b$	0,58	38	(R 5)
Avec la MOD			
$H_3/H_1 = 0,17 + 0,18 K_w$	0,64	31	(R 6)
Avec l'atténuation verticale <i>in situ</i>			
$H_3/H_1 = 0,13 + 0,13 K_d$	0,65	49	(R 7)
Corrélations multiples (n = 31)		r²	
$H_3/H_1 = 0,23 + 0,12 K_b + 0,09 K_w$		0,23	(R 8)
$H_3/H_1 = 0,15 + 0,05 K_w + 0,10 K_d$		0,36	(R 9)
$H_3/H_1 = 0,15 + 0,02 K_b + 0,11 K_d$		0,35	(R 10)
$H_3/H_1 = 0,15 + 0,02 K_b + 0,05 K_w + 0,10 K_d$		0,34	(R 11)
N.B. Toutes corrélations significatives à 99 %, sauf R8, à 95 %			

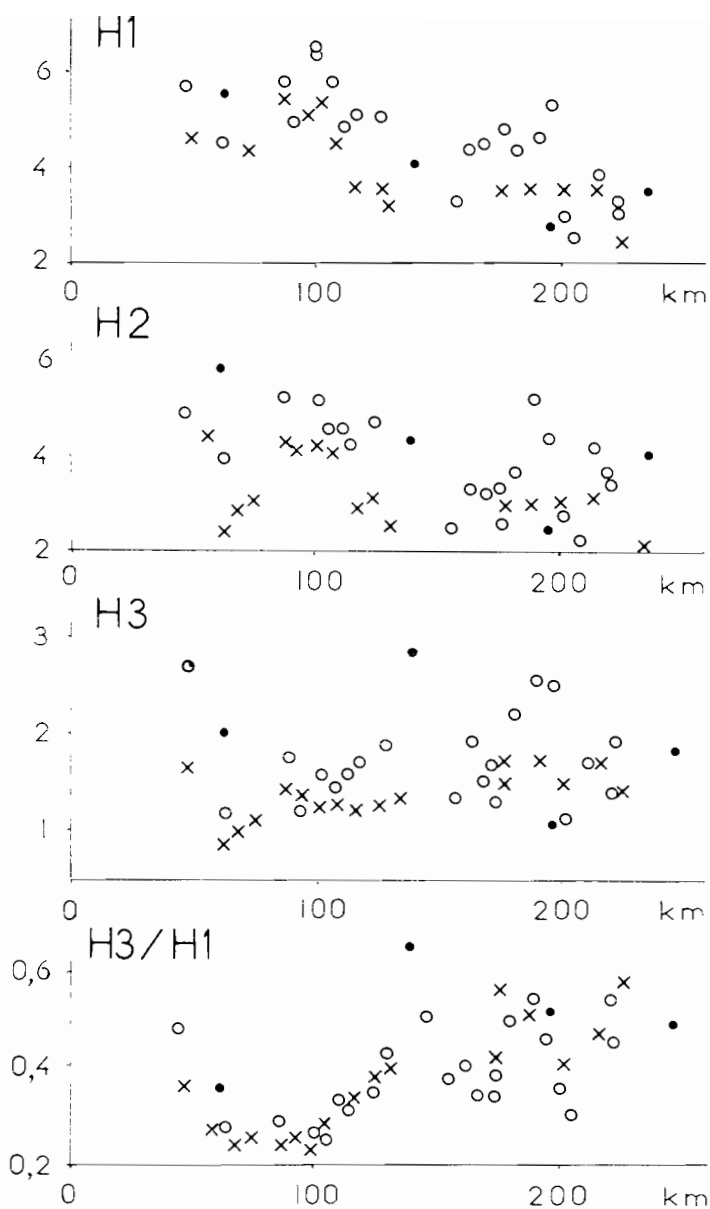


FIGURE 4: Distribution des réflectances des "eaux profondes" en radiométrie de terrain le long de l'estuaire (distance à la mer en abscisses). Nous distinguons les mesures effectuées en octobre 1986 (·), en novembre 1986 (x) et en mars 1987 (o).

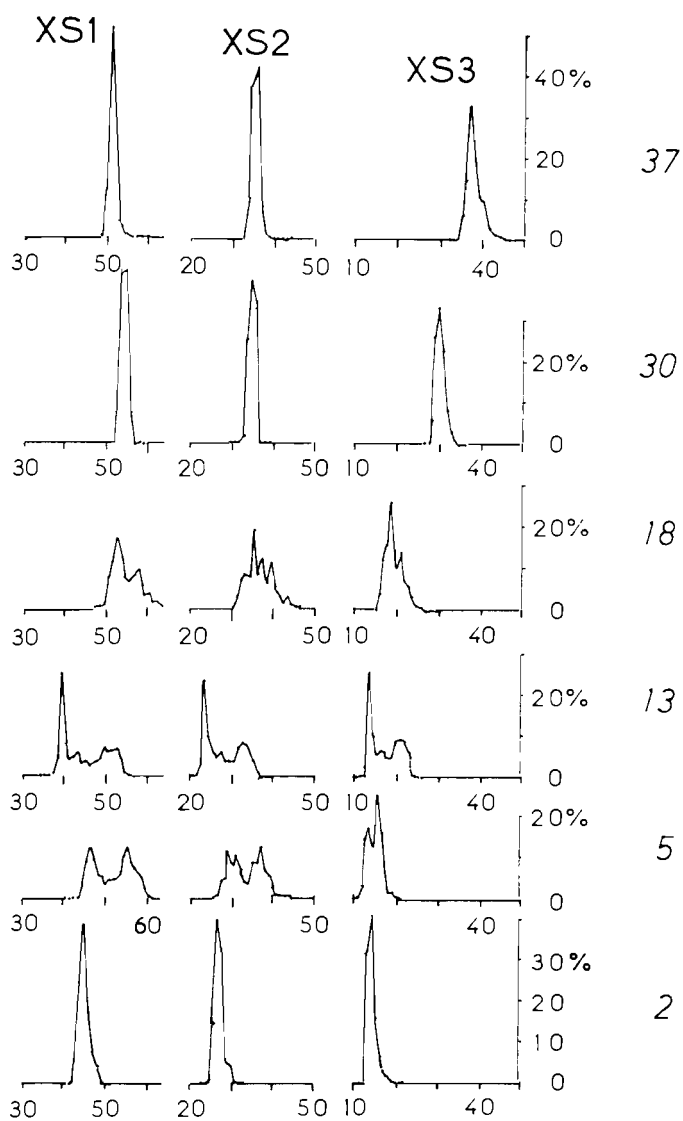


FIGURE 5: Quelques exemples d'histogrammes du signal "eau profonde" le long de l'estuaire dans les trois canaux du satellite SPOT. En abscisses sont reportés les comptes numériques bruts, en ordonnées les fréquences. Les chiffres en italique sont les numéros de station.

Données satellitaires

Pour évaluer l'effet de la qualité des eaux sur les signaux, nous avons sélectionné des portions d'image sur des zones que nous savions, par nos relevés de terrain, profondes de plus d'un mètre.

Au niveau des canaux individuels, la comparaison de la réflectance des eaux le long de l'estuaire est compliquée par de fortes variations des comptes numériques entre les deux séries du 12 et du 18 octobre. Un décrochement net existe entre les deux séries, surtout pour XS1 et XS2. Dans la série du 18 octobre, les comptes numériques XS3 tendent à croître d'aval (station 25) en amont (station 38). Toujours en considérant les trois canaux séparément, nous voyons que le signal de l'eau libre présente un histogramme unimodal, avec un pic étroit, en amont. En aval, le pic s'élargit et l'histogramme devient fréquemment bimodal (figure 5). Nous attribuons cette déformation au signal des particules minérales en suspension.

Le rapport de canaux XS3/XS1 présente un décrochement, en une même station (station 25), entre les deux séries du 12 et du 18 octobre, passant de 0,49 à 0,41. La différence d'instrument d'acquisition (HRV2 pour la scène 24-325, HRV1 pour les autres) est sans doute une des causes majeures de ce décrochement. Cependant, l'évolution sur l'ensemble de l'estuaire est significative (test de rang de Spearman) : XS3/XS1 diminue vers l'aval, passant de 0,8 (station 38) à 0,3 (station 5). Au stade actuel de l'exploitation des données, nous pouvons vérifier que XS3/XS1 suit bien les variations géographiques des caractéristiques de l'eau, du moins dans leur tendance générale (figure 6). Cependant, cette relation n'est pas linéaire, mais présente une "saturation" aux fortes valeurs de chlorophylle (B) ou de MOD. A titre indicatif, nous avons calculé les corrélations suivantes (significatives à 99%) :

$$XS3/XS1 = 1,21 + 0,40 \ln A_{375} \quad (r=0,96; n = 12) \quad (R12)$$

$$XS3/XS1 = -0,06 + 0,18 \ln B \quad (r=0,92; n = 9) \quad (R13)$$

$$XS3/XS1 = 0,34 + 0,37 \ln K_d \quad (r=0,96; n = 9) \quad (R14)$$

Bathymétrie et signal radiométrique

Radiométrie de terrain

En considérant séparément les trois canaux, nous voyons que la réflectance diminue quand la profondeur de l'eau augmente (figure 7) avec un effet plus marqué en H3 et, de façon prévisible, sur les fonds clairs. La variation de réflectance en fonction de la profondeur de l'eau (Z) doit suivre, selon la théorie (voir discussion), une loi de la forme

$$\ln H_i = \ln R_b - 2 K_o Z \quad (\text{équation 1})$$

où R_b est la réflectance du fond et K_o le coefficient d'atténuation verticale (scalaire) de l'eau. Pour chacun des profils bathymétriques réalisés, les corrélations sont souvent peu significatives et la pente de la relation est très variable. La couleur du fond a un effet : dans le canal 1 (le plus représentatif de l'absorption de l'eau dans la fenêtre 400-700

nm), nous obtenons pour les fonds clairs et les fonds sombres les deux relations respectives :

clairs : $\ln H1 = \ln 9,5 - 0,86 Z$ ($r = -0,52, n = 37$) ($P = 99\%$)

sombres : $\ln H1 = \ln 3,7 - 0,97 Z$ ($r = -0,35, n = 28$) ($P < 90\%$, n.s.)

(n.s. : non significatif)

Cependant, dans le cas d'une application satellitaire, cette couleur serait a priori inconnue. Nous avons donc calculé une relation générale entre réflectances et profondeur de l'eau; pour l'ensemble des profils bathymétriques, nous obtenons :

$$\ln H1 = \ln 6,8 - 0,65 Z \quad (r = -0,41, n = 65) \quad (P = 99\%) \quad (R15)$$

Si nous considérons maintenant le rapport de canaux H3/H1, nous voyons qu'il diminue quand la profondeur de l'eau augmente (figure 8). En utilisant à nouveau la forme mathématique théorique, nous obtenons pour les différents profils bathymétriques des corrélations plus satisfaisantes qu'avec les trois canaux pris séparément et les variations sont plus réduites. Sur l'ensemble des profils, nous obtenons :

$$\ln (H3/H1) = \ln 1,45 - 2,87 Z \quad (r = -0,87, n = 70) \quad (P > 99\%) \quad (R16)$$

et, en éliminant les fonds clairs, nous avons une équation très comparable :

$$\ln (H3/H1) = \ln 1,47 - 2,63 Z \quad (r = -0,88, n = 52) \quad (P > 99\%) \quad (R16')$$

L'utilisation du rapport de canaux permet donc de diminuer fortement l'effet de la couleur du sédiment. Cependant, un examen du graphique de H3/H1 en fonction de Z montre que la forme ci-dessus ($\ln H3/H1 = f(Z)$; figure 8 A) représente mal les phénomènes dans les eaux très peu profondes. Une transformation logarithmique sur la variable Z, et non sur la fonction H3/H1, décrit mieux les eaux peu profondes (figure 8 B) :

$$H3/H1 = 0,1 - 0,37 \ln Z \quad (r = -0,91, n = 52) \quad (P > 99\%) \quad (R17)$$

Sans définir de limites de confiance, nous voyons (figure 8 B) que, pour une valeur donnée de H3/H1, l'incertitude sur Z (quelle qu'en soit la cause) est de l'ordre d'un facteur 2.

Nous pouvons remarquer que les terrains émergés donnent des signaux assez différents selon leur humidité. Le sol humide (humidifié par capillarité) ou mouillé (pellicule d'eau de 1 mm ou moins) a généralement une valeur maximale de H3/H1 (de 1,7 à 2,7, selon la couleur); les sols secs présentent des valeurs légèrement plus faibles (1,5 à 2,2) (figure 8 B).

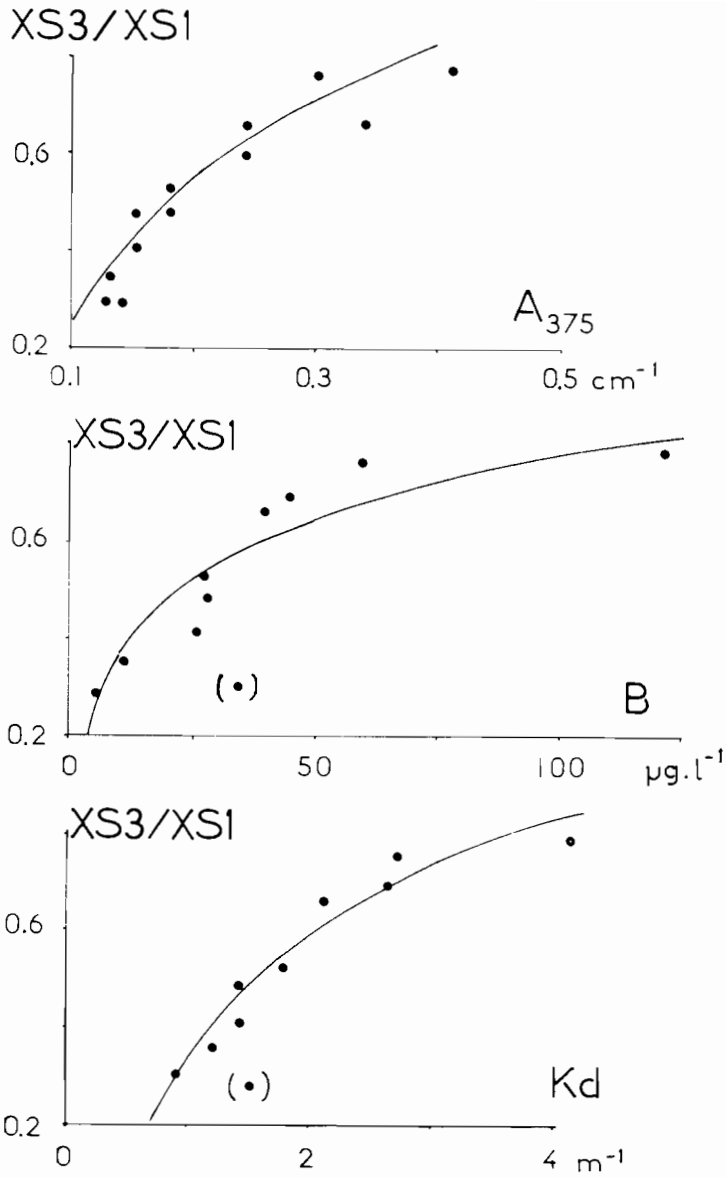


FIGURE 6: Relation entre les données satellitaires (rapport des comptes numériques bruts) et les caractéristiques des "eaux profondes": absorption de la lumière dans l'ultraviolet (estimateur de la MOD), concentration en chlorophylle et coefficient d'atténuation verticale. Le point entre parenthèses correspond à une eau d'aval, chargée en sédiments et n'est pas inclus dans les corrélations (R12-R14).

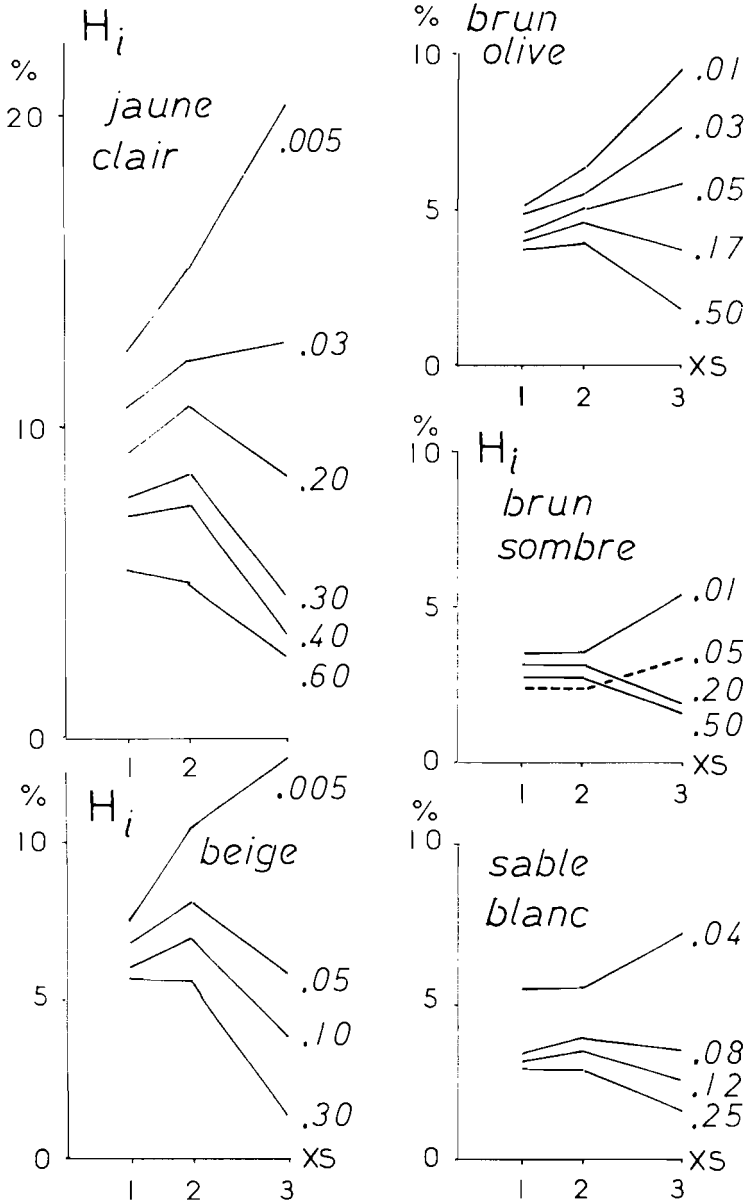


FIGURE 7 : Signatures obtenues en radiométrie de terrain sur des eaux de profondeur décroissante (profondeur, en m, en italiques). Des sédiments de couleur différente donnent des signatures différentes.

Données satellitaires et bathymétrie

Nous avons jusqu'ici traité prioritairement la portion extrême amont, où la marée n'agit plus sur le niveau de l'eau, et la portion aval, où nous connaissons facilement l'état de la marée. Dans les deux cas, nous avons distingué en première approximation trois thèmes : le thème "eau profonde" ($Z > 0,6$ m), le thème "hauts-fonds" ($0,6 > Z > 0,02$ m), et le thème "marécages". L'ensemble de ces trois thèmes compose les zones humides (par opposition aux zones exondées en permanence), qui doivent être prises en compte dans le bilan hydrique. Ces trois thèmes donnent des signaux XS3/XS1 différents.

Dans la portion amont, nous avons vu que les caractéristiques des eaux présentent un fort gradient spatial (figure 2). Le thème "eau profonde" a donc des bornes variables que nous avons définies à la fois par les liaisons entre le signal XS3/XS1 et B (concentration en chlorophylle) et d'après notre connaissance du terrain. La borne supérieure du rapport XS3/XS1 pour les "eaux profondes" passe ainsi de 0,59 à 0,74 entre les stations n° 33 et n° 39, sur une distance de 30 km. Ces "eaux profondes" ne représentent que 15 à 30 % des surfaces humides totales. Les "marécages" couvrent de 30 à 50 % des surfaces humides.

Dans la portion aval, à l'heure de prise de vue, la marée était proche de l'étalement de basse mer, selon les tables de marée du Service hydrographique. Des comparaisons ponctuelles sur des zones connues indiquent que la classe "eau profonde" est délimitée par $XS3/XS1 \leq 0,30$. La classe "hauts-fonds" est définie par $0,31 < XS3/XS1 < 0,47$, correspondant à $0,5 \text{ m} > Z > 0,01 \text{ m}$ (figure 9).

DISCUSSION

Traitement des signaux radiométriques

En radiométrie de réalité de terrain, nous avons été amenés à choisir le rapport de canaux H3/H1 uniquement par inspection des données sans a priori, et après essai de différentes autres combinaisons. Nous sommes conscients de l'existence d'autres traitements possibles, dont l'"index de chromaticité" [LINDELL *et al.*, 1986] ou la transformation de Kauth-Thomas [HODGSON *et al.*, 1987]. Ces combinaisons, ou traitements, se justifient pour certains objectifs ou avec certains capteurs. Dans le cas présent, nous avons pu constater qu'une combinaison très simple était adéquate pour nos objectifs bien déterminés, à la fois sur les mesures de terrain et sur les données satellitaires.

Nous avons indiqué que les données satellitaires ont, jusqu'ici, été employées sans essai de correction des effets atmosphériques. L'erreur introduite peut être importante, surtout dans les grandes longueurs d'onde du canal 3, où le signal de l'eau peut représenter moins de 10 % du signal total [STURM, 1981]. Notre emploi d'un rapport de canaux réduit certaines des variations ou des erreurs instrumentales, mais ne peut supprimer les effets atmosphériques.

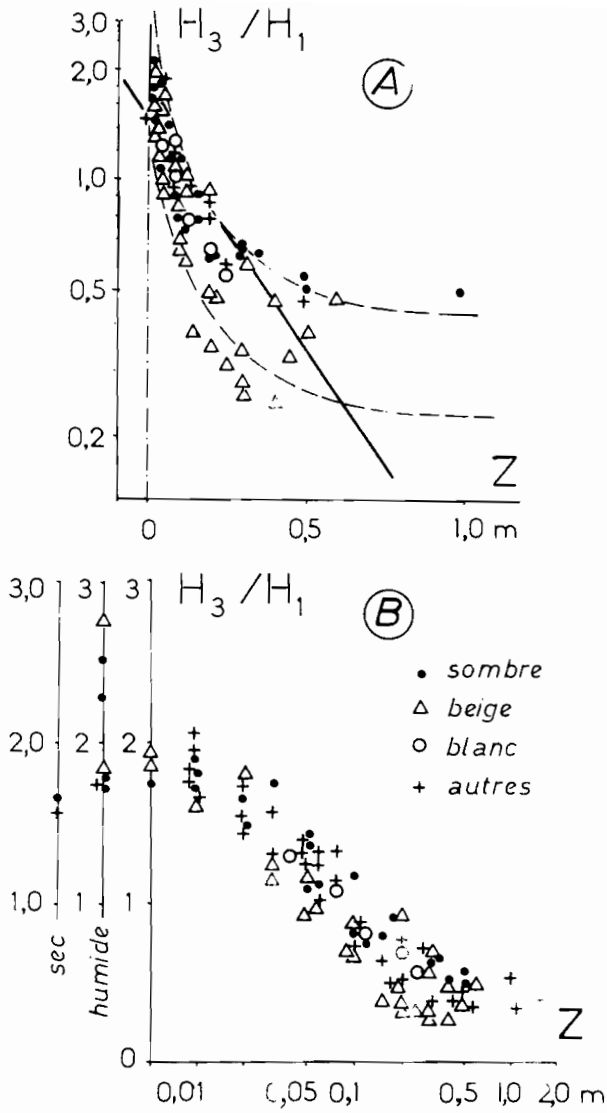


FIGURE 8 : Diminution du rapport de canaux H_3/H_1 , en radiométrie de terrain, pour une profondeur croissante de l'eau. En A : coordonnées conformes à la théorie et droite de corrélation (équation R16). En B : utilisation de la forme mathématique inverse.

Qualité des eaux "profondes" et radiométrie

La détermination des caractéristiques des eaux par télédétection est désormais classique. La concentration en chlorophylle est un des paramètres les plus fréquemment mesurés, soit pour la surveillance d'un écosystème continental [RITCHIE & COOPER, 1987], soit pour l'estimation de la production primaire, aussi bien en milieu lacustre [LEMOALLE, 1979] qu'en milieu océanique [PLATT *et al.*, 1988]. Le recours à deux longueurs d'onde est également fréquent [STURM, 1981], surtout dans le cas où les particules minérales sont abondantes [STUMPF & PENNOCK, 1989]. La matière organique dissoute est fortement absorbante dans l'ultra violet [DAVIES-COLLEY & VANT, 1987], mais peut aussi interférer avec le signal de la chlorophylle [CARDER *et al.*, 1989].

Dans l'estuaire de la Casamance, les eaux de type 1 (comme défini par ROBINSON, 1985) sont pratiquement absentes. Les eaux de l'amont sont de type 2 avec un effet important de la MOD, donc du type G (GA) défini par KIRK [1983], tandis que l'aval présente des eaux de type T [KIRK, 1983], à forte concentration en solides inorganiques. Dans les eaux d'amont, nous avons mentionné que l'absorption verticale *in situ* (K_d) est due à la fois à la MOD (K_w) et au phytoplancton (K_b), celui-ci ayant un "poids" double de celui de la MOD (voir régression R4). Inversement, en radiométrie de terrain, le rapport H3/H1 est plus affecté par la MOD que par la chlorophylle, d'après les coefficients respectifs de K_b et K_w dans les corrélations multiples (voir tableau 1, régressions R 9 et R 11). Nous disposons pour l'instant de trop peu de données satellitaires pour tenter une comparaison similaire.

Radiométrie et bathymétrie

L'emploi des techniques de télédétection dans la détermination de la bathymétrie des eaux côtières n'est pas récent [STURM, 1981]. Le problème le plus fréquemment mentionné est celui de la pénétration de la lumière, et donc de la "portée" de la technique [JOHNSON & MUNDAY, 1983]. Dans le cas présent, notre intérêt était centré sur la bathymétrie des zones les moins profondes, à $Z < 0,6$ m, qui restaient inaccessibles aux sondages acoustiques traditionnels. La forte absorption de la lumière par les eaux de la Casamance ne semblait donc pas devoir être un problème. A l'usage, nous avons vu qu'une profondeur optique "infinie" était justement atteinte (pour le rapport H3/H1) vers 0,6 m.

Il demeure cependant deux groupes de problèmes, l'un lié à la forme mathématique de la relation et l'autre touchant à l'application satellitaire.

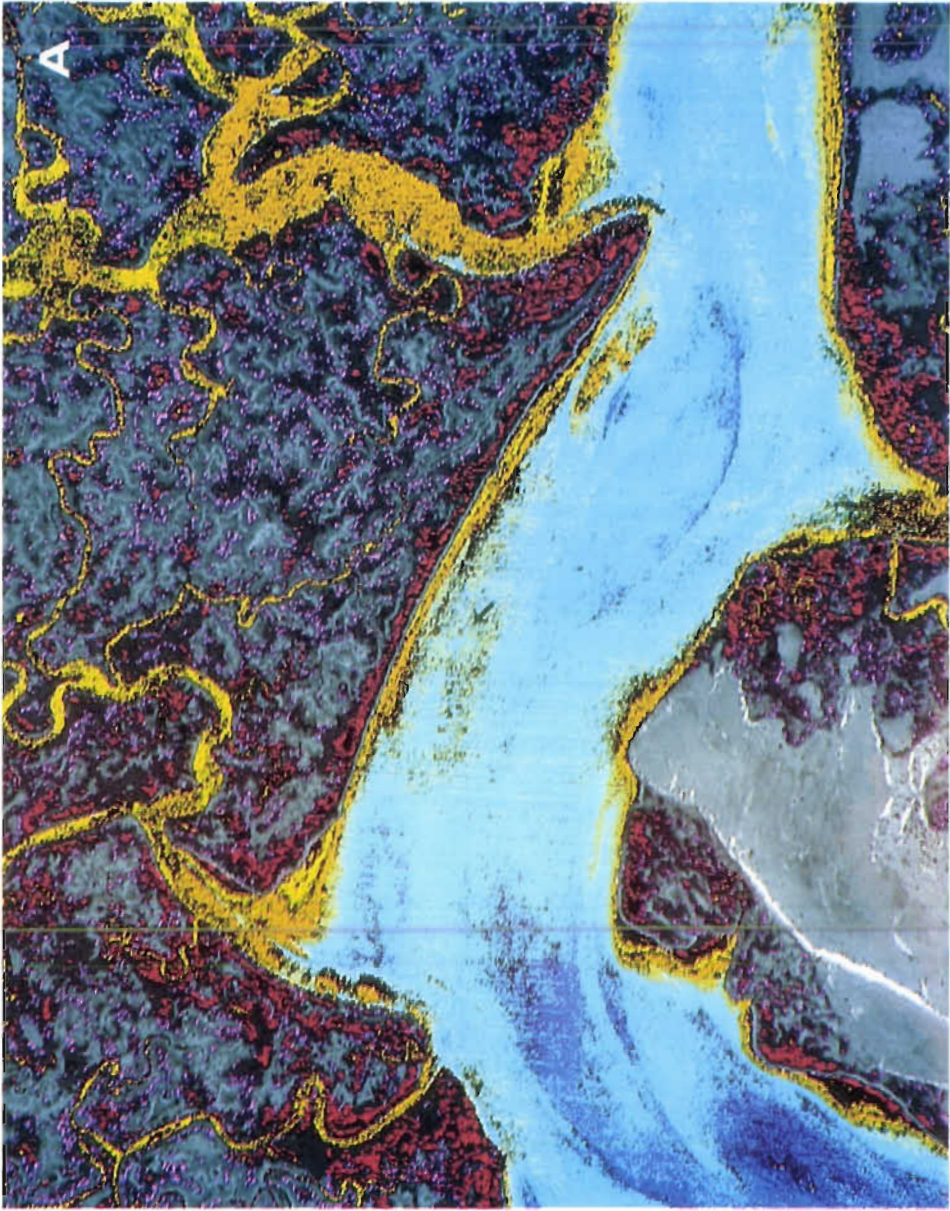
Forme mathématique

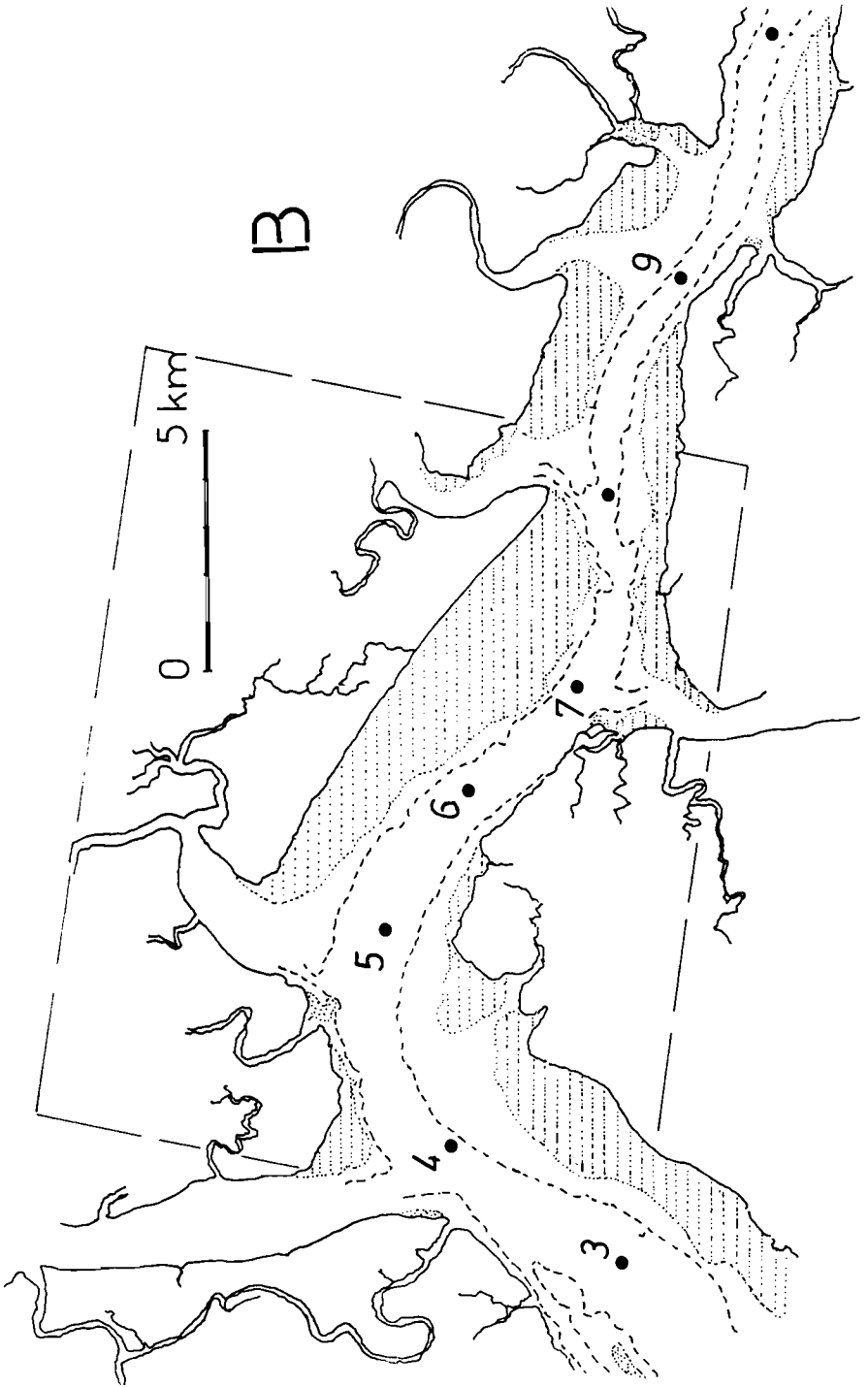
La théorie de la propagation de la lumière dans l'eau [KIRK, 1983] prédit que la réflectance d'une eau, en présence d'un fond encore visible, devrait dépendre de la profondeur de cette eau suivant l'équation 1 (voir "Radiométrie de terrain"). Cette forme mathématique, $\ln H_i = f(Z)$, est

FIGURE 9 : Illustration de l'exploitation des données satellitaires.

A : Traitement d'une scène SPOT (voir en B pour la localisation) par emploi du rapport de canaux XS3/XS1. La palette de fausses couleurs a été choisie arbitrairement pour faire ressortir les eaux "profondes" (différentes nuances de bleu) et les hauts-fonds (en jaune).

B : Situation de la scène (cadre en tiretés fins), avec emplacement des stations pour faciliter le repérage. Les profondeurs inférieures à 0,5 m sont en pointillés ; l'isobathe 5 m est indiquée en pointillé. Schéma d'après la carte 6137 du Service hydrographique de la Marine.





retrouvée dans la littérature, aussi bien pour une seule longueur d'onde [SPITZER & DIRKS, 1986] que pour un rapport de canaux [JOHNSON & MUNDAY, 1983]. Cependant, appliquée à nos mesures de terrain, cette forme aboutit à deux problèmes. Le premier tient à l'ajustement visuel de l'ensemble des données (figure 8), surtout pour les eaux les moins profondes et pour les fonds clairs. La forme mathématique inverse, $H_i = (\ln Z)$ (voir régression R 17) permet un meilleur ajustement pour l'ensemble des données. L'inconvénient – jusqu'ici mineur – de cette forme est que nous ne pouvons pas extrapoler la relation à profondeur nulle. Nous avons relevé que l'incertitude sur Z , pour une valeur donnée de H_3/H_1 , est d'un facteur 2. Cette estimation est obtenue par inspection de la distribution des données expérimentales. Dans l'état actuel de l'étude, et compte tenu des interrogations quant à la forme même de la relation, il ne nous semble pas utile de pousser plus avant l'analyse et de définir des limites de confiance.

Le second problème tient à la signification de la pente de la relation "théorique". Nous avons mentionné que la comparaison de l'équation 1 et de la régression expérimentale (R 15 par exemple) indique un coefficient d'atténuation verticale (K_d) d'environ $0,4 \text{ m}^{-1}$, alors que les coefficients mesurés *in situ* étaient $K_d \approx 1-2 \text{ m}^{-1}$. Ce désaccord peut être relié à deux faits. D'une part, chaque profil bathymétrique de vérité de terrain portait sur 4 à 6 mesures; les pentes des régressions de H_i sur Z ont donc des limites de confiance très larges et ne sont généralement pas significativement différentes d'un profil à l'autre. D'autre part, les eaux étudiées lors des trois missions de terrain présentaient une gamme réduite de valeurs de K_d . Cette base étroite, superposée à la variabilité des fonds, justifie le désaccord observé. Il appert que nos mesures, sur des eaux naturelles, doivent être complétées par une étude sur des systèmes expérimentaux artificiels.

Applications satellitaires

Quelques contrôles ponctuels, sur des zones bien connues quant à leur bathymétrie, ont comparé les profondeurs réelles et celles déterminées à partir des données satellitaires. Compte tenu des diverses sources d'incertitude (profondeur réelle moyenne sur le pixel, entre autres), l'accord semble satisfaisant (figure 9), mais devra être confirmé pour tous les types d'eau.

Dans la portion médiane de l'estuaire que nous n'avons pas abordée ici, la vérification sera compliquée par les facteurs liés à la marée. La propagation de l'onde de marée moyenne a été mesurée dans le chenal principal [BRUNET-MORET, 1970], mais elle est mal connue dans les chenaux de mangrove. Il faudra cependant déterminer l'état de la marée et le niveau de l'eau, en chaque point.

Dans les applications préliminaires présentées ici, nous avons délimité trois grandes classes de profondeurs. Nous avons ainsi pu préciser la distribution des hauts-fonds et des marécages. Ce point s'était révélé important pour des simulations numériques du fonctionnement et du bilan hydrique de la portion amont de l'estuaire [PAGES &

DEBENAY, 1987]. Les résultats finals seront utilisés dans une modélisation fine, visant à relier la pluviométrie à la salinité du fleuve.

CONCLUSION

Les eaux de la Casamance présentent de fortes valeurs des coefficients d'atténuation lumineuse. Nous avons pourtant vu que la télédétection peut être employée dans un tel environnement. Les relations obtenues, par nos mesures de terrain, entre le signal optique et les caractéristiques des eaux sont certes spécifiques à ce milieu particulier. Mais il se confirme que la télédétection fournit des indications sur la bathymétrie et l'hydroclimat.

Dans le domaine aquatique, les liaisons entre les ressources halieutiques et l'environnement sont complexes, mais des relations du type "boîte noire" peuvent exister. Ainsi, l'indice morpho-édaphique peut, moyennant quelques précautions, donner une bonne indication de la productivité d'un écosystème [KERR & RYDER, 1988; SCHNEIDER & HAEDRICH, 1989]. Le signal optique des eaux, fonction de la bathymétrie et de l'hydrobioclimat, permettrait de mieux estimer la productivité potentielle des différentes parts de l'estuaire.

Mais les ressources halieutiques réelles dépendent aussi des structures humaines d'exploitation. La télédétection, surtout avec la haute définition du satellite SPOT, devrait permettre de mieux connaître l'évolution des implantations humaines (villages ou campements temporaires de pêcheurs) et de reconnaître des sites exploitables, le tout dans l'environnement peu accessible des mangroves tropicales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBARET (J.-J.), 1987. - Les peuplements de poissons de la Casamance (Sénégal) en période de sécheresse. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, 20, 3-4, pp. 291-310.
- BANNISTER (T.T.), 1974. - A general theory of steady state phytoplankton growth in a nutrient saturated mixed layer. *Limnology and oceanography*, 19, 1, pp. 13-30.
- BLABER (S.J.M.), 1985. - The ecology of fishes of estuaries and lagoons of the Indo-Pacific with particular reference to Southeast Africa, in: *Fish community ecology in estuaries and coastal lagoons: towards an ecosystem integration*, ed. A. Yanez-Arancibia, pp. 247-265. - México : Universidad nacional autonoma de México.
- BOESCH (D.F.) & TURNER (R.F.), 1984. - Dependence of fishery species on salt marshes: the role of food and refuge. *Estuaries*, 7, 4A, pp. 460-468.

- BRUNET-MORET (Y.), 1970. - *Etudes hydrologiques en Casamance. Rapport définitif.* - Paris : ORSTOM, Service hydrologique. - 52 p.
- CARDER (K.L.), STEWARD (R.G.), HARVEY (G.R.) & ORTNER (P.B.), 1989. - Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and oceanography*, 34, 1, pp. 68-81.
- CHABOUD (C.), CORMIER-SALEM (M.-C.), DIAW (M.C.) & KEBE (M.), 1987. - Approche socio-économique de l'exploitation du milieu aquatique casamançais. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, 20, 3-4, pp. 323-332.
- DAVIES-COLLEY (R.J.) & VANT (W.N.), 1987. - Absorption of light by yellow substance in freshwater lakes. *Limnology and oceanography*, 32, 2, pp. 416-425.
- HARRIGAN (P.), ZIEMAN (J.C.) & MACKO (S.A.), 1989. - The base of nutritional support for the gray snapper (*Lutjanus griseus*): an evaluation based on a combined stomach content and stable isotope analysis. *Bulletin of marine science*, 44, 1, pp. 65-77.
- HODGSON (M.E.), JENSEN (J.R.), MACKAY (H.E.) jr. & COULTER (M.C.), 1987. - Remote sensing of wetland habitat: a Wood Stork example. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 53, 8, pp. 1075-1080.
- JOHNSON (R.W.) & MUNDAY (J.C.) jr., 1983. - The marine environment, in : *Manual of remote sensing*, ed. R.N. Colwell, 2, pp. 1371-1496. - 2nd edition. - Falls Church : American society of photogrammetry.
- KERR (S.R.) & RYDER (R.A.), 1988. - The applicability of fish yield indices in freshwater and marine ecosystems. *Limnology and oceanography*, 33, 4, part 2, pp. 973-981.
- KIRK (J.T.O.), 1983. - *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems.* - Cambridge : Cambridge university press. - XI-401 p.
- LAMB (P.J.), PEPLER (R.A.) & HASTENRATH (S.), 1986. - Interannual variability in the tropical Atlantic. *Nature*, 322, 6076, pp. 238-240.
- LEMOALLE (J.), 1979. - *Biomasse et production phytoplanctoniques du lac Tchad (1968-1976). Relations avec les conditions du milieu.* - Paris : ORSTOM. - 311 p.
- LE RESTE (L.), 1984. - Etude des variations annuelles de la production de crevettes dans l'estuaire de la Casamance (Sénégal). *Studies*

and reviews - *General fisheries council for the Mediterranean*, **61**, 1, pp. 253-269.

- LINDELL (T.), KARLSSON (B.), ROSENGREN (M.) & ALFÖLDI (T.), 1986. - A further development of the chromaticity technique for satellite mapping of suspended sediment load. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, **52**, 9, pp. 1521-1529.
- PAGES (J.) & DEBENAY (J.-P.), 1987. - Evolution saisonnière de la salinité de la Casamance. Description et essai de modélisation. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, **20**, 3-4, pp. 203-217.
- PAGES (J.), DEBENAY (J.-P.) & LEBRUSQ (J.-Y.), 1987. - L'environnement estuarien de la Casamance. *Revue d'hydrobiologie tropicale*, **20**, 3-4, pp. 191-202.
- PLATT (T.), SATHYENDRANATH (S.), CAVERHILL (C.M.) & LEWIS (M.R.), 1988. - Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing. *Deep-sea research*, (A) **35**, 6, pp. 855-879.
- PRITCHARD (D.W.), 1967. - What is an estuary: physical viewpoint, in : *Estuaries*, ed. G.H. Lauff, pp. 3-5. -Washington, D.C. : American association for the advancement of science. - (Publication AAAS ; 83).
- RITCHIE (J.C.) & COOPER (C.M.), 1987. - Comparison of Landsat MSS pixel array sizes for estimating water quality. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, **53**, 11, pp. 1549-1553.
- ROBINSON (I.S.), 1985. - *Satellite oceanography, an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. - Chichester : Ellis Horwood. - 455 p. - (Ellis Horwood series in marine science).
- ROZAS (L.P.), McIVOR (C.C.) & ODUM (W.E.), 1988. - Intertidal rivulets and creekbanks: corridors between tidal creeks and marshes. *Marine ecology-progress series*, **47**, 3, pp. 303-307.
- SCHNEIDER (D.C.) & HAEDRICH (R.L.), 1989. - Prediction limits of allometric equations: a reanalysis of Ryder's morphoedaphic index. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, **46**, 3, pp. 503-508.
- SNEDAKER (S.C.), 1989. - Overview of ecology of mangroves and information needs for Florida Bay. *Bulletin of marine science*, **44**, 1, pp. 341-347.
- SPITZER (D.) & DIRKS (R.W.J.), 1986. - Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote

- sensing, in : *Proceedings of the 7th international symposium on remote sensing for resources development and environmental management, Enschede, Netherlands, August 25-27, 1986*, ed. M.C.J. Damen, G.S. Smit & H.T. Verstappen, **2**, pp. 775-777. - Rotterdam : A. Balkema.
- STUMPF (R.P.) & PENNOCK (J.R.), 1989. - Calibration of a general optical equation for remote sensing of suspended sediments in a moderately turbid estuary. *Journal of geophysical research*, **94**, C10, pp. 14363-14371.
- STURM (B.), 1981. - The atmospheric correction of remotely sensed data and the quantitative determination of suspended matter in marine water surface layers, in : *Remote sensing in meteorology, oceanography and hydrology*, ed. A.P. Cracknell, pp. 163-197. - Chichester : Ellis Horwood. - (Ellis Horwood series in environmental science).
- TWILLEY (R.R.), LUGO (A.E.) & PATTERSON-ZUCCA (C.), 1986. - Litter production and turnover in basin mangrove forests in southwest Florida. *Ecology*, **67**, 3, pp. 670-683.
- WEIDEMANN (A.D.) & BANNISTER (T.T.), 1986. - Absorption and scattering coefficients in Irondequoit Bay. *Limnology and oceanography*, **31**, 3, pp. 567-583.
- WOLANSKI (E.), 1986. - An evaporation-driven salinity maximum zone in Australian tropical estuaries. *Estuarine, coastal and shelf science*, **22**, 4, pp. 415-424.

ZONE HAUTURIERE

Dans la dernière partie de cet ouvrage, nous abordons le domaine hauturier avec en toile de fond les pêcheries de thonidés. Avant d'évoquer le problème de la prévision des zones de pêche, C. DUPOUY par la télédétection satellitaire évalue un des plus importants paramètres de la biologie marine : la teneur en chlorophylle d'une masse d'eau. En effet, la quantité de phytoplancton est le premier paramètre qui traduit la richesse d'une masse d'eau et son degré d'ensemencement. Des cartes de température de la surface de la mer dressées à partir de données satellitaires avec un algorithme tel que celui élaboré par J. CITEAU et H. DEMARCQ, J.-M. STRETTA a pu développer un modèle prévisionnel pour la pêche thonière.

Ce type de modèle prévisionnel fait déjà partie du passé. L'avenir repose sur l'utilisation de toutes les informations sur l'environnement marin obtenues essentiellement par la télédétection aérospatiale et intégrées dans des systèmes experts dédiés à la pêche. Ce type d'approche, partie des recherches thonières menées au Centre ORSTOM de Montpellier par J.-M. STRETTA et M. PETIT, fait école actuellement dans d'autres secteurs de l'halieutique.

La chlorophylle de surface observée par le satellite NIMBUS-7 dans une zone d'archipel (Nouvelle-Calédonie et Vanuatu). Une première analyse

par

CÉCILE DUPOUY

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre ORSTOM
B.P. A5, Nouméa (Nouvelle-Calédonie)*

RESUME

Une première analyse de quarante scènes claires acquises par le capteur CZCS du satellite NIMBUS-7 de 1978 à 1984 sur la Nouvelle-Calédonie et le Vanuatu, apporte une vision nouvelle de la distribution de la chlorophylle de surface dans une zone d'archipel. Les structures superficielles tracées par le phytoplancton de surface ont été classées en deux groupes suivant deux critères : organisation spatiale et concentration en chlorophylle "satellite". On distingue un signal fort, lié aux variations saisonnières de la chlorophylle dans le Pacifique tropical Sud-Ouest, et des signaux de plus faible intensité, autour des terres émergées. Des effets d'îles apparaissent autour de la Nouvelle-Calédonie, mais sont plus réduits autour des îles Loyauté.

ABSTRACT

A preliminary analysis of forty cloud-free images of the NIMBUS-7 satellite taken by CZCS from 1978 to 1984 over New Caledonia and Vanuatu gives a new insight about the distribution of surface chlorophyll in an archipelago area. The superficial structures drawn by surface phytoplankton has been classified into two groups following two criteria : spatial organization and "satellite" chlorophyll concentration. It is possible to distinguish a strong signal connected with seasonal variations of chlorophyll in the south-western tropical Pacific Ocean, and lower intensity signals around islands. Some island effects appear around New Caledonia, but they are less important around the Loyalty Islands.

INTRODUCTION

Le capteur CZCS* à bord du satellite NIMBUS-7 (1978-1985) possède un canal bleu, indispensable à la mesure de la concentration en pigments chlorophylliens [HOVIS *et al.*, 1980]. Par ailleurs, les données de couleur de l'océan ont été largement utilisées pour l'étude et le suivi de systèmes productifs, tels les upwellings côtiers [EPPLEY *et al.*, 1985; PELAEZ & MCGOWAN, 1986 ; BRICAUD *et al.*, 1987 ; DUPOUY & DEMARCO, 1987 ; SHANNON *et al.*, 1983], les plateaux continentaux [HOLLIGAN *et al.*, 1983 ; VIOLLIER *et al.*, 1988], les grands courants tel le Gulf Stream [GORDON *et al.*, 1983], les sorties de fleuves [MULLER-KARGER *et al.*, 1988]. En revanche, peu d'études ont été entreprises à l'aide du satellite sur la biomasse océanique des zones oligotrophes [LOHRENZ *et al.*, 1988] ou autour des îles [FELDMAN *et al.*, 1984]. C'est l'originalité de ce travail d'être ciblé sur une région à la fois oligotrophe et parsemée d'îles.

Le Pacifique tropical Sud-Ouest est en effet considéré comme un océan oligotrophe du fait de la généralisation de la Structure tropicale typique** avec une thermocline plus profonde que dans l'Atlantique, associée à la nitracline, autour de 100 mètres [DANDONNEAU, 1979].

Toutefois ce schéma ne s'applique pas à la mer de Corail baignant les archipels de la Nouvelle-Calédonie et du Vanuatu. L'océan, profond autour de la "grande terre", remonte dans la région des rides de Fairway à l'ouest, des Loyauté à l'est et de l'île de Norfolk au sud (figure 1). Les hauts-fonds coralliens affleurent à l'ouest (atolls des Chesterfield, banc de Landsdowne). L'hydrologie de la mer de Corail dépend des facteurs

* Coastal Zone Color Scanner.

** Dans l'Atlantique tropical oriental en saison chaude, HERBLAND et VOITURIEZ [1977 ; 1979] ont défini une Structure tropicale typique (STT), c'est-à-dire un système à deux couches dont celle de surface est dépourvue de nitrate. Selon ces auteurs, la STT cesse d'exister quand le nitrate apparaît à la surface.

météorologiques liés à la migration en latitude de la zone de convergence du Pacifique Sud [DONGUY & HENIN, 1980, DONGUY, 1987]. Le mélange vertical y est intense entre 20°S et 30°S, sauf pour la période de décembre à mars (condition estivale australe) où s'installe une thermocline saisonnière [HENIN *et al.*, 1984]. Au sud de 22°S, la concentration en chlorophylle de surface est maximale en période d'alizés forts (condition hivernale australe, d'avril à septembre) par suite de la libération de sels nutritifs consécutive à l'érosion de la nitracine [DANDONNEAU & GOHIN, 1984].

Le phénomène d'enrichissement en chlorophylle autour des terres ou "effet d'îles"* n'est pas observé de façon systématique dans le Pacifique tropical Sud-Ouest [DANDONNEAU & CHARPY, 1985]. D'après cette étude fondée sur la collecte à maille large du réseau de navires marchands SURTROPAC**, la chlorophylle s'accroît autour des îles volcaniques du Vanuatu et de Fiji et non autour de l'île soulevée et entourée d'un lagon de Nouvelle-Calédonie.

A l'inverse des îles Hawaii [REVELANTE & GILMARTIN, 1974], aucun "effet de masse d'île" n'a été observé autour de l'île corallienne de Maré lors des campagnes PREFIL*** [LE BORGNE *et al.*, 1985].

Le principal atout de l'imagerie satellitaire en océanographie est l'apport d'un continuum d'échelle d'observation des structures dans l'espace. L'imagerie satellitaire de la couleur de l'eau par NIMBUS-7 a été analysée en vue de répondre à la question "l'océan tropical Sud-Ouest est-il oligotrophe dans les zones d'archipels et, sinon, à quelle échelle s'observent les phénomènes d'enrichissement ?".

MATERIEL ET METHODES

L'expérience Coastal Zone Color Scanner embarquée sur NIMBUS-7 était chargée de mesurer les réflectances terrestres dans 5 bandes du visible étroites (40 nm), du bleu (443 nm, maximum d'absorption par les pigments chlorophylliens), en passant par le vert et le jaune (520 et 550 nm), au proche infrarouge (670 et 750 nm). L'acquisition de ce satellite défilant, placé à 890 km sur une orbite héliosynchrone, se fait par un système de balayage, sur une trace de 1 600 km de largeur, avec une résolution au sol de 850 m x 850 m.

Nous avons sélectionné quarante images parmi les plus claires dans la région de Nouvelle-Calédonie au sein des archives du satellite NIMBUS-7 CZCS de la NASA. La liste des vingt-quatre scènes retenues pour cette étude est donnée dans le tableau 1.

Une aire géographique commune à l'ensemble des scènes a été choisie : elle s'étend de 160°E à 170°E et de 15°S à 25°S. Les données brutes de NIMBUS-7 CZCS ont été redressées et corrigées des effets de l'atmosphère par les méthodes décrites en annexe. Il résulte de ce

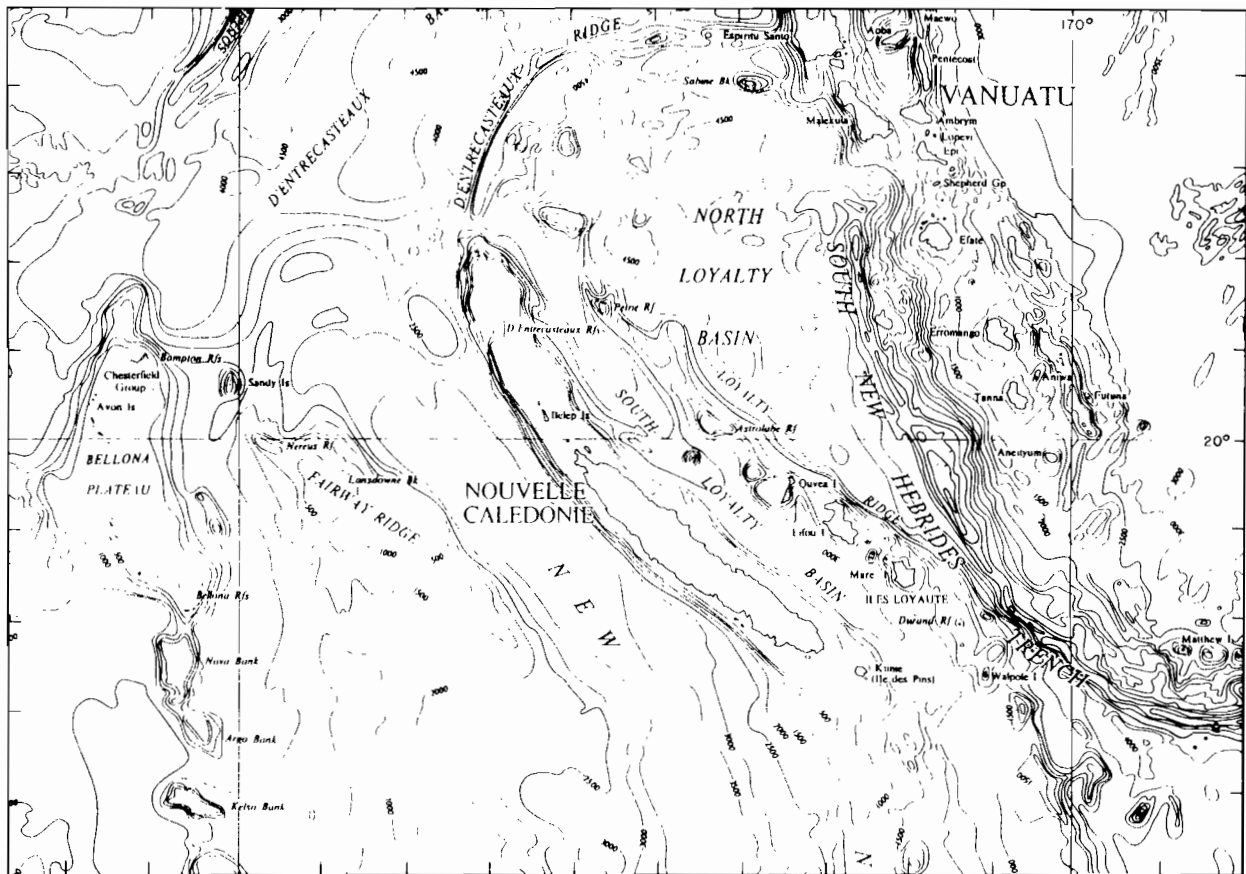
* Concept englobant de nombreux processus à toutes les échelles, d'après les différents auteurs.

** SURTROPAC : SURveillance TRar océanique du Pacifique.

*** PREFIL : PRoduction primaire et EFFets d'ILes.

FIGURE 1 : Carte bathymétrique détaillée de la région englobant la Nouvelle-Calédonie, les dépendances (îles Loyauté) et le Vanuatu (extraite de la carte CCOP/SOPAC, 1983).

On note, par rapport à la Nouvelle-Calédonie, les rides de Fairway à l'ouest, des Nouvelles-Hébrides à l'est ; les atolls des Chesterfield à l'ouest.



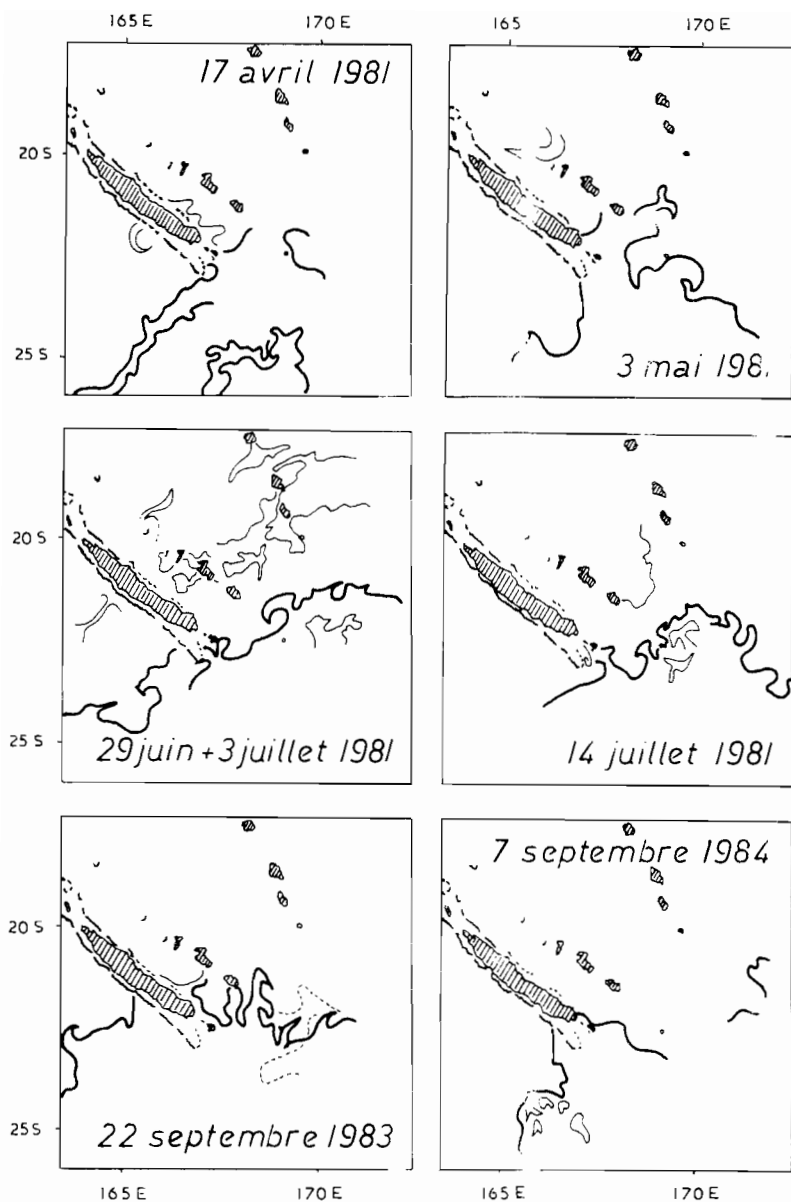


FIGURE 2: Représentation schématique de la limite entre les eaux riches du sud, et les eaux plus pauvres au nord pour les conditions hivernales 1981, 1983 et 1984. Le contour de la chlorophylle "satellite" suit l'isoplèthe $0,3 \text{ mg.m}^{-3}$. Elle a été lissée pour une meilleure clarté (voir planche I).

TABLEAU 1 : Structures tracées par la chlorophylle de surface par NIMBUS-7 CZCS pendant la période 1978-1984. Les étoiles indiquent que l'image est présentée dans les planches en couleur, pour la période considérée.

PERIODE HIVERNALE (ALIZES)	
6 avril 1980 1 ^{er} avril 1981 17 avril 1981** 3 mai 1981 13 juin 1981 29 juin 1981** 3 juillet 1981 14 juillet 1981** 14 août 1981 27 avril 1983** 22 septembre 1983 7 septembre 1984	fronts de couleur sud et nord tourbillon sur la côte ouest enrichissement sud enrichissement sud effets d'îles aux Loyauté gradient de couleur nord sud enrichissement au sud de la Nouvelle-Calédonie enrichissement au sud de la Nouvelle-Calédonie front de couleur au nord de la Nouvelle-Calédonie enrichissement au sud de la Nouvelle-Calédonie enrichissement au sud de la Nouvelle-Calédonie enrichissement au sud de la Nouvelle-Calédonie
PERIODE ESTIVALE (CALMES)	
14 novembre 1978 22 mars 1979 18 décembre 1979 27 décembre 1980** 4 janvier 1982** 12 mars 1982 22 mars 1984	<i>Trichodesmium</i> sp. pauvreté en chlorophylle <i>Trichodesmium</i> sp. <i>Trichodesmium</i> sp. <i>Trichodesmium</i> sp. <i>Trichodesmium</i> sp. <i>Trichodesmium</i> sp.
SITUATIONS INTERMEDIARES	
9 septembre 1980 1 ^{er} novembre 1980** 19 novembre 1980	tourbillon sur côte ouest accroissement général tourbillon sur côte ouest
STRUCTURES FINES	
18 décembre 1979** 13 juin 1981 17 septembre 1983 22 septembre 1983** 4 octobre 1983**	<i>Trichodesmium</i> sp. effets d'îles vers le nord effets d'îles vers le sud effets d'îles vers le sud effets d'îles vers le sud

traitement des cartes de concentration en chlorophylle intercalibrées (gamme logarithmique en mg.m^{-3}). Les cartes les plus caractéristiques sont regroupées dans les planches I et II, avec une résolution dégradée de 1,6 km x 1,6 km, et dans la planche III, avec la résolution initiale de 825 m x 825 m.

Afin de simplifier la description des champs de chlorophylle obtenus, nous avons adopté une représentation schématique des enrichissements en chlorophylle avec le choix d'une isoplèthe représentative.

RESULTATS

Les images satellitaires obtenues par le capteur CZCS dans l'archipel de Nouvelle-Calédonie révèlent une hétérogénéité spatiale et une variabilité temporelle inattendues pour une zone "oligotrophe".

Les structures phytoplanctoniques de surface extraites de la série NIMBUS-7 (tableau 1) ont été classées en deux groupes, suivant l'intensité des concentrations en chlorophylle. Le premier groupe (signal fort) représente les structures tracées par des isoplèthes supérieures à $0,3 \text{ mg.m}^{-3}$ de chlorophylle, le second, celles tracées par les plus faibles valeurs (supérieures à $0,1 \text{ mg.m}^{-3}$).

1. Signal fort de la série NIMBUS-7 observé

On peut distinguer dans le premier groupe, deux types d'enrichissements très distincts de par la forme et la période d'observation.

Conditions hivernales (planche I)

Les cartes représentatives de la période hivernale, soit celles des 17 avril, 3 mai, 29 juin, 3 et 14 juillet 1981, du 22 septembre 1983 et du 7 septembre 1984, ont été regroupées dans la figure 2. L'isoplèthe $0,3 \text{ mg.m}^{-3}$ de chlorophylle "satellite" décrit, vers 22°S , la limite entre les eaux plus riches situées au sud de la Nouvelle-Calédonie et celles du nord plus pauvres. Cette limite varie peu en latitude aux différentes dates où on l'observe (hiver austral 1981, 1983, 1984). En revanche, l'orientation de l'isoplèthe suit, soit la ride de Norfolk au sud (figures 2b et 2f), soit la ride des Nouvelles-Hébrides à l'est (figures 2c, 2d et 2e).

Ce front de couleur de l'eau coïncide avec un front thermique observé au cours de la campagne HYDROTHON 01 en condition hivernale en juillet 1978 [JARRIGE *et al.*, 1979] qui sépare les eaux chaudes au nord (température de surface supérieure ou égale à 25°C) des eaux froides du sud (température de surface inférieure ou égale à 21°C). Cette zone correspond à la zone de la convergence tropicale. La couleur de l'océan trace donc la limite septentrionale des eaux enrichies du sud sous l'influence des alizés et mise en évidence par les données du réseau SURTROPAC [DANDONNEAU & GOHIN, 1984].

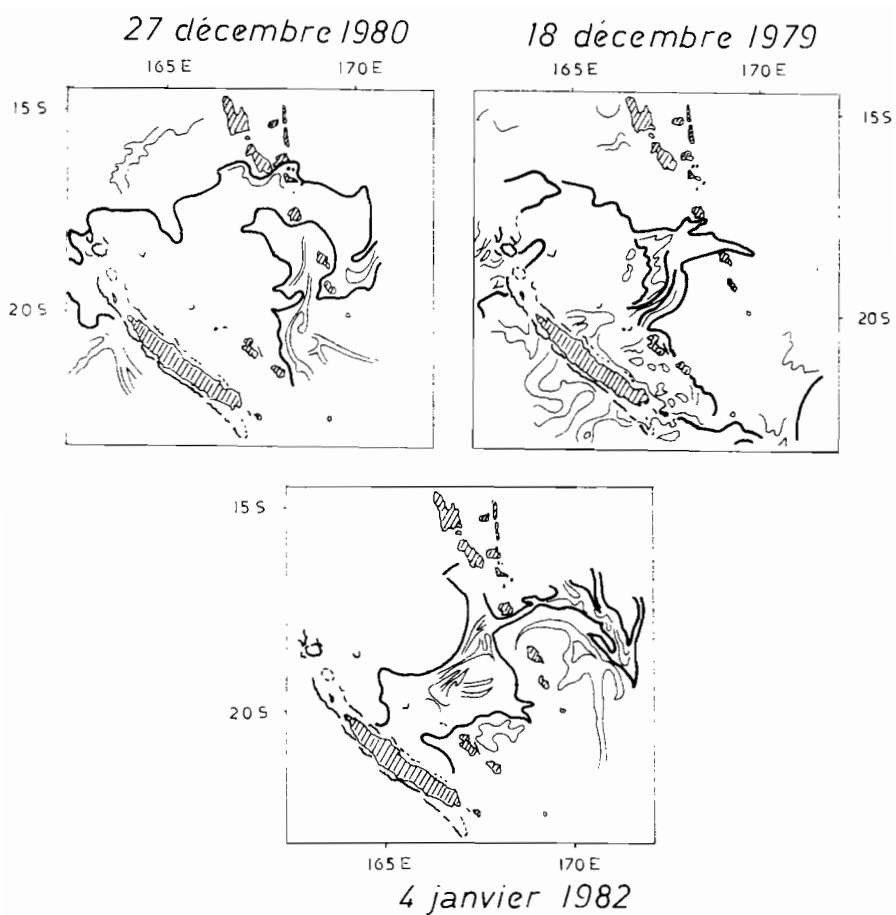


FIGURE 3 : Représentation schématique des eaux riches en pigments chlorophylliens pour les conditions estivales 1979, 1980 et 1982, montrant l'extension des efflorescences à *Trichodesmium*. La chlorophylle "satellite" suit l'isoplèthe $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ (voir planche II).

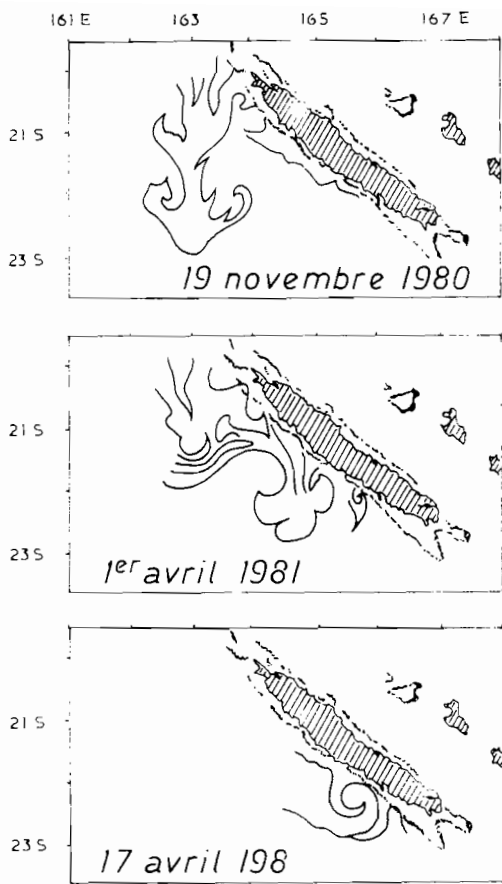


FIGURE 4 : Représentation schématique des eaux faiblement enrichies en chlorophylle. La chlorophylle "satellite" suit l'isoplethe (1 mg.m^{-3}).

Exemples de tourbillons piégés à la côte nord-ouest de Nouvelle-Calédonie.

Conditions estivales (planche II)

Les cartes représentatives de la période estivale, soit celles du 18 décembre 1979, du 27 décembre 1980 et du 4 janvier 1982, sont regroupées dans la figure 3.

L'isoplèthe $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ de la chlorophylle "satellite" délimite des superficies d'eaux enrichies de plus de $100\,000 \text{ km}^2$, de forme régulière, s'étirant vers l'est jusqu'à 400 km. Prenant leur origine sur les côtes nord de Nouvelle-Calédonie, elles vont jusqu'à dépasser l'archipel du Vanuatu en janvier 1982 (figure 3c). L'enrichissement de janvier est remarquablement structuré en un large vortex cyclonique se terminant, vers le sud, par un tourbillon orienté en forme de flèche (figure 3c), semblant indiquer un transport.

Comme il a été montré auparavant [DUPOUY *et al.*, 1988], bien qu'aucun échantillon simultané n'ait été prélevé à la date de janvier 1982, le capteur CZCS détecte sans aucun doute à cette date des floraisons de *Trichodesmium spp.* (*Oscillatoria*) [SOURNIA, 1986], algues constamment présentes dans la masse d'eau jusqu'à 80 mètres [LE BORGNE, 1986]. Leurs efflorescences sont connues pour former des "marées rouges", fréquemment observées par les équipages de bateaux marchands du réseau SURTROPAC. Ces algues sont également connues pour s'agréger en filaments, pouvant alors s'accumuler le long de lignes de convergence, que l'on observe sur les images de janvier 1982 dans l'axe du vortex et en décembre 1979. Par ailleurs, DANDONNEAU et GOHIN [1984] montrent qu'elles sont effectivement responsables des enrichissements en chlorophylle de surface au nord de 20°S en période estivale.

Ces algues ont la particularité de fixer l'azote atmosphérique [CARPENTER & PRICE, 1976]. C'est ainsi que DUPOUY *et al.* [1988] ont pu, en utilisant les données de la littérature, évaluer cette fixation d'azote pour l'efflorescence de janvier 1982 à 1 tonne. Cette quantité représente le centième de la fixation annuelle estimée pour tout le Pacifique par CAPONE et CARPENTER [1982].

Le capteur CZCS de NIMBUS-7 se révèle être un outil unique pour calculer l'impact de telles floraisons, responsables d'une fixation d'azote non négligeable, et, de plus, fréquentes dans la région du Pacifique tropical Sud-Ouest.

2. Signal faible de la série NIMBUS-7

Ce groupe est délimité par les intensités faibles de chlorophylle ($>0,1 \text{ mg.m}^{-3}$). La principale observation, dans cette gamme de faibles valeurs, est un continuum permanent de chlorophylle entre la Nouvelle-Calédonie et le Vanuatu. Les eaux plus oligotrophes sont trouvées plus au nord et à l'ouest de la grande terre.

Au sein de cet enrichissement global, l'isoplèthe $0,1 \text{ mg.m}^{-3}$ permet ainsi d'isoler des structures caractéristiques dont il est difficile de savoir, vu le peu d'images analysées, si elles représentent des traits caractéristiques de l'hydrologie de cette région.

Tout d'abord, la partie nord-ouest du lagon de la Nouvelle-Calédonie, connue comme une zone riche en tourbillons observés par

SCENES NIMBUS-7 CZCS

La gamme de concentration en chlorophylle croissante est au bas des images, du bleu vers le rouge pour des valeurs de 0,05 à 0,5 mg.m⁻³, en progression logarithmique. Les nuages sont masqués en blanc, les terres en noir.

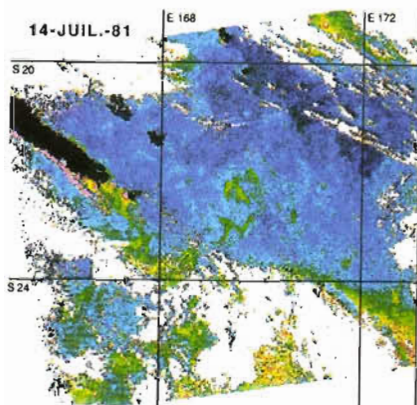
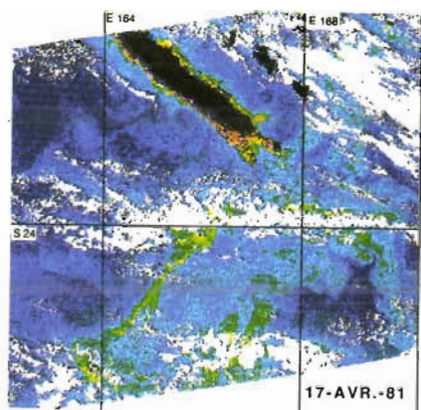
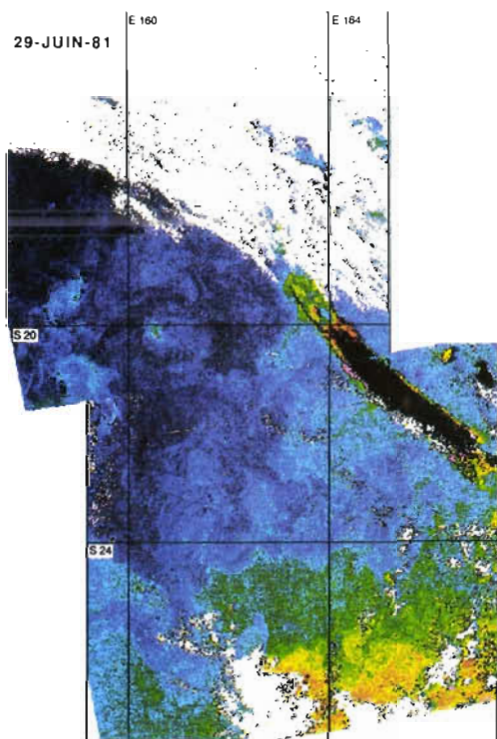
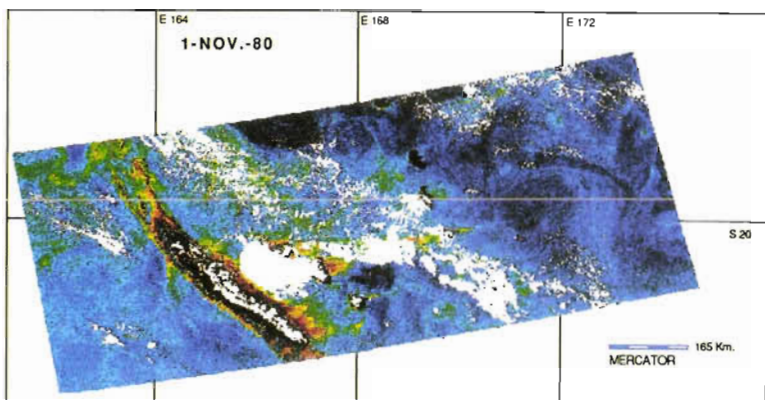
PLANCHE I. Conditions hivernales.

1^{er} novembre 1980 ;

29 juin 1981 ;

17 avril 1981 ;

14 juillet 1981.



CHL A + PHEO (mg/m³)

SCENES NIMBUS-7 CZCS

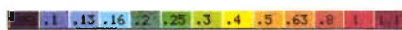
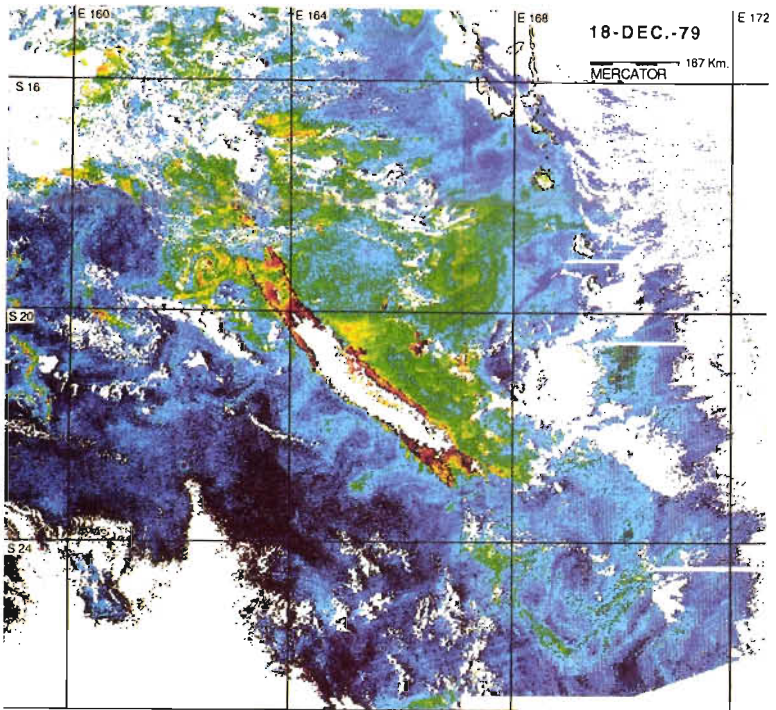
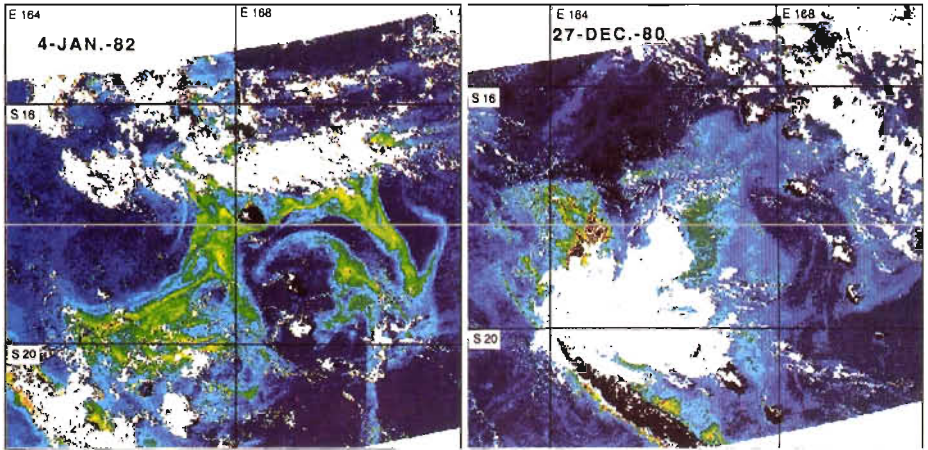
La gamme de concentration en chlorophylle croissante est au bas des images, du bleu vers le rouge pour des valeurs de 0,05 à 0,5 mg.m⁻³, en progression logarithmique. Les nuages sont masqués en blanc, les terres en noir.

PLANCHE II. Conditions estivales.

4 janvier 1982 ;

27 décembre 1980 ;

18 décembre 1979.



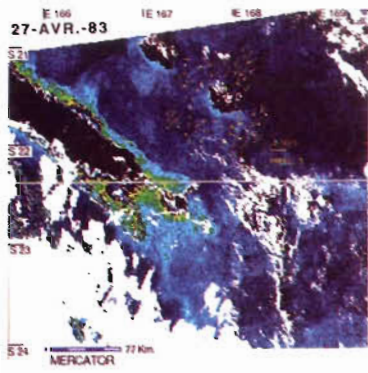
CHL A + PHEO (mg/m³)

SCENES NIMBUS-7 CZCS

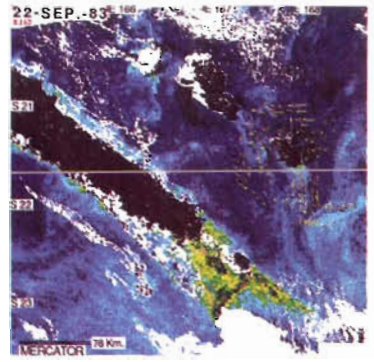
La gamme de concentration en chlorophylle croissante est au bas des images, du bleu vers le rouge pour des valeurs de 0,05 à 0,5 mg.m⁻³, en progression logarithmique. Les nuages sont masqués en blanc, les terres en noir.

PLANCHE III. Observations à échelle fine.

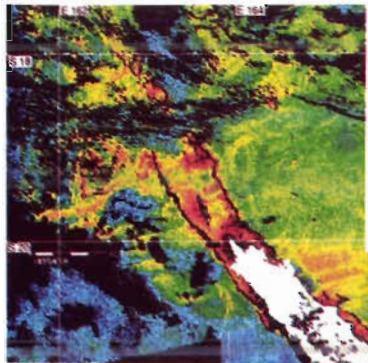
- a. 27 avril 1983 ;
- b. 22 septembre 1983 ;
- c. 4 octobre 1983 ;
- d, e, f. 18 décembre 1979.



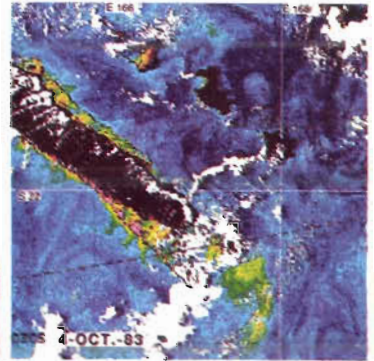
a



b

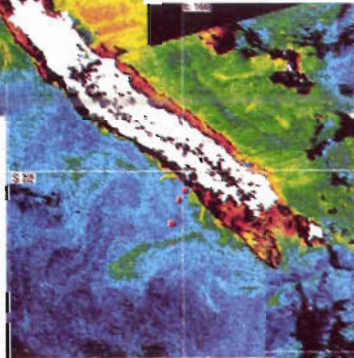


d

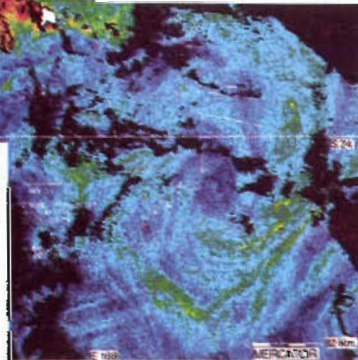


c

18 DEC. 79



e



f

avion dans l'infrarouge thermique en novembre 1980 [PETIT & HENIN, 1982], piège de larges vortex de chlorophylle (200 km) aux dates des 19 novembre 1980, 1er et 17 avril 1981 (figure 4), mais également les 6 avril et 9 septembre 1980.

En revanche, aux îles Loyauté, Lifou et Maré (planche III), des panaches d'eaux plus riches (20 km) que les eaux avoisinantes situées dans le courant des Loyauté se détachent des côtes en direction du sud. Ces observations sont en accord avec les mesures de courants superficiels effectuées au cours des campagnes PREFIL 5, du 13 au 25 avril 1983, et PREFIL 6, du 8 au 13 septembre 1983.

De plus, des enrichissements isolés se produisent au-dessus des hauts-fonds (60 mètres) du plateau de Landsdowne (ride de Fairway). Ils sont bien détectés en juin 1981 (planche I). Les atolls Chesterfield montrent régulièrement des biomasses plus riches, aussi bien à l'intérieur qu'autour des anneaux des récifs (juin 1981, planche I, mais également décembre 1979, mars 1979, août 1981).

Enfin, sur toutes les scènes, des sorties d'eaux riches sont constatées aux principaux passages nord et sud du lagon de Nouvelle-Calédonie. Des exportations de chlorophylle se produisent, à certaines dates, par les étroites passes du lagon ouest (octobre 1983, planche III). Une étude approfondie des échanges lagon/océan est en cours et elle nécessite de garder la résolution initiale de 825 mètres (planche III). Enfin l'image de décembre 1979 (planche III) procure des détails de l'hétérogénéité spatiale d'une floraison de *Trichodesmium*, avec des structures tourbillonnaires étonnantes à l'extrémité nord du lagon et au large de l'île des Pins par 24°S.

Ce signal faible de la série NIMBUS-7 est le plus important car il permet de nuancer les conclusions tirées des campagnes à la mer (pas d'influence sur la chlorophylle de surface de l'île de Maré lors des PREFIL) et indique la présence d'enrichissements fortement localisés, définissant un milieu oligotrophe hétérogène, difficilement accessible aux mesures classiques.

CONCLUSIONS

Les images du satellite NIMBUS-7 CZCS ont apporté une vision synoptique des enrichissements de chlorophylle qui manquait jusque-là dans cette région de Nouvelle-Calédonie, parsemée d'îles et de hauts-fonds.

Le signal saisonnier est prédominant du fait des forts enrichissements qu'il amène en surface ($>0,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), en période d'alizés ou de calmes. Les fortes concentrations en chlorophylle observées en période hivernale, au sud de Nouvelle-Calédonie, sont liées aux alizés, tandis que celles du nord-est en conditions estivales sont dues à des proliférations de *Trichodesmium* exploitant une forte stabilité de la masse d'eau chaude et stratifiée.

Le signal saisonnier masque généralement l'information de faibles intensités révélée autour des îles par le satellite. C'est ainsi qu'au sud de la Nouvelle-Calédonie où de nombreux monts sous-marins ont été

détectés récemment [RIGOLOTT, 1989], l'enrichissement hivernal homogène masque tout autre signal. Le réseau SURTROPAC ne détecte que le signal de fortes concentrations, les campagnes n'ont pu reconstituer les enrichissements, sans doute fugitifs, de chlorophylle autour des îles. Aussi, de telles informations sont précieuses pour décrire la circulation superficielle considérée dans la région comme faible et variable [HENIN *et al.*, 1984].

Cet article est le résultat d'un premier classement, visuel, des résultats obtenus par CZCS. On n'a pas déterminé l'importance relative et l'impact du léger enrichissement ("effet d'archipel"), permanent et étendu, en comparaison des enrichissements forts mais saisonniers. La comparaison avec une autre source de biomasse phytoplanctonique dans le Pacifique (l'upwelling équatorial) permettrait une cartographie globale du Pacifique tropical Sud-Ouest, qui apparaît, grâce aux images satellites, plus mésotrophe qu'oligotrophe.

Il est nécessaire qu'un suivi de couleur de l'eau soit programmé dans la prochaine décennie avec les expériences Sea-WiFS* de la NASA, et SPOT 4/5 du CNES sur lequel il sera ajouté une bande bleue au capteur Végétation. La cartographie globale des bassins océaniques se poursuit à l'aide de l'archive NIMBUS-7 [FELDMAN *et al.*, 1989]. Toutefois, des études plus régionales demeurent indispensables pour comprendre les mécanismes de la production primaire. A toutes les échelles, le satellite offre une information abondante qui n'est pas encore totalement interprétée et qui permet de mieux cibler les futures observations de terrain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRICAUD (A.), MOREL (A.) & ANDRE (J.M.), 1987. - Spatial/temporal variability of algal biomass and potential productivity in the Mauritanian upwelling zone, as estimated from CZCS data. *Advances in space research*, 7, 2, pp. 53-62.
- CAPONE (D.G.) & CARPENTER (E.J.), 1982. - Nitrogen fixation in the marine environment. *Science*, 217, 4565, pp. 1140-1142.
- CARPENTER (E.J.) & PRICE (C.C.), 1976. - Marine Oscillatoria (Trichodesmium): explanation for aerobic nitrogen fixation without heterocysts. *Science*, 191, 4233, pp. 1278-1280.
- DANDONNEAU (Y.), 1979. - Concentrations en chlorophylle dans le Pacifique tropical sud-ouest : comparaison avec d'autres aires océaniques tropicales. *Oceanologica acta*, 2, 2, pp. 133-142.

* Sea-WiFS : Sea-Wiewing Wide Field-of-view Sensor.

- DANDONNEAU (Y.), 1982. - A method for the rapid determination of chlorophyll plus phaeopigments in samples collected by merchant ships. *Deep-sea research*, (A) 29, 5, pp. 647-654.
- DANDONNEAU (Y.) & CHARPOT (L.), 1985 - An empirical approach to the island mass effect in the south tropical Pacific based on sea surface chlorophyll concentrations. *Deep-sea research*, (A) 32, 6, pp. 707-721.
- DANDONNEAU (Y.) & GOHIN (F.), 1984. - Meridional and seasonal variations of the sea surface chlorophyll concentration in the southwestern tropical Pacific (14 to 32°S. 160 to 175°E). *Deep-sea research*, (A) 31, 12, pp. 1377-1393.
- DELMAS (R.), 1987. - Logiciel de décodage et de rectification des images NIMBUS-7 (CZCS). *Document techniques CISI*, 60 p.
- DESCHAMPS (P.Y.) & VIOLLIER (M.), 1987. - Algorithms for ocean colour from space and application to CZCS data. *Advances in space research*, 7, 2, pp. 11-19.
- DONGUY (J.R.), 1987. - Recent advances in the knowledge of the climatic variations in the tropical Pacific Ocean. *Progress in oceanography*, 19, 1, pp. 49-85.
- DONGUY (J.R.) & HENIN (C.), 1980. - Climatic teleconnections in the western South Pacific with El Niño phenomenon. *Journal of physical oceanography*, 10, 12, pp. 1952-1958.
- DUPOUY (C.), en préparation. - Mesures optiques de l'atténuation de l'éclairement photosynthétique. *Rapports de mission - Centre ORSTOM de Nouméa, sciences de la mer, océanographie* (Rapport de la campagne PROPPAC 04 du N.O. Suroit 28 octobre-28 novembre 1989).
- DUPOUY (C.) & DEMARCO (H.), 1987. - CZCS as an aid for understanding modalities of the phytoplankton productivity during upwelling off Senegal. *Advances in space research*, 7, 2, pp. 63-71.
- DUPOUY (C.), PETIT (M.) & DANDONNEAU (Y.), 1988. - Satellite detected cyanobacteria bloom in the southwestern tropical Pacific. Implication for oceanic nitrogen fixation. *International journal of remote sensing*, 9, 3, pp. 389-396.
- EPPLEY (R.W.), STEWART (E.), ABBOTT (M.R.) & HEYMAN (U.), 1985. - Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll. Introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight. *Journal of plankton research*, 7, 1, pp. 57-70.

- FELDMAN (G.), CLARK (D.) & HALPERN (D.), 1984. - Satellite color observations of the phytoplankton distribution in the eastern equatorial Pacific during the 1982-1983 El Niño. *Science*, **226**, 4678, pp. 1069-1071.
- FELDMAN (G.), KURING (N.), NG (C.), ESAIAS (W.), McCLAIN (C.), ELROD (J.), MAYNARD (N.), ENDRES (D.), EVANS (R.), BROWN (J.), WALSH (S.), CARLE (M.) & PODESTA (G.), 1989. - Ocean color, availability of the global data set. *Eos, transactions - American geophysical union*, **70**, 23, pp. 634-635, 640-641.
- GILMARTIN (M.) & REVELANTE (N.), 1974. - The 'island mass' effect on the phytoplankton and primary production of the Hawaiian islands. *Journal of experimental marine biology and ecology*, **16**, 2, pp. 181-204.
- GORDON (H.R.) & CLARK (D.K.), 1980. - Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. *Applied optics*, **19**, 20, pp. 3428-3430.
- GORDON (H.R.), CLARK (D.K.), BROWN (J.W.), BROWN (O.B.), EVANS (R.H.) & BROENKOW (W.W.), 1983. - Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied optics*, **22**, 1, pp. 20-36.
- GORDON (H.R.), CLARK (D.K.), MUELLER (J.L.) & HOVIS (W.A.), 1980. - Phytoplankton pigments from the Nimbus-7 coastal zone color scanner: comparisons with surface measurements. *Science*, **210**, 4465, pp. 63-66.
- HENIN (C.), GUILLERM (J.-M.) & CHABERT (L.), 1984. - Circulation superficielle autour de la Nouvelle-Calédonie. *Océanographie tropicale*, **19**, 2, pp. 113-126.
- HERBLAND (A.) & VOITURIEZ (B.), 1977. - Production primaire, nitrate et nitrite dans l'Atlantique tropical. I. - Distribution du nitrate et production primaire. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, **15**, 1, pp. 47-55.
- HERBLAND (A.) & VOITURIEZ (B.), 1979. - Hydrological structure analysis for estimating the primary production in the tropical Atlantic Ocean. *Journal of marine research*, **37**, 1, pp. 87-101.
- HOLLIGAN (P.M.), VIOLLIER (M.), HARI'OUR (D.), CAMUS (P.) & CHAMPAGNE-PHILIPPE (M.), 1983. - Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge. *Nature*, **304**, 5924, pp. 337-342.

- HOVIS (W.A.), CLARK (D.K.), ANDERSON (F.), AUSTIN (R.W.), WILSON (W.H.), BAKER (E.T.), BALL (D.), GORDON (H.R.), MUELLER (J.L.), EL-SAYED (S.Z.), STURM (B.), WRIGLEY (R.C.) & YENTSCH (C.S.), 1980. - Nimbus-7 coastal zone color scanner: system description and initial imagery. *Science*, **210**, 4465, pp. 60-63.
- JARRIGE (F.), BOURRET (P.) & GUILLERM (J.M.), 1979. - Observation d'une zone de frontière thermique dans le sud-ouest du Pacifique. *Rapports scientifiques et techniques - Centre ORSTOM de Nouméa, océanographie*, **5**, 11 p.
- KIRK (J.T.O.), 1983. - *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. - Cambridge : Cambridge university press. - XI-401 p.
- KROENKE (L.), JOUANNIC (C.) & HOWARD (P.), 1983. - *Bathymetry of the Southwest Pacific*. - Suva : UN ESCAP/CCOP/SOPAC.
- LE BORGNE (R.), 1986. - *Résultats des campagnes à la mer du programme "PROCAL". 3. Campagnes "PRÉFIL" (zooplancton et micronecton), "UITOE", "MARE" et "ONDIMAR", décembre 1982-septembre 1984*. - Nouméa : Centre ORSTOM, océanographie. - 154 p.
- LE BORGNE (R.), DANDONNEAU (Y.) & LEMASSON (L.), 1985. - The problem of the island mass effect on chlorophyll and zooplankton standing crops around Mare (Loyalty Islands) and New Caledonia. *Bulletin of marine science*, **37**, 2, pp. 450-459.
- LOHRENZ (S.E.), ARNONE (R.A.), WIESENBURG (D.A.) & DePALMA (I.P.), 1988. - Satellite detection of transient enhanced primary production in the western Mediterranean Sea. *Nature*, **335**, 6187, pp. 245-247.
- MOREL (A.), 1980. - In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-layer meteorology*, **18**, 2, pp. 177-201.
- MULLER-KARGER (F.E.), McCLAIN (C.R.) & RICHARDSON (P.L.), 1988. - The dispersal of the Amazon's water. *Nature*, **333**, 6168, pp. 56-59.
- PELAEZ (J.) & McGOWAN (J.A.), 1986. - Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnology and oceanography*, **31**, 5, pp. 927-950.
- PETIT (M.) & HENIN (C.), 1982. - Radiométrie aérienne et prospection thonière. Rapport final. *Note et documents d'océanographie - Mission ORSTOM de Port-Vila*, **3**, 96 p.

- RIGOLOTT (P.), 1989. - Origine et évolution géodynamique du système Ride de Nouvelle-Calédonie/Norfolk (S.O. Pacifique) : synthèse des données de géologie et de géophysique marine, étude des marges et bassins associés. *Thèse Géologie-géophysique, Brest*, 310 p.
- SHANNON (L.V.), MOSTERT (S.A.), WALTERS (N.M.) & ANDERSON (F.P.), 1983. - Chlorophyll concentrations in the southern Benguela current region as determined by satellite (Nimbus-7 coastal zone colour scanner). *Journal of plankton research*, 5, 4, pp. 565-583.
- SOURNIA (A.), 1986. - *Atlas du phytoplancton marin. Volume 1: Introduction, Cyanophycées, Dictyochophycées, Dinophycées et Raphidophycées.* - Paris : Editions du Centre national de la recherche scientifique. - 219 p.
- VIOLLIER (M.), SOURNIA (A.), BIRRIEN (J.-L.), CHRETIENNOT-DINET (M.-J.), LE BORGNE (P.), LE CORRE (P.), MORIN (P.) & OLRV (J.P.), 1988. - Satellite (AVHRR/NOAA-9) and ship studies of a coccolithophorid bloom in the western English Channel. *Marine nature*, 1, 1, pp. 1-14.
- VIOLLIER (M.), TANRE (D.) & DESCHAMPS (P.Y.), 1980. - An algorithm for remote sensing of water color from space. *Boundary-layer meteorology*, 18, 3, pp. 247-267.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié, pour l'obtention des données NIMBUS-7, d'une action thématique programmée CNES/CNRS en 1987. Les logiciels ont été élaborés et le traitement des images effectué grâce à l'accord et l'aide amicale des équipes DERO/AT et DERO/DI du Centre IFREMER de Brest. Je remercie également les chercheurs du Centre ORSTOM de Montpellier, de Brest et de Nouméa qui m'ont permis d'interpréter l'imagerie satellitaire grâce aux précieuses informations issues des campagnes à la mer.

ANNEXE

Les images brutes NIMBUS-7 ont été traitées comme suit. Les effets de la courbure et de la rotation de la terre ont été corrigés de façon à obtenir des images en coordonnées Mercator, comparables point à point [DELMAS, 1987]. La résolution a été dégradée à 1,5 km x 1,5 km pour les planches I et II (traitement d'un point sur deux) et la résolution initiale conservée à 825 m x 825 m pour la planche III.

Les effets atmosphériques, importants dans le domaine visible, ont été éliminés en utilisant les algorithmes de VIOLLIER *et al.* [1980]. Le traitement des données exposé vise à retrouver les réflectances marines dans les trois canaux du visible : 1 (443 nm), 2 (520 nm), 3 (550 nm) en utilisant le canal 4 (670 nm) pour les corrections atmosphériques suivant les recommandations de DESCHAMPS et VIOLLIER [1987].

La totalité du signal du satellite dans chaque canal (440 à 670 nm) est converti en réflectances en tenant compte des calibrations initiales et de la baisse de sensibilité du capteur intervenue depuis 1981. La partie constante du signal atmosphérique est ensuite calculée et éliminée de la réflectance totale (partie Rayleigh due à l'air).

La partie variable de ce signal atmosphérique, due à la diffusion des aérosols aériens (eau et poussières), est fournie par le canal 4 car à 670 nm le signal marin est considéré comme presque nul, le résidu dépend du canal 3 [DESCHAMPS & VIOLLIER, 1987]. Une loi de dépendance de la diffusion aérosols en $(k)^n$ où k est la longueur d'onde et n est le coefficient d'Angström non connu, permet d'extrapoler le signal aérosol aux canaux 1, 2 et 3 à partir de sa valeur dans le canal 4. Ce coefficient varie entre -1 et +1 suivant la nature des aérosols terrestres ou marins. Le choix, pour toutes les scènes, d'un coefficient constant ($n=0,5$) n'a pas introduit d'erreur. La validité de la correction atmosphérique a été testée sur les points d'eau claire de l'image choisis au large des terres, pour lesquels le spectre de réflectances marines est connu. Une gamme de chlorophylle "satellite" constante est applicable à toutes les scènes, de 0,05 à 0,5 mg.m⁻³. Le maximum est trouvé dans les eaux les plus riches du lagon.

La concentration en chlorophylle (plus phéopigments), "C sat" (chlorophylle "satellite"), est calculée à partir d'un rapport des réflectances "satellite" marines dans les canaux bleu/vert [GORDON *et al.*, 1980], le mieux adapté aux eaux claires oligotrophes du cas 1 [MOREL, 1980], influencées essentiellement par le phytoplancton et les particules associées. L'incertitude sur la concentration en chlorophylle "satellite" est inférieure à la valeur admise de 30% [HOVIS *et al.*, 1980] car le traitement de cette série NIMBUS-7 s'est effectué sur le type d'eau idéal du cas 1 (en dehors des lagons) et a bénéficié, de plus, d'un important fichier de vérités-mer.

"C sat" dépend de $K(m^{-1})$, K étant le coefficient d'atténuation diffuse de la lumière visible. En effet, la lumière solaire rétrodiffusée captée par le satellite provient d'une profondeur estimée à $0,7/K$ [GORDON & CLARK, 1980]. Dans le Pacifique tropical Sud-Ouest, on estime à 20 mètres en moyenne la profondeur de détection par le satellite de la biomasse en phytoplancton [KIRK, 1983] et 25 mètres d'après des mesures récentes au quantamètre [DUPOUY, en préparation]. Le maximum profond de chlorophylle (80 mètres en moyenne) n'est jamais détecté.

Restitution de la température de surface océanique en zone intertropicale à partir des données du satellite METEOSAT

par

JEAN CITEAU

HERVE DEMARCO

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre de recherches océanographiques de Dakar Thiaryoye (CRODT)
B.P. 2241 Dakar (Sénégal)*

RESUME

Après une revue des différents concepts utilisés pour restituer la température de surface océanique à partir de données satellitaires, il est montré que la combinaison des données du seul canal infrarouge thermique du satellite METEOSAT, associées aux données de température de surface fournies par les navires marchands, suffit à évaluer l'absorption atmosphérique en zone intertropicale. A partir de celle-ci, une cartographie des températures de surface de l'océan peut être obtenue simplement, les contraintes d'exploitation restant suffisamment modestes pour être compatibles avec les exigences d'application dites en temps réel.

Après calibration radiométrique de la donnée satellitaire, des images composites sont produites sur une période de 5 jours en ne retenant en chaque pixel que la valeur de température radiative la plus élevée, minorant ainsi l'absorption atmosphérique. Une discrimination entre mer et nuages est ensuite réalisée par comparaison à une référence climatologique. En zone intertropicale, l'absorption atmosphérique variant surtout en fonction de la latitude, un champ de correction est généré puis appliqué à l'image de synthèse. Dans les zones nuageuses:

une analyse objective fondée sur les données des navires marchands permet de compléter la couverture. L'écart-type entre les températures obtenues et un lot indépendant de données à la mer est de 0,8 à 0,9 °C. Dans la région de l'upwelling équatorial, une comparaison de notre produit aux cartes NWS et GOSSTCOMP a été effectuée et confrontée aux résultats de la couverture altimétrique du satellite GEOSAT en 1987.

ABSTRACT

Numerous works have been done about sea surface temperature (SST) retrieval using the various sensors on board past and existing satellites. A short review of the proposed techniques shows that, for similar atmospheric and oceanic conditions, the higher accuracies need often a more or less complex data assimilation (multispectral methods, variation of viewing angle, multitemporal analysis and geostatistic) in order to remove atmospheric absorption. Moreover, as far as the software or the data ingest is concerned, the delivery of SST map may be delayed and limits real-time applications.

The present paper using the sole thermal infrared channel of METEOSAT combined to the (numerous) ships of opportunity data, proposes a simple and reliable technique of parametrization of atmospheric absorption observed in the intertropical area. The estimated precision fits the needs either of large climatic studies or these of regional ones. After a check of the calibration in radiance, then an inversion of Planck's function, a discrimination of cloud free area is performed using equally a guess field or a climatological chart (Reynolds). Composite images are produced by retaining the warmest value over five days (with eight images per day). On these ones, an empirical model for atmospheric absorption will be applied on the following scheme : as the distribution of water vapor in tropical area appears mainly as zonal phenomenon (clearly linked to the ITCZ), it can be suggested to take it into account along (several) north-south transects by polynomial functions determined in order to have the best fit between (refined) sea truth data and METEOSAT data. In our area of work, from 50°W to 10°E, four meridional sections have been made, inside of which atmospheric correction is assumed to be only latitude dependent. Along each line, another polynomial adjustment is performed in order to fit continuity needs. Finally the resulting matrix is applied to the cloud free area of METEOSAT data. The cloud covered areas are filled up by objective analysis of ships data. This adjustment process appears also to remove ship's data of poor quality and the mean difference between METEOSAT corrected data and sea truth is about 0.8–0.9°C. The aim of this work is to improve the relevant data set daily produced with METEOSAT (by ESOC, Darmstadt). Compared now with NOAA products (CAC), a general good agreement is evident on large scale ; but local discrepancies remain on regional scale for which our space and time resolution are better (i.e. Senegalo-Mauritanian

upwelling). Moreover, the above parametrization takes into account both atmospheric effect and zenithal angle.

INTRODUCTION

Dès le début des années soixante-dix avec les lancements successifs des satellites de la série NOAA, suivis en 1977 par le lancement du premier satellite météorologique géostationnaire européen METEOSAT, nombre d'études ont été consacrées à l'extraction de la température de surface de la mer à partir de données satellitaires [ALBUISSON *et al.*, 1979 ; PHULPIN & DESCHAMPS, 1980 ; CHESTER, 1980 ; McCLAIN, 1980 ; LARSON, 1980]. Très rapidement, il est apparu qu'une excellente restitution de la température de surface pouvait être obtenue avec des instruments dédiés tel l'AVHRR* à bord des satellites de la série NOAA, ou encore l'HCMM**, instruments dont les bandes spectrales ont permis une approche expérimentale de l'atténuation atmosphérique du signal.

La principale limitation, résultant de l'atténuation du signal par la traversée de l'atmosphère, a conduit à développer diverses méthodes de correction : par combinaison soit de différentes fenêtres spectrales, soit de différents angles de visée, ou encore d'observations satellitaires à différentes dates. L'introduction de données d'observation directe, océanique ou atmosphérique, fournit enfin les éléments de calibration de ces méthodes.

En comparaison, le même objectif à partir de données de satellites géostationnaires, plus grossiers tant en résolution spectrale que spatiale, pouvait sembler une gageure.

Après une revue des concepts déjà expérimentés, nous présentons ici une méthode simple de restitution de la température de surface de la mer à partir des données du canal infrarouge thermique du satellite géostationnaire METEOSAT. Les très nombreuses données issues des navires marchands et disséminées par le SMT (Système mondial de transmission) nous permettent en Atlantique tropical une quantification convenable de l'absorption atmosphérique. Sur un lot disjoint de données, la précision de la méthode est évaluée.

REVUE DE DIFFERENTES METHODES D'EXTRACTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER

La principale contrainte posée par l'extraction de la température de surface de la mer à partir de données satellitaires est liée à l'atténuation du signal dans sa traversée de l'atmosphère. Pour s'en affranchir, deux

* AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer.

** HCMM : Heat Capacity Mapping Mission.

démarches ont été tentées, l'une utilisant le domaine des micro-ondes, l'autre celui de l'infrarouge thermique.

Le premier, expérimenté avec le SMMR* à bord de NIMBUS-7 et SEASAT, offre la possibilité de mesurer l'énergie thermique émise par la surface marine, dans un domaine où le rayonnement n'est pas affecté par la traversée des nuages ou d'autres composants de l'atmosphère. Une revue des travaux réalisés à partir de cet instrument par CHESTER [1980] indique que la température de surface de la mer peut être atteinte avec une précision de 1,2 °C. En revanche, la résolution spatiale liée à la longueur d'onde utilisée dans cet instrument n'est que de 150 km.

Le second, systématiquement présent à bord des satellites météorologiques opérationnels, utilise la bande des 10 à 12 µm, fenêtre de transparence atmosphérique dans l'infrarouge thermique. Le signal émis par la surface de la mer est cependant sensible à la composition de l'atmosphère et totalement absorbé par un couvert nuageux.

La méthode dite "split-window" ou méthode multispectrale [McCLAIN *et al.*, 1983 ; PHULPIN & DESCHAMPS, 1980] dérive des simulations effectuées à partir de modèles de transmission couplés à de nombreux radiosondages [WEINREB & HILL, 1980]. Elle a permis d'établir que l'atténuation du signal due à l'atmosphère pouvait être estimée par une combinaison linéaire des radiances mesurées dans les fenêtres spectrales 10,50-11,50 µm, 11,50-12,50 µm et 3,55-3,93 µm de l'AVHRR.

Une méthode similaire, développée au Centre de météorologie spatiale de Lannion (France) [ROCHARD, comm. pers.], utilise conjointement aux canaux AVHRR, les informations du sondeur HRIS**, qui permet une meilleure description de la composition de l'atmosphère.

Sur le plan analytique, ces méthodes sont aujourd'hui les meilleures, la précision atteinte étant de l'ordre de 0,5°C avec une résolution spatiale de l'ordre du kilomètre. Dans les régions intertropicales, le couvert nuageux limite toutefois leur application d'autant que le recouvrement des orbites et leur fréquence de passage sont moindres.

Il était donc naturel de rechercher la combinaison d'une haute résolution temporelle et d'une bonne définition spectrale, ce qui fut réalisé grâce au VAS*** à bord du satellite GOES-E. La procédure d'extraction de la température de surface [BATES, 1983] est voisine des méthodes précédentes et la précision obtenue se situe entre 0,8 et 1°C.

Parmi les expériences de correction atmosphérique utilisant des satellites géostationnaires, on peut citer pour mémoire : la calibration du canal infrarouge de METEOSAT par les données du sondeur vertical de TIROS-N [BÉRIOT *et al.*, 1982 ; SMITH, 1980] ou encore l'utilisation des canaux visible et infrarouge de GOES-E dans un modèle de transfert radiatif [MAUL, 1981].

* SMMR : Scanning Multichannel Microwave Radiometer.

** HRIS : High Resolution Infrared Sounder.

*** VAS : Vertical Atmospheric Sounder.

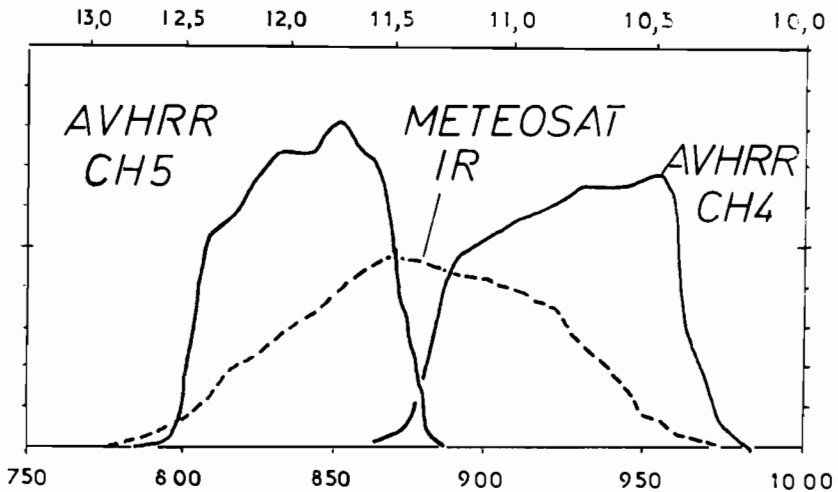


FIGURE 1 : Bandes spectrales comparées des radiomètres infrarouge thermique des satellites NOAA (AVHRR CH4 : 10 et 11,5 μm ; AVHRR CH5 : 11,2 et 12,5 μm) et de METEOSAT-2 (10,5 à 12,5 μm), d'après DUDHIA [1986].
(Abscisses exprimées en haut du graphique en μm et en nm en bas)

Par ailleurs, la visée d'un même point sous des angles différents à partir de deux satellites géostationnaires (GOES-E et GOES-W) a conduit à corriger l'absorption atmosphérique en extrapolant la radiance de surface pour une épaisseur optique nulle [SMITH, 1980]. Cette méthode, séduisante en apparence, impose toutefois de lourdes contraintes d'exploitation.

Le produit opérationnel de l'ESOC* utilise pour la correction des données infrarouge de METEOSAT le résultat d'un modèle d'analyse du CEPMMT**. La résolution spatiale de ce produit est grossière (160 kilomètres sous satellite) et nous a amenés à conduire notre propre

* ESOC : European Space Operation Center, Darmstadt, Allemagne.

** CEPMMT : Centre européen de prévision météorologique à moyen terme. Reading, Grande-Bretagne.

expérience. Celle-ci, issue d'une campagne d'assistance tant à des navires de recherche qu'à des bateaux de pêche [CITEAU *et al.*, 1984], tentait de tirer le meilleur parti d'un satellite (METEOSAT) dont la couverture sur l'Atlantique tropical est remarquable.

En conclusion, il apparaît que le seul canal de la fenêtre infrarouge thermique du satellite METEOSAT (figure 1) ne suffit pas à s'affranchir de la correction atmosphérique. Celle-ci peut être estimée, soit à l'aide d'un sondeur vertical, soit, comme nous le proposons, à l'aide de données exogènes.

METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES METEOSAT

Les données METEOSAT sont disséminées chaque demi-heure dans trois canaux : un canal visible (0,4-1,1 μm), un canal vapeur d'eau (5,7-7,1 μm) et un canal infrarouge thermique (de 10,5-12,5 μm). La résolution sous satellite est de 2,5 x 2,5 km dans le visible et 5 x 5 km dans l'infrarouge thermique. Seules sont utilisées ici les données de ce dernier canal, dont le radiomètre a une sensibilité de 0,5 °C.

Les différentes étapes de la restitution de la température de surface sont d'une part le prétraitement de l'information par la calibration en radiance et le redressement géométrique et d'autre part la synthèse multitemporelle, la discrimination mer/nuages et la correction atmosphérique.

PRETRAITEMENT DE L'INFORMATION

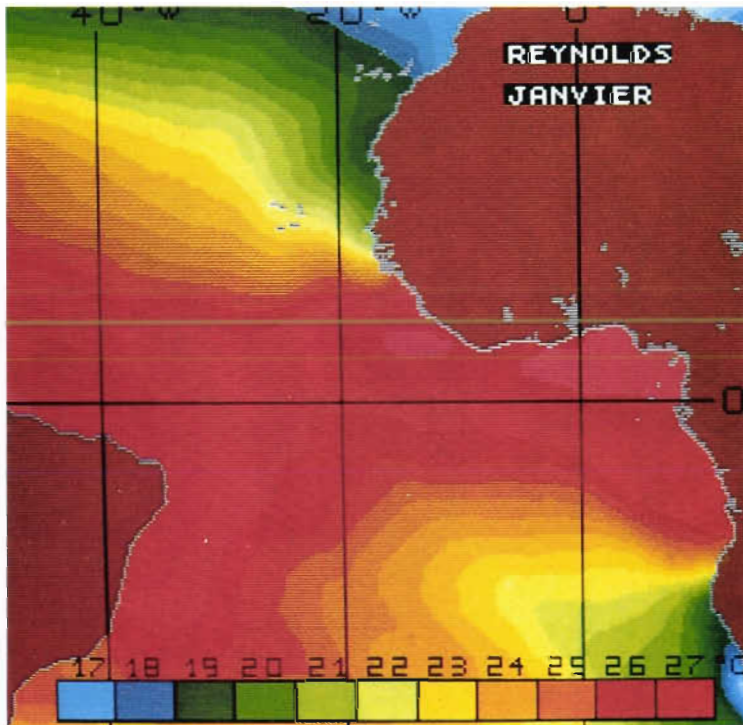
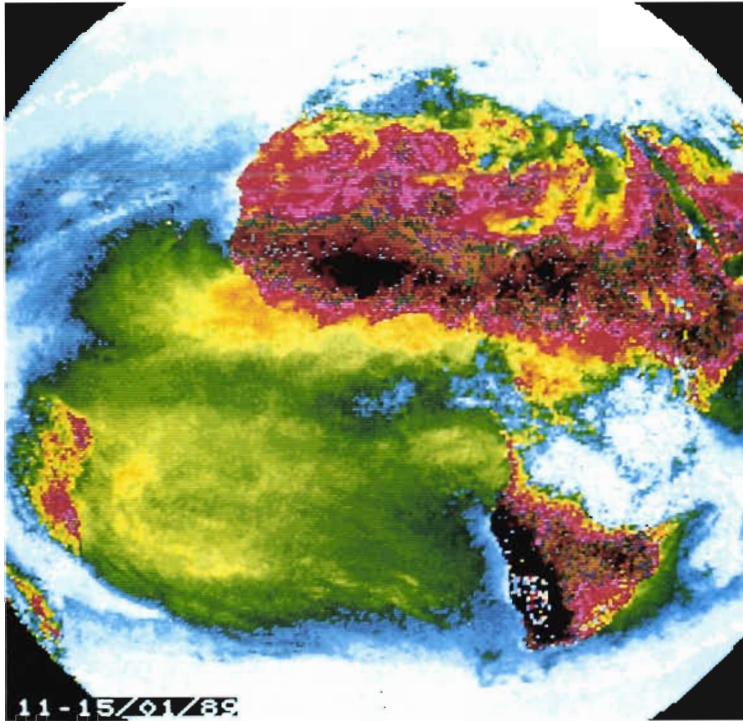
Les informations nécessaires à la calibration de chaque capteur (corps noir de référence, télémétries diverses, visée de l'espace, etc.) font partie de l'information transmise par le satellite METEOSAT à la station de contrôle de l'ESOC. Celle-ci renvoie via le satellite une information dite disséminée et géographiquement recalée. A partir de ces informations, chaque utilisateur procède à une calibration des comptes numériques, puis à un calcul des radiances [MORGAN, 1979] et enfin, par inversion de la fonction de Planck, au calcul d'une température radiative, la mer étant assimilée à un corps noir.

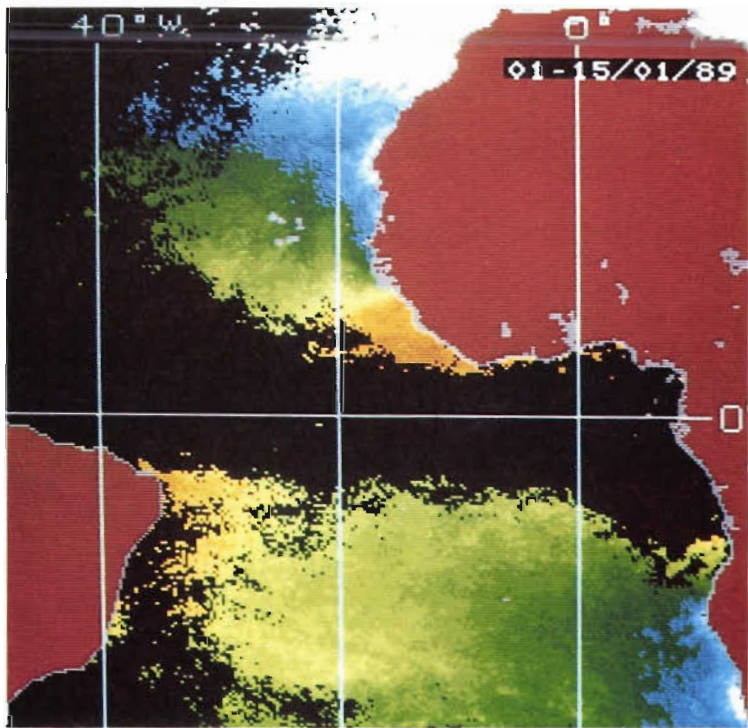
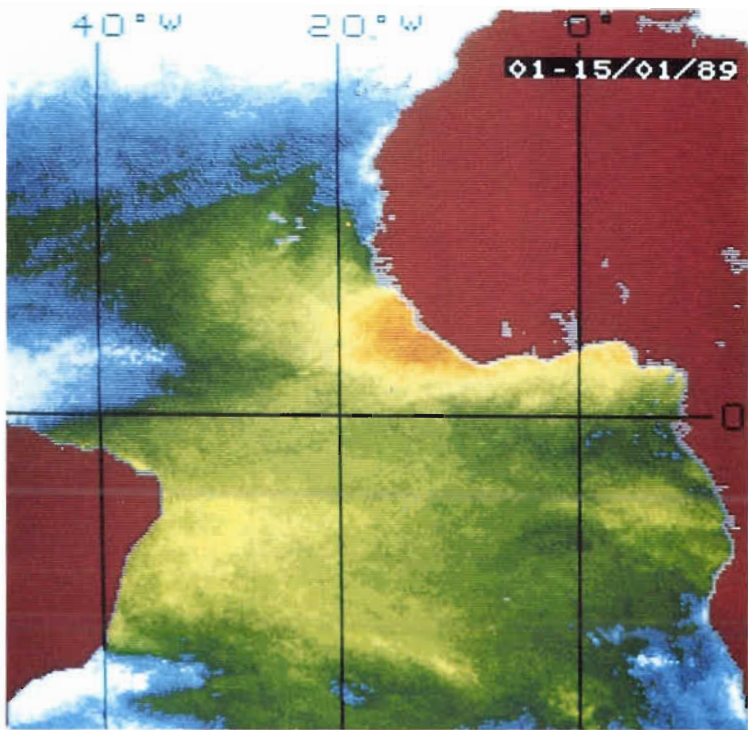
A ce niveau, une synthèse multitemporelle est réalisée. Celle-ci est justifiée par les constats suivants : d'une part la température de surface de la mer peut être considérée comme stable sur une période de temps de quelques jours et d'autre part les phénomènes d'absorption dus à l'atmosphère – qui diminuent la température apparente de la surface de la mer – sont variables et éphémères.

Cette synthèse est effectuée en ne retenant pour chaque pixel que les comptes numériques correspondant aux températures les plus élevées, sur une période de temps adaptée à la variabilité des phénomènes océanographiques observés. En Atlantique tropical, une base de temps de cinq jours a été choisie.

FIGURE 2

- a) Image de synthèse METEOSAT infrarouge non redressée, du 11 au 15 janvier 1989.
- b) Image moyennée du 1^{er} au 15 janvier 1989, redressée géométriquement et masquée sur les continents.
- c) Climatologie de REYNOLDS [1982] du mois de janvier.
- d) Image du 1^{er} au 15 janvier 1989 masquée sur les nuages.





Un redressement géométrique est ensuite opéré suivant une projection géographique équidistante, de concept simple et économe en temps calcul par rapport à la projection de Mercator. Les figures 2a et 2b illustrent ce redressement géométrique.

DISCRIMINATION MER/NUAGES

Si la méthode de l'histogramme bidimensionnel visible/infrarouge est bien connue pour discriminer mer et nuages [BIZZARRI, 1979], elle impose néanmoins les contraintes de chargement et d'exploitation de la donnée visible. Nous l'avons évitée en observant que les anomalies significatives de température de surface de l'océan étaient rarement supérieures à 4°C en valeur absolue. Les nombreuses données de surface disponibles depuis le début du siècle ont permis de construire une "climatologie" de la température de surface de la mer. Nous avons pris pour référence celle de REYNOLDS [1982] élaborée sur une base mensuelle par degrés de latitude et longitude. Celle-ci sert de base à la génération par interpolation d'une climatologie (figure 2c) correspondant à la même période calendaire que celle de l'image à traiter.

Une comparaison directe de la donnée satellitaire avec cette climatologie conduit à différencier les zones où le gradient de température tel qu'il apparaît sur la synthèse est attribuable à une structure atmosphérique ou océanique. L'expérience et la connaissance océanographique du milieu nous ont permis d'établir qu'en zone intertropicale, jusqu'à 5°C d'atténuation du signal par l'atmosphère, le gradient thermique observé est encore le fait d'une structure marine (figure 2d). Dans ces zones, les températures radiatives doivent de nouveau être corrigées de l'absorption atmosphérique résiduelle pour atteindre la température de surface de la mer.

DETERMINATION DE LA CORRECTION ATMOSPHERIQUE

Si l'on considère que la vapeur d'eau est le principal responsable de l'atténuation du signal radiométrique, on peut représenter sa distribution en utilisant les données du modèle d'analyse du Centre européen: la figure 3 représente le contenu intégré en vapeur d'eau de 1 000 à 300 hPa sur la même période de quinze jours. On y retrouve principalement un gradient méridien, en relation avec la position de la zone intertropicale de convergence (ZITC). Cependant, l'introduction de ce contenu intégré en vapeur d'eau comme base de correction de la donnée infrarouge METEOSAT ne donne pas de résultats suffisamment précis tant en raison de sa faible résolution spatiale - maille de (2,5 x 2,5) degrés - que du prétraitement déjà effectué sur les données METEOSAT et minorant l'effet atmosphérique. Cette figure suggère néanmoins que, le long de chaque longitude, le gradient méridien d'absorption puisse être estimé par une fonction polynomiale simple, calculée ici à partir des données des bateaux.

En effet, d'après QUENEY [1974], la contribution des basses couches est forte et la pente de la relation humidité/altitude varie peu en zone intertropicale. Le contenu intégré en vapeur d'eau pourrait donc être évalué à partir de l'humidité en surface. Cependant, cette dernière n'est pas calculable avec une densité suffisante à partir des données recueillies à la mer. Nous avons donc eu recours aux seules données de température de surface mesurées par les navires marchands (figure 4a), l'absorption totale en un point (vapeur d'eau et effet de l'angle zénithal) pouvant être décrite par la différence des températures mesurées hors atmosphère et au niveau de la mer.

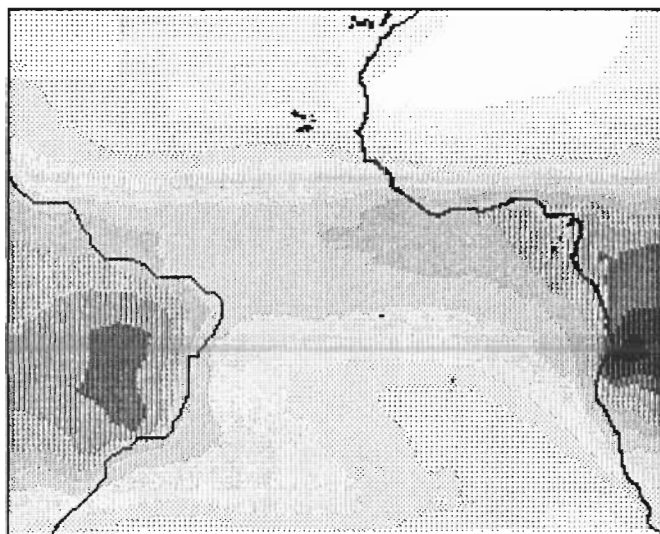


FIGURE 3 : Cartographie du contenu intégré en vapeur d'eau du 1^{er} au 15 janvier 1989 calculé à partir des données du modèle d'analyse du CEPMMT.

En calculant en chacune des données bateaux la différence (notée dT) entre la température mesurée par ces derniers (figure 4a) et celle donnée par le satellite (figure 4b), on obtient une distribution d'écarts (figure 4c) représentant l'absorption totale en chaque point. La plus grande amplitude de ces écarts étant principalement méridienne, nous avons divisé notre zone d'étude en quatre secteurs méridiens à l'intérieur desquels nous supposons que l'absorption atmosphérique varie principalement avec la latitude. Un ajustement polynomial de degré 5,

effectué à partir des données disponibles dans chaque domaine, prend compte de la distribution des écarts. Une interpolation en longitude permet ensuite une extension en champ continu de la correction (figure 4d) à appliquer en retour à la donnée METEOSAT (figure 5a).

Dans les zones masquées par les nuages, une analyse objective simple des données bateaux autorise l'extension en champ continu (figure 5b). L'algorithme utilise les données bateaux dont les valeurs aberrantes ont été préalablement éliminées successivement : par comparaison avec la climatologie de REYNOLDS en rejetant celles qui s'en écartent de plus de 4°C ; par tri géographique sur des zones élémentaires (8 degrés de longitude x 4 degrés de latitude) excluant les données distantes de la valeur centrale de plus de deux fois l'écart-type. Ce dernier tri permet également l'identification des navires dont les mesures sont suspectes.

Les données restantes servent de base au calcul de la température de surface de la mer, en explorant une surface circulaire dont le rayon varie avec la densité des données. Les données METEOSAT situées aux frontières du domaine sont prises en compte au même titre que les données bateaux.

On observe que les zones à faible densité de données, situées en Atlantique équatorial, sont généralement aussi des zones à faible gradient thermique. L'extension de ces données y est donc préférable à un recours à une climatologie susceptible d'entraîner un biais local.

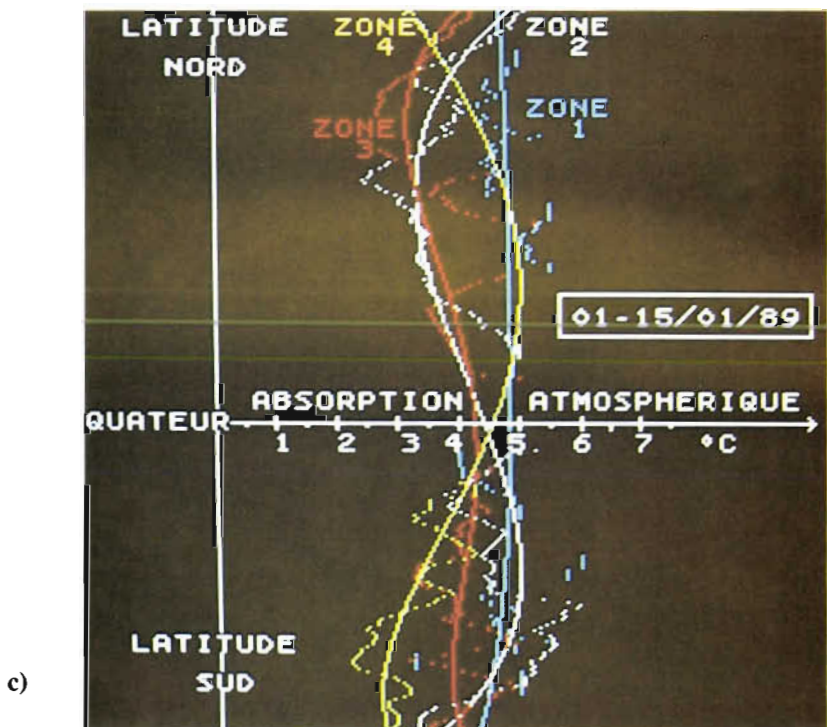
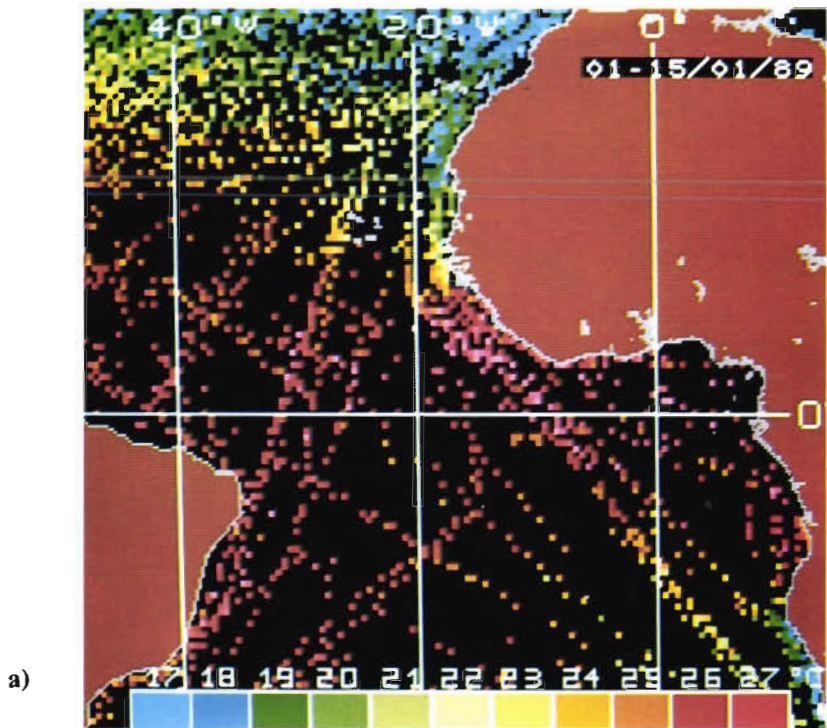
Afin de conserver la structure des zones frontales, on applique un lissage médian défini par une matrice dont la taille diminue avec l'augmentation du gradient marin (figure 5c). L'anomalie de température peut être calculée à partir de la climatologie de REYNOLDS (figure 5d).

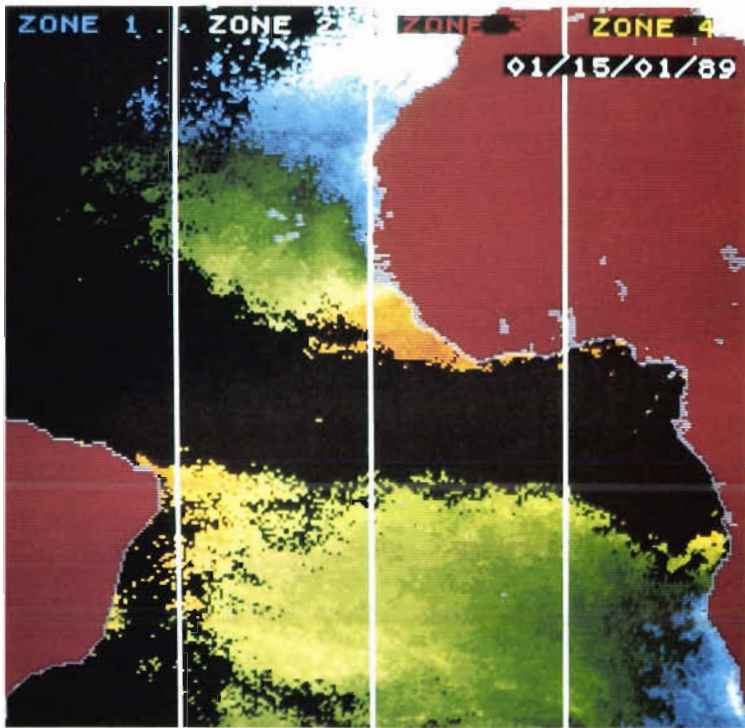
RESULTATS ET DISCUSSION

Le poids donné aux mesures à la mer impose une critique de leur qualité et de leur distribution. En ce qui concerne leur qualité, sur les 3 500 données disponibles par quinzaine en moyenne dans la zone 36°N-30°S et 50°W-16°E (4 612 données de surface ont été collectées pour la période du premier au quinze janvier 1989), environ 15% ont été éliminées par les différents filtres. La distribution des données restantes est généralement inégale (figure 4a). La densité des données est plus élevée en Atlantique Nord et dans les régions d'upwelling côtier (zones de plus grand intérêt océanographique) et plus faible dans l'Atlantique central Sud et la baie de Biafra (région orientale du golfe de Guinée) où les gradients marins sont aussi plus faibles. Dans cette dernière région, également défavorisée par la quasi-permanence d'un couvert nuageux, seuls les capteurs micro-ondes évoqués plus haut sont à même de fournir une information, toute autre méthode utilisant le domaine infrarouge thermique étant peu efficace. Hormis cette région, l'ensemble de la bande nuageuse liée à la présence de la ZITC est généralement bien documentée par les données de navires marchands.

FIGURE 4

- a) Localisation des températures de surface des navires marchands pour la période du 1^{er} au 15 janvier 1989 par le SMT.
- b) Synthèse infrarouge du 1^{er} au 15 janvier (identique à figure 2d).
- c) Courbes d'absorption atmosphérique résultantes, calculées d'après les différences locales entre température METEOSAT et température bateau à l'intérieur des quatre secteurs méridiens représentés en figure 4b.
- d) Champ d'absorption atmosphérique résultant des courbes de la figure 4c.





b)



d)

Quel que soit le mode d'élaboration d'une carte de température de surface à partir de données satellitaires, la validation se fait toujours en dernière analyse à l'aide de données à la mer. A l'échelle de notre zone d'étude, l'Atlantique tropical, les seules données de validation absolue proviennent exceptionnellement des navires océanographiques et le plus souvent de navires marchands.

A partir d'un lot de données issu des mêmes navires marchands et disjoint de celui utilisé par notre logiciel, l'écart-type des différences entre données à la mer et données satellitaires traitées a été calculé pour 50 situations sur l'ensemble de l'Atlantique tropical. Il a été trouvé en moyenne entre 0,8 et 0,9 °C. Si l'on effectue le même traitement sur une zone plus restreinte, à savoir la façade maritime sénégal-mauritanienne où les conditions expérimentales sont meilleures (faible couvert nuageux et densité de bateaux élevée), l'écart-type calculé sur 150 situations reste compris dans les mêmes valeurs.

Une autre évaluation de notre produit a été sa comparaison (figure 6) avec des produits similaires existants, tels les cartes de température GOSSTCOMP* ou NWS**, toutes deux produites par la NOAA. Nous avons focalisé notre attention sur l'upwelling équatorial, région à forte variabilité interannuelle. Des expériences totalement indépendantes y ont été menées en 1987 à partir de satellites à capteur actif et permettant de relier l'intensité de l'upwelling à la hauteur dynamique déduite de l'altimètre de GEOSAT.

Durant la deuxième quinzaine de juillet 1986, l'upwelling équatorial apparaît de manière confuse sur le produit GOSSTCOMP (semaine du 16 au 22 juillet) avec un fort et inhabituel gradient thermique zonal à l'équateur aux environs de 5°W (figure 6a). Il est en revanche nettement visible et décrit de façon comparable sur la carte NWS et notre produit du 16 au 31 juillet (figures 6b et 6c).

Durant la deuxième quinzaine de juillet 1987, l'upwelling équatorial est parfaitement identifié sur les cartes GOSSTCOMP et NWS (figures 6d et 6e). Il est toutefois plus intense sur la première (24 et 25°C respectivement à l'équateur par 10°W). Sur notre produit (du 16 au 31 juillet), cet upwelling est absent (figure 6f).

Même si l'existence d'un biais systématique entre ces trois produits est probable, on notera cependant entre les deux années une baisse significative de l'intensité de l'upwelling équatorial sur le produit NWS et encore plus nette sur notre carte. En revanche, le produit GOSSTCOMP fait apparaître plus clairement l'upwelling en 1987.

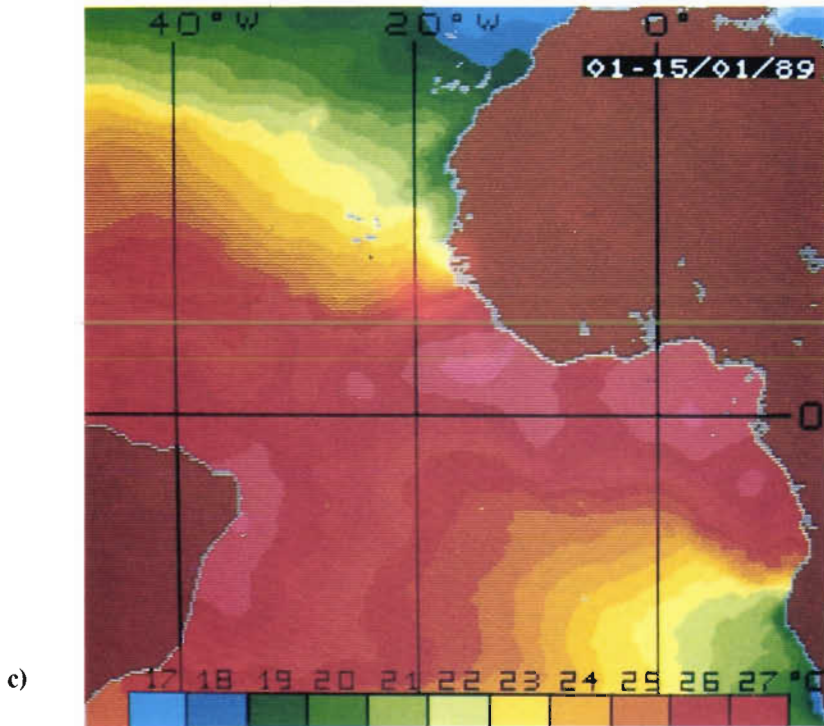
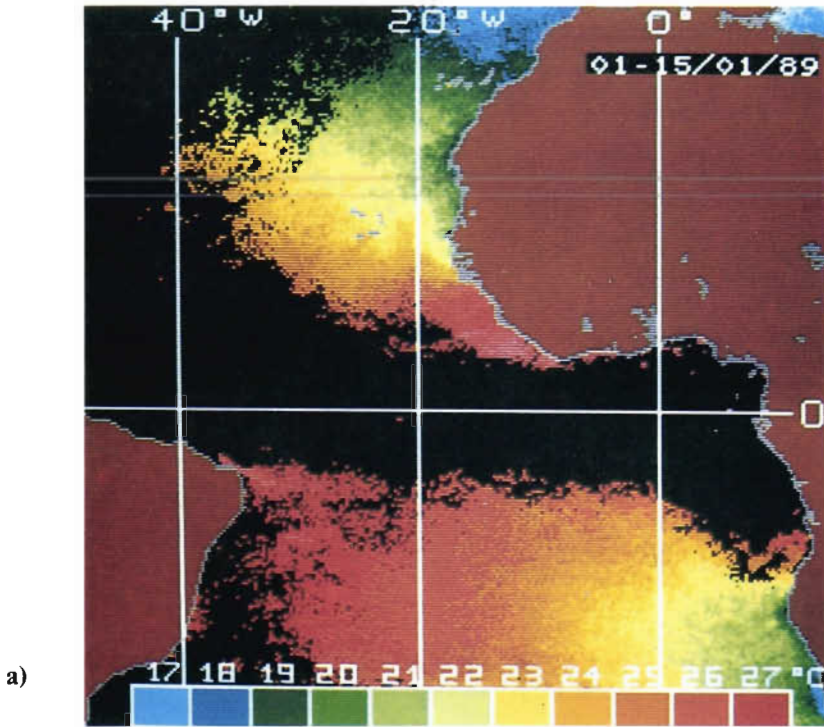
Les mesures altimétriques effectuées à partir de GEOSAT de novembre 1986 à août 1987 indiquent clairement une apparition précoce de l'upwelling équatorial au mois de mai, une baisse anormale de son intensité dès le mois de juin, allant jusqu'à sa disparition complète en août [ARNAULT *et al.*, sous presse]. Cette observation inhabituelle est en parfaite concordance avec les résultats de notre produit pour cette époque, contrairement aux cartes américaines. D'autres considérations,

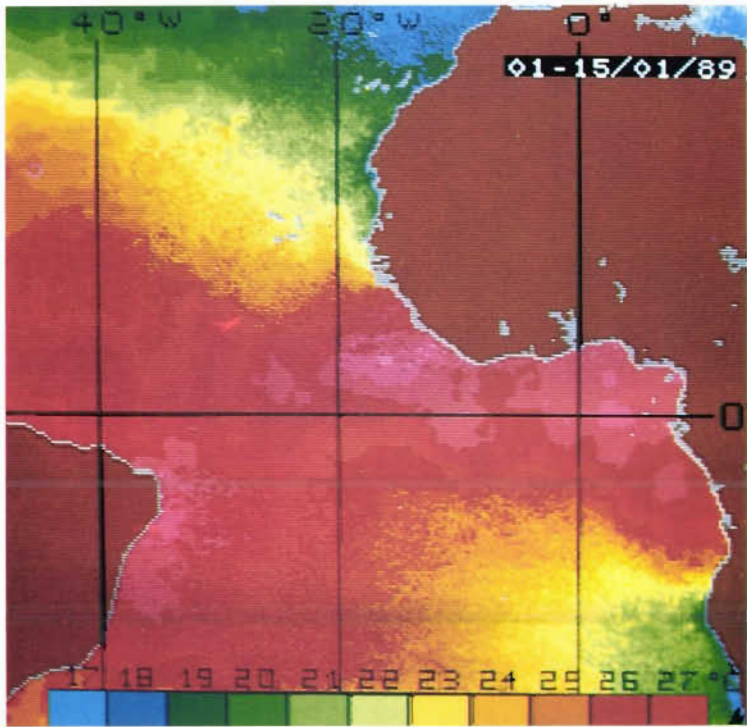
* GOSSTCOMP : Global Operational Sea Surface Temperature Computation.

** NWS : National Weather Service Etats-Unis.

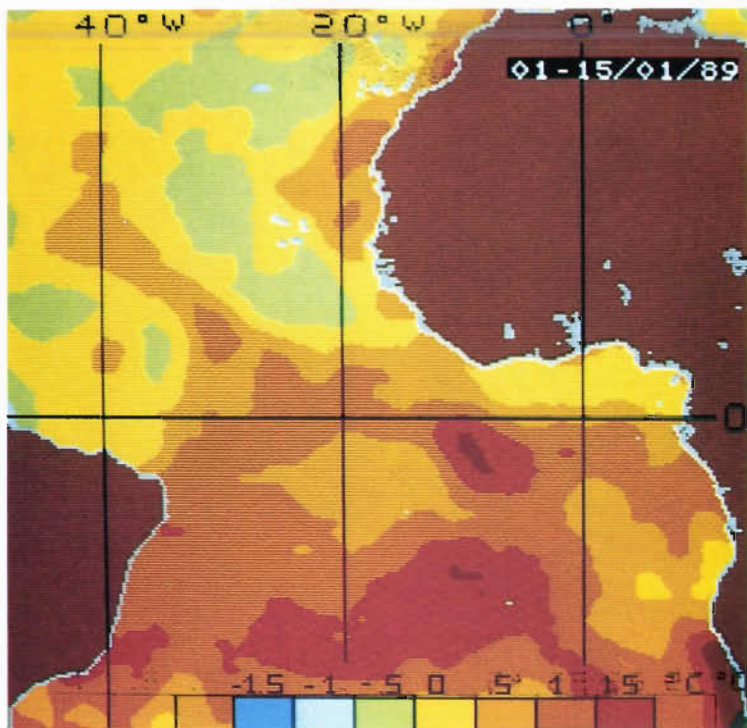
FIGURE 5

- a) Champ de température corrigé de l'absorption atmosphérique pour les zones de radiance claire, du 1^{er} au 15 janvier 1989.
- b) Idem, avec analyse objective des données bateaux en zone nuageuse.
- c) Champ de température résultant, après lissage sélectif en fonction de la valeur du gradient local.
- d) Anomalie de température de surface calculée d'après la climatologie de REYNOLDS [1982].





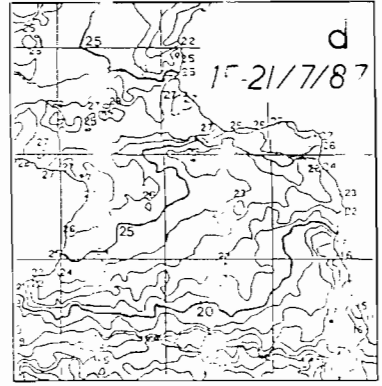
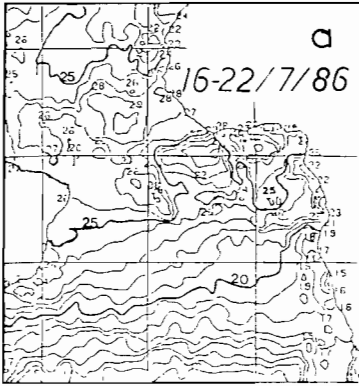
b)



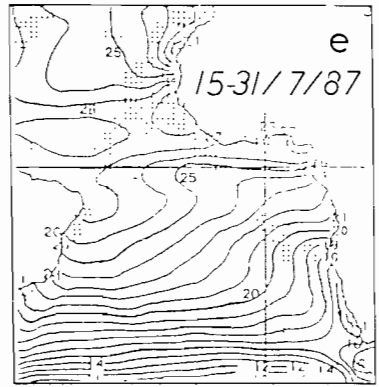
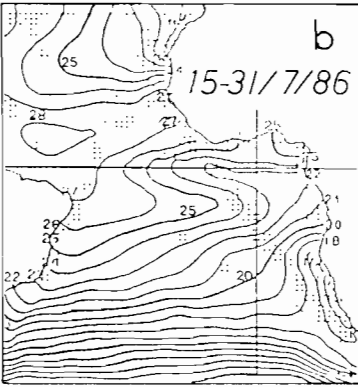
d)

FIGURE 6 : Cartes de températures de surface de l'Atlantique tropical.

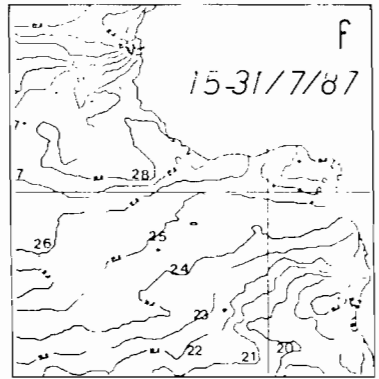
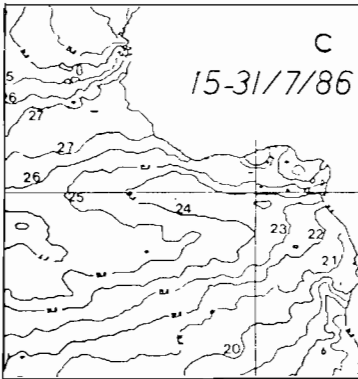
- a) GOSSTCOMP, du 16 au 22 juillet 1986.
- b) NWS, du 16 au 31 juillet 1986.
- c) ORSTOM/CRODT, du 16 au 31 juillet 1986.
- d) GOSSTCOMP, du 15 au 21 juillet 1987.
- e) NWS, du 16 au 31 juillet 1987.
- f) ORSTOM/CRODT, du 16 au 31 juillet 1987.



GOSSTCOMP



NWS



ORSTOM 'CROTT

d'ordre purement océanographique cette fois, viennent la confirmer si l'on analyse les conditions de vent en surface. En se fondant sur les relations existant entre les paramètres météorologiques et océaniques de surface et la position de la ZITC [PHILANDER, 1986], on observera qu'en 1987 la zone intertropicale de convergence a amorcé sa migration vers le nord de façon précoce (mi-mars), pour se stabiliser à la latitude atteinte à la mi-juin 1987 [CITEAU *et al.*, 1987]. Il est donc logique de penser que la réponse de l'océan équatorial au régime des alizés de sud-est à cette époque, aura été un upwelling équatorial précoce dont l'intensité aura diminué jusqu'à disparaître en juillet 1987.

Une des explications possibles aux divergences que nous observons entre notre produit et les cartes américaines précédemment citées, pourrait être le poids trop élevé de la climatologie dans le processus d'élaboration de ces dernières. En revanche, l'originalité de nos cartes (ORSTOM/CRODT) est de ne pas intégrer d'information climatique, en dehors de celles nécessaires aux procédures de discrimination.

CONCLUSION

La méthode proposée a le mérite de la simplicité et supporte les contraintes d'une exploitation opérationnelle dans la mesure où ni les moyens informatiques requis ni le logiciel utilisé ne sont exceptionnellement lourds, si on les compare à ceux mis en oeuvre dans les grandes agences spatiales européennes ou américaines. La précision obtenue (0,8 °C) est du même ordre de grandeur que celle généralement annoncée pour des méthodes similaires. La résolution spatiale atteinte suggère l'intérêt de la réalisation d'une climatologie nouvelle de l'océan Atlantique tropical, issue d'une couverture satellitaire.

A l'heure où les grands programmes à vocation climatique (TOGA, WOCE) exigent un suivi fidèle des paramètres océanographiques, il ne nous a pas semblé inutile de remettre en question certains produits opérationnels existants qui ne paraissent pas toujours donner une image fidèle de la réalité océanographique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBUISSON (M.), MONGET (J.M.) & NIHOUS (C.), 1979. - Sea surface temperature anomaly mapping using the NOAA satellites, in: *Use of data from meteorological satellites, proceedings of a technical conference, Lannion, France, September 17-21, 1979*, ed. B. Battrick, pp. 201-204. - Paris : European space agency. - (ESA SP-143).
- ARNAULT (S.), MENARD (Y.) & ROUQUET (M.C.), sous presse. - Variability of the tropical Atlantic in 1986-87 as observed by GEOSAT and in situ data. *Journal of geophysical research*.

- BATES (J.), 1983. - Use of VAS multispectral data for sea surface temperature determination, in: *Satellite-derived sea surface temperature workshop*. - Pasadena : Jet propulsion laboratory, California institute of technology. - (JPL publication ; 83-84).
- BERIOT (N.), SCOTT (N.A.), CHEDIN (A.) & SITBON (P.), 1982. - Calibration of geostationary satellite infrared radiometers using the Tiros-N vertical sounder: application to METEOSAT. *Journal of applied meteorology*, **21**, 1, pp. 84-89.
- BIZZARRI (B.), 1979. - Satellite data for weather analysis and prediction, in: *Use of data from meteorological satellites, proceedings of a technical conference, Lannion, France, September 17-21, 1979*, ed. B. Battrick, pp. 31-42. - Paris : European space agency. - (ESA SP-143).
- CHESTER (T.J.), 1980. - Sea surface temperature measurement from the SEASAT SMMR, in: *Proceedings of a workshop on applications of existing satellite data to the study of ocean surface energetics, 19-21 November 1980, University of Wisconsin*, ed. C. Gautier, pp. 175-179.
- CITEAU (J.), BERGES (J.C.) & DEMARCO (H.), 1987. - Position de la zone intertropicale de convergence le long de 28°W et température de surface. *Veille climatique satellitaire*, **18**, pp. 3-5.
- CITEAU (J.), GUILLOT (B.) & LAE (R.), 1984. - Opération Listao : reconnaissance de l'environnement physique en Atlantique intertropicale à l'aide des satellites METEOSAT et GOES-E. *Initiation - documentations techniques, ORSTOM*, **63**, 28 p.
- DUDHIA (A.), 1986. - Inter-calibration of METEOSAT and AVHRR. *AES experts meeting "Measuring the greenhouse effect", Toronto, Canada, 15-19 September 1986*.
- LARSON (S.E.), 1980. - Sea surface temperature variability; implications for the role of satellite derived SST's in climate research, in: *Proceedings of a workshop on applications of existing satellite data to the study of ocean surface energetics, 19-21 November 1980, University of Wisconsin*, ed. C. Gautier, pp. 151-162.
- MAUL (G.A.), 1981. - Application of GOES visible-infrared data to quantifying mesoscale ocean surface temperatures. *Journal of geophysical research*, **86**, C9, pp. 8007-8021.
- McCLAIN (E.P.), 1980. - Results of global tests of a two-window method for satellite-derived sea surface temperature, in: *Proceedings of a workshop on applications of existing satellite data*

to the study of the ocean surface energetics, 19-21 November 1980, University of Wisconsin, ed. C. Gautier, pp. 169-173.

McCLAIN (E.P.), PICHEL (W.G.), WALTON (C.C.), AHMAD (Z.) & SUTTON (J.), 1983. - Multichannel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures. *Advances in space research*, 2, 6, pp. 43-47.

MORGAN (J.), 1979. - METEOSAT calibration. Report - MDMD/MET, ESOC, 1, 24 p.

PHILANDER (S.G.H.), 1986. - Unusual conditions in the tropical Atlantic Ocean in 1984. *Nature*, 322, 6076, pp. 236-238.

PHULPIN (T.) & DESCHAMPS (P.Y.), 1980. - Estimation of sea surface temperature from AVHRR infrared channels measurements, in : *Coastal and marine applications of remote sensing. Proceedings of the Sixth annual conference of the Remote Sensing Society, 18th-19th December, 1979, University of Dundee*, ed. A.P. Cracknell, pp. 47-58. - Reading : Remote Sensing Society.

QUENEY (P.), 1974. - *Eléments de météorologie*. - Paris : Masson. - X-300 p. - (Collection de l'Ecole nationale supérieure de techniques avancées).

REYNOLDS (R.W.), 1982. - Monthly averaged climatology of sea surface temperature. *NOAA technical report NWS*, 31, 112 p.

SMITH (W.L.), 1980. - Sea surface temperatures: improved observation from geostationary satellites, in : *Proceedings of a workshop on applications of existing satellite data to the study of the ocean surface energetics, 19-21 November 1980, University of Wisconsin*, ed. C. Gautier, pp. 163-168.

WEINREB (M.P.) & HILL (M.L.), 1980. - Calculations of atmospheric radiances and brightness temperatures in infrared windows channels of satellite radiometers. *NOAA technical report NESS*, 80, 40 p.

La télédétection infrarouge thermique peut-elle aider à la prévision des zones de pêche ? La réponse praxéologique

par

JEAN-MICHEL STRETTA

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre ORSTOM
B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex (France)*

RESUME

Les mouvements des thons sont difficilement observables depuis l'espace. Nous devons les déduire à partir de modèles s'appuyant sur les connaissances que l'on a du comportement alimentaire des thons. Pour bâtir ce type de modèle, nous savons que les couches épipélagiques de l'océan tropical sont pauvres lorsque les conditions hydrologiques sont stables, que la faune migrante semble ne pas participer aux rations alimentaires des thons et que les besoins énergétiques des thons sont importants et bien connus.

Pour trouver les zones à fortes concentrations de thons aidés, nous devons rechercher des zones à forte densité de nourriture. Ce problème nous entraîne à rechercher des zones où la productivité est élevée. Dans les eaux tropicales, le système qui joue un rôle considérable dans l'enrichissement de la couche épipélagique est celui de la remontée de la thermocline en surface (ou dans la couche euphotique). Cette remontée va ainsi créer une zone frontale (ou un dôme thermique) et nous amener à développer un nouveau concept en écologie des thons : celui du passé hydrologique d'une masse d'eau. Cette notion nous permet

d'appréhender le problème de la localisation de la nourriture des thons en étudiant la signature thermique en surface des mécanismes de fertilisation des masses d'eaux. Cette signature peut être détectée par avions ou par satellites équipés de radiomètres infrarouge pour mesurer la température de surface de la mer. Le modèle le plus simple pour cerner la période et la zone où la probabilité de trouver des animaux proies sera la plus élevée consiste en une analyse (dite analyse praxéologique) de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température de surface.

ABSTRACT

Tuna movements cannot be observed in the open ocean from space. We must deduce movements from models based on tuna behaviour. We know that the tropical epipelagic water masses are nutritionally poor under steady conditions, that the migrating fauna is not a major source of food for tunas and that the bioenergetics of tuna are important and well-documented.

In order to find high concentrations of tunas, first we must find areas with high density of tuna forage. Typically, these patches of prey within an epipelagic ecosystem occur in fronts, upwellings or domes. The knowledge of the hydrological history of water masses through satellite detection is now possible through time and space by measuring the surface thermal signature of fertilizing processes of water masses. We can estimate forage production, and thereby predict tuna distribution.

This signature can be detected by airplane, or satellites equipped with infrared radiometer for measuring sea surface temperature. The simplest model will be to follow the sea surface temperature along time/space scale and to point out the area where the probability of finding forage organisms for tunas is supposed to be high.

A possible way to find high concentration of tunas is the praxeological analysis. This analysis we have developed is based on the study of the hydrological history of water masses using satellite data (METEOSAT and NOAA).

INTRODUCTION

L'analyse classique d'un écosystème passe par la description des données de nature, de structure et de fonctionnement. Cette procédure analytique est, dans l'esprit d'ARISTOTE, une partie de la logique qui traite de la démonstration. Elle considère les "choses" dans leurs éléments plutôt que dans leur ensemble. Cela signifie que l'on va réduire l'écosystème étudié en une série de "boîtes" et que l'on va reconstituer cet écosystème à partir de celles-ci aussi bien au sens matériel qu'au sens conceptuel.

Les modèles d'écosystèmes sont de deux types : les modèles structuraux qui décrivent l'évolution de la structure des peuplements et les modèles fonctionnels qui décrivent les échanges de matière et d'énergie entre les différentes composantes de l'écosystème [AGOUMI, 1985]. Ces deux types de modèles relèvent d'une procédure analytique, qui est la scission de la réalité en des unités de plus en plus petites et l'isolement des chaînes causales individuelles [BERTALANFFY, 1973]. En revanche, VINOGRADOV [1983] souligne le fait que " *modelling should be regarded as a specific method for the study and description of ecosystems. However, in the construction of such a model only basic parameters and relations can be used and many interesting details must be omitted*".

Cette approche réductionniste préconise donc de diviser l'écosystème en ses différentes composantes et le plus souvent de le recréer dans des conditions de stabilité. L'alternative à cette approche réductionniste est une approche globale ou systémique [ROSNAY, 1975] d'un écosystème. Cette méthode holistique qui s'appuie sur des schémas conceptuels nouveaux, ou paradigmes, s'éloigne de la procédure analytique. Elle offre des modèles qui s'appliquent à des systèmes en ne tenant pas compte de la nature de leurs éléments et des relations entre ceux-ci [BERTALANFFY, 1973]. Toutefois, selon ROSNAY [1975], la méthode systémique se distingue de la théorie générale des systèmes de BERTALANFFY dont le "*but ultime consiste à décrire et à englober dans un formalisme mathématique, l'ensemble des systèmes rencontrés dans la nature... Dans l'analyse systémique, la démarche de la pensée est à la fois analytique et synthétique, détaillante et englobante*".

ROSNAY [1975] dresse un tableau des caractéristiques de chacune de ces deux approches. Dans ce tableau, nous retiendrons que l'approche analytique "*S'appuie sur la précision des détails*" alors que l'approche systémique "*s'appuie sur la perception globale*". Plus loin dans ce tableau, cet auteur, évoque le fait que dans le cadre de l'approche analytique, on rencontre des "*Modèles précis et détaillés mais difficilement utilisables dans l'action*" alors que dans l'approche systémique, on rencontre des "*Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action*".

La construction et la mise au point de modèles mathématiques du fonctionnement d'un écosystème pélagique marin ont une longue histoire [VINOGRADOV, 1983]. Depuis plusieurs années, les études s'orientent vers les analyses globales des écosystèmes mais beaucoup d'entre elles se fondent sur des concepts et des modèles d'équilibre ou d'homéostasie comme celui présenté par WALSH [1972]. Ces modèles sont inadéquats pour des phénomènes de modification et de différenciation, car d'après BERTALANFFY [1973], un système peut être défini comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et leur environnement. Tout système est à la fois formé de sous-systèmes et à son tour partie intégrante d'un système plus vaste [FRONTIER, 1983]. Dans son ouvrage, BERTALANFFY [1973] précise que le but de la théorie générale des systèmes est de "*formuler des principes valables pour*

les «systèmes» en général indépendamment de la nature des éléments qui les composent et des relations des «forces» qui les relient. ... Dans sa forme élaborée, ce serait une discipline logico-mathématique, et elle-même purement formelle, mais qui s'appliquerait aux diverses sciences empiriques". Un écosystème est un système ; FRONTIER [1977] précise que : "Les éléments [de ce système] dépendent les uns des autres, et constituent donc un réseau d'interactions... De cet ensemble d'interactions résultent des propriétés globales et un fonctionnement global, non entièrement prévus par les propriétés et fonctionnements des éléments composants : en effet, à ces derniers doivent être ajoutés ceux qui découlent des relations entre éléments. Il y a émergence d'un niveau macroscopique, nouveau par rapport au niveau défini par les éléments."

De plus ces éléments, au sein de l'écosystème, sont eux-mêmes les systèmes et FRONTIER [1977] poursuit en précisant : "A un niveau donné, l'organisation qui détermine ce niveau utilise, en les combinant, les propriétés globales des sous-systèmes qui la composent. L'organisation pourra être décrite en n'utilisant que ces propriétés globales, et en ignorant la "réalité interne" des éléments – ce que l'on exprime en disant qu'on considère ces derniers comme des boîtes noires, pour lesquelles on ne connaît que l'information qui entre et celle qui sort. Cette optique se trouve à la base de la construction des modèles ; on voit que ces derniers se réfèrent toujours à une échelle de perception choisie."

La méthode praxéologique

La procédure analytique s'intéresse aux situations (le plus souvent aux situations stables ou en équilibre) et, au lieu d'analyser des flux d'énergie entre les différents compartiments de l'écosystème, on pourrait imaginer d'analyser l'évolution (au sens large) de l'ensemble de l'écosystème au cours du temps. Cette nouvelle forme d'analyse, s'inspirant dans son esprit de la théorie dynamique des systèmes, s'intéresse aux actions (ou aux événements) auxquelles viennent aboutir les situations. Cette forme d'analyse que nous appellerons **analyse praxéologique*** a l'avantage d'être proche de la réalité. Elle manque toutefois d'élégance mathématique et de puissance déductive ; c'est, par essence, une analyse empirico-intuitive. Par ailleurs, comme le fait remarquer BERTALANFFY [1973], les premières versions d'un nouveau paradigme** sont souvent assez grossières et les solutions obtenues sont loin d'être parfaites. Cette analyse praxéologique et la modélisation qui en découle peuvent être considérées dans un premier temps comme un modèle verbal qui est, comme le souligne BERTALANFFY [1973], meilleur que pas de modèle du tout ou qu'un

* praxéologie : de praxis : action. Analyse de l'évolution des événements (ou des actions) dans le temps.

** Ce nouveau paradigme s'oppose à celui des dynamiciens qui, lui, repose sur l'hypothèse que la reproduction, la survie et la production d'une population de poissons est virtuellement indépendante des changements dans l'abondance des autres composants biotiques dans l'eau. Le système étudié comprend seulement une population de poissons et des pêcheurs [RIGLER, 1982].

modèle plaqué, sous prétexte qu'on peut le formaliser mathématiquement, ce qui fausse la réalité. De son côté, RIGLER [1982] reconnaît que l'empirisme en écologie est une branche à haut risque mais très porteuse ; les principales critiques adressées aux méthodes empiriques sont qu'elles n'offrent pas d'alternative intellectuelle, que l'empirisme n'est pas de la science et enfin que c'est scientifiquement stérile. Toutefois, cet auteur précise que la clé caractéristique d'une théorie empirique est qu'elle s'adapte parfaitement à des prévisions. En revanche, une théorie analytique et explicative ne fait pas seulement des prévisions mais tend à expliquer comment elles fonctionnent.

Exemple d'analyse praxéologique

Nous allons appliquer le principe de l'analyse praxéologique pour tenter de cerner dans l'océan les zones les plus favorables aux concentrations de thonidés et bâtir un modèle empirique pour prévoir ces zones. Pour cela, nous allons analyser et décomposer les différents événements océanographiques qui s'enchaînent pour aboutir aux concentrations de thons. Nous savons que dans l'océan les mouvements et les concentrations de thons sont difficiles à observer directement. Nous devons donc les déduire soit par la connaissance des routes migratoires ou des concentrations liées à la reproduction, soit indirectement à partir de ce que nous savons du comportement des thons en fonction de quelques paramètres classiquement relevés pour l'étude de leur environnement. Les principaux paramètres analysés sont au nombre de cinq [STRETTA, 1988]. Ce sont : la température de surface, la teneur en oxygène dissous, la profondeur de la thermocline, le gradient de température qui lui est associé et la productivité de la masse d'eau. Cependant, ces paramètres doivent être étudiés dans leur ensemble car c'est celui qui sera proche de la valeur critique pour une espèce, à une taille et à un niveau physiologique donnés, qui deviendra alors le facteur limitant pour les déplacements et les concentrations des thons.

PRESENTATION D'UNE PECHERIE THONIERE DE SURFACE

Les concentrations de thons

Dans le golfe de Guinée, les captures significatives d'albacores (*Thunnus albacares*) et de listaos (*Katsuwonus pelamis*) sont réalisées dans une gamme de température qui s'étend de 22 à 29°C. La distribution des prises en fonction de la température de surface est très variable suivant les régions considérées [STRETTA, 1988 ; STRETTA & PETIT, 1989a]. Cela montre que la seule température de surface, le jour de la pêche, n'est pas le paramètre déterminant, d'autant plus que ce sont les mêmes poissons qui migrent d'une région à l'autre [MIYABE & BARD, 1986]. A une température donnée correspondra donc une fertilité différente de la masse d'eau suivant la région et la saison. De

plus, de nombreux auteurs estiment que la nourriture va induire la distribution des thons au sein des bornes définies par les paramètres physiques et physiologiques [BLACKBURN, 1965 ; SUND *et al.*, 1981 ; STRETTA, 1988].

Dans l'océan, les thons se rassemblent en bancs qui eux-mêmes se regroupent en concentrations. FONTENEAU [1986] définit le terme de concentration comme étant un groupement temporaire et très localisé de bancs de thons dans des zones écologiquement favorables. Pour trouver en mer des concentrations de thons suffisamment importantes pour être le siège d'une pêcherie de surface active, au moins deux hypothèses peuvent être retenues : soit les concentrations de thons sont liées à la reproduction, soit elles sont liées à une recherche permanente de nourriture.

Si l'on retient l'hypothèse des concentrations liées à la reproduction, nous savons, d'après ALBARET [1977] et CAYRE *et al.* [1988], que l'essentiel de la reproduction des albacores de surface s'effectue dans la zone équatoriale de la côte africaine jusque vers 25° ouest et 5° nord à 5° sud. La période de ponte couvre le quatrième trimestre de l'année et le premier trimestre de l'année suivante. Pour les albacores de profondeur du golfe de Guinée, les périodes de maturation sexuelle s'observent de février à avril. Pour les individus de l'Atlantique central et Ouest, les périodes de ponte sont encore mal cernées.

Si l'on retient l'hypothèse des concentrations liées à une recherche continue de nourriture, STRETTA [1988] soulève trois problèmes, à savoir, tout d'abord, que les masses d'eaux épipelagiques tropicales dans des conditions de stabilité comme la structure tropicale typique (STT) définie par HERBLAND & VOITURIEZ [1977] sont relativement pauvres [LE BORGNE, 1977], que la faune migrante semble ne pas participer aux rations alimentaires des thons [ROGER & GRANDPERRIN, 1976] et, enfin, que les besoins en nourriture des principales espèces de thons pour différents niveaux d'activité sont élevés [KITCHELL *et al.*, 1978], voire très élevés. A titre d'anecdote, VALIELA [1984] rapporte le fait que la consommation de maquereaux et de harengs par le stock de thon rouge en mer du Nord en 1952 (record d'abondance pour le thon rouge) a été estimée à 210 000-256 000 tonnes dont 150 000-180 000 tonnes de harengs.

Dans les eaux tropicales, on aboutit au paradoxe soulevé par KITCHELL *et al.* [1978], à savoir comment des bancs de thons peuvent-ils vivre au sein d'un environnement aussi pauvre ? Ces auteurs, s'appuyant sur les travaux de REID [1962] dans le Pacifique central, évaluent à "2.5 parts per billion" ** la quantité d'organismes proies dans la mer. Malgré cette nourriture théoriquement très diluée, les thons peuvent survivre, ce qui témoigne premièrement de la forte répartition en tache de la nourriture et deuxièmement de la remarquable capacité

* Nous employons à dessein les termes "relativement pauvres" pour qualifier la productivité au sein de la STT. Si les travaux de HERBLAND *et al.* [1985] font état d'une productivité conséquente dans l'océan tropical, il semblerait que cette productivité soit peu ou pas exportée vers les échelons trophiques supérieurs.

** 2,5 ppb ou $2,5 \cdot 10^{-9}$.

des thons à localiser et à "moissonner" ces agrégats d'organismes proies. Comme SUND *et al.* [1981], nous avancerons que les thons se rassemblent là où la température leur est favorable.

Par ailleurs, à partir d'une analyse bibliographique sur la nourriture des thons [STRETTA, 1987], nous retiendrons que les thons ont un spectre de nourriture très vaste ; que ce sont des prédateurs actifs et opportunistes [BERNARD *et al.*, 1985] qui chassent de jour et à vue dans la zone épipélagique de l'océan [MURPHY, 1959 ; MAGNUSON, 1963] ; que rien ne permet de dire que la nourriture est un facteur limitant pour les recrues [OLSON & BOGGS, 1986] ; que pour les juvéniles d'albacore et de listao, la nourriture est un facteur limitant la croissance [KITCHELL *et al.*, 1978]. OLSON [1982] précise que les pré-recrues ont besoin de taux d'ingestion très élevés par unité de poids corporel pour faire face à la dépense énergétique quotidienne d'entretien, de locomotion et de croissance. Enfin, pour les poissons adultes, le facteur limitant est leur capacité à consommer et à assimiler la nourriture disponible [KITCHELL *et al.*, 1978].

Les processus d'enrichissement

Il existe en Atlantique tropical différents processus d'enrichissement des masses d'eaux. HERBLAND *et al.* [1983] les classent en deux catégories : tout d'abord, les systèmes "quasi géostrophiques", tels les dômes de Guinée et d'Angola, la crête thermique équatoriale en saison chaude centrée entre 2° et 3°S ; puis les systèmes non géostrophiques, tels la divergence équatoriale en saison froide et les upwellings côtiers classiques liés au vent que l'on rencontre le long des côtes du Sénégal au nord, le long des côtes du Ghana et de la Côte d'Ivoire et le long des côtes du Gabon, du Congo et de l'Angola, entre le cap Lopez et le cap Frio.

Au sein de l'océan, il existe un autre système d'enrichissement, peu étudié par les océanographes mais en revanche bien connu des pêcheurs, à savoir celui que l'on rencontre aux alentours d'un haut-fond sous-marin ou d'un guyot. En effet, on constate très souvent que dans une zone, généralement située au large où il n'y a pas de pêche significative, la présence d'un guyot va favoriser un rassemblement de poisson [PETIT *et al.*, 1989]. Comme le soulignent BOEHLERT & GENIN [1987], l'enrichissement de la masse d'eau qui se produit près d'un guyot résulte d'une remontée générale des isothermes. Si, pour des raisons mécaniques, cette forme d'enrichissement est à relier à une remontée des isothermes, la présence de thon est à relier à la présence d'une anomalie dans le champ de perception d'un bancs de thon selon la théorie développée par PETIT [1986]. Dans le cas d'un guyot, cette anomalie pourrait être le gradient bathymétrique et/ou une turbulence de courant ou alors la modification d'autres paramètres créée par le guyot lui-même.

Ces zones d'enrichissement ont un point commun : celui des mouvements verticaux de la thermocline dans la couche euphotique. Cette remontée peut atteindre la surface et l'altération de la thermocline

se traduira par un refroidissement en surface ; c'est le cas d'un upwelling côtier ou de la zone de la divergence équatoriale. Si cette remontée de la thermocline n'atteint pas la surface, on assistera alors à la formation d'une structure en dôme ou d'une structure du type crête thermique.

En l'absence de structures frontales issues d'une remontée d'eau froide en surface, les processus de maturation de la masse d'eau sont plus lents et l'on retrouve la notion de variabilité basse fréquence de WALSH [1976]. HERBLAND *et al.* [1983] précisent qu'"il n'est pas nécessaire que les sels nutritifs parviennent en surface pour que la zone soit productive ; la couche homogène est peut-être le siège d'une grande activité biologique". Alors se pose la question de savoir si cette productivité est suffisante pour entretenir une production tertiaire capable à son tour de supporter des concentrations de thons. HERBLAND *et al.* [1983] estiment que "*les variations à court terme des conditions hydrologiques ont probablement plus d'importance qu'on le pense.*"

Toutefois, le type d'écosystème dans lequel évoluent les thonidés est associé à des mécanismes d'enrichissement qui résultent d'un contact entre une eau froide issue d'un upwelling et une masse d'eau chaude créant ainsi une zone frontale avec transfert d'énergie au voisinage l'interface selon le concept développé par FRONTIER [1978] "*au niveau du contact entre deux écosystèmes de maturités différentes, il se produit une exportation de matière et d'énergie du plus jeune vers le plus mûr. L'eau chaude oligotrophe exploitant l'eau froide riche, se peuple d'éléments trophiques supérieurs vagiles*". Exemples: la zone frontale du cap Lopez au large du Gabon [VOITURIEZ *et al.*, 1973 ; DUFOUR & STRETTA, 1973 ; STRETTA, 1977, 1988] et la zone frontale du cap des Trois Pointes au large du Ghana [STRETTA *et al.*, sous presse]. Les mécanismes d'enrichissement peuvent également résulter d'une remontée de la thermocline telle qu'on la rencontre dans la divergence équatoriale ou encore dans les dômes d'Angola et de Guinée [STRETTA, 1988].

En conclusion, il ne faut pas perdre de vue que cette forte productivité doit être considérée comme un véritable bouleversement écologique de l'écosystème de type "catastrophe" selon la théorie de R. THOM [PETIT, 1986]. Le résultat de ces bouleversements est la production d'animaux fourrage pour les thons.

RESULTATS DE L'ANALYSE PRAXEOLOGIQUE

Si l'on reprend les paramètres d'environnement qui ont une influence sur la disponibilité des thons, nous trouvons dans la structure tropicale typique une température de surface, une profondeur de la couche homogène et une teneur en oxygène dissous compatibles avec les exigences physiologiques des thons. En revanche, en raison de la pauvreté des eaux, c'est la nourriture qui devient alors proche de la valeur critique pour les thons et, comme nous l'avons vu plus haut, c'est le paramètre d'environnement proche de sa valeur critique qui devient le facteur limitant pour le déplacement et les concentrations de thons au

sein de la STT. C'est ainsi que SUND *et al.* [1981], s'appuyant sur les travaux de KITCHELL *et al.* [1978], pensent que : "*Despite the high daily food requirements of tunas, the migratory life style of these fishes is obviously very successful even in the open ocean where there is a highly patchy distribution of forage at all trophic levels*".

Structuration de l'analyse

Indépendamment de la complexité des mécanismes de productivité que l'on rencontre dans le milieu océanique, il existe une bonne corrélation entre les zones de forte productivité planctonique et celle des fortes captures de thonidés [YENTSCH, 1973]. C'est ainsi qu'une importante densité de nourriture pour les thons*, au sein de l'océan tropical, est le résultat d'une importante productivité de la masse d'eau. SCHAEFER [1957] pense que les concentrations de thons tropicaux coïncident avec les régions à forte productivité. Développant cette notion, HESTER [1961] trouve que "*An increase in the amount of tuna food in an area could result in a temperature-tuna relationship seemingly dependent upon the cooler water associated with the upwelling*". D'une façon générale, BRANDHORST [1958] souligne qu'un des facteurs prépondérants influençant l'agrégation de poissons pélagiques dans les eaux tropicales est la présence de nourriture elle-même tributaire de la production du phytoplancton.

Puisqu'une forte productivité planctonique sous-tend une forte concentration de nourriture pour les thons, la liaison entre la productivité de la masse d'eau et la pêche de thonidés est le concept retenu pour expliquer la présence de thon dans une zone océanique [STRETTA, 1988]. Cette hypothèse demande toutefois à être modulée par le fait que les thons se rassemblent dans des zones où les conditions hydrologiques telles que la température de surface, l'oxygène dissous, la profondeur de la thermocline etc., sont compatibles avec leurs besoins physiologiques [CAYRE *et al.*, 1988]. Maintenant que cette hypothèse et ses limites sont posées, il nous reste, pour trouver les zones de concentration de thons, à rechercher les zones à forte densité de nourriture ce qui revient à déterminer, dans l'océan, les zones à productivité élevée.

Nous avons vu plus haut que les masses d'eaux épipélagiques de l'océan intertropical sont relativement pauvres dans des conditions de stabilité telles qu'elles se rencontrent au sein de la structure tropicale typique et que dans les eaux tropicales, le système qui joue un rôle primordial dans l'enrichissement de la couche épipélagique est celui de la remontée de la thermocline en surface (ou seulement dans la couche euphotique).

Si l'on considère que l'arrivée en surface d'eaux froides riches en nutriments est le signal du début d'une fertilisation de la masse d'eau, celle-ci va évoluer et mûrir dans le temps. Nous allons suivre les

* Le terme "nourriture des thons" que nous employons est un terme générique qui englobe la nourriture ingérée par les thons ainsi que celle ingérée par les proies des thons ; en fait, ce terme implique que la chaîne trophique ne soit déroulée depuis le phytoplancton jusqu'aux animaux proies des thons.

mécanismes de fertilisation et de maturation avec le développement du phytoplancton, du zooplancton et du micronecton. Comme dans le déroulement de la chaîne trophique, qui part de l'enrichissement de la masse d'eau en nutriments pour arriver à la présence d'animaux proies pour les thons, il s'écoule un certain laps de temps (que nous préciserons plus loin), la probabilité de cerner une future concentration de thons pourrait donc être déduite en suivant la maturation de la masse d'eau dans l'espace et dans le temps.

Si l'on connaît, dans les grandes lignes, les implications directes entre la productivité d'une masse d'eau et des paramètres d'environnement d'une part et entre la présence de thons et des paramètres d'environnement d'autre part, pourquoi ne pourrait-on pas analyser l'implication inverse à savoir déduire la présence des thons à partir des données d'environnement ? Cette idée n'est pas neuve car YENTSCH [1973] pense que globalement la mesure de la seule température de l'eau pourrait aider les pêcheries pélagiques. En revanche, nous pensons qu'il ne faut pas se cantonner à une vision statique des relations entre pêche thonière et paramètres d'environnement, mais se livrer à une analyse dynamique dans le temps et l'espace de ces relations [STRETTA & PETIT, 1989a]. Une vision statique consiste à relever les paramètres d'environnement le jour de la pêche alors qu'une démarche dynamique revient à analyser l'évolution hydrologique et biologique d'une masse d'eau. Cette démarche recherche et suit la signature thermique en surface des mécanismes de fertilisation et de maturation au sein de cette masse d'eau [STRETTA & SLEPOUKHA, 1983b].

Si le début de la fertilisation de la masse d'eau se traduit en surface par une diminution de la température, se pose alors la question de savoir comment suivre dans le temps cette phase de maturation de la masse d'eau. Un élément de réponse est apporté par l'étude de la dérive d'une drogue dans l'upwelling mauritanien par HERBLAND *et al.* [1973]. Ces auteurs montrent que l'augmentation de la température de surface reflète l'augmentation des biomasses du phytoplancton et du zooplancton (figures 1 et 2) et que l'évolution de la température de surface est un bon traceur de la productivité d'une masse d'eau. Par ailleurs, sur le plateau continental de la Côte d'Ivoire, DANDONNEAU [1972] trouve que pendant les poussées phytoplanctoniques, *"la couche superficielle apparaît comme la plus représentative de toute la zone euphotique"*.

Les outils privilégiés pour analyser à distance et sur une vaste échelle le passé hydrobiologique des masses d'eaux sont fournis par la télédétection aérospatiale notamment la radiométrie infrarouge [STRETTA, 1987]. Ces outils vont nous permettre de délimiter les zones de refroidissement superficiel. Une nouvelle limite inhérente à cette technique réside dans le fait que le radiomètre ne pourra être utilisé, pour rechercher le début d'un enrichissement d'une masse d'eau, que si la remontée de la thermocline atteint la surface.

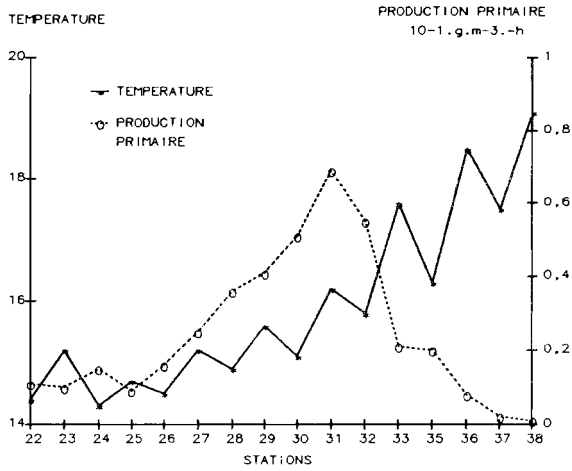


FIGURE 1 : Suivi de la drogue dans l'upwelling mauritanien d'après HERBLAND *et al.* [1973] : évolution de la température de surface et de la production primaire (exprimée en $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$).

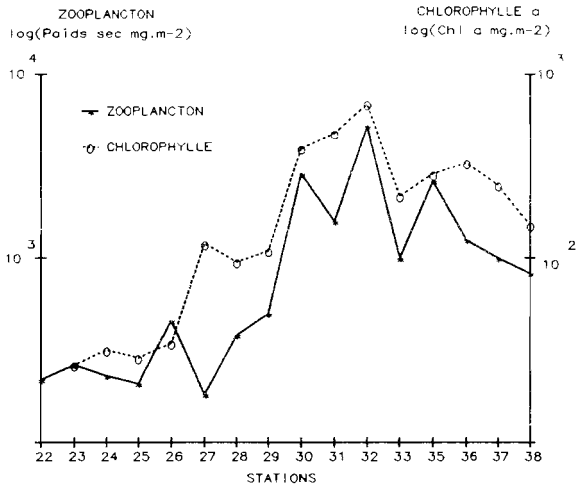


FIGURE 2 : Suivi de la drogue dans l'upwelling mauritanien d'après HERBLAND *et al.* [1973] : évolution de la biomasse du zooplancton (exprimé en \log poids sec $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$) et de la chlorophylle *a* (exprimée en $\log \text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$).

En nous appuyant sur les évolutions des températures de surface pendant cinq saisons de pêche au large du cap Lopez et au large de la Côte d'Ivoire [STRETTA, 1977 ; STRETTA *et al.*, sous presse], nous avons tenté de construire un "scénario thermique idéal (STI)". Ce STI sera le reflet de la signature thermique de surface des mécanismes d'enrichissement et de maturation d'une masse d'eau. Il nous permettra de déterminer quels sont les événements et leur durée qui concourent à l'obtention de conditions hydrologiques les plus favorables à l'obtention de conditions optimales pour la présence de thonidés.

Le scénario thermique idéal

Ce scénario thermique est bâti à partir d'une analyse empirique des conditions hydrologiques de surface associées à des concentrations de thonidés essentiellement dans la région du cap Lopez, (Gabon) et dans une moindre mesure dans la province maritime ivoirienne. C'est ainsi que la région du cap Lopez, située dans le golfe de Guinée au large du Gabon, est le siège en été boréal d'une zone frontale qui sépare les eaux guinéennes chaudes, dessalées et oligotrophes, des eaux froides, salées et eutrophes issues de l'upwelling côtier au sud du cap Lopez*. Les travaux dans cette région ont permis de préciser : les origines des masses d'eaux en présence [WAUTHY, 1977], les mécanismes d'enrichissement au niveau du front [VOITURIEZ *et al.*, 1973 ; DUFOUR & STRETTA, 1973 ; FRONTIER, 1978], les fluctuations spatio-temporelles des pêches de thonidés au sein du système frontal à partir des opérations de radiométrie aérienne menées quasi quotidiennement pendant cinq saisons de pêche [STRETTA, 1977 ; MARSAC *et al.*, 1987] et de travaux antérieurs [GALLARDO & LE GUEN, 1972].

En employant la terminologie utilisée en recherche opérationnelle, "l'activité" pêche thonière dans un système frontal nécessite la mise en oeuvre de différentes actions, à savoir le mouvement des masses d'eaux, la position du front thermique, le gradient thermique et l'enrichissement de la zone frontale par le développement du phytoplancton, du zooplancton et du micronecton. En nous inspirant des réseaux** classiquement utilisés en recherche opérationnelle (Tableau 1), nous avons cerné et ordonné ces différentes actions par des conditions d'antériorité et de postériorité sur un réseau linéaire et nous avons déterminé la durée d'une action en relevant leurs durées minimale et maximale. Ce calcul a été rendu possible grâce aux opérations de radiométrie aérienne menées au large de la Côte d'Ivoire [STRETTA *et al.*, sous presse] et du Gabon comme nous l'avons vu plus haut.

* Avant l'apparition des eaux froides, les eaux guinéennes ont déjà atteint une certaine stabilité tant physique que biologique avec en particulier une production de régénération importante [DUFOUR & STRETTA, 1983] à laquelle doit s'ajouter des phénomènes de survie de certaines formes du phytoplancton dans des conditions oligotrophes similaires à celles des expériences de DODSON et THOMAS [1987].

** Un réseau est une représentation explicitant les actions et les relations logiques entre elles.

Les six actions que nous avons identifiées sont :

Action N° 1 (Enrichissement)

Tout d'abord, ces deux régions sont envahies par des eaux froides issues d'upwellings : cela se traduit par l'installation pendant sept jours (durée minimale) ou pendant dix jours (durée maximale) d'une structure de type frontal entre la masse des eaux froides et celles des eaux chaudes présentes auparavant. Nous sommes dans une phase d'ENRICHISSEMENT de la masse d'eau. Le point de départ du réseau se situe le jour où les eaux froides apparaissent dans la zone.

Action N° 2 (Maturation phase 1)

Le phénomène de remontée d'eaux froides peut se ralentir et les eaux chaudes envahissent alors tout le secteur. Cela se situe entre le 8^e et le 11^e jour et s'étend sur une période de six jours (durée minimale) ou de neuf jours (durée maximale) pour aboutir donc au plus tôt le 13^e jour ou au plus tard le 19^e jour. Cette extension a pour conséquence immédiate le relâchement des isothermes de la zone frontale.

Action N° 3 (Maturation phase 2)

On assiste ensuite pendant six jours (durée minimale) ou pendant neuf jours (durée maximale) soit entre le 14^e ou 19^e jour et le 20^e ou 28^e jour à une nouvelle remontée d'eaux froides. Un ou des nouveaux fronts thermiques apparaissent dans la région du cap Lopez ou au large de la Côte d'Ivoire.

Action N° 4 (Maturation phase 3)

Après cette phase, les eaux chaudes s'étendent, toutefois les eaux froides présentes dans le secteur limitent leur expansion. Cette quatrième action s'établit au plus tôt le 20^e jour et au plus tard le 29^e jour pour se terminer au plus tôt le 24^e jour ou au plus tard le 36^e jour. Pendant cette période, la biomasse du micronecton est élevée [DUFOUR & STRETTA, 1973]. C'est également au cours de cette période que l'on atteint une position d'équilibre entre les masses d'eaux froides et chaudes.

Ces trois dernières actions qui se situent entre le 8^e ou 11^e jour jusqu'à une date située entre le 24^e et le 36^e jour, représentent la phase de MATURATION du système.

Action N° 5 (Stabilisation du système)

En analysant les évolutions des températures de surface pendant les saisons de pêche thonière au large du cap Lopez (Cabo) et au large de la Côte d'Ivoire, nous avons constaté que la pêche ne débutait pas immédiatement après ce que nous nommons la période de maturation de la masse d'eau, mais qu'elle ne commençait qu'à l'issue d'une période de STABILISATION thermique en surface. *A contrario*, la saison estivale de pêche de 1974 au cap Lopez [STRETTA, 1977] avait montré un

bouleversement quasi-quotidien des isothermes de surface après la période de maturation: il s'en était suivi une quasi-absence de pêche.

Action N° 6 (Pêche)

A partir de ce moment, entre le 32^e et le 47^e jour, les concentrations de thons sont maximales dans la zone et se poursuivent sur une période de neuf à quinze jours. De plus, si pendant cette période des poches d'eaux chaudes, à caractère stable, se forment, elles constitueront de véritables pièges à poissons [STRETTA, 1977]. Dès qu'elles se diluent ou s'estompent, l'activité de PÊCHE qui se poursuit va être dispersée dans la zone ; à plusieurs reprises, des pêches sont associées à de petits fronts thermiques isolés [DUFOUR & STRETTA, 1973]. Dans les provinces maritimes du cap Lopez ou de Côte d'Ivoire, nous avons observé qu'elle déclinait entre le 40^e et le 61^e jour. Mais ces considérations sur la durée de l'activité de pêche ne sont données qu'à titre indicatif.

TABLEAU 1 : Durées en jours, dates de début et de fin des différentes actions.

ACTION N°	1	2	3	4	5	6
durée minimale	7	6	6	5	7	10
durée maximale	10	9	9	8	10	15
début au plus tôt le	1 ^{er}	8 ^e	14 ^e	20 ^e	25 ^e	32 ^e
début au plus tard le	1 ^{er}	11 ^e	20 ^e	29 ^e	37 ^e	47 ^e
fin au plus tôt le	7 ^e	13 ^e	19 ^e	24 ^e	31 ^e	41 ^e
fin au plus tard le	10 ^e	19 ^e	28 ^e	36 ^e	46 ^e	61 ^e

- Action N° 1 : Extension eaux froides - ENRICHISSEMENT
- Action N° 2 : Extension eaux chaudes - MATURATION PHASE 1
- Action N° 3 : Extension eaux froides - MATURATION PHASE 2
- Action N° 4 : Extension eaux chaudes - MATURATION PHASE 3
- Action N° 5 : Stabilisation des isothermes - STABILISATION
- Action N° 6 : Pêche thonière - PÊCHE

Nous estimons le délai entre l'arrivée en surface des eaux froides et la présence de la nourriture des thons entre cinq et sept semaines (Tableau 1). De leur côté, MENDELSSHON et ROY [1986] estiment ce délai entre quatre et six semaines.

A partir de cette analyse, le scénario thermique idéal pourrait être le suivant: tout d'abord, on assiste à l'apparition en surface d'eaux froides issues de l'upwelling, puis à la maturation de ces eaux, pour se terminer par une stabilisation thermique pendant une semaine. A l'issue de cette évolution thermique idéale, la zone sera favorable à la présence de thons (figure 3).

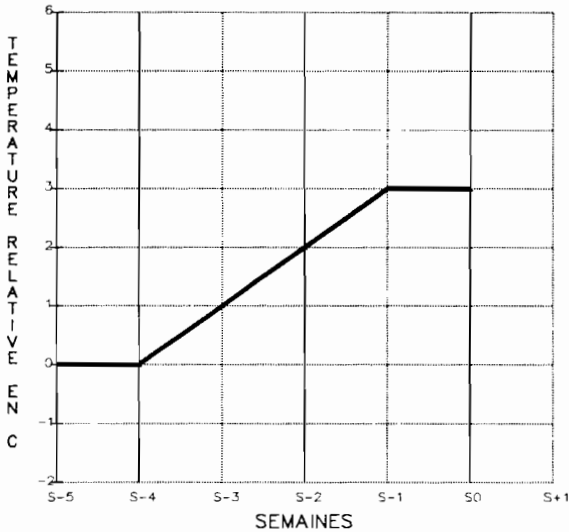


FIGURE 3 : Scénario thermique idéal (STI).

Il faut à présent traduire la maturation de la masse d'eau. Entre la température de la masse d'eaux froides qui atteint la surface et la température de surface au moment du début de l'activité de pêche, on constate en moyenne une élévation de la température de surface de l'ordre de 1°C par semaine.

Comme le font remarquer STRETTA et PETIT [1989b], dans cette démarche, la "schématisation de l'écosystème est poussée à l'extrême car à partir [de ...] la température de surface, nous allons suivre dans l'espace et dans le temps une succession d'actions qui débute par l'arrivée en surface des eaux infra-thermoclineales jusqu'à la présence d'organismes proies pour les thons en passant par les actions d'enrichissement et de maturation de la masse d'eau".

Toutefois, si l'on accepte ces restrictions, il sera relativement facile, en utilisant les techniques de la télédétection aérospatiale, de suivre

l'évolution dans l'espace et dans le temps d'une masse d'eau froide qui apparaît en surface. Compte tenu de ce que nous venons d'exprimer sur les délais entre le déclenchement d'un processus d'enrichissement et celui de la présence du thon, il sera possible de cerner la période et la zone où la probabilité de trouver des animaux proies sera la plus élevée [STRETTA & PETIT, 1989b]. En fait, le modèle le plus simple consistera à comparer le scénario thermique de toute masse d'eau au scénario thermique idéal.

En résumé, c'est l'évolution de la température de surface dans le temps qui est le reflet du degré de maturité de l'eau et non pas la température de surface seule isolée de son contexte hydrologique passé.

Schématisation de l'écosystème

Il peut paraître présomptueux de vouloir suivre un écosystème dans sa totalité, mais, comme le souligne AGOUMI [1985], la première étape dans la modélisation d'un écosystème marin concerne la schématisation du système à étudier. Cette schématisation s'appuie sur plusieurs points : la délimitation géographique de la région étudiée, le choix du pas d'espace et de temps, le choix des variables d'état et la réduction des dimensions du problème. Nous allons adopter cette même démarche pour étudier "notre" écosystème.

Notre analyse porte sur l'océan Atlantique tropical de 20°N à 10°S et de la côte africaine à la côte sud-américaine et à 50° W au nord de l'équateur. Dans cet océan, les variations saisonnières de la ceinture intertropicale sont dans leurs grandes lignes bien connues. Elles sont de plus bien tranchées entre les saisons chaudes et froides.

Pour le pas d'espace, nous avons opté pour un découpage de l'océan Atlantique en 138 zones de 2° de latitude et 5° de longitude (figure 4). Chaque zone ainsi délimitée a une superficie de 36 000 milles carrés. Le découpage en zones de 2° x 5° respecte, selon MERLE [1977], les échelles de corrélation observées pour les paramètres de surface tels que la température et tient compte du fait que dans l'Atlantique, les variations hydroclimatiques sont plus importantes dans le sens latitudinal que dans le sens longitudinal. Comme cet auteur a adopté cette taille d'entités océaniques, nous disposons donc pour chacune de ces zones de la température de surface mensuelle moyenne et des profils thermiques verticaux mensuels moyens.

Comme pas de temps, nous prendrons celui de la semaine. Ce choix est tout d'abord dicté par celui de la réception des cartes compilées de températures de surface mesurées par les satellites météorologiques à défilement du type NOAA ou géostationnaires comme METEOSAT. Si dans la mer les variations thermiques peuvent parfois être très rapides [STRETTA, 1977], le pas de temps de la semaine permet de nous affranchir des variations thermiques brutales et éphémères.

Choix de la variable d'état

Pour analyser "notre" écosystème thonier, il est évident que l'on ne pourra pas suivre l'évolution de tous les paramètres d'environnement dans un canevas spatio-temporel. Il serait plus réaliste de considérer l'évolution des cinq paramètres classiquement relevés pour l'étude de l'environnement des thonidés. Rappelons que ces cinq paramètres sont: la température de surface, la teneur en oxygène dissous, la profondeur de la thermocline, le gradient de température qui lui est associé et la productivité de la masse d'eau.

Réduction des dimensions du problème

Notre schématisation de l'écosystème est poussée à l'extrême car à partir d'une seule variable d'état (la température de surface), nous allons résumer les processus d'enrichissement et de maturation d'une masse d'eau qui débute à l'arrivée en surface des eaux infra-thermoclineales jusqu'à la présence d'organismes/proies pour les thons dans une zone de 36 000 milles carrés.

En fait, nous allons comparer l'évolution de la température de surface à une évolution thermique idéale.

Modèle prévisionnel

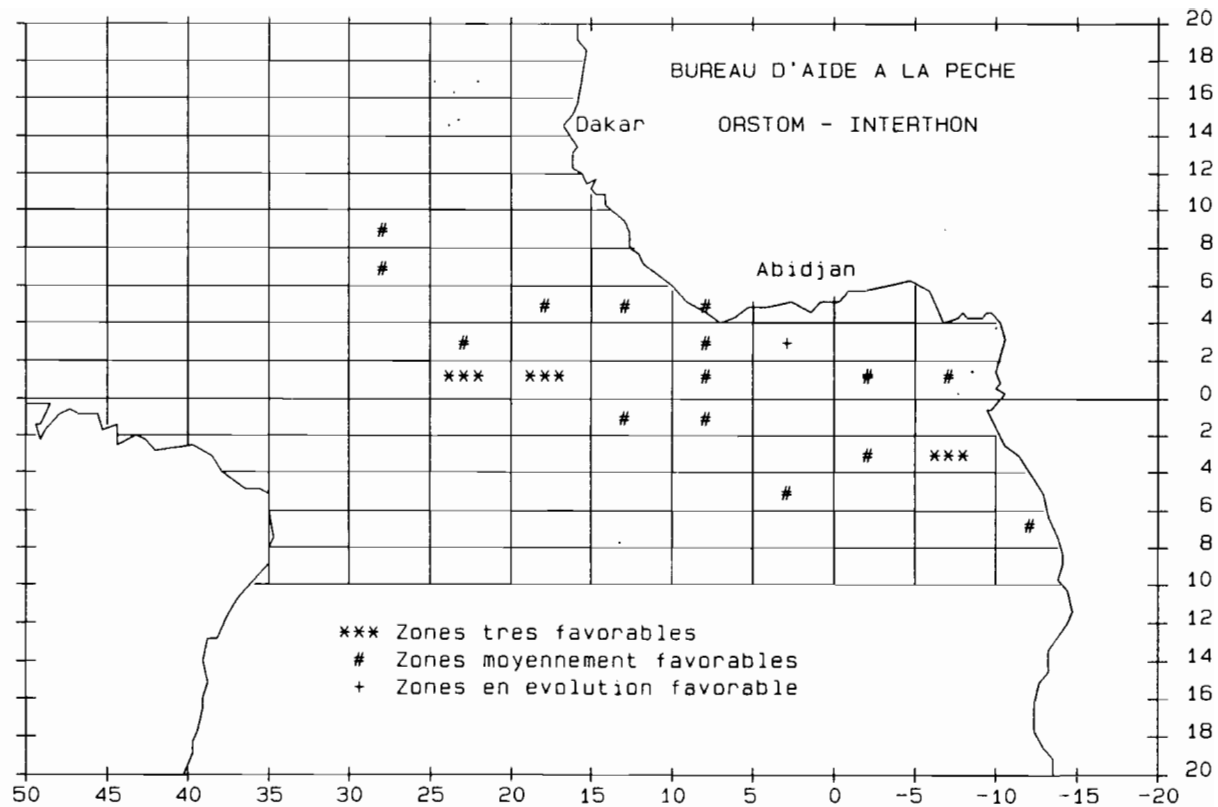
Pour étudier le passé hydrologique de la masse d'eau, nous avons développé le modèle prévisionnel PREVI-PECHE présenté par STRETTA et SLEPOUKHA [1983a, 1983b] et précisé par STRETTA et PETIT [1989b]. Les informations thermiques utilisées pour alimenter le modèle PREVI-PECHE avaient deux origines: les cartes thermiques GOSSTCOMP de la NOAA et surtout celles dressées à partir des données du satellite METEOSAT suivant l'algorithme de CITEAU et DEMARCO [1990]. Le modèle PREVI-PECHE a permis de distribuer de 1982 à 1985 un BULLETIN PREVISIONNEL pour définir des zones favorables à la pêche thonière dans l'Atlantique tropical oriental auprès de la flottille thonière FIS*. La validation d'un tel modèle est difficile et l'on rencontre différents problèmes dès lors que l'on ne possède pas toute l'information objective pour la réaliser.

Si, au départ, les résultats de ces prévisions de pêche ne s'adressaient qu'aux pêcheurs de la flottille FIS, il est évident que pour vérifier la véracité des informations diffusées, il faut connaître les prises de thonidés dans tout l'océan Atlantique intertropical. Or, cinq années après la fin de la diffusion des prévisions de pêche, nous n'avons toujours pas accès aux données des prises de la flottille thonière espagnole. Ces données espagnoles sont indispensables pour la validation du modèle car en 1984 et 1985, les flottilles FIS et espagnole avaient des cibles différentes. Le premier recherchait essentiellement de l'albacore avec de faibles rendements alors que la seconde plus opportuniste, recherchait du listao. Comme le modèle prévisionnel PREVI-PECHE

* Flottille FIS: Flottille thonière française, ivoirienne e. sénégalaise.

FIGURE 4 : Découpage de l'océan Atlantique tropical entre 20°N et 10°S et entre la côte africaine et 50°W en 138 zones de 2° latitude par 5° longitude.

Ce type de document, accompagné d'une carte thermique, était distribué aux pêcheurs. Sur cette carte, les zones très favorables, moyennement favorables et en évolution favorable sont représentées avec des figurés différents.



PREVISION N: 28 DU 4/10/1982
PERIODE DU 29/9 AU 12/10/1982

donne des informations sur le degré de maturité d'une masse d'eau, l'aspect "espèce" est peu important au moment de la validation.

Toutefois, une société privée d'audit* a mené en 1985, pour le compte de l'IFREMER, une enquête auprès des pêcheurs et des armateurs de la flottille FIS pour mesurer l'impact qu'ont eu ces expériences "d'aide à la pêche" dans le cadre du Bureau d'aide à la pêche** à Abidjan. De cette enquête [IFREMER enquête ..., 1985, pages 4 et 5], il ressort que : "Les patrons pêcheurs, dans leur grande majorité ont utilisé les cartes de "probabilités de pêche" par zone que leur communiquait le BAP d'Abidjan tous les 15 jours environ. Ils les ont utilisées :

- en complément à d'autres sources d'informations ;
- pour "recoller" à la pêche après une escale au port ;
- pour aller sur des zones déclarées favorables ;
- ou pour constituer des archives personnelles.

Dans leur majorité, ils évaluent positivement l'ensemble du système et souhaitent qu'il soit reconduit."

CONCLUSION

La traduction par un modèle empirique d'un système naturel en évolution ne doit pas nous faire perdre de vue qu'il est difficile de traduire les multiples interactions qui existent entre les différents éléments d'un écosystème. Toutefois, le modèle PREVI-PECHE a démontré que l'outil télédétection, même très rudimentaire, peut largement contribuer à la prévision de zones de pêche thonière. Loin de se laisser enfermer dans le cadre purement technique de nouvelles méthodes et soucieux de valoriser des résultats collectés à l'issue de prospections et de contacts avec les pêcheurs, la création d'une cellule d'expertise en matière de prévisions de pêche et d'évaluation du potentiel halieutique d'une zone pourrait être raisonnablement envisagée pour l'actuelle décennie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGOUMI (A.), 1985. - Modélisation de l'écosystème pélagique en Manche. Etude de l'influence des phénomènes physiques sur le système planctonique. *Thèse Sciences naturelles, Université Pierre et Marie Curie Paris 6*, pagination multiple.
- ALBARET (J.-J.), 1977. - La reproduction de l'albacore (*Thunnus albacares*) dans le golfe de Guinée. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, 15, 4, pp. 389-419.

* Société DG CONSEIL.

** Bureau d'aide à la pêche (BAP) Cellule créée en 1978 par l'ORSTOM et les armateurs à la pêche au thon réunis au sein de la Coopérative maritime INTERTHON.

- BERNARD (H.J.), HEDGEPEETH (J.B.) & REILLY (S.B.), 1985. - Stomach contents of albacore, skipjack, and bonito caught off southern California during summer 1983. *Reports - California cooperative oceanic fisheries investigations*, **26**, pp. 175-182.
- BERTALANFFY (L. von), 1973. - *Théorie générale des systèmes : physique, biologie, psychologie, sociologie, philosophie*. - Paris : Dunod. - XV-296 p.
- BLACKBURN (M.), 1965. - Oceanography and the ecology of tunas. *Oceanography and marine biology, an annual review*, **3**, pp. 299-322.
- BOEHLERT (G.W.) & GENIN (A.), 1987. - A review of the effects of seamounts on biological processes, in : *Seamounts, islands, and atolls*, ed. B.H. Keating, P. Fryer, R. Batiza & G.W. Boehlert, pp. 319-334. - Washington, D.C. : American geophysical union. - (Geophysical monograph ; 43)
- BRANDHORST (W.), 1958. - Thermocline topography, zooplankton standing crop, and mechanisms of fertilization in the eastern tropical Pacific. *Journal du Conseil*, **24**, 1, pp. 16-31.
- CAYRE (P.), AMON KOTHIAS (J.B.), DIOUF (T.) & STRETTA (J.-M.), 1988. - Biologie des thons. *FAO document technique sur les pêches*, **292**, pp. 157-268.
- CITEAU (J.) & DEMARCO (H.), 1990. - Restitution de la température de surface océanique en zone intertropicale à partir des données du satellite METEOSAT. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco*, n° spécial **6**, pp. 149-172.
- DANDONNEAU (Y.), 1972. - Etude du phytoplancton sur le plateau continental de Côte d'Ivoire. II. Représentativité de l'eau de surface pour la description et pour l'interprétation des phénomènes dynamiques. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, **10**, 3, pp. 267-274.
- DODSON (A.N.) & THOMAS (W.H.), 1977. - Marine phytoplankton growth and survival under simulated upwelling and oligotrophic conditions. *Journal of experimental marine biology and ecology*, **26**, 2, pp. 153-161.
- DUFOUR (P.) & STRETTA (J.-M.), 1973. - Fronts thermiques et thermohalins dans la région du cap Lopez (Golfe de Guinée), juin-juillet 1972 : phytoplancton, zooplancton, micronecton et pêche thonière. *Documents scientifiques - Centre de recherches océanographiques, Abidjan*, **4**, 3, pp. 99-142.

- FONTENEAU (A.), 1986. - Analyse de l'exploitation de quelques concentrations d'albacore par les senneurs durant la période 1980-1983 dans l'Atlantique Est. *Collective volume of scientific papers - International commission for the conservation of Atlantic tunas*, **25**, pp. 81-98.
- FRONTIER (S.), 1977 a. - Réflexions pour une théorie des écosystèmes. *Bulletin d'écologie*, **8**, 4, pp. 445-464.
- FRONTIER (S.), 1977 b. - Interface entre deux écosystèmes, exemples dans le domaine pélagique. *Journal de recherche océanographique*, **2**, 1, pp. 24-25.
- FRONTIER (S.), 1978. - Interface entre deux écosystèmes : exemple dans le domaine pélagique. *Annales de l'Institut océanographique, Paris*, **54**, 2, pp. 95-105.
- FRONTIER (S.), 1983. - *Essai d'écologie frénétique*. (Manuscrit non publié).
- GALLARDO (Y.) & LE GUEN (J.-C.), 1972. - Caractères hydrologiques des régions frontales d'Angola, du Gabon et du Congo favorables aux concentrations d'albacores. *Documents scientifiques du Centre de Pointe-Noire ORSTOM*, (N.S.) **23**, 18 p.
- HERBLAND (A.), LE BORGNE (R.), LE BOUTEILLER (A.) & VOITURIEZ (B.), 1983. - Structure hydrologique et production primaire dans l'Atlantique tropical oriental. *Océanographie tropicale*, **18**, 2, pp. 249-293.
- HERBLAND (A.), LE BORGNE (R.) & VOITURIEZ (B.), 1973. - Production primaire, secondaire et régénération des sels nutritifs dans l'upwelling de Mauritanie. *Documents scientifiques - Centre de recherches océanographiques, Abidjan*, **4**, 1, pp. 1-75.
- HERBLAND (A.), LE BOUTEILLER (A.) & RAIMBAULT (P.), 1985. - Size structure of phytoplankton biomass in the equatorial Atlantic Ocean. *Deep-sea research*, (A) **32**, 7, pp. 819-836.
- HERBLAND (A.) & VOITURIEZ (B.), 1977. - Production primaire, nitrate et nitrite dans l'Atlantique tropical. I. - Distribution du nitrate et production primaire. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, **15**, 1, pp. 47-55.
- HESTER (F.J.), 1961. - A method of predicting tuna catch by using coastal sea-surface temperatures. *California fish and game*, **47**, 4, pp. 313-326.

- IFREMER : enquête sur l'utilisation des systèmes d'aide à la pêche.* - Paris : DG conseil, 1985. - 53 p.
- KITCHELL (J.F.), NEILL (W.H.), DIZON (A.E.) & MAGNUSON (J.J.), 1978. - Bioenergetic spectra of skipjack and yellowfin tunas, in : *The physiological ecology of tunas*, ed. G.D. Sharp & A.E. Dizon, pp. 357-368. - New York : Academic press.
- LE BORGNE (R.), 1977. - Etude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4°W. II. Biomasses et peuplements du zooplancton. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, 15, 4, pp. 333-348.
- MAGNUSON (J.J.), 1963. - Tuna behavior and physiology, a review. *FAO fisheries reports*, 6, 3, pp. 1057-1066.
- MARSAC (F.), PETIT (M.) & STRETTA (J.-M.), 1987. - Radiométrie aérienne et prospection thonière à l'ORSTOM. Méthodologie, bilan et prospective. *Initiations - documentations techniques, ORSTOM*, 68, 33 p.
- MENDELSSOHN (R.) & ROY (C.), 1986. - Environmental influences on the French, Ivory Coast, Senegalese and Moroccan tuna catches in the Gulf of Guinea, in : *Proceedings of the ICCAT conference on the international skipjack year program*, ed. P.E.K. Symons, P.M. Miyake & G.T. Sakagawa, pp. 170-188. - Madrid : International commission for the conservation of Atlantic tunas.
- MERLE (J.), 1977. - Seasonal variations of temperature and circulation in the upper layer of the equatorial Atlantic Ocean (GATE area), in : *GATE workshop, Miami, February 28 to March 10, 1977*, pp. 1.87-1.88.
- MIYABE (N.) & BARD (F.X.), 1986. - Movements of skipjack in the eastern Atlantic, from results of tagging by Japan, in : *Proceedings of the ICCAT conference on the international skipjack year program*, ed. P.E.K. Symons, P.M. Miyake & G.T. Sakagawa, pp. 342-347. - Madrid : International commission for the conservation of Atlantic tunas.
- MURPHY (G.I.), 1959. - Effect of water clarity on albacore catches. *Limnology and oceanography*, 4, 1, pp. 86-93.
- OLSON (R.J.), 1982. - Feeding and energetics studies of yellowfin tuna, food for ecological thought. *Collective volume of scientific papers - International commission for the conservation of Atlantic tunas*, 17, 2, pp. 444-457.

- OLSON (R.J.) & BOGGS (C.H.), 1986. - Apex predation by yellowfin tuna (*Thunnus albacares*): independent estimates from gastric evacuation and stomach contents, bioenergetics, and cesium concentrations. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, **43**, 9, pp. 1760-1775.
- PETIT (M.), 1986. - Coherent theory on tuna behavior, in : *Proceedings of the 37th annual tuna conference, May 18-21, 1986*, ed. R.W. Brill, p. 14. - Honolulu : Southwest fisheries center NMFS.
- PETIT (M.), STRETTA (J.-M.), SIMIER (M.) & WADSWORTH (A.), 1989. - Anomalies de surface et pêche thonière : SPOT et la télédétection de zones de pêche par l'inventaire des hauts-fonds. *Mappemonde*, **89**, 3, pp. 13-19.
- REID (J.L.) jr., 1962. - On circulation, phosphate-phosphorus content, and zooplankton volumes in the upper part of the Pacific Ocean. *Limnology and oceanography*, **7**, 3, pp. 287-306.
- RIGLER (F.H.), 1982. - The relation between fisheries management and limnology. *Transactions of the American fisheries society*, **111**, 2, pp. 121-132.
- ROGER (C.) & GRANDPERRIN (R.), 1976. - Pelagic food webs in the tropical Pacific. *Limnology and oceanography*, **21**, 5, pp. 731-735.
- ROSNAY (J. de), 1975. - *Le microscope : vers une vision globale*. - Paris : Editions du seuil. - 295 p.
- SCHAEFER (M.B.), 1957. - Report on the investigations of the Inter-American tropical tuna commission for the year 1956. *Annual report - Inter-American tropical tuna commission, 1956*, pp. 33-70.
- STRETTA (J.-M.), 1977. - Température de surface et pêche thonière dans la zone frontale du cap Lopez (Atlantique tropical oriental) en juin et juillet 1972, 1974 et 1975. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, **15**, 2, pp. 163-180.
- STRETTA (J.-M.), 1986. - Hydrological history of water masses as a new concept in tuna ecology ?, in : *Program and abstracts - 116th annual meeting A.F.S., 76th annual meeting I.A.F.W.A., Providence, Rhode Island, September 14-18, 1986*, p. 78.
- STRETTA (J.-M.), 1987. - Régime et comportement alimentaires de l'albacore, du listao et du patudo dans l'Atlantique tropical oriental (revue bibliographique). *Collective volume of scientific papers - International commission for the conservation of Atlantic tunas*, **26**, 1, pp. 95-104.

- STRETTA (J.-M.), 1988. - Environnement et pêche thonière en Atlantique tropical oriental. *FAO document technique sur les pêches*, 292, pp. 269-316.
- STRETTA (J.-M.) & PETIT (M.), 1989 a. - Relation capturabilité température de surface. *FAO document technique sur les pêches*, 302, pp. 49-50.
- STRETTA (J.-M.) & PETIT (M.), 1989 b. - Télédétection aéro-spatiale et pêche thonière en Atlantique inter-tropical. *FAO document technique sur les pêches*, 302, pp. 99-109.
- STRETTA (J.-M.), PETIT (M.) & SLEPOUKHA (M.), sous presse. - Les prises de thonidés et leur environnement au large de la Côte d'Ivoire, in : *Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire. Tome 1 : Le milieu marin*, ed. P. Le Loeuff, E. Marchal & J.B. Amon Kothias, Paris : ORSTOM.
- STRETTA (J.-M.) & SLEPOUKHA (M.), 1983 a. - Les satellites, l'ordinateur et l'aide à la pêche thonière. *Pêche maritime*, 62, 1258, pp. 38-40.
- STRETTA (J.-M.) & SLEPOUKHA (M.), 1983 b. - A forecasting model for tuna fisheries in the intertropical Atlantic, in : *Proceedings of the 34th annual tuna conference, Lake Arrowhead, May 15-18, 1983*, p. 36.
- SUND (P.N.), BLACKBURN (M.) & WILLIAMS (F.), 1981. - Tunas and their environment in the Pacific Ocean: a review. *Oceanography and marine biology, an annual review*, 19, pp. 443-512.
- VALIELA (I.), 1984. - *Marine ecological processes*. - New York : Springer-Verlag. - X-546 p. - (Springer advanced texts in life sciences).
- VINOGRADOV (M.E.), 1983. - Open-ocean ecosystems, in : *Marine ecology, volume V: ocean management, part 2: ecosystems and organic resources*, ed. O. Kinne, pp. 657-737. - Chichester : J. Wiley & sons.
- VOITURIEZ (B.), VERSTRAETE (J.M.) & LE BORGNE (R.), 1973. - Conditions hydrologiques de la zone frontale du cap Lopez pendant la campagne thonière de juin-juillet 1971. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, 11, 2, pp. 229-249.
- WALSH (J.J.), 1972. - Implications of a systems approach to oceanography. *Science*, 176, 4038. pp. 969-975.

- WALSH (J.J.), 1976. - Herbivory as a factor in patterns of nutrient utilization in the sea. *Limnology and oceanography*, **21**, 1, pp. 1-13.
- WAUTHY (B.), 1977. - Révision de la classification des eaux de surface du golfe de Guinée (Berrit 1961). *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, **15**, 3, pp. 279-295.
- YENTSCH (C.S.), 1973. - Remote sensing for productivity in pelagic fisheries. *Nature*, **244**, 5414, pp. 307-308.

Intégration de la télédétection aérospatiale dans la base de données d'un système expert dédié à la pêche thonière

par

JEAN-MICHEL STRETTA

MICHEL PETIT

MONIQUE SIMIER

*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)
Centre ORSTOM
B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex (France)*

RESUME

Une nouvelle forme d'investigation est à présent possible avec les systèmes experts et l'intelligence artificielle. Si un système expert prend en compte les connaissances d'un expert dans sa base de données, dans le cas de la pêche se pose le problème du choix de l'expert: un halieute ou un pêcheur? La première solution donne la priorité aux données de l'environnement récoltées par télédétection, tandis que la seconde privilégie le comportement du thon. La solution est peut-être dans un système expert regroupant les deux termes de cette alternative. L'approche par l'intelligence artificielle pour la modélisation des mouvements des thons se focalise sur la représentation et la simulation

du comportement animal et sur les interactions entre l'animal et son environnement.

Ces types de démarches débouchant sur de nouveaux modèles prévisionnels pourraient être une voie pour le développement des pêcheries thonières dans les prochaines années.

ABSTRACT

A new form of investigation is now possible with expert systems and artificial intelligence. If an expert system records an expert's specialised knowledge in its data base, we must face the problem of the choice of the expert. We can choose between a fishery biologist and a fisherman. The first solution gives priority to environmental data gathered with remote sensing, the second solution gives priority to tuna behaviour. The solution perhaps lies in an expert system mixing both solutions. The artificial intelligence methods focuses on the representation and simulation of animal behaviour and the relations of the animal and its environment for the modelisation of the relations between organisms and between organisms and their environment

This type of forecasting model could be the solution for the development of tuna fisheries for the next few years.

Les thonidés, comme beaucoup de poissons, ont un comportement de groupe et vivent en bancs de plusieurs centaines d'individus. Ces regroupements évoluent dans le temps et l'espace en fonction des conditions environnementales et de la biologie des individus qui les composent.

L'hypothèse de départ que nous adopterons pour tenter de modéliser les déplacements de ces bancs est que le but principal d'un banc est de se nourrir pour survivre*. Dans ce cadre, son comportement sera donc régi exclusivement par cet aspect de la relation avec le milieu.

POSITION DU PROBLEME ET OBJECTIFS

Dans la ceinture intertropicale de l'océan mondial, les thonidés ont *"un habitat très étendu qui les amène de manière encore inexplicite à fréquenter des zones oligotrophes (injustement qualifiées de pauvres) qui représentent en surface la plus grande partie de cet habitat"* [Thons et

* Dans une première approche, on n'envisagera pas les autres aspects de son comportement, comme la reproduction, mais ceux-ci devront pouvoir être intégrés plus tard au système.

environnement, 1989]. Au sein de ces zones oligotrophes, des "processus d'enrichissement engendrés par le vent à une petite échelle espace-temps (micro-upwellings) très variables, donneraient à ces vastes zones un aspect de «peau de panthère»" [Thons et environnement, 1989]. Dans cet océan oligotrophe, HERBLAND et VOITURIEZ [1977] ont mis en évidence une structure tropicale typique qui est un système à deux couches dont celle de surface est dépourvue de nitrate. Dans ce type de situation, la remontée de la thermocline en surface va créer un enrichissement du milieu et des anomalies dans la répartition des paramètres d'environnement (température, salinité, turbidité, etc.). Le thon, qui est un poisson d'interface, est attiré par une anomalie ou un fort gradient qu'il détecte dans son champ de perception selon les critères établis par PETIT [1986]. C'est ainsi que les thons sont attirés par les anomalies thermiques de surface (exemple des zones frontales entre les eaux chaudes et les eaux froides issues d'un upwelling côtier) ou verticales (cas des dômes thermiques où la thermocline est proche de la surface sans l'atteindre), par une anomalie bathymétrique (exemple d'un haut-fond ou d'un guyot, etc.). La recherche de ces anomalies qui sont sources d'enrichissement, donc de nourriture disponible, permettrait de prévoir les zones de rassemblement des thons à leur proximité. Les objets ou systèmes flottants au sens large tels que les épaves ou les associations avec d'autres espèces pélagiques ont un effet attractif sur les thons sans qu'il y ait une source d'enrichissement évidente.

LES OUTILS DE MODELISATION EXISTANTS

Le modèle prévisionnel PREVI-PECHE qui est le résultat d'une analyse praxéologique des conditions de surface permet de définir les zones favorables à la pêche thonière [STRETTA, 1990]. Ce modèle est bâti sur une analyse empirique des conditions hydrologiques de surface associées à des concentrations de thonidés. Ce passé hydrologique de la masse d'eau est mesuré à partir de données thermiques satellitaires. Sommairement, PREVI-PECHE compare l'évolution des températures à une évolution thermique idéale (scénario thermique idéal) et évalue selon l'écart à ce scénario idéal la probabilité de pêche dans la zone considérée.

Le problème de la modélisation des déplacements des bancs de thons (donc de leur prévision) peut être également envisagé en termes de modélisation classique en utilisant un algorithme. Ce type d'approche est développé par EDWARDS et KLEIBER [sous presse] avec le modèle TOPS*. Ce modèle permet de simuler le comportement des bancs de dauphins et des thoniers qui recherchent ces bancs**, dans une zone où les conditions environnementales (ramenées en fait à un paramètre appelé qualité du milieu) sont fixées arbitrairement au départ.

* TOPS : Tuna-vessel Observer Program Simulator.

** Dans l'océan Pacifique oriental, l'essentiel des prises de thonidés est effectué sur des bancs mixtes dauphins-thons.

Ce modèle est fondé sur le fait que les dauphins ont tendance à se regrouper dans les zones qui leur sont le plus favorables et les thoniers à suivre les dauphins dès qu'ils les repèrent.

On pourrait facilement concevoir le couplage entre les modèles TOPS et PREVI-PECHE, le premier simulant le déplacement des thonidés dans une zone où les conditions environnementales sont optimales et définies par le second. Ce type d'approche ou ce type de modélisation pourrait être adapté à notre problème ; il présente l'inconvénient d'être un peu trop figé dans une démarche purement mathématique. Les connaissances que l'on a des lois qui régissent les interactions entre les thons et leur environnement relèvent davantage de l'expertise que de la modélisation analytique. Comme le soulignent SAARENMAA et NIKULA [1989], l'élaboration d'un modèle de simulation en écologie relève encore plus de l'art que de la science.

SYSTEME EXPERT ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Il existe à présent une approche nouvelle pour modéliser des connaissances dans un domaine particulier : l'intelligence artificielle et les systèmes experts, qui utilisent essentiellement des méthodes empiriques reposant sur un savoir heuristique permettant de trouver la meilleure solution et non pas la solution optimale [CHATAIN & DUSSAUCHOY, 1987]. Ces auteurs précisent que les systèmes experts ont la particularité de manipuler des notions principalement de nature symbolique par opposition aux données numériques utilisées par les programmes classiques. Le but d'un système expert est *"la modélisation du comportement d'un expert humain, accomplissant une tâche de résolution de problèmes pour laquelle on ne dispose d'aucun algorithme et ce dans un domaine bien précis"* [DINCBAS, 1983]. Le transfert de la compétence de l'expert est un processus long et incrémentiel constitué d'échanges constants entre l'expert et le cognicien. Mais se poserait alors le problème du choix de l'expert. Dans le cas de la pêche thonière, on aurait le choix entre deux types d'expert : l'halieute ou le pêcheur. Si l'on privilégie l'analyse des conditions hydrologiques de surface associées à des concentrations de thonidés, l'expert sera l'halieute; en revanche il serait possible d'imaginer un système expert dans lequel le pêcheur, aidé en cela par un cognicien, transférerait ses connaissances vers le système expert [BARD communication personnelle]. Une solution mixte serait sans doute la plus souhaitable.

Dans une autre direction, des chercheurs travaillant dans le domaine de l'intelligence artificielle ont développé plusieurs techniques symboliques et non algorithmiques qui imitent et/ou reproduisent l'apprentissage humain, les perceptions dans un environnement, les prises de décision, etc. Ces techniques visent à reproduire l'intelligence humaine et pourront être adaptées à la modélisation de processus similaires chez les animaux pour des applications impliquant l'hétérogénéité spatiale de l'environnement, des comportements dirigés,

des interactions au sein et/ou entre les systèmes, la mémoire des relations spatiales. Ces nouvelles méthodes, qui se focalisent sur la représentation et la simulation du comportement animal et sur les interactions entre l'animal et son environnement, utilisent les techniques de la programmation orientée objet pour modéliser les interactions parmi les organismes ainsi que les interactions entre les organismes et leur environnement.

A partir de règles établies par des experts, de connaissances sur les besoins énergétiques des thons, d'études sur les réactions des thons en fonction du milieu et de données disponibles sur le milieu marin, on pourrait, en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle, prévoir les déplacements des bancs de thons.

POURQUOI SE TOURNER VERS L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE?

Si l'on fixe une situation initiale concernant une population thonière dans une zone et que l'on associe à cette population un jeu de paramètres environnementaux, il faudrait en déduire une situation finale pour cette même population dans le temps et dans l'espace.

Il serait également intéressant d'appliquer un raisonnement inverse, à savoir, de repartir de cette situation finale pour recomposer et retrouver de nouveaux jeux de paramètres qui aboutiraient à cette même situation finale, mais par des voies différentes.

Les modes de déduction par chaînage avant et chaînage arrière propres aux systèmes experts nous semblent coïncider avec ce type de raisonnement. Mais ce type de démarche se heurte au problème de la représentation du milieu dans l'espace et à la question de l'intégration des différents niveaux d'influence de l'environnement sur les thons. Sachant que le thon est attiré par un gradient, et non par la distribution homogène d'un paramètre, se pose également le problème du codage de l'information dont on dispose sur ces paramètres environnementaux. Il s'agit de découper le milieu en sous-zones élémentaires qui soient mises à jour régulièrement durant le déroulement d'une simulation par l'acquisition de nouvelles valeurs. Mais ce découpage doit être flou et modifié en fonction des conditions environnementales. D'aucuns verront ici la pierre d'achoppement de cette modélisation : la connaissance des paramètres de l'environnement doit être très fine tant en résolution spatiale que temporelle. C'est là que la télédétection intervient comme outil capable d'assurer ce continuum afin d'alimenter et de mettre à jour la base de données à caractère environnemental.

Par ailleurs, la programmation orientée objet permet la représentation du domaine des connaissances sous forme "d'objets" caractérisés par leurs attributs et par des méthodes, c'est-à-dire les opérations qui se rapportent à l'objet considéré. Le deuxième concept

(qui n'est pas propre à l'intelligence artificielle) est celui des méthodes de recherche pour trouver et évaluer les différents chemins pour relier une situation de départ à une situation d'arrivée. Sur ces deux points, les travaux de SAARENMAA *et al.* [1988] sur les élans de Finlande nous apportent des éléments intéressants concernant une approche de la modélisation en écologie mettant en oeuvre les concepts de la programmation orientée objet. Pour être à même de prédire les dommages causés par les élans, SAARENMAA & NIKULA [1989] tentent de reproduire le raisonnement de l'élan quand il est à la recherche de nourriture ou d'autres besoins.

En reprenant cette démarche, il serait possible de l'appliquer au comportement d'un banc de thons en partant du principe qu'il se déplace en permanence à la recherche de nourriture et qu'il perçoit une information sur une fraction seulement du milieu qui l'entoure. Lorsque le banc "détecte" un environnement qui lui est favorable, c'est-à-dire riche en nourriture, il réagit en s'orientant vers cet environnement. Un banc ne pourra prospérer que dans la mesure où il tire plus d'énergie de sa nourriture qu'il n'en dépense pour l'atteindre.

LA MODELISATION

Réalisation du modèle

De quelles données disposons-nous pour développer ce type d'approche dans le domaine de l'halieutique thonière ?

Pour la "philosophie" du déplacement, de la formation et de la dispersion des bancs, nous travaillerons sur les calculs et hypothèses exposés dans PETIT [1988].

Pour l'instanciation des paramètres de l'environnement, il faut disposer de volumes importants de données sous forme de fichiers informatisés. Pour les températures de surface, on utilisera les données obtenues par satellites avec les capteurs infrarouge classiques ou les capteurs micro-ondes tel que SMMR* pour s'affranchir des problèmes de nébulosité. On disposera également, à défaut de carte exhaustive des fonds sous-marins, d'une liste de positions de hauts-fonds connus repérés par les satellites SPOT [PETIT *et al.*, 1989] ou SEASAT ou GEOS-3 [BAUDRY, 1986]. A terme, il faut prévoir l'accès à tout type de fichier pouvant apporter une information utile : températures de surface de la mer, données bathymétriques, courants, vents, etc.

Pour la représentation des connaissances, on considérera l'objet bancs de thon comme l'entité de base (et non l'individu-poisson). Comme proposé par PETIT [1988], cet objet banc est caractérisé par la liste des attributs suivants : la taille, la position, le rayon de perception (zone dans laquelle le banc peut détecter une variation de qualité du milieu), le potentiel physiologique, la vitesse et l'orientation du déplacement et un facteur mémoire du banc. La vitesse de nage du banc

* SMMR : Scanning Multichannel Microwave Radiometer.

est fonction du milieu, du potentiel physiologique du banc et d'un facteur aléatoire. L'attribut orientation du déplacement est fonction également du milieu et d'un facteur mémoire que l'on attribue au banc. Cette mémoire du banc est fondée sur l'idée que plus le banc avance dans une direction sans rien trouver, plus l'intérêt de continuer dans cette direction diminue pour lui.

Pour déterminer l'indice de productivité potentielle d'une zone, on utilisera le modèle prévisionnel PREVI-PECHE [STRETTA, 1990]. Les résultats de ce modèle peuvent se traduire en termes de nourriture disponible et utilisés en entrée d'une simulation. Il s'agit ici d'arriver à représenter géographiquement ces zones pour lesquelles on connaît l'affinité particulière du thon et d'arriver à quantifier leur influence. On considérera que la quantité de nourriture disponible a un effet direct sur la présence de thons, tout simplement par le fait qu'un thon se déplaçant sans trouver la nourriture nécessaire s'affaiblira progressivement et finira par mourir après désagrégation du banc ; inversement, lorsqu'il rencontrera une zone riche, il aura tendance à y rester.

Validation du modèle

Pour la validation du modèle, on dispose de données sur les prises des flottilles thonières. Ces fichiers portent sur les enquêtes réalisées sur plusieurs années auprès de patrons pêcheurs en Atlantique tropical et Pacifique occidental. Elles décrivent les prises journalières ou de chaque coup de filet. Les informations dont on dispose sont : la date, la position exacte du bateau, le poids total de poisson pêché en tonnes (dans une première approximation, nous assimilons cette information à la taille du banc) et enfin la répartition selon la taille et l'espèce des poissons pêchés. On peut ainsi localiser chaque jour pendant plusieurs années la position de quelque cent à deux cents bancs de thons dans différentes zones de pêche. De telles données peuvent permettre d'initialiser une simulation et de vérifier ensuite dans quelle mesure les résultats obtenus correspondent à une réalité.

En résumé, ce genre de simulation nous permettrait d'accéder rapidement et efficacement à tous ces fichiers de données qui constituent une part essentielle de la connaissance dans ce domaine.

CONCLUSION

Après avoir tenté d'approcher le problème du déplacement des thons avec des modèles indirects qui s'appuient sur une analyse des conditions hydrologiques de surface mesurées par satellite ou à partir de modèles fondés sur les réactions des thons face à des conditions de milieu stables et utilisant des langages de programmation procédurale, l'exploration des possibilités des techniques d'intelligence artificielle devrait être un moyen d'affiner ce que l'on sait (c'est-à-dire ce que l'on croit savoir).

dans le domaine des relations thon-environnement. Mais plusieurs difficultés subsistent, en particulier celles liées à la représentation du milieu dans l'espace et le temps.

La télédétection, par la bonne réactualisation des bases de données environnementales qu'elle permet, tant en précision relative des paramètres qu'en couverture spatio-temporelle, est un outil de choix pour aider à les résoudre. La limite actuelle réside plutôt, comme il arrive souvent pour les techniques d'intelligence artificielle appliquée à la télédétection, dans l'extraction des connaissances des processus biologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAUDRY (N.), 1986. - Filtering SEASAT and GEOS-3 altimeter data in the southwest Pacific. Rapport - *ORSTOM Nouméa, géologie-géophysique*, N 4-86, 11 p.
- CHATAIN (J.-N.) & DUSSAUCHOY (A.), 1987. - *Systèmes experts, méthodes et outils*. - Paris : Eyrolles. - XXX-279 p.
- DINCBAS (M.), 1983. - Contribution à l'étude des systèmes experts. *Thèse docteur-ingénieur, ENSAE Toulouse*, 178 p.
- EDWARDS (E.F.) & KLEIBER (P.), sous presse. - Effects of non-randomness on line transect estimates of dolphin abundance. *Fishery bulletin*.
- HERBLAND (A.) & VOITURIEZ (B.), 1977. - Production primaire, nitrate et nitrite dans l'Atlantique tropical. I. - Distribution du nitrate et production primaire. *Cahiers ORSTOM, série océanographie*, 15, 1, pp. 47-55.
- PETIT (M.), 1986. - Coherent theory on tuna behavior, in : *Proceedings of the 36th annual tuna conference, May 18-21, 1986*, ed. R.W. Brill, p. 14. - Honolulu : Southwest fisheries center NMFS.
- PETIT (M.), 1988. - Tuna school, predation strategy and oceanic resources, in : *Proceedings of the 38th annual tuna conference, Lake Arrowhead, California, May 17-20, 1987*, p. 22. - La Jolla : Inter-American tropical tuna commission.
- PETIT (M.), STRETTA (J.-M.), SIMIER (M.) & WADSWORTH (A.), 1989. - Anomalies de surface et pêche thonière : SPOT et la télédétection de zones de pêche par l'inventaire des hauts-fonds. *Mappemonde*, 89, 3, pp. 13-19.

SAARENMAA (H.) & NIKULA (A.), 1989. - Managing moose damage in forest plantations: a deep model of animal behavior on a geographic information system platform, in: *9th international workshop on expert systems and their applications, Avignon, France, May 29-June 2, 1989*, pp. 825-831.

SAARENMAA (H.), STONE (N.D.), FOLSE (L.J.), PACKARD (J.M.), GRANT (W.E.), MAKELA (M.E.) & COULSON (R.N.), 1988. - An artificial intelligence modelling approach to simulating animal/habitat interactions. *Ecological modelling*, **44**, pp. 125-141.

STRETTA (J.-M.), 1990. - La télédétection infrarouge thermique peut-elle aider à la prévision des zones de pêche ? La réponse praxéologique. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco*, n° spécial **6**, pp. 173-198.

Thons et environnement, Paris du 12 au 15 septembre 1988. - Paris : ORSTOM, 1989. - 84 p. - (Colloques et séminaires).

INDEX DES AUTEURS CITES

ABBOTT (M.R.) : 144.
AGOUMI (A.) : 175, 188, 192.
AHMAD (Z.) : 172.
AHRENS (T.J.) : 22.
ALBARET (J.-J.) : 99, 119, 178, 192.
ALBUISSON (M.) : 151, 170.
ALFÖLDI (T.) : 121.
ALLAN (T.D.) : 12, 16.
AMIDEI (R.) : 14, 16.
AMON KOTHIAS (J.B.) : 193, 197.
ANDERSON (F.) : 146.
ANDERSON (F.P.) : 147.
ANDRE (J.M.) : 143.
APEL (J.R.) : 11, 14, 16, 21.
ARGUE (A.W.) : 55.
ARNAULT (S.) : 164, 170.
ARNONE (R.A.) : 146.
AUBREY (D.A.) : 26.
AUSTIN (R.W.) : 146.

BADGLEY (P.C.) : 10, 17.
BAKER (E.T.) : 146.
BALL (D.) : 146.
BALLESTER (A.) : 13, 17.
BANNISTER (T.T.) : 101, 119, 122.
BARD (F.X.) : 177, 195, 202.
BARTON (G.) : 13, 17.
BATES (J.) : 152, 171.
BATIZA (R.) : 193.
BATTRICK (B.) : 170, 171.
BAUDRY (N.) : 204, 206.
BEAL (R.C.) : 12, 14, 17.
BELLAÏCHE (G.) : 84.
BELSHER (T.) : 61, 62, 68, 69, 83.
BEN MOUSSA (H.) : 62, 68, 69, 83.
BERGES (J.C.) : 171.
BERIOT (N.) : 152, 171.
BERNARD (H.J.) : 179, 193.

BERNSTEIN (R.L.) : 12, 17.
BERTALANFFY (L. von) : 175, 176, 193.
BEVERTON (R.J.H.) : 30, 54.
BINA (R.T.) : 11, 17, 22.
BIRRIEN (J.-L.) : 147.
BIZZARRI (B.) : 158, 171.
BLABER (S.J.M.) : 99, 119.
BLACKBURN (M.) : 178 193 197.
BLIZARD (M.A.) : 14, 18.
BOEHLERT (G.W.) : 179, 193.
BOESCH (D.F.) : 99, 119.
BOGGS (C.H.) : 179, 196.
BORN (G.H.) : 22.
BOUDOURESQUE (C.-F.) : 72, 83, 84.
BOUR (W.) : 87, 88, 90, 91, 94, 96.
BOURRET (P.) : 146.
BRANDHORST (W.) : 181, 193.
BRICAUD (A.) : 126, 143.
BRILL (R.W.) : 55, 196, 206.
BROENKOW (W.W.) : 145.
BROWN (E.H.) : 13, 18.
BROWN (J.) : 145.
BROWN (J.W.) : 145.
BROWN (O.B.) : 145.
BROWN (R.J.) : 11, 18.
BRUNET-MORET (Y.) : 99, 118, 120.

CAMUS (P.) : 145.
CAPONE (D.G.) : 135, 143.
CARDER (K.L.) : 114, 120.
CARLE (M.) : 145.
CARPENTER (E.J.) : 135, 143.
CARPENTER (K.) : 17.
CASSANET (J.) : 13, 18.
CAVERHILL (C.M.) : 121.
CAYRE (P.) : 178, 181, 193.
CHABERT (L.) : 145.
CHABOUD (C.) : 99, 120.
CHAMPAGNE-PHILIPPE (M.) : 13, 18, 145.
CHARNOCK (H.) : 21.
CHARPY (L.) : 127, 144.
CHATAIN (J.-N.) : 202, 206.
CHEDIN (A.) : 171.
CHENEY (R.E.) : 15, 18, 19, 23.
CHESSELET (R.) : 14, 15, 19.
CHESTER (T.J.) : 151, 152, 171.
CHIKUNI (S.) : 26.
CHILDS (L.) : 17.
CHRETIENNOT-DINET (M.-J.) : 147.

CITEAU (J.) : 15, 19, 97, 149, 154, 170, 171, 189, 193.
 CLAASEN (D. Van R.) : 14, 19, 22.
 CLARK (D.) : 145.
 CLARK (D.K.) : 145, 146, 148.
 COLLOTTE (P.) : 22.
 COLWELL (R.N.) : 120.
 COOK (A.H.) : 21.
 COOPER (C.M.) : 114, 121.
 CORMIER-SALEM (M.-C.) : 120.
 CORNILLON (P.) : 26.
 COULSON (R.N.) : 207.
 COULTER (M.C.) : 120.
 COURBOULES (J.) : 14, 19, 83, 84.
 CRACKNELL (A.P.) : 12, 13, 19, 122, 172.
 CUQ (F.) : 13, 19.

 DAHL (A.L.) : 22.
 DAMEN (M.C.J.) : 122.
 DANDONNEAU (Y.) : 55, 126, 127, 132, 135, 143, 144, 146, 182, 193.
 DANIAULT (N.) : 13, 19.
 DAVIES-COLLEY (R.J.) : 101, 114, 120.
 DEBENAY (J.-P.) : 101, 119, 121.
 DEEPAK (A.) : 12, 20.
 DeLEONIBUS (P.S.) : 17.
 DELMAS (R.) : 144, 147.
 DEMARCO (H.) : 13, 20, 126, 144, 149, 171, 193.
 DEN HARTOG (C.) : 72, 84.
 DePALMA (I.P.) : 146.
 DESCHAMPS (P.Y.) : 144, 147, 148, 152, 172.
 DIAW (M.C.) : 120.
 DICKIE (L.M.) : 37, 54.
 DIEMER (F.P.) : 25.
 DIEMIENTIEVA (T.F.) : 30, 54.
 DINCIBAS (M.) : 202, 206.
 DIOUF (T.) : 193.
 DIRKS (R.W.J.) : 118, 121.
 DIZON (A.E.) : 195.
 DOBSON (M.C.) : 57.
 DODSON (A.N.) : 184, 193.
 DONGUY (J.R.) : 127, 144.
 DOUGLAS (B.C.) : 18, 23.
 DOUMENGE (F.) : 9.
 DUDHIA (A.) : 153, 171.
 DUFOUR (P.) : 180, 184, 185, 186, 193.
 DUNTLEY (S.Q.) : 12, 20.
 DUPOUY (C.) : 13, 20, 32, 33, 50, 54, 55, 56, 125, 126, 135, 144, 148.
 DUSSAUCHOY (A.) : 202, 206.

 EDWARDS (E.F.) : 201, 206.

EL-SAYED (S.Z.) : 146.
ELROD (J.) : 145.
ENDRES (D.) : 145.
EPPLEY (R.W.) : 126, 144.
ESAIAS (W.) : 145.
ESHKY (A.A.) : 84.
EVANS (R.) : 145.
EVANS (R.H.) : 145.
EWING (G.C.) : 10, 20.

FELDMAN (G.) : 126, 143, 145.
FIEUX (M.) : 13, 20.
FIOCCO (G.) : 18.
FOLSE (L.J.) : 207.
FONTENEAU (A.) : 31, 55, 178, 194.
FREDJ (G.) : 71, 84.
FRONTIER (S.) : 175, 176, 180, 184, 194.
FROUIN (R.) : 13, 20.
FRYER (P.) : 193.

GALLARDO (Y.) : 184, 194.
GAROFALO (D.) : 55.
GAUTIER (C.) : 13, 20, 171, 172.
GENIN (A.) : 179, 193.
GIERLOFF-EMDEN (H.G.) : 11, 21.
GILLOT (R.A.) : 13, 21.
GILMARTIN (M.) : 127, 145.
GIRARD (C.M.) : 83, 84.
GIRARD (M.C.) : 83, 83.
GIRAUD (G.) : 83.
GOHIN (F.) : 127, 132, 135, 144.
GORDON (H.R.) : 12, 13, 21, 126, 145, 146, 148.
GOWER (J.F.R.) : 12, 14, 21.
GRANDPERRIN (R.) : 178, 196.
GRANT (W.E.) : 207.
GROTTE (A.) : 22.
GUILLERM (J.-M.) : 145, 146.
GUILLOT (B.) : 19, 171.
GUYENNE (T.D.) : 14, 21.

HAEDRICH (R.L.) : 119, 121.
HALPERN (D.) : 145.
HAMMACK (J.C.) : 11, 21.
HARANG (L.) : 13, 18, 43, 56.
HARBOUR (D.S.) : 145.
HARRIGAN (P.) : 99, 120.
HARVEY (G.R.) : 120.
HASTENRATH (S.) : 120.
HEDGEPEETH (J.B.) : 193.

HENIN (C.) : 36, 56, 127, 142, 143, 144, 145, 146.
HERBLAND (A.) : 145, 178, 179, 180, 182, 183, 194, 201, 206.
HESTER (F.J.) : 181, 194.
HEYMAN (U.) : 144.
HICKS (R.B.) : 12, 22.
HILL (M.L.) : 152, 172.
HODGSON (M.E.) : 112, 120.
HOFFSCHIR (C.) : 91, 96.
HOLLIGAN (P.M.) : 126, 145.
HOLT (S.J.) : 30, 54.
HOUGHTON (J.T.) : 13, 21.
HOVIS (W.A.) : 126, 145, 146, 148.
HOWARD (P.) : 146.

ITO (S.) : 26.

JARA (R.) : 17.
JARRIGE (F.) : 132, 146.
JAUBERT (J.) : 84.
JENSEN (J.R.) : 120.
JEUDY DE GRISSAC (A.) : 84.
JOANNOT (P.) : 88, 94, 96.
JOHNSON (R.W.) : 114, 118, 120.
JOUANNIC (C.) : 146.

KARLSSON (B.) : 121.
KATZ (I.) : 17.
KEARNEY (R.E.) : 32, 55.
KEATING (B.H.) : 193.
KEBE (M.) : 120.
KERR (S.R.) : 54, 119, 120.
KHAFFAJI (A.K.) : 84.
KINNE (O.) : 197.
KIRK (J.T.O.) : 101, 114, 120, 146.
KIRWAN (A.D.) : 12, 22.
KITCHELL (J.F.) : 178, 179, 181, 195.
KLEIBER (P.) : 32, 55, 201, 206.
KROENKE (L.) : 146.
KUCHLER (D.A.) : 15, 22.
KULBICKI (M.) : 36, 56.
KURING (N.) : 145.

LAE (R.) : 19, 171.
LAMB (P.J.) : 99, 120.
LARSON (S.E.) : 151, 171.
LAUFF (G.H.) : 121.
LAUREC (A.) : 30, 55.
LE BORGNE (P.) : 13, 24, 147.
LE BORGNE (R.) : 127, 135, 146, 170, 194, 195, 197.

LE BOUTEILLER (A.) : 194.
 LE CORRE (P.) : 147.
 LE GALL (J.-Y.) : 14, 15, 22.
 LE GUEN (J.-C.) : 30, 55, 184, 194.
 LE LOEUFF (P.) : 197.
 LE RESTE (L.) : 99, 120.
 LEBRUSQ (J.-Y.) : 121.
 LEFEVRE (J.-R.) : 72, 83, 84.
 LEMAIRE (O.) : 22.
 LEMASSON (L.) : 146.
 LEMOALLE (J.) : 114, 120.
 LEWIS (M.R.) : 121.
 LIM (J.B.) : 17.
 LINDELL (T.) : 112, 121.
 LOHRENZ (S.E.) : 126, 146.
 LOUBERSAC (L.) : 15, 22, 69, 96.
 LUGO (A.E.) : 122.
 LYONS (K.J.) : 11, 22.

MACKEY (H.E.) jr. : 120.
 MACKO (S.A.) : 120.
 MAGNUSON (J.J.) : 195.
 MAKELA (M.E.) : 207.
 MANDURA (A.S.) : 84.
 MANIERE (R.) : 84.
 MARCHAL (E.) : 197.
 MARMELSTEIN (A.D.) : 55.
 MARSAC (F.) : 14, 22, 184, 195.
 MASSIN (J.-M.) : 11, 13, 22, 25.
 MASTRANTONIO (G.) : 18.
 MATHEWS (T.) : 12, 22.
 MAUGHAN (P.M.) : 38, 55.
 MAUL (G.A.) : 13, 23, 152, 171.
 MAYNARD (N.) : 145.
 McCLAIN (C.) : 145.
 McCLAIN (C.R.) : 146.
 McCLAIN (E.P.) : 151, 152, 171, 172.
 McGOWAN (J.A.) : 126, 146.
 McIVOR (C.C.) : 121.
 McROY (C.P.) : 72, 84.
 MEINARDI (M.) : 71, 84.
 MEINESZ (A.) : 83, 84.
 MENARD (Y.) : 170.
 MENDELSSOHN (R.) : 38, 55, 186, 195.
 MERLE (J.) : 188, 195.
 MILLER (L.) : 15, 18, 19, 23.
 MILOY (L.) : 17.
 MITSUYASU (H.) : 14, 25.
 MIYABE (N.) : 177, 195.

MIYAKE (P.M.) : 55, 195.
 MOLINIER (R.) : 81, 84.
 MONGET (J.-M.) : 11, 23, 170.
 MOREL (A.) : 143, 146, 148.
 MOREL (A.Y.) : 13, 21.
 MORGAN (J.) : 154, 172.
 MORIN (P.) : 147.
 MOSTERT (S.A.) : 147.
 MOUGENOT (B.) : 97.
 MUELLER (J.L.) : 145, 146.
 MULLER-KARGER (F.E.) : 126, 146.
 MUNDAY (J.C.) jr. : 114, 118, 120.
 MURPHY (G.I.) : 179, 195.

NACINI (E.) : 13, 23.
 NEILL (W.H.) : 195.
 NEREM (R.S.) : 14, 23.
 NEVILLE (R.A.) : 25.
 NG (C.) : 145.
 NIHOUL (J.C.J.) : 13, 23, 56.
 NIHOUS (C.) : 170.
 NIKULA (A.) : 202, 204, 207.
 NIWA (K.) : 26.

O'NEIL (R.A.) : 25.
 ODUM (W.E.) : 121.
 OLIVIER (J.) : 84.
 OLRV (J.P.) : 147.
 OLSON (R.J.) : 179, 196.
 ORTNER (P.B.) : 120.
 OZOUVILLE (L. d') : 22.

PACKARD (J.M.) : 207.
 PAGES (J.) : 97, 99, 101, 118, 121.
 PATTERSON-ZUCCA (C.) : 122.
 PELAEZ (J.) : 126, 146.
 PENNOCK (J.R.) : 114, 122.
 PEPPLER (R.A.) : 120.
 PERES (J.M.) : 81, 84.
 PERRET-BOUDOURESQUE (M.) : 83.
 PETIT (M.) : 6, 22, 27, 32, 33, 36, 37, 38, 43, 48, 49, 50, 51, 55, 56, 57, 142,
 144, 146, 177, 179, 180, 182, 187, 188, 189, 195, 196, 197, 199, 201,
 204, 206.
 PHILANDER (S.G.H.) : 170, 172.
 PHILIPPE (M.) : 43, 56.
 PHULPIN (T.) : 13, 24, 151, 152, 172.
 PICARD (J.) : 81, 84.
 PICHEL (W.G.) : 172.
 PIERROT (S.) : 71, 84.

PIRAZZOLI (P.A.) : 13, 24.
PLATT (T.) : 114, 121.
PODESTA (G.) : 145.
POSTEL (E.) : 28, 38, 56.
PRICE (C.C.) : 135, 143.
PRITCHARD (D.W.) : 99, 121.

QUENEY (P.) : 159, 172.

RAIMBAULT (P.) : 194.
REED (L.E.) : 25.
REGRAIN (R.) : 11, 24.
REID (J.L.) jr. : 178, 196.
REILLY (S.B.) : 193.
REVELANTE (N.) : 127, 145.
REYNOLDS (R.W.) : 155, 158, 160, 165, 172.
RICCIO (E.) : 17.
RICHARDSON (P.L.) : 146.
RIGLER (F.H.) : 177, 196.
RIGOLOT (P.) : 143, 147.
RITCHIE (J.C.) : 114, 121.
ROBERTS (B.) : 17.
ROBINSON (I.S.) : 13, 24, 114, 120.
ROGER (C.) : 178, 196.
ROGERS (R.H.) : 25.
ROSENGREN (M.) : 121.
ROSNAY (J. de) : 175, 196.
ROUQUET (M.C.) : 170.
ROY (C.) : 38, 55, 186, 195.
ROY (P.) : 71, 80, 84.
ROZAS (L.P.) : 99, 121.
RUAL (P.) : 96.
RYDER (R.A.) : 119, 120.

SAARENMAA (H.) : 202, 204, 207.
SAIFULLAH (S.) : 84.
SAKAGAWA (G.T.) : 55, 195.
SALTZMAN (B.) : 12, 13, 24.
SATHYENDRANATH (S.) : 121.
SCHAEFER (M.B.) : 181, 196.
SCHNEIDER (D.C.) : 119, 121.
SCHULKIN (M.) : 12, 24.
SCHWINGHAMER (P.) : 54.
SCOTT (N.A.) : 171.
SHANNON (L.V.) : 13, 24, 126, 147.
SHARP (G.D.) : 195.
SHUM (C.K.) : 23.
SIMIER (M.) : 56, 57, 196, 199, 206.
SINHA (E.) : 10, 24.

SITBON (P.) : 171.
 SLATER (P.N.) : 12, 24.
 SLEPOUKHA (M.) : 37, 38, 57, 182, 189, 197.
 SMIT (G.S.) : 122.
 SMITH (V.E.) : 11, 25.
 SMITH (W.L.) : 152, 153, 172.
 SNEDAKER (S.C.) : 99, 121.
 SÖRENSEN (B.M.) : 12, 25.
 SOURNIA (A.) : 135, 147.
 SPITZER (D.) : 118, 121.
 STACKPOLE (L.) : 17.
 STEWARD (R.G.) : 120.
 STEWART (E.) : 144.
 STEWART (R.H.) : 13, 25.
 STONE (N.D.) : 207.
 STRETTA (J.-M.) : 6, 22, 33, 37, 38, 43, 56, 57, 173, 177, 178, 179, 180,
 181, 182, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 193, 195, 196, 197, 199, 201,
 205, 206, 207.
 STUMPF (R.P.) : 114, 122.
 STURM (B.) : 112, 114, 122, 146.
 SUND (P.N.) : 178, 179, 181, 197.
 SUTTON (J.) : 172.
 SYMONS (P.E.K.) : 55, 195.

TANABE (R.) : 26.
 TANRE (D.) : 147.
 TAPLEY (B.D.) : 23.
 TEMPLE (O.R.) : 55.
 THOMAS (W.H.) : 184, 193.
 THOMSON (V.) : 11, 25.
 TOBA (Y.) : 14, 25.
 TOSELLI (F.) : 13, 21.
 TOURNADRE (J.) : 15, 25.
 TROADEC (J.-P.) : 37, 57.
 TSAI (J.J.) : 13, 25.
 TURNER (R.E.) : 99, 119.
 TWILLEY (R.R.) : 99, 122.

VAILLANT (D.) : 42, 57.
 VALERIO (C.) : 84.
 VALIELA (I.) : 178, 197.
 VANT (W.N.) : 101, 114, 120.
 VERGER (F.) : 11, 25.
 VERNBERG (F.J.) : 25.
 VERSTAPPEN (H.T.) : 122.
 VERSTRAETE (J.M.) : 197.
 VINOGRADOV (M.E.) : 175, 197.
 VIOLLIER (M.) : 62, 69, 126, 144, 145, 147, 148.
 VOITURIEZ (B.) : 126, 145, 178, 180, 184, 194, 197, 201, 206.

VOLLMERS (R.R.) : 11, 25.

WADSWORTH (A.) : 27, 48, 56, 57, 196, 206.

WALSH (J.J.) : 175, 180, 197, 198.

WALSH (S.) : 145.

WALTERS (N.M.) : 147.

WALTON (C.C.) : 172.

WARNE (D.K.) : 11, 26.

WAUTHY (B.) : 184, 198.

WEIDEMANN (A.D.) : 101, 122.

WEILL (A.) : 14, 26.

WEINREB (M.P.) : 152, 172.

WIESENBURG (D.A.) : 146.

WILLIAMS (F.) : 197.

WILSON (W.H.) : 146.

WITTE (J.M.) : 13, 26.

WOLANSKI (E.) : 101, 122.

WRIGLEY (R.C.) : 146.

YABUTA (Y.) : 26.

YAMANAKA (I.) : 16, 26.

YANEZ-ARANCIBIA (A.) : 119.

YENTSCH (C.S.) : 146, 181, 182, 198.

ZACHER (W.) : 17.

ZAITZEFF (J.B.) : 12, 26.

ZIEMAN (J.C.) : 120.

ZION (P.M.) : 14, 26.

INDEX DES SUJETS TRAITES

- absorption atmosphérique : 149, 151, 153, 154, 158, 159, 161, 165.
absorption de l'eau : 109.
absorption de la lumière : 101, 102, 110, 114.
Advanced Very High Resolution Radiometer, voir : AVHRR.
aérosol : 148.
Afrique de l'Ouest : 15, 98.
 voir aussi : Casamance, Guinée (golfe de), Sénégal.
albacore : 177, 178, 179, 189.
algue : 62, 81, 135.
 voir aussi : maërl.
alizé : 127, 132, 142, 170.
aménagement du littoral : 14, 76.
analyse globale : 175.
analyse objective : 160.
analyse praxéologique : 174, 176, 177, 201
analyse systémique : 175.
angle de visée : 90.
Angola (dôme thermique) : 179, 180.
anomalie :
 bathymétrique, voir : bathymétrie, anomalie.
 thermique, voir : température, anomalie.
Antarctique : 13.
Atlantique : 31, 126, 188.
 central : 160, 178.
 équatorial : 160.
 intertropical : 189.
 Nord : 160.
 tropical : 34, 37, 43, 151, 154, 164, 168, 170, 179, 188, 189, 190, 205.
 tropical oriental : 37, 189.
atténuation verticale : 101.
Australie : 17, 30, 88.
AVHRR : 14, 151, 152, 153.
avion : 32, 39, 42, 43, 44, 48, 142, 174.
azote : 50, 135.
- baleine : 36, 39, 44.
bathymétrie : 63, 68, 99, 104, 108, 114, 118, 119.
 anomalie : 201.
 gradient : 179.
biocénose : 71, 80, 81, 82.
Bureau d'aide à la pêche : 192.
- cachalot : 43.
calibration : 148, 149, 151, 152, 154.

canal infrarouge : 151, 152, 154.
 canal vapeur d'eau : 154.
 canal visible : 154.
 canal XS1 (SPOT) : 51, 62, 63, 68, 76, 90, 98, 104, 108, 112, 115.
 canal XS2 (SPOT) : 51, 62, 63, 68, 76, 90, 104, 108.
 canal XS3 (SPOT) : 62, 76, 98, 104, 108, 112, 115.
 capteur : 10, 12, 42, 44, 48, 50, 104, 112, 125, 126, 132, 135, 143, 148, 154, 160.
 actif : 164.
 micro-ondes : 204.
 optique : 14.
 voir aussi au nom des capteurs.
 carte bathymétrique : 11, 128.
 cartographie : 11, 13, 59, 62, 63, 64, 66, 72, 82, 83, 88, 90, 143, 149, 159.
 Casamance : 98, 99, 100, 101, 114, 119.
 catastrophes (théorie des) : 180.
 Centre de météorologie spatiale de Lannion : 152.
 Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye : 99, 168, 170.
 Centre européen de prévision météorologique à moyen terme, Reading : 153, 159.
 Centre national d'études spatiales : 13, 15, 42, 143.
 Centre national de la recherche scientifique : 15.
 CEPMMT, voir Centre européen de prévision météorologique à moyen terme.
 cétacé : 33, 43, 44.
 voir aussi : baleine, cachalot, dauphin, mammifère marin.
 chaîne alimentaire (ou chaîne trophique) : 50, 182.
 chlorophycées : 62.
 chlorophylle : 101, 102, 108, 110, 112, 114, 123, 125, 126, 127, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 142, 143, 148, 183.
 de surface : 125, 127, 131, 142.
 gradient : 104.
 "satellite" : 125, 130, 132, 133, 134, 135, 148.
 classification : 62, 63, 68, 91.
 dirigée : 71, 78, 80, 82.
 non dirigée : 74, 76.
 supervisée : 90, 91.
 CNES, voir : Centre national d'études spatiales.
 CNRS, voir : Centre national de la recherche scientifique.
 coefficient d'atténuation : 101, 109, 118.
 Commission du Pacifique Sud : 31, 32, 35, 37.
 communauté benthique : 71, 83.
 voir aussi : peuplement, benthique.
 condition hydrologique : 16, 180, 181, 184, 201, 202, 205.
 convergence tropicale : 132.
 voir aussi : Zone intertropicale de convergence.
 coraux : 87, 88, 91, 94.
 voir aussi : *Faviidae*.

correction atmosphérique : 36, 148, 152, 154, 158.
 Coastal Zone Color Scanner, voir : CZCS.
 couche euphotique : 173, 179, 181.
 couleur : 12, 14, 36, 48, 126, 127, 131, 132, 143.
 front : 131, 132.
 gradient : 131.
 courant : 15, 43, 101, 126, 142, 179, 204.
 CPS, voir : Commission du Pacifique Sud.
 crête thermique : 179, 180.
 CRODT, voir : Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye.
 CZCS : 50, 125, 126, 127, 131, 132, 135, 136, 142, 143.

dauphin : 36, 44, 201, 202.
 décorrélation : 63, 90.
 Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt : 39, 42.
 DLR, voir : Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt.
 dôme thermique : 173, 179, 180, 201.
 voir aussi : Angola et Guinée.

E-SAR : 39, 42, 43.

eau

- couleur, voir : couleur, front, gradient.
- eutrophe : 184.
- mésotrophe : 143.
- oligotrophe : 126, 127, 132, 135, 142, 143, 148, 180, 184, 200, 201.

 écosystème : 14, 68, 72, 76, 174, 175, 176, 180, 187, 188, 189, 192.

- continental : 114.
- corallien : 63.
- lacustre : 114.
- littoral : 15.
- marin : 30, 83, 121, 175, 181, 188, 203.
- terrestre : 15, 30.
- tropical : 99.

 effet atmosphérique : 104, 112, 127, 148, 158.
 effet d'archipel : 143.
 effet de haut-fond : 36.
 effet d'île : 36, 125, 127, 131.
 efflorescence : 50, 133, 135.
 enrichissement : 127, 131, 132, 135, 142, 143, 173, 179, 181, 184, 185, 187, 188, 189, 201.
 mécanisme : 180, 184.
 environnement : 30, 32, 50, 98, 119, 123, 175, 177, 178, 180, 182, 189, 199, 200, 201, 202, 203, 204.
 EOS : 54.
 épave : 43, 201.
 ERS-1 : 14, 15, 54.

ESOC, voir : European Space Operation Center, Darmstadt.
 estuaire : 59, 98, 99, 101, 102, 106, 107, 108, 114, 118, 119.
 European Space Operation Center, Darmstadt : 153, 154.
 évaluation de biomasse : 88.
 évaluation de stock : 30, 32, 33, 36, 62.

fausse couleur : 82, 115.
Faviidae : 88, 90, 94.
 fenêtre spectrale : 151, 152.
 front de couleur, voir : couleur, front.
 front thermique : 36, 43, 132, 184, 185, 186.
 voir aussi : structure frontale, système frontal, zone frontale.
 fucales : 62, 64.

GEOS-3 : 11, 204.
 GEOSAT : 14, 150, 164.
 Global Operational Sea Surface Temperature Computation : 150, 164, 168, 189.
 GOES : 12.
 GOES-E : 152, 153.
 GOES-W : 153.
 GOSSTCOMP, voir : Global Operational Sea Surface Temperature Computation.

gradient : 10, 43, 112, 158, 160, 201, 203.
 bathymétrique, voir : bathymétrie, gradient.
 chlorophylle, voir : chlorophylle, gradient.
 couleur, voir : couleur, gradient.
 matière organique dissoute, voir : matière organique dissoute, gradient.
 salinité : voir : salinité, gradient.
 température, voir : température, gradient.

Guinée (dôme thermique de) : 179, 180.
 Guinée (golfe de) : 15, 160, 177, 178, 184.
 guyot : 179, 201.
 voir aussi : haut-fond.

halieutique : 5, 6, 27, 28, 32, 36, 37, 38, 42, 43, 44, 50, 54, 98, 99, 119, 123, 192, 204.
 opérationnelle : 5, 7, 28, 37, 38, 42, 50.

Halieutique et radar : expérimentation en Méditerranée : 39, 42, 43, 44.
 HAREM, voir : Halieutique et radar : expérimentation en Méditerranée.

haute résolution : 44, 48, 59, 61, 62, 63, 88, 152.
 haut-fond : 49, 50, 51, 63, 101, 112, 115, 123, 118, 126, 142, 179, 201, 204.
 voir aussi : guyot.

HCMM : 12, 151.
 Heat Capacity Mapping Mission, voir : HCMM.

herbier : 59, 72, 76, 78, 80, 81.
 High Resolution Infrared Sounder, voir : HRIS.
 histogramme bidimensionnel : 90, 91, 92, 93, 158.

houle : 48, 49, 51, 63, 82.
HRIS : 152.
hydroclimat : 101, 119.
HYDROTHON 01 : 132.
hypersalinité : 99, 101.

IATTC, voir : Inter-American Tropical Tuna Commission.
ICCAT, voir : International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas.

IFREMER, voir : Institut français pour l'exploitation de la mer.

IFP, voir : Institut français du pétrole.

IGN, voir : Institut géographique national.

indice d'abondance : 36.

indice de productivité : 205.

indice de transparence : 62.

indice de végétation : 62, 68.

indice morpho-édaphique : 119.

indice pigmentaire : 62, 68.

Indien (Océan) : 15, 31, 43.

infrarouge : 11, 14, 32, 36, 37, 80, 142, 149, 151, 152, 154, 155, 158, 160, 161.

capteur, voir radiomètre, infrarouge.

voir aussi : proche infrarouge.

voir aussi : radiomètre, infrarouge.

Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération : 15, 32, 34, 43, 90, 123, 168, 170.

Institut français du pétrole : 52.

Institut français pour l'exploitation de la mer : 15, 192.

Institut géographique national : 42.

intelligence artificielle : 5, 200, 202, 203, 204, 205, 206.

Inter-American Tropical Tuna Commission : 31.

International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas : 31.

JERS-1 : 54.

lagon : 63, 88, 94, 127, 135, 142, 148.

laminaires : 63, 64.

LANDSAT : 11, 15, 44, 48.

LANDSAT 1 : 10.

LANDSAT 2 : 10.

LANDSAT 3 : 12.

LANDSAT 4 : 13.

LANDSAT 5 : 15.

LANDSAT Thematic Mapper : : 13, 15, 44.

listao : 177, 179, 189.

Loyauté (îles) : 126, 128, 131, 142.

macrophytes : 61, 62.

maërl : 63.

mammifère marin : 36.
 mangrove : 99, 101, 118.
 marécage : 30, 32, 37, 101, 112, 118.
 Marquises (îles) : 51.
 masse d'eau
 enrichissement : 179, 182.
 maturation : 180, 182, 184, 185, 186, 187, 189.
 passé hydrologique : 37, 173, 182, 189, 201.
 productivité : 181, 182, 189.
 matière organique dissoute : 98, 101, 102, 105, 108, 110, 114.
 gradient : 104.
 maturation d'une masse d'eau, voir : masse d'eau, maturation.
 Méditerranée : 13, 42, 43, 72, 83.
 occidentale : 73.
 mélange vertical : 127.
 Météorologie nationale : 15.
 METEOSAT : 12, 37, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 158, 160, 161, 188, 189.
 micronecton : 182, 184, 185.
 micro-onde : 152, 160.
 micro-upwelling, voir : upwelling, micro-upwelling.
 MOD, voir : matière organique dissoute.
 modèle : 14, 30, 36, 37, 38, 49, 152, 154, 158, 159, 173, 174, 175, 176, 177, 188, 189, 192, 201, 202, 204, 205.
 prévisionnel : 123, 189, 200, 201, 205.
 simulation : 202.
 validation : 189, 205.
 modélisation : 49, 119, 177, 188, 200, 201, 202, 203, 204.
 Moorea : 63, 67.
 MSS : 44.

 NASA, voir : National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C..
 National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. : 11, 127, 143.
 National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C. : 11, 164, 189.
 National Weather Service, Silver Spring, Md : 150, 164, 168.
 navire marchand (ou bateau) : 149, 150, 151, 158, 159, 160, 161, 164, 165.
 NIMBUS : 10.
 NIMBUS-1 : 10.
 NIMBUS-7 : 11, 12, 50, 125, 126, 127, 131, 132, 135, 136, 142, 143, 147, 148, 152.
 Niño (El) : 15.
 nitracline : 126, 127.
 NOAA, voir : National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.
 NOAA (satellites) : 14, 37, 151, 152, 174, 188.
 NOAA-1 : 10.

Nouvelle-Calédonie : 32, 33, 36, 37, 50, 59, 87, 88, 89, 91, 94, 95, 125, 126,
 127, 128, 131, 132, 134, 135, 142.
 voir aussi : Lifou (île), Loyauté (îles), Maré (île), Piné (île des),
 Tetembia (récif de).
 NWS, voir : National Weather Service, Silver Spring, Md.

onde interne : 45, 48, 49.
 ORSTOM, voir : Institut français de recherche scientifique pour le
 développement en coopération.
 oxygène dissous : 177, 180, 181, 189.

Pacifique : 34, 59, 135, 143.
 central : 178.
 Est : 31, 201.
 intertropical : 16.
 Nord : 16.
 Ouest : 31, 205.
 Sud : 15, 32, 43, 87, 127.
 tropical Sud-Ouest : 88, 125, 126, 127, 135, 143, 148.

pêche : 5, 7, 14, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 49, 50, 123,
 177, 179, 181, 182, 184, 185, 186, 187, 192, 199, 200, 202, 205.
 aide (à la pêche) : 32, 34, 36, 192.
 côtière : 59.
 effort : 29, 30.
 gestion : 15, 37.
 pélagique : 16, 182.
 prévision : 32, 37, 123, 189, 192, 201.
 statistiques : 30, 31, 33.
 système : 5.

peuplement : 175.
 benthique : 72, 83.
 littoraux : 81.

phanérogames marines : 72.
 voir aussi : posidonies.

phéopigment : 101, 148.

photographie aérienne : 9, 82, 91.

phytoplancton : 98, 101, 103, 114, 123, 125, 132, 143, 148, 181, 182, 184.

pigment chlorophyllien, voir : chlorophylle.

pixel : 50, 76, 82, 90, 92, 122, 149, 154.

plateau continental : 126, 182.

platier : 63, 88, 91, 95.

plongée : 68, 71, 72, 74, 78, 80, 82.

pollution : 11, 13, 44, 63, 76.

Polynésie française : 32, 62.

Porto Conte (baie de) : 72, 73, 76, 80.

posidonies : 76, 78, 81, 83.

prédateur : 179.

PREFIL, voir : Production primaire et effets d'îles.

PREVI-PECHE : 37, 189, 192, 201, 202, 205.

proche infrarouge : 11, 48, 127.
 production
 primaire : 50, 114, 143, 183.
 tertiaire : 180.
 Production primaire et effets d'îles : 127, 142.
 productivité : 14, 119, 173, 178, 180, 181.
 masse d'eau : 177.
 planctonique : 181.
 programmation orientée objet : 203, 204.

 qualité de l'eau : 99.

 radar : 10, 15, 28, 42, 43, 44, 48, 49.
 RADARSAT : 54.
 radiance : 152, 153, 154, 165.
 radiomètre : 36, 104, 153, 154, 182.
 infrarouge : 32, 153, 174, 182, 204.
 radiométrie : 32, 34, 104, 112, 114, 149.
 aérienne : 32, 36, 184.
 de terrain : 62, 98, 104, 105, 106, 108, 111, 112, 113, 114.
 Radiométrie aérienne et prospection thonière : 32, 33, 43, 51.
 rapport de canaux : 62, 63, 68, 98, 108, 112, 115.
 RAPT, voir : Radiométrie aérienne et prospection thonière.
 réalité de terrain : 72, 74, 80, 82, 83, 98, 99, 104, 112.
 récif : 59, 87, 88, 89, 90, 91, 94, 95, 142.
 barrière : 63, 88, 90.
 corallien : 11, 13, 88, 94.
 voir aussi : Tetembia (récif de).
 redressement géométrique : 154, 158.
 réflectance : 104, 105, 106, 108, 109, 114, 127, 148.
 résolution : 44, 90, 99, 127, 132, 142, 147, 154.
 géométrique : 42.
 spatiale : 152, 154, 158, 170, 203.
 spectrale : 151.
 voir aussi : haute résolution.

 Salinité : 98, 101, 102, 104, 119.
 gradient : 99, 104.
 voir aussi : hypersalinité, sursalure.
 SAR : 28, 39, 42, 44.
 Sardaigne : 59, 71, 72, 73.
 satellite : 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 33, 42, 44, 48, 49, 50, 54, 59, 61, 76, 82,
 83, 87, 88, 98, 99, 107, 119, 125, 126, 127, 130, 142, 143, 148, 149, 150,
 151, 152, 153, 154, 159, 164, 174, 188, 189, 204, 205.
 d'observation de la terre : 11.
 géostationnaire : 151, 152, 153.
 météorologique : 10, 151, 152.
 océanographique : 28, 44.
 voir aussi au nom des satellites.

Scanning Multichannel Microwave Radiometer, voir : SMMR.
 scénario thermique idéal : 184, 187, 188, 201.
 Sea-Wiewing Wide Field-of-view Sensor, voir : Sea-WiFS.
 Sea-WiFS : 143.
 SEASAT : 11, 12, 44, 152, 204.
 sel nutritif : 127, 180.
 Sénégal : 98, 179
 Service hydrographique de la Marine : 112, 115.
 Shuttle Imager Radar-A, voir : SIR-A.
 signature
 thermique : 174, 182, 184.
 spectrale : 91.
 simulation : 15, 90, 118, 152, 200, 203, 205.
 SIR-A : 44.
 SKYLAB : 11.
 SMMR : 152, 204.
 SMT, voir : Système mondial de transmission.
 sonar latéral : 68, 72.
 SPOT : 15, 28, 44, 45, 48, 49, 50, 51, 59, 61, 62, 63, 71, 76, 80, 81, 83, 87,
 88, 90, 91, 94, 99, 104, 107, 115, 119, 143, 204.
 voir aussi : canal XS1, canal XS2, canal XS3
 SPOT-IMAGE : 50, 76.
 STI, voir : scénario thermique idéal.
 structure frontale : 180, 185.
 structure tropicale typique : 126, 178, 180, 181, 201.
 STT, voir : structure tropicale typique.
 sursalure : 101.
 SURTROPAC, voir : Surveillance transocéanique du Pacifique.
 Surveillance transocéanique du Pacifique : 127, 132, 135, 143.
 Synthetic Aperture Radar, voir : SAR.
 système expert : 38, 50, 123, 200, 202, 203.
 système frontal : 184.
 Système mondial de transmission : 151, 161.

 Tahiti : 36, 63.
 télédétection : 5, 6, 7, 11, 28, 37, 38, 50, 54, 59, 72, 88, 90, 94, 99, 114, 119,
 192, 200, 203, 206.
 aérienne : 32, 68, 72.
 aérospatiale : 5, 6, 27, 37, 38, 54, 123, 182, 188.
 océanique : 15.
 satellitaire (ou spatiale) : 59, 61, 62, 63, 83, 123.
 température
 anomalie : 36, 158, 160, 165, 201.
 carte : 37, 123, 149, 164, 168, 188, 189.
 gradient : 43, 158, 160, 164, 165, 177, 184, 189.
 surface (température de) : 10, 13, 33, 34, 36, 54, 132, 149, 151, 152,
 154, 158, 159, 160, 161, 174, 177, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186,
 187, 188, 189, 204.
 Tetembia (récif de) : 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95.

Thematic Mapper, voir : LANDSAT Thematic Mapper.
 thermocline : 48, 126, 179, 201.
 mouvement : 179.
 profondeur : 177, 181, 189.
 remontée : 173, 180, 181, 182, 201.
 saisonnaire : 127.
 thon : 5, 37, 50, 178, 179, 180, 181, 187, 189, 201, 203, 205.
 voir aussi : albacore, listao, thon rouge.
 banc : 36, 38, 39, 42, 43, 44, 178, 179, 201, 203, 204, 205.
 besoins énergétiques : 173, 203.
 comportement : 36, 39, 43, 173, 177, 199, 204.
 concentration : 177, 178, 180, 181, 182, 184, 186, 201, 202.
 déplacement (ou mouvement) : 199, 202, 205.
 disponibilité : 180.
 distribution : 178.
 écologie : 36, 173.
 environnement : 27, 34, 38, 182, 189, 202, 203, 206.
 nourriture : 173, 174, 178, 179, 180, 181, 186, 201, 204, 205.
 pêche : 15, 27, 28, 31, 32, 34, 37, 38, 42, 49, 123, 181, 182, 184, 185,
 186, 189, 192, 200, 201, 202.
 physiologique : 180.
 présence : 182, 184, 187, 188, 205.
 prospection : 32, 33, 34, 36, 51.
 stock : 178.
 thon rouge : 39, 178.
 thonier : 201, 202.
 TIROS : 10.
 TIROS-N : 11, 12, 152.
 TOGA, voir : Tropical Ocean and Global Atmosphere.
 TOPS, voir : Tuna-vessel Observer Program Simulator.
 tourbillon : 10, 45, 49, 131, 134, 135, 142.
 voir aussi : vortex.
transect line : 44.
 transparence atmosphérique : 152.
Trichodesmium : 131, 133, 135, 142.
 troca : 87, 88, 90, 91.
 Tropical Ocean and Global Atmosphere : 170.
 Tuna-vessel Observer Program Simulator : 201, 202.

 ultraviolet : 110.
 upwelling : 43, 164, 180, 181, 185, 187.
 côtier : 126, 160, 179, 180, 184, 201.
 équatorial : 143, 150, 164, 170.
 mauritanien : 182, 183.
 micro-upwellings : 201.
 US Navy : 11.

 Vanuatu : 32, 33, 36, 37, 125, 126, 127, 128, 135
 vapeur d'eau : 158, 159.

VARAN-S : 42, 43.

VAS : 152.

végétation marine : 59, 62, 63, 68.

Végétaux marins (projet) : 61, 62, 64, 66.

VEGMA, voir : Végétaux marins (projet).

vent : 36, 48, 49, 170, 179, 201, 204.

Vertical Atmospheric Sounder, voir : VAS.

vortex : 135, 142.

WOCE, voir : World Ocean Circulation Experiment.

World Ocean Circulation Experiment : 170.

ZEE, voir : Zone économique exclusive.

ZITC, voir : Zone intertropicale de convergence.

zone frontale : 36, 160, 173, 180, 184, 185, 201.

Zone intertropicale de convergence : 158, 160 170.

Zone économique exclusive : 5, 31, 32, 33, 37.

zooplancton : 182, 183, 184.

COMITÉ DE LECTURE

- M. le Prof. M.A. ALI, Université de Montréal (Canada).
M. le Prof. J. AUBOUIN, Université Pierre-et-Marie Curie, Paris (France).
M. le Prof. M. BACESCU, Musée Gr. Antipa, Bucarest (Roumanie).
Dr. A. BALLESTER, Instituto de ciencias del mar, Barcelona (Espagne).
M. le Prof. B. BATTAGLIA, Istituto di zoologia, anatomia comparata e genetica, Padova (Italie).
M. le Prof. G. BOILLOT, Station marine, Villefranche-sur-mer (France).
Dr. Q. BONE, Marine Laboratory, Plymouth (Grande-Bretagne).
M. le Prof. P. BOUGIS, Institut océanographique, Paris (France).
M. l'Ingénieur Général J. BOURGOIN, Service hydrographique et océanographique de la Marine, Paris (France).
Cdt. J.-Y. COUSTEAU, Fondation Cousteau, Paris (France).
M. J. DELORME, Paris (France).
M. le Prof. A. DISTECHE, Université de Liège (Belgique).
M. le Prof. F. DOUMENGE, Musée océanographique, Monaco (P^{té} de Monaco).
M. le Prof. P. DRACH, Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer (France).
M. le Prof. M. FONTAINE, Institut océanographique, Paris (France).
M. G. GRAU, Institut français du pétrole, Rueil-Malmaison (France).
M. le Prof. A. GUILCHER, Université de Bretagne occidentale, Brest (France).
M. le Prof. A. IVANOFF, Université Pierre-et-Marie Curie, Paris (France).
Dr. G. KULLENBERG, Commission océanographique intergouvernementale, Paris (France).
M. le Prof. H. LACOMBE, Muséum national d'histoire naturelle, Paris (France).
M. le Prof. L. LAUBIER, Institut océanographique, Paris (France).
M. le Prof. L. LEGENDRE, Université Laval, Québec (Canada).
M. le Prof. X. PICHON, Collège de France, Paris (France).
M. le Prof. C. LEVI, Muséum national d'histoire naturelle, Paris (France).
Dr. C. MAURIN, Bazoges-en-Pareds (France).
M. le Prof. J.-M. PERES, Station marine d'Endoume, Marseille (France).
M. le Prof. H. POSTMA, Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee, Texel (Pays-Bas).
M. le Prof. L. SALDANHA, Universidade de Lisboa (Portugal).
M. le Prof. E. SEIBOLD, Freiburg (Allemagne).
M. le Prof. J.-P. TRUCHOT, Université de Bordeaux I, Arcachon (France).
-

Publié avec le concours financier du
Gouvernement de la Principauté de Monaco

Printed in France

O.E.R.S.C.I. - Montpellier

ISBN 2-7260-0142-4