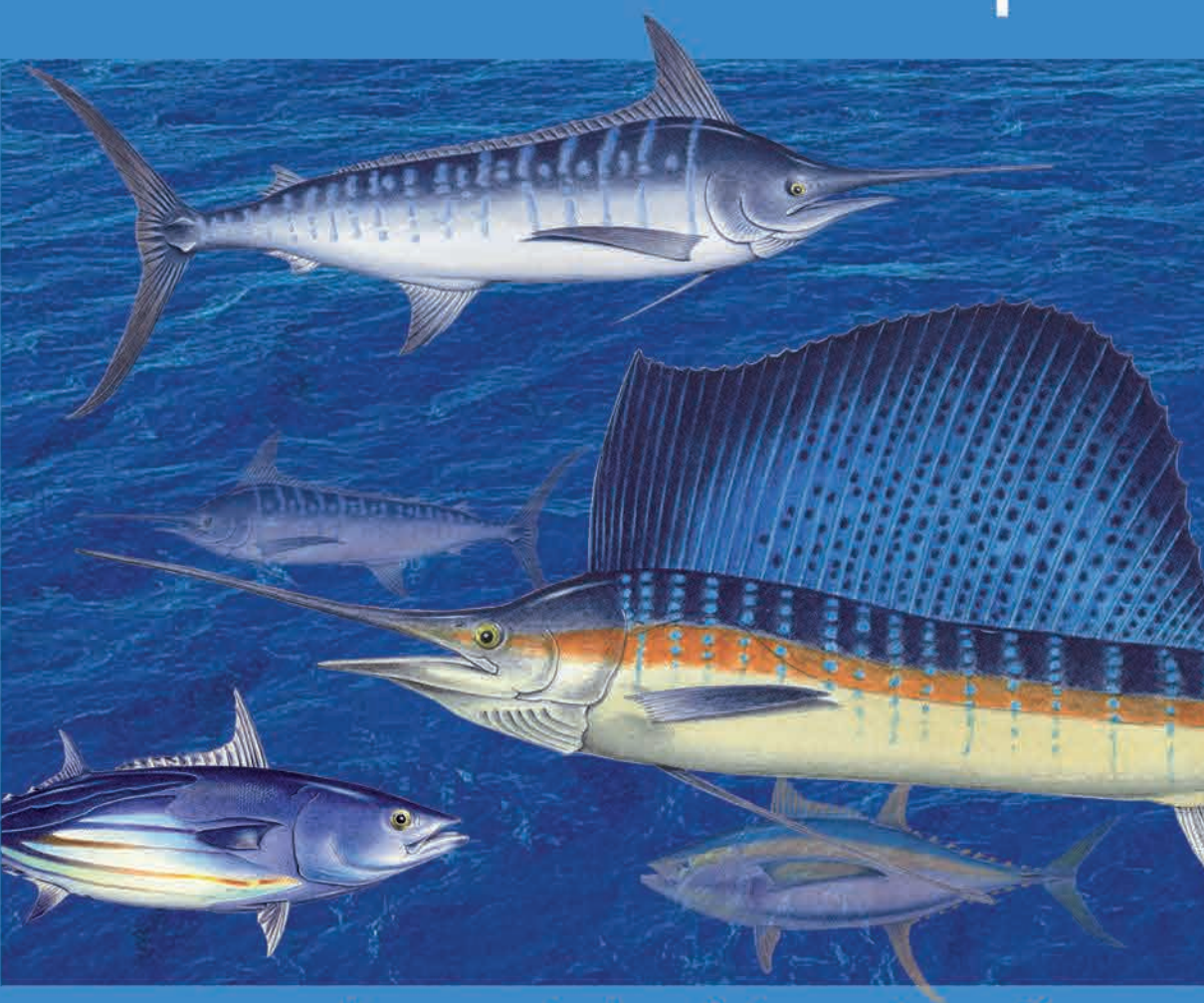


Éditeurs scientifiques

Michel Petit Frédéric Huynh

Halieutique et environnement océanique



**Le cas de la pêche palangrière
à l'espadon depuis l'île de la Réunion**

IRD
Éditions

Halieutique et environnement océanique

Le cas de la pêche palangrière à l'espadon
depuis l'île de la Réunion

Halieutique et environnement océanique

Le cas de la pêche palangrière
à l'espadon
depuis l'île de la Réunion

Éditeurs scientifiques
Michel PETIT, Frédéric HUYNH

IRD Éditions
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

PARIS, 2006

Préparation éditoriale, coordination, fabrication
Marie-Odile Charvet Richter

Mise en page
Aline Lugand – Gris Souris

Maquette de couverture
Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure
Pierre Lopez

Légende de la couverture

**Lavis de P. Opic. De bas en haut : *Thunnus albacares*,
Katsuwonus pelamis, *Istiophorus platypterus*, *Makaira mazara***

Crédits produits

Les données d'anomalie de surface de l'eau (SLA) ont été acquises par l'IRD dans le cadre d'un projet Principal Investigator Cnes/Nasa/IRD (PI Jason : Projet Pelops). Aussi toute diffusion de résultats obtenus à l'aide de ces mesures doit-elle faire l'objet d'un visa du PI de Pelops (Principal investigateur : Michel Petit, Michel.Petit@ird.fr).

Les données de couleur de l'eau ont été acquises par l'IRD dans le cadre d'un projet SeaWiFS. De même, toute diffusion de résultats obtenus à l'aide de ces mesures doit faire l'objet d'un visa du PI de ce projet (Principal investigateur : Michel Petit, Michel.Petit@ird.fr).

Quant aux données de SST ou de vorticité, mention sera simplement faite de la provenance et il devra être noté « Copyright <année> SEAS-Réunion/IRD ».

Remerciements

Les éditeurs tiennent à remercier vivement et sincèrement toutes les personnes et les organismes qui, par leur aide et leur contribution, ont assuré le succès de ce programme de recherche et de développement ainsi que la réalisation de cet ouvrage.

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alin s 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

  IRD, 2006

ISBN : 2-7099-1583-9

Sommaire

Préface	7
Partie I	
De l'océanographie spatiale du Sud-Ouest de l'océan Indien	9
Chapitre 1	
Des phénomènes physiques aux paramètres océanographiques	11
M. Desruisseaux, M. Petit, L. Gardel, A. Ramos, M. Slepoukha, E. Rivière, J. Coca, P. Malard, Y. Basson	
Chapitre 2	
Hydroclimat du Sud-Ouest de l'océan Indien et océanographie spatiale	39
D. Guyomard, M. Petit, M. Desruisseaux, J.-M. Stretta, L. Gardel	
Partie 2	
La pêche palangrière développée depuis l'île de la Réunion	67
Chapitre 1	
L'espadon, espèce cible de la pêche palangrière réunionnaise	69
D. Guyomard, F. Poisson, J.-M. Stretta	
Chapitre 2	
Synopsis de la pêche palangrière réunionnaise	79
D. Guyomard, F. Poisson, J.-M. Stretta	
Partie 3	
Analyse croisée des données environnementales océaniques et des captures palangrières	93
Chapitre 1	
De la statistique élémentaire à l'analyse de co-inertie	95
G. Constantin De Magny, M. Desruisseaux, M. Petit	
Chapitre 2	
Les modèles linéaires généralisés	119
G. Constantin De Magny, M. Desruisseaux, M. Petit	
Partie 4	
Approche par simulation de la dynamique de la capturabilité de l'espadon par la palangre de surface	131
Chapitre 1	
La modélisation dans la compréhension des déplacements de grands pélagiques exploités par la pêche	133
D. Guyomard, J.-C. Soulié, M. Desruisseaux, J.-M. Stretta, M. Petit	

Chapitre 2	
Un applicatif de modélisation individus-centrée fondé sur une architecture de type multi-agents (MUFINS)	155
J.-C. Soulié, D. Guyomard, M. Desruisseaux, J.-M. Stretta, M. Petit	
Chapitre 3	
Essai d'utilisation des réseaux de neurones	171
M. Desruisseaux, M. Petit, G. Constantin De Magny, F. Huynh	
Conclusion	181
M. Petit, F. Huynh	
Annexe	
SEASview : un système d'information océanique adapté à la pêche palangrière réunionnaise	185
1 ^{re} partie	
Description des produits d'environnement océanique fournis en entrée	187
L. Gardel, M. Desruisseaux, M. Petit, A. Ramos, M. Slepoukha, E. Rivière, J. Coca, Y. Basson	
2 ^e partie	
Un logiciel d'extraction des données environnementales	195
M. Desruisseaux, M. Petit, L. Gardel	
Bibliographie	231

Préface

Quelle que soit l'espèce visée, du thon à l'anchois en passant par l'espadon, les professionnels de la pêche pélagique n'ont de cesse lors de leurs marées, d'essayer de diminuer les coûts du poste recherche du poisson. Ce fait est encore plus crucial lorsqu'une nouvelle pêcherie s'implante au sens géographique et (ou) économique : les surfaces à prospecter sont immenses et les structures du marché ne sont pas stabilisées. De ce fait, les marges d'erreur sur la stratégie et la tactique de pêche sont des plus étroites. La pêcherie palangrière à l'espadon qui s'est développée au cours de la dernière décennie se situe dans ce double cas.

En observant en permanence les océans, les satellites fournissent des données de plus en plus pertinentes et fiables pour décrire le « paysage océanique » grâce d'une part à des capteurs de plus en plus efficaces et, de l'autre, à des méthodes de traitement de plus en plus performantes. Ce paysage, ainsi affiné en temps quasi réel, est très « parlant » pour les pêcheurs qui peuvent alors se diriger plus directement sur les concentrations de poissons et, par là, réduire significativement le poste prospection de leur compte d'exploitation.

Ce même paysage, porté à la connaissance des gestionnaires publics des pêcheries et des spécialistes de la dynamique des populations de poisson, est une information incontournable pour établir et parfaire les règlements (TAC, quotas, etc.) nécessaires à une gestion durable de la ressource. Il ne s'agit plus désormais, faute d'informations pertinentes réelles, de mettre en jachère des déserts bleus ou d'autoriser des pressions halieutiques fortes sur des régions en limite d'exploitation intensive...

Les ichtyologistes, en particulier les comportementalistes, sont aussi des plus intéressés par la connaissance du paysage océanique : elle leur permet de comprendre les déplacements des bancs de poissons à différentes échelles spatio-temporelles et aussi d'en déduire certains paramètres, mal connus mais nécessaires aux dynamiciens des populations marines. Par manque d'information spatio-temporelle solide, les chercheurs sont trop souvent contraints, dans leurs modèles, à simplifier le milieu océanique en une homogénéité trop éloignée de la réalité.

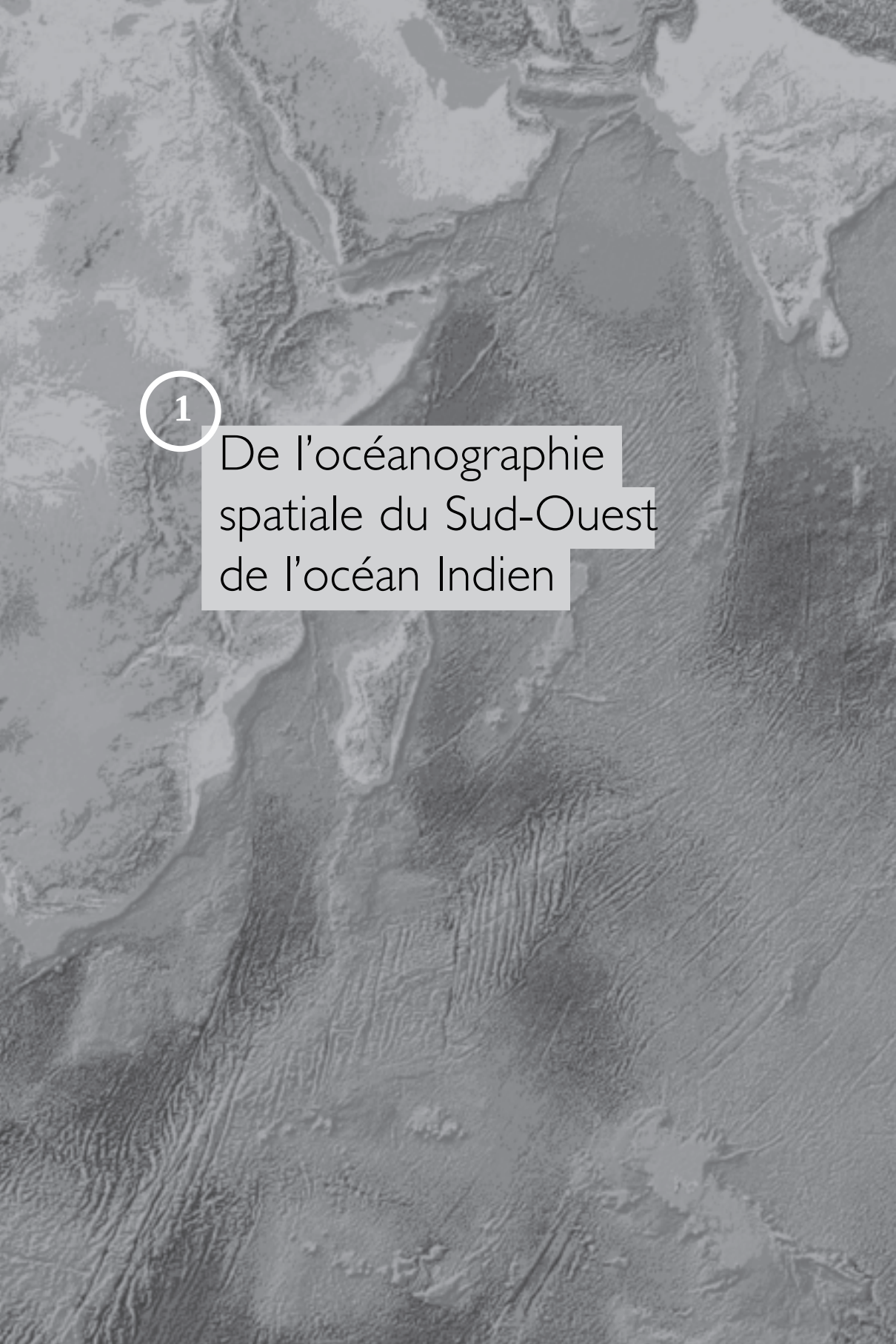
Ce triple intérêt – du professionnel, du gestionnaire et du scientifique – porté aux produits issus des données satellitaires avait déjà été identifié lors du projet thonier régional (PTR, phase II) de la Commission de l'océan Indien (COI). Le programme qui en avait résulté, notamment dans le cadre réunionnais du Centre d'appui national (CAN-Réunion, 1993-1997) avait abouti à une réussite dans ces trois aspects. En particulier, la fourniture régulière de produits issus de la télédétection spatiale aux professionnels avait participé à diminuer le coût d'exploitation des unités mais aussi à mieux répartir les captures sur l'année, contribution loin d'être négligeable en matière de stabilité économique.

Lors du montage du « Projet palangre Réunion » (PPR), il est apparu évident que la recherche et l'appui dans ce domaine soient poursuivis. À ces fins, début 2000, l'Ifremer en a confié¹ à l'IRD l'un des volets de recherche (*Optimisation de la pêche palangrière par l'étude des relations entre distribution de la ressource et conditions océanographiques*) défini dans cette optique et organisé autour de trois axes (1) *l'acquisition, le traitement et le stockage des données d'environnement (produits satellitaires)*, (2) *la mise en forme des données d'abondance* et (3) *l'analyse croisée de ces données et l'élaboration de produits dérivés*.

Ce travail a été réalisé en un an et demi et, suite à la demande des acteurs professionnels de la pêche palangrière en extension dans les Dom-Tom et les pays insulaires en développement, il nous a paru judicieux d'en regrouper les principaux résultats dans un ouvrage qui se veut didactique et pratique, et qui vise un public large intéressé par le développement durable de la pêche palangrière et les moyens d'y parvenir. Tout en conservant précision et rigueur scientifique, l'ambition de cet ouvrage est d'être accessible au lecteur sans formation spécialisée dans les domaines thématiques (halieutique) ou technologiques (télédétection, analyse de données). Pour cela, nous avons consacré une partie conséquente de cet ouvrage à la synthèse des connaissances en océanographie spatiale appliquée à la pêche palangrière dans l'océan Indien comme exemple ainsi qu'aux nouvelles méthodes d'analyse du croisement de données de pêche et d'environnement océanique. Quant aux résultats proprement dits du programme, la consigne donnée aux auteurs était avant tout de ne rien cacher des difficultés et, surtout de ne pas faire de « cosmétique » : tous les aspects, positifs comme insuffisants du programme, se devaient d'être présentés et analysés.

Nous espérons que les explications, informations et résultats donnés ici sont suffisamment complets afin que le lecteur puisse se faire sa propre opinion sur les avantages et les limites des produits issus du spatial et des nouvelles technologies associées.

1. Contrat-cadre n° 99/1213381, signé le 28 février 2000.

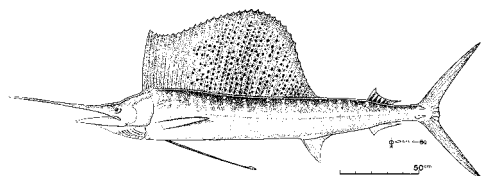
A grayscale bathymetric map of the Indian Ocean, showing the African continent to the west, the Australian continent to the south, and the Indonesian archipelago to the east. The map highlights various oceanographic features such as the East African Rift, the Southeast Indian Ridge, and the Australian Plate. The number '1' is enclosed in a white circle on the left side of the map.

1

De l'océanographie
spatiale du Sud-Ouest
de l'océan Indien

Des phénomènes physiques aux paramètres océanographiques

MARTIN DESRUISSEAUX, MICHEL PETIT,
LAURE GARDEL, ANTONIO RAMOS,
MICHEL SLEPOUKHA, EMMANUEL RIVIÈRE,
JOSEP COCA, PIERRE MALARD, YVETTE BASSON



Scomberus albigatus (Lacépède, 1804)

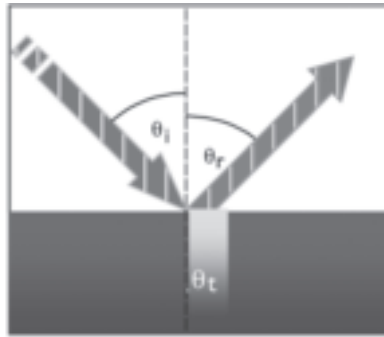
© P. Opic

La télédétection utilise les propriétés d'émission et (ou) de réflexion des rayonnements. Ces rayonnements, ondes électromagnétiques, transportent de l'énergie et se propagent sans altération dans le vide. Dans certains milieux, ces ondes peuvent être plus ou moins modifiées. Quand cette modification peut être reliée à des propriétés de l'objet d'étude, le rayonnement devient alors un support d'information.

Pour mesurer les rayonnements, sont utilisés des capteurs, instruments sensibles à certaines longueurs d'onde qui peuvent être de deux types : passif ou actif. Les **capteurs passifs** mesurent les ondes électromagnétiques naturelles, c'est-à-dire dont la source est le Soleil, qu'elles soient ou non modifiées par la Terre et son atmosphère. La présence de l'atmosphère limite la réception de l'énergie électromagnétique par les capteurs satellitaires au sein de certaines « fenêtres spectrales » : visible – proche infrarouge, infrarouge thermique, micro-ondes, etc. À partir des données acquises par ce type de capteurs peuvent être déduites notamment la production biologique, la température de surface, la couverture nuageuse.

Les **capteurs actifs**, eux, envoient des pulses d'ondes radar et analysent le signal réfléchi. La source est donc artificielle et l'on en contrôle la longueur d'onde et la polarisation. De ce signal retour, peuvent être calculés, entre autres, la hauteur des vagues, la force d'entraînement du vent, la vorticité de la couche de surface et les courants géostrophiques.

L'eau est le milieu qui nous intéresse ici. Lorsqu'une onde électromagnétique éclaire la surface de l'océan, une partie du rayonnement est réfléchi et une



▽ Fig. 1

Angles de réflexion (θ_r) et de transmission (θ_t) d'un rayonnement incident.

partie est transmise dans l'eau (fig. 1). La quantité d'énergie réfléchie, ainsi que les angles de réflexion et de transmission (θ_r et θ_t), dépendent de deux propriétés capitales en électromagnétisme : la **conductivité** et la **constante diélectrique**. Dans l'eau de mer, ces deux dernières propriétés dépendent de la fréquence de l'onde électromagnétique ainsi que de la température de l'eau, de sa salinité et de sa composition : composants organiques, chlorophylle-*a*, par exemple et (ou) inorganiques, comme les sédiments. Le signal retourné est donc fonction des caractéristiques optiques de l'eau, elles-mêmes influencées par ses propriétés inhérentes.

La couleur de l'eau

Dans le visible, les longueurs d'ondes assez petites vont pénétrer dans l'eau et être absorbées progressivement, jusqu'à une certaine profondeur où elles seront presque complètement absorbées. Dans le spectre visible, le rouge sera absorbé plus rapidement que le bleu. La profondeur d'absorption totale de la lumière sera fonction de la composition de l'eau. Les eaux naturelles, douces et salées, contiennent un mélange de matières dissoutes et particulières optiquement actives, variables en nature et variables en concentration : en conséquence, leurs propriétés optiques sont très changeantes dans l'espace et le temps.

Comportement des constituants de l'eau de mer dans le visible

LES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS

On distingue deux catégories de matière dans l'eau : les matières **dissoutes** et **particulaires**. De manière arbitraire, on considère comme dissoute la matière dont la taille des éléments est inférieure à $0,47 \mu\text{m}$. La matière organique dissoute

comprend les acides humiques et fulviques issus de la décomposition de la matière végétale. Elle est aussi appelée substance jaune (*Gelbstoff* en allemand). Dans le cas des eaux du large, il s'agit de la décomposition du zooplancton et du phytoplancton à la fin des blooms.

En pleine mer, la matière particulaire ou matière en suspension (MES) est aussi constituée du zooplancton et du phytoplancton vivants. Les concentrations (de l'ordre de $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$) peuvent être très variables, en particulier au sein des blooms qui nous intéressent directement dans le cas des espèces pélagiques : ces blooms constituent l'étage nourriture des proies favorites de ces espèces. Près des rivages, il peut s'agir de sable ou de vase dont la concentration varie avec l'agitation de la mer et la profondeur. À proximité des agglomérations, il peut s'agir de pollution (concentrations de quelques mg.m^{-3} à plusieurs centaines de mg.m^{-3}). Enfin dans les estuaires, elle correspond à la contribution continentale à la sédimentation océanique et est apportée par les rivières (jusqu'à plusieurs g.m^{-3} lors de la remise en suspension des sédiments, sous l'effet, par exemple, de la marée).

Les interactions avec le rayonnement visible

L'intensité de la lumière dans l'eau décroît exponentiellement avec la profondeur. Cette atténuation de la lumière a principalement deux origines : l'absorption et la diffusion.

- L'**absorption** est la transformation de l'énergie électromagnétique en une autre forme d'énergie par interaction avec la matière. L'énergie du rayonnement est principalement transformée en chaleur ou stockée dans les liaisons chimiques des molécules produites par la photosynthèse. La lumière absorbée peut parfois réapparaître sous une autre longueur d'onde, comme dans le cas de la fluorescence.
- La **diffusion** (*scattering* en anglais) est le changement de direction des faisceaux de rayonnement, qui sont déviés suite à des réflexions sur des particules en suspension. La diffusion ne produit pas de transformation d'énergie ni de longueur d'onde. Elle est pratiquement indépendante de la longueur d'onde¹.

Contrairement à la diffusion, l'absorption dépend de la longueur d'onde. L'eau claire absorbe davantage dans les grandes longueurs d'ondes du spectre visible (lumière rouge) que dans les courtes (lumière bleue). L'absorption du rouge donne à l'eau sa coloration bleue typique des eaux tropicales. Ces eaux « pures » ont une production biologique relativement faible.

Les régions plus productives des océans sont plus riches en matières dissoutes et particulaires. La substance jaune est présente en solution dans l'eau et absorbe fortement dans les courtes longueurs d'ondes du spectre visible (bleu) et peu dans les longueurs d'onde plus grandes (jaune-rouge). Il reste entre les deux la couleur verte que l'on observe typiquement dans les eaux productives des latitudes moyennes.

1. La diffusion ne doit pas être confondue avec la dispersion, qui dévie aussi les rayons lumineux mais par d'autres processus (diffraction ou réfraction). Contrairement à la diffusion, la dispersion dépend des longueurs d'ondes. Elle est responsable par exemple de la séparation des couleurs dans un prisme.

La coloration verte des eaux productives vient aussi de la matière particulaire, en particulier du phytoplancton et de ses pigments chlorophylliens indispensables à la photosynthèse. En général, c'est la chlorophylle-*a* qui est le pigment majoritaire. Lorsque les conditions de lumière et de fortes concentrations de nutriments sont réunies, la biomasse phytoplanctonique est une fonction croissante de cette coloration.

L'intensité lumineuse décroît exponentiellement avec la profondeur. Ce qu'on appelle alors la profondeur d'atténuation ou profondeur d'intégration dépend de la composition de la masse d'eau (concentration des différents constituants), en plus de dépendre des longueurs d'onde comme on l'a vu ci-dessus.

Deux cas de figures sont envisagés pour le calcul de la couleur de l'eau : les eaux du « Cas 1 », où la couleur de l'eau est essentiellement liée à la présence du phytoplancton et de ses dérivés et les eaux du « Cas 2 », qui sont influencées par la matière organique particulaire et dissoute. Les premières correspondent aux eaux du large ; les secondes aux eaux côtières et estuariennes.

La production primaire

La production primaire est variable dans le temps et l'espace, en fonction des processus physiques, chimiques, biologiques et surtout de leur synchronisation. Sous les tropiques, la quantité de lumière est suffisante toute l'année. La production primaire dépend alors de la disponibilité des nutriments. Le vent devient alors une donnée clé puisque, sous son action, les eaux froides et riches en nutriments remontent en surface. Dans ces régions tropicales, où la nutricline est profonde (stratification permanente), la production primaire nouvelle peut se faire à de plus grandes profondeurs et échapper partiellement à la détection par satellite.

La production primaire est cruciale dans les cycles biochimiques globaux. Elle nous intéresse ici parce qu'elle représente le premier maillon d'une chaîne trophique dont le dernier maillon est l'espèce ciblée par les pêcheurs.

Les capteurs

Le premier capteur à avoir permis d'accéder à la couleur de l'eau est CZCS² embarqué sur Nimbus-7. Arrêté prématurément en 1987, il a pu malgré tout collecter les données suffisantes pour servir de référence dans la résolution du problème ardu de la calibration de ce type de capteur.

En août 1997, la plate-forme SEASTAR (fig. 2) est mise en orbite avec à son bord le capteur SeaWiFS³. La résolution spatiale des données au nadir⁴ est de 1 km et la fauchée du capteur est de 2 800 km. Ses huit canaux du vert au proche infra-rouge analysent avec une grande précision les composants de l'eau et leurs concentrations. Le canal 1 de SeaWiFS est utilisé pour distinguer les

2. Coastal Zone Color Scanner.

3. Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor.

4. « Au nadir » signifie à la verticale du passage du satellite.



▽ Fig. 2
Vue d'artiste du satellite SEASTAR en orbite.
(Source : SeaWiFS's Project)

substances jaunes ; les canaux 2, 3, 4 pour calculer la concentration en pigments chlorophylliens ; les canaux 6, 7, 8 pour évaluer la turbidité et corriger les effets atmosphériques.

Une double calibration du capteur est faite régulièrement en direction du soleil et en direction de la Lune, affinant l'ajustement des luminances. Une autre particularité de la plate-forme est de permettre une rapide inclinaison ($\pm 20^\circ$) le long de la trace du satellite. Ce dépointage évite que le capteur soit aveuglé par le reflet spéculaire. L'inconvénient est la perte d'acquisition sur quelques dizaines de milles de la zone intertropicale pendant cette manœuvre de quelques secondes. Le dernier-né de cette génération est le capteur expérimental MODIS⁵ sur le premier satellite EOS⁶, qui a été lancé en décembre 1999. Ses trente-six bandes spectrales réparties entre 0,4 et 14,4 μm permettent aussi bien le calcul de la température de la surface, avec une résolution identique à celle des capteurs AVHRR⁷ (cf. *infra*), que celui des concentrations en chlorophylle-*a* pour les eaux du large entre 0,05 et 50 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Calcul de la concentration en chlorophylle-*a* (Chl-*a*)

Le calcul ne concerne ici que les eaux du large (dites du « Cas I »). Dans un premier temps, on va chercher à relier les quantités mesurées par le satellite à des quantités mesurables facilement sur le terrain. En l'occurrence, le satellite mesure une luminance. Cette grandeur dépend des propriétés du milieu et de l'éclairement ; elle peut s'exprimer en fonction de la réflectance. La réflectance

5. Moderate resolution Imaging Spectrometer.

6. Earth Observation Satellite.

7. Advanced Very High Resolution Radiometer.

est ce qu'on nomme une propriété optique apparente (en anglais, *Apparent Optical Properties* ou AOP).

Les AOP sont définies en opposition avec les propriétés optiques inhérentes (en anglais *Inherent Optical Properties* ou IOP). Les IOP sont les propriétés optiques d'une masse d'eau qui dépendent uniquement de sa composition et non pas des conditions d'éclairement. Par exemple, les coefficients d'absorption ou de diffusion spécifient ces propriétés, mais d'autres grandeurs peuvent caractériser les IOP comme l'indice de réfraction.

Localement, l'éclairement varie très rapidement (présence de nuages, mais aussi selon l'angle d'incidence et selon l'agitation de la surface de la mer) et afin de s'affranchir de cette contrainte, l'utilisateur va faire intervenir les propriétés optiques inhérentes de la masse d'eau. La luminance mesurée par le satellite s'exprime en fonction de nombreux paramètres : l'éclairement extra-atmosphérique (juste au-dessus de la surface), mais aussi la réflectance sous la surface, contenant l'information de la couleur de l'eau.

$$L_{wn} = F_0 \frac{(1-\rho)(1-\rho')R}{n^2(1-rR)Q}$$

où	L_{wn}	luminance réfléchie, mesurée par le satellite
	F_0	éclairement extra-atmosphérique
	n	index de réfraction de l'eau de mer
	R	réflectance issue du transfert radiatif, fonction du rayonnement incident et des IOP
	ρ	réflectance de Fresnel à incidence normale
	ρ'	réflectance de Fresnel pour le ciel et le soleil
	r	réflectance air-eau
	Q	constante, qui lie l'éclairement ascendant sous la surface à la luminance ascendante sous la surface

▽ Équation 1

Luminance mesurée par le satellite.

Dans cette équation, le rapport $(1-\rho)(1-\rho')/n^2(1-rR)$ prend en compte les processus d'interface entre deux milieux d'indices de réfraction différents. Il varie peu en fonction des longueurs d'onde et vaut 0,545.

De plus, la réflectance issue du transfert radiatif peut aussi s'exprimer en fonction des IOP que sont les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion.

$$R(\lambda) = G(\mu_0, \lambda) \cdot \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}$$

où	$G(\mu_0, \lambda)$	est le champ de lumière descendante
	$a(\lambda)$	est le coefficient d'absorption
	$b_b(\lambda)$	est le coefficient de rétrodiffusion

▽ Équation 2

Réflectance issue du transfert radiatif.

Les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion dépendent des concentrations des différents constituants optiquement actifs et de coefficients d'absorption et de rétrodiffusion spécifiques à chaque constituant par unité de concentration. Ces derniers sont calculés sur la base de mesures de terrain ou de laboratoire.

La technique la plus utilisée pour calculer la concentration de chlorophylle-*a* ou d'autres constituants est le rapport des luminances. On choisit une bande dans laquelle la luminance est très sensible et on la normalise en choisissant de la rapporter à une luminance dans une longueur d'onde peu sensible. La chlorophylle-*a* absorbe fortement dans le bleu, sa réflectance est faible et ce quelle que soit la concentration en chlorophylle. Dans le vert, le pigment absorbe faiblement et réfléchit fortement. Le rapport des luminances, ici $L_{\text{bleu}}/L_{\text{vert}}$, permettra de s'affranchir des effets de l'environnement ambiant en particulier, celui du rayonnement incident et de calculer la concentration en chlorophylle-*a*.

Sources d'erreur

Il faut en permanence avoir à l'esprit l'ensemble des sources d'erreur possibles afin d'exploiter au mieux les images.

Dans les longueurs d'onde du visible, la luminance mesurée par le capteur est perturbée en grande partie lors de son passage dans l'atmosphère. Les particules (eau, aérosols) absorbent fortement le rayonnement et diffusent aussi le rayonnement, ce qui fait que l'étape des corrections atmosphériques est primordiale.

Dans le cas des eaux du large, la couleur de l'eau dépend essentiellement de la concentration chlorophyllienne. En revanche, pour les eaux du « Cas 2 », c'est-à-dire les eaux côtières, l'interprétation des mesures radiométriques est plus complexe en raison de la présence simultanée de la matière organique dissoute, des particules dissoutes et des pigments chlorophylliens. La quantification de ces trois constituants demande de nombreuses données de terrain et généralement on obtient des modèles locaux, assez peu génériques.

Concernant la combinaison des canaux, il est nécessaire d'effectuer le choix optimal pour le rapport des luminances intervenant dans l'algorithme.

Enfin reste un problème important, qui est celui de la validation par des données du terrain. Quand les mesures sur le terrain se font avec un spectro-radiomètre ou un radiomètre juste au-dessus de l'eau, sur une surface de l'ordre du centimètre, elles sont très influencées par les conditions d'éclairement (brumes atmosphériques, inclinaison de la vague, présence d'écume qui sature l'instrument...) et ces conditions sont d'autant plus variables dans le temps que l'on observe une zone très petite. Il faut donc réaliser de nombreuses mesures et parfois effectuer un choix dans ses mesures. Comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre, les ondes du visible pénètrent dans la colonne d'eau : on parle de profondeur d'« intégration ». Cette valeur dépend de la composition de l'eau, elle varie donc selon les endroits.

Les mesures de terrain s'avèrent tout à fait indispensables pour obtenir cette information, essentielle pour affiner l'interprétation des images satellitaires. C'est une règle générale des techniques de télédétection.

La température de l'eau

Capteurs et mesure

La mesure de la température peut se faire par l'intermédiaire de deux types de capteurs radicalement différents. Les uns travaillent dans la fenêtre spectrale des micro-ondes (i.e. hyperfréquences), les autres dans celle de l'infrarouge thermique. L'intérêt principal que peuvent avoir les premiers par rapport aux seconds est de ne pas être gêné par le couvert nuageux. Les capteurs *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* sur les plates-formes Nimbus-7 et SEASAT, puis *Special Sensor Microwave/Imager* sur deux satellites météorologiques américains (DMSP), ont pu exploiter cet avantage. Mais la difficulté du traitement nécessaire et le coût de la construction de ces instruments, face à des résultats médiocres, les ont cantonnés plus dans l'expérimental que dans l'opérationnel. Le bruitage du signal sur des capteurs hyperfréquences est considérable et reste difficile à supprimer par le traitement dans cette région du spectre sans altérer la partie du signal utile à la mesure de la température.

Les capteurs les plus opérationnels sont donc les radiomètres à infrarouge thermique, c'est-à-dire entre 8 et 14 μm : par exemple, AVHRR⁷ sur les satellites NOAA⁸ ou le radiomètre embarqué sur le satellite géostationnaire Météosat. Le programme opérationnel des satellites NOAA a débuté dans les années 1970 et il est assuré de se poursuivre au moins jusqu'en 2011. Actuellement, sont en orbite les plates-formes NOAA-12, 14, 15, 16, 17, 18. NOAA-12 est actif depuis septembre 1991 et commence à présenter des signes de vieillissement ; NOAA-14, lancé en décembre 1994, est pleinement opérationnel ; le capteur AVHRR de NOAA-15 connaît des problèmes quasiment depuis son lancement ; enfin NOAA-18 lancé récemment est en cours de calibration et de test. Les principaux atouts du capteur AVHRR des plates-formes NOAA, outre sa constance sur plus de vingt ans, sont sa haute résolution temporelle (répétitivité) et spatiale (1,1 km au nadir). Les données ont aussi été très utilisées en raison de leur faible coût et du possible accès en temps réel par l'intermédiaire d'une antenne HRPT⁹ comme celle de la station SEAS¹⁰ de l'IRD à la Réunion.

Le comportement de l'eau dans l'infrarouge thermique fait appel à la notion de corps noir. Un corps noir est un corps théorique qui, à une température donnée, absorbe la totalité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit et qui le réémet en totalité. Un corps gris transmet partiellement le rayonnement absorbé. L'émissivité est le rapport de l'énergie émise par un corps gris par celle qu'émettrait ce même corps s'il se comportait comme un corps noir. Dans l'infrarouge thermique, l'émissivité de l'eau est proche de 1 : l'eau se comporte comme un corps noir.

8. National Oceanographic and Atmospheric Administration.

9. High Resolution Picture Transmission.

10. Surveillance de l'environnement assistée par satellite.

Les corps reçoivent de l'énergie de la part de leur environnement (par exemple du soleil), un rayonnement qu'ils absorbent plus ou moins. La fraction de rayonnement absorbée modifie l'énergie interne du corps. Cette énergie peut être, par exemple, réémise sous forme de rayonnement dans une autre longueur d'onde. Ainsi, le corps joue alors lui-même le rôle de source en transformant une partie de l'énergie thermique en énergie radiative, donc en rayonnement électromagnétique.

La luminance émise par la surface de la mer puis enregistrée par le capteur est convertie en température de brillance ou température apparente radiative, liée par l'émissivité à la température réelle de surface de l'océan.

Calcul de la température de surface de la mer (SST¹¹)

La luminance enregistrée par le capteur traverse l'atmosphère où le rayonnement peut être plus ou moins fortement perturbé. Principalement, la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère est la source de ces perturbations car elle absorbe une partie du rayonnement. La température de brillance et la température absolue sont donc différentes de quelques degrés. Les corrections à apporter peuvent provenir soit de modèles analytiques qui demandent alors de nombreux intrants comme le profil atmosphérique de la température et de la vapeur d'eau, soit des modèles empiriques. Dans le deuxième cas, les seuls besoins sont de nombreuses mesures *in situ* de bonne qualité.

Les propriétés de la vapeur d'eau dans l'infrarouge ont été longuement étudiées, notamment la transmission différentielle selon la bande spectrale. La méthode appelée *multi-window* utilise cette propriété pour réduire l'effet perturbateur du contenu atmosphérique, simplement en combinant linéairement les mesures de température de brillance faites dans plusieurs canaux de l'infrarouge thermique. La méthode *split window* est une application particulière de *multi-window* formalisée aux canaux 4 et 5 du capteur AVHRR. Cette dernière est très largement utilisée.

Pour les images de la station SEAS, nous avons choisi et adapté localement la méthode *split window*. L'algorithme correspondant, *Multi-Channel Sea Surface Temperature* (MCSST), correspond à une fonction linéaire des températures de brillance qui prend en compte l'angle de vue du satellite sur le pixel calculé.

$$T_{SST} = A_0 + A_1(T_4) + A_2(T_4 - T_5) + A_3(\sec \theta - 1) + A_4(\sec \theta - 1)$$

Rappel : $\sec \theta = \frac{1}{\cos \theta}$

où $\left\{ \begin{array}{l} T_4 \text{ et } T_5 \text{ sont les températures de brillance des canaux 4 et 5} \\ \text{respectivement} \\ \theta \text{ est l'angle zénithal du satellite} \end{array} \right.$

▽ Équation 3

Température de surface en fonction des températures de brillance.

Les coefficients A_0 à A_4 sont obtenus par une analyse en régression entre un jeu de données satellitaires (températures de brillance), d'une part et un jeu de données *in situ* de qualité, d'autre part. Outre la prise de la mesure en mer elle-même, on doit veiller à ce que les mesures soient faites dans des conditions d'agitation moyenne (force 3), d'absence de brume, dans des régions thermiquement stables (pas de gradients), en deuxième partie de nuit (pour éviter l'effet du réchauffement diurne) et dans des régions de différentes latitude. Pour résumer, il est nécessaire de prendre des points de mesure là où la probabilité de variabilité de la température est faible et d'avoir la plus grande simultanéité entre les mesures en mer et les passages des satellites. Bien évidemment, le jeu de données *in situ* servant à la **calibration** ne doit pas servir à la **validation** de l'algorithme.

Sources d'erreur

La calibration des mesures demande une certaine gymnastique intellectuelle : on compare une mesure ponctuelle réalisée par une sonde dans les premiers décimètres de la surface (mesure volumique) avec une mesure intégrée sur une surface de plus de 1 km² sur les premiers micromètres de la colonne d'eau. La mesure correspond en fait à l'échange de chaleur à l'interface de l'eau et de l'air. Donc si les couches inférieures sont homogènes, la mesure sera significative (présence de vent ou mesure en absence de réchauffement solaire superficiel). En revanche, si les couches inférieures sont très stratifiées, la mesure surfacique pourra être très différente de la mesure volumique. Les mesures de nuit ou en présence de vent moyen seront donc plus significatives. Si le vent est très fort, on assiste au phénomène inverse, moins marqué, de sous-estimation de la température de la mer à cause des embruns.

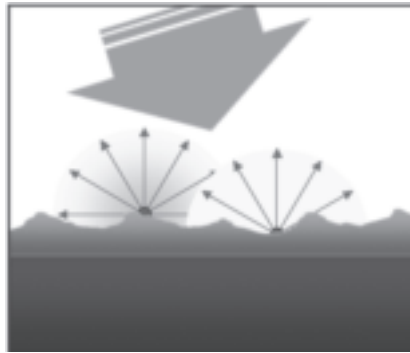
Un autre type d'erreur provient de l'angle de visée considérable du capteur. Ces capteurs ont l'avantage d'avoir une fauchée de plusieurs milliers de kilomètres (on emploie souvent le terme de données à **large champ**), ce qui aide à augmenter la répétitivité du satellite. Mais les luminances des pixels éloignés du nadir auront traversé une couche atmosphérique plus grande et seront d'autant plus perturbées. C'est la raison pour laquelle l'équation 3 introduit une dépendance avec l'angle zénithal. De plus, ces mêmes pixels couvriront une surface plus importante (jusqu'à 5 fois plus que le pixel au nadir). Pour corriger ce problème, nous avons regroupé les pixels géoréférencés en leur centre dans des « super pixels » de une minute d'angle en longitude et latitude, soit environ un mille carré à l'équateur.

La troisième source d'erreur est due aux nuages qui contaminent fortement les acquisitions dans ces régions tropicales. Un masque nuage complexe et original est appliqué afin de cacher les luminances qui semblent trop faibles pour correspondre à des températures de surface de la mer. Le seuil choisi est sciemment assez faible afin de ne pas passer à côté d'un événement océanique. La conséquence directe est qu'il faut être attentif lorsqu'il y a de faibles températures et surtout ne jamais isoler une image de celles qui précèdent et de celles qui suivent.

Le vent à la surface de l'eau et la vorticité

Comportement de la surface marine dans les hyperfréquences

Les océans sont beaucoup plus opaques aux fréquences des ondes radars qu'aux fréquences de la lumière visible. La réalité est encore plus complexe du fait que le rayonnement n'est généralement pas réfléchi dans une seule direction, mais plutôt diffusé dans une multitude de directions qui dépendent de l'angle d'incidence de l'onde (θ_i) ainsi que de l'état de la mer (fig. 3).

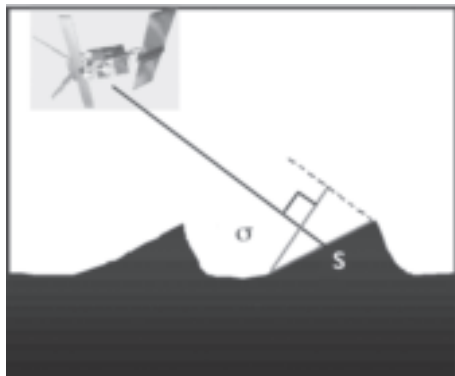


▽ Fig. 3
Diffusion d'un rayonnement incident.

Sur la surface d'une mer agitée (« rugueuse »), chaque point éclairé peut diffuser le rayonnement incident dans une sphère, qu'on appelle une ondelette de Huygen. La figure 3 en illustre deux. La diffusion du rayonnement dépend de la section efficace normalisée (*normalized scattering cross section*), notée σ^0 . Considérons la surface de la mer non comme une surface, mais comme une succession de petites surfaces les unes accolées aux autres, d'orientation et de taille différentes (fig. 3). Le capteur, selon sa position par rapport à la petite surface, peut « voir » une surface plus petite, projection de la surface S observée dans un plan perpendiculaire à la visée du capteur (fig. 4). La section efficace σ est la projection de la surface S que le capteur voit et la section efficace normalisée σ^0 est le rapport de cette surface sur la surface réelle.

D'une part, cette quantité σ^0 dépend de l'angle d'incidence, de l'angle de réflexion et de la polarisation du rayonnement. D'autre part, elle varie à chaque point de la surface de la mer en raison des vagues.

À une certaine distance de la surface, le rayonnement observé peut être considéré comme la somme du rayonnement émis par toutes les ondelettes de Huygen. Ces rayonnements dépendent entre autres de l'orientation géométrique locale



▽ Fig. 4
Illustration d'une section efficace.

de la surface de la mer¹². Intuitivement, les pixels avec un σ^0 élevé paraissent plus brillants, mais peuvent correspondre à des situations très différentes : au nadir sur une mer calme, ou à un angle de visée très incliné et perpendiculaire aux vagues sur une mer agitée. Grâce aux variations locales de σ^0 , on arrive à estimer la direction du vent. Une compréhension théorique de σ^0 est donc fondamentale, mais son analyse est longue, ardue et aboutit à des résultats imparfaits. Ce problème est encore un domaine de recherche actif.

Principe des mesures de la vitesse et de la direction du vent

La section efficace normalisée dépend de la hauteur et de la pente des vagues, qui dépendent elles-mêmes de la force du vent. Des mesures empiriques suggèrent que σ^0 est proportionnelle à la vitesse du vent élevée à une certaine puissance $\eta(\theta_i)$:

$$\sigma^0(\theta_i, u) = au^{\eta(\theta_i)}$$

où	a	est une constante
	u	est la vitesse du vent
	$\eta(\theta_i)$	est un exposant qui dépend de l'angle d'incidence

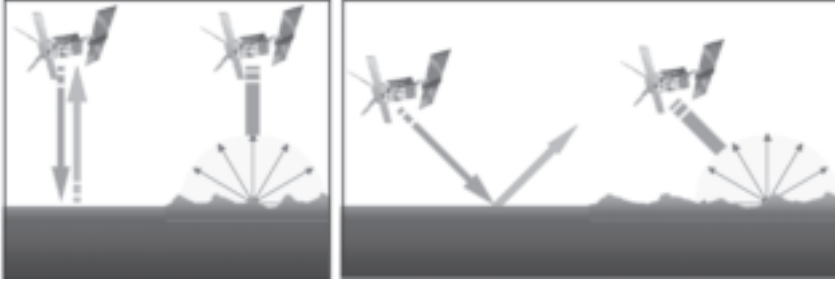
▽ Équation 4

Relation empirique entre la section efficace normalisée (σ^0) et la vitesse du vent (u).

On peut comprendre intuitivement que l'exposant dépend de l'angle d'incidence en comparant les encadrés droit et gauche de la figure 5. Lorsqu'un capteur actif se trouve près de la verticale du point observé ($\theta_i \approx 0$), une mer calme réfléchira davantage d'énergie vers le capteur qu'une mer agitée (figure 5 à gauche). Cette

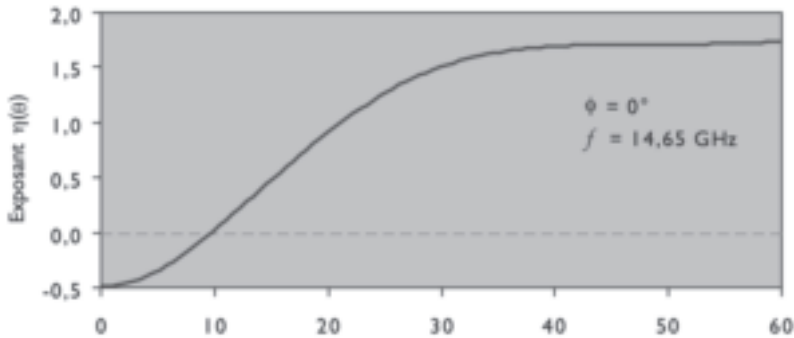
¹². Puisqu'on ne peut pas connaître les caractéristiques individuelles de chaque vague, on fait intervenir dans le calcul de σ^0 des outils statistiques. Ces méthodes supposent par exemple que les hauteurs des vagues respectent une distribution gaussienne.

relation se traduit par un exposant η négatif. Si le capteur se trouve à un angle plus grand (figure 5 à droite), alors une mer calme réfléchira au contraire moins d'énergie dans la direction du capteur. Cette relation se traduit par un exposant η positif.



▽ Fig. 5

Énergie retournée à un capteur actif sous deux angles d'incidences différents.

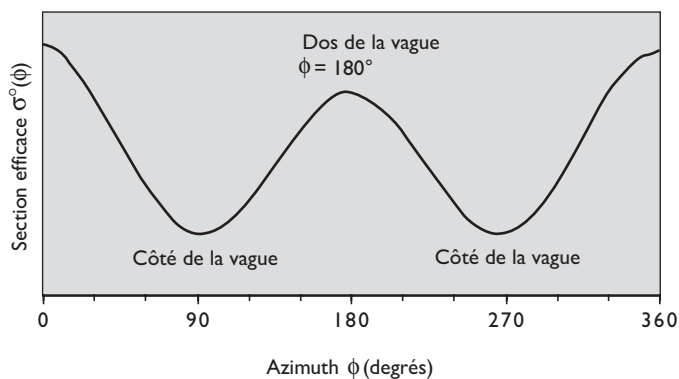


▽ Fig. 6

Graphique de $\eta(\theta_i)$ à un azimut de 0° pour une onde à 14,65 GHz.

La figure 6 illustre la relation entre l'exposant et l'angle d'incidence lorsque l'observateur fait face au vent (nous expliquerons plus bas pourquoi) et pour une onde de 14,65 GHz. Cette relation n'est valide que pour des vents entre 3 et 25 m/s environ. Pour des vents plus forts que 25 m/s, la situation se complique à cause des vagues qui se brisent, de l'écume et des embruns.

En plus de dépendre de l'angle d'incidence (θ_i), la section efficace dépend aussi de l'azimut (ϕ) de l'observation par rapport au vent (un azimut de 0° signifie que l'observateur est face au vent et qu'il observe la partie frontale des vagues). La pente n'est pas la même sur la partie frontale, les côtés et le dos de la vague. En observant la même surface de la mer à partir de deux azimuts différents, on obtient deux valeurs de σ^0 différentes. La figure 7 illustre la façon dont varie σ^0 en fonction de l'azimut. Les valeurs numériques ne sont pas indiquées parce qu'elles dépendent de l'angle d'incidence θ_i et de la vitesse du vent (équation 4).

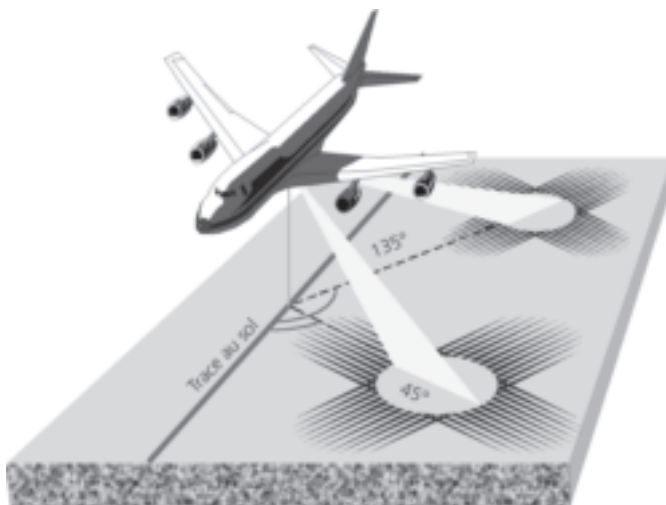


▽ Fig. 7
Variations de σ^0 en fonction de l'azimut.

$$\sigma^0(\theta_i, \phi, u) = au^{\eta(\theta_i)}(1 + b \cos \phi + c \cos 2\phi)$$

▽ Équation 5
Relation empirique entre la section efficace normalisée (σ^0) et la vitesse du vent (u).

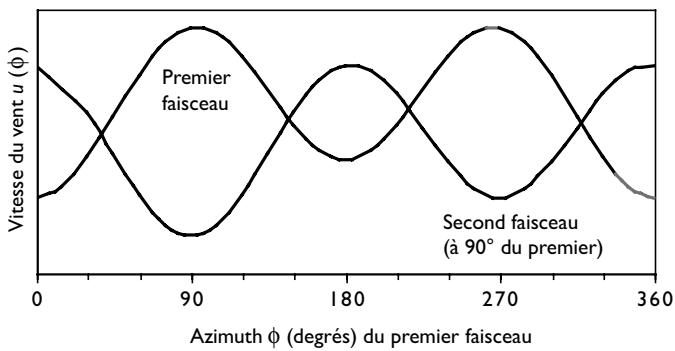
L'équation 5 montre la même relation entre la section efficace normalisée et la vitesse du vent que l'équation 4, mais en y ajoutant des termes qui représentent la dépendance avec l'azimut illustrée à la figure 7. Les constantes a , b et c sont déterminées expérimentalement.



▽ Fig. 8
Géométrie du balayage d'un diffusiomètre radar à deux faisceaux.

Cette dépendance avec l'azimut sert de base à la détermination de la vitesse et de la direction du vent à partir des mesures d'un diffusiomètre radar. La figure 8 illustre un diffusiomètre aéroporté qui balaye simultanément deux régions : une à 45° de la direction du vol et l'autre à 135° . La valeur absolue de la section efficace est calculée pour chacune des deux régions éclairées, en tenant compte du fait que l'angle d'incidence θ_i (fig. 6) varie entre environ 25° et 60° .

Lorsque le capteur avance dans une direction constante, chaque région balayée par le premier faisceau est ensuite balayée par le second. On dispose ainsi de deux observations de σ^0 pris à deux azimuts ϕ différents, inconnus mais à 90° l'un de l'autre. Les deux courbes de la figure 9 illustrent qualitativement les vitesses et directions que pourrait avoir le vent pour produire les ϕ^0 mesurés par chacun des deux faisceaux. Une grande gamme de valeurs est possible pour un faisceau, mais seulement quatre vitesses et directions sont des solutions simultanées aux deux faisceaux (les quatre points d'intersections des deux courbes).



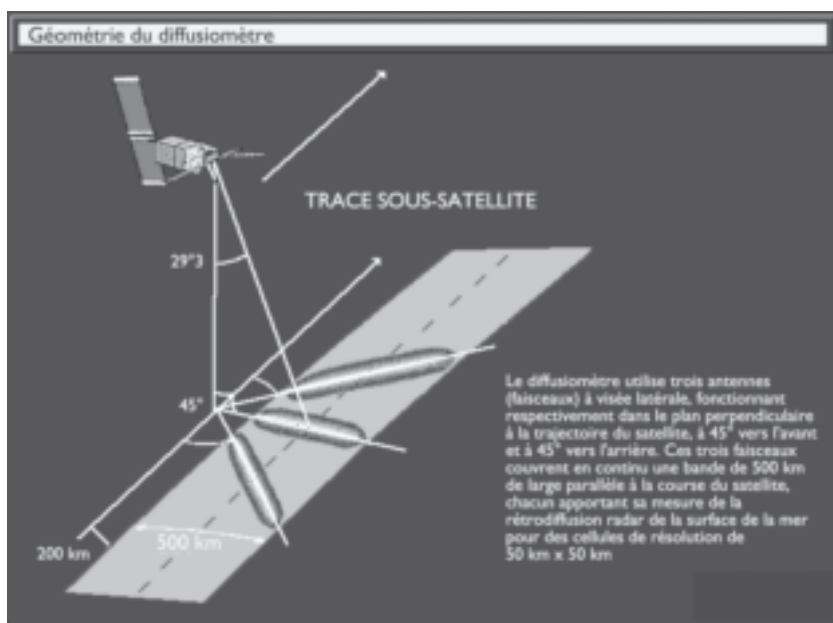
▽ Fig. 9

Valeurs de u et ϕ possibles pour un σ mesuré (une courbe par faisceau).

Il reste donc une ambiguïté dans la détermination de la vitesse et direction du vent, mais elle peut être levée si on a une idée (même grossière) de la direction que devrait avoir le vent. On peut s'appuyer par exemple sur une analyse météorologique à grande échelle. La solution à ce problème peut être grandement facilitée par l'ajout d'un troisième faisceau, ce qui résout plus de 90 % des ambiguïtés.

Capteurs disponibles

Les données de vents nous sont fournies par les satellites ERS-1 et ERS-2 de l'Agence spatiale européenne (ESA). Le satellite ERS-1 a été lancé en juillet 1991 et mis en sommeil en juin 1996. En avril 1995, ERS2 est mis à poste sur la même orbite pour remplacer ERS1. Un intervalle d'une journée sépare les passages de ces deux satellites. Leurs orbites se répètent tous les 35 jours.



▽ Fig. 10
Géométrie du balayage du diffusiomètre des satellites ERS.
(Source : Agence spatiale européenne)

Les diffusiomètres embarqués utilisent trois faisceaux (fig. 10) qui balayent une bande de 500 km de largeur. Cette bande est située à 200 km à droite de la trace au sol du satellite. La position est précise à 5 km près, à la fois dans le sens de la fauchée et de la trace du satellite. Les mesures des vitesses du vent sont valides entre 4 et 24 m/s avec une précision d'environ 2 m/s. L'incertitude sur la direction du vent est d'environ 20°.

Calcul de la vorticité à partir des données de vent

Dès 1993, sur la station SEAS de La Réunion, nous avons calculé les vorticités à partir de la force d'entraînement du vent (*wind stress*). Les données de vents sont issues des mesures faites par les diffusiomètres des satellites ERS. Cette force d'entraînement contrôle le pompage d'Ekman et est aussi à l'origine des structures tourbillonnaires à l'échelle de la semaine et de la dizaine de milles. Nous avons fait la double hypothèse que la vorticité était un bon indicateur prédictif, d'une part, sur la tendance des masses d'eau à plonger (convergence) ou à remonter (divergence) et, de l'autre, sur la tendance à l'enrichissement en nutriments de ces masses d'eau, information capitale en halieutique opérationnelle. Depuis, cette intuition a été vérifiée par de nombreux travaux : la dynamique de petite échelle intervient dans les structures fines de la turbulence à plus grande échelle (20-100 milles, 10-100 jours) en termes de persistance et de cohérence des tourbillons océaniques.

Soit une masse d'eau soumise à une vitesse de composantes (u, v) , dans un référentiel dont l'origine est à la surface de l'eau. L'axe des x pointe en direction de l'est, l'axe des y en direction du nord et l'axe des z augmente avec la profondeur. Si on ne considère que la pression de l'air, la force de Coriolis et la force du vent s'exerçant sur cette masse d'eau, alors l'équation de mouvement ramené en unité de masse s'écrit :

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta F_x}{\delta z}$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta y} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta F_y}{\delta z}$$

où

f	est le paramètre de Coriolis
P	est la pression
ρ	est la densité de la mer
F_x et F_y	sont les composantes de la force exercée par le vent

▽ Équation 6

Équation de mouvement à la base du calcul de la vorticité.

La composante verticale de la « spirale » de la force d'entraînement à la surface de l'eau, après différenciation et regroupement est :

$$\frac{\delta w_1}{\delta z} - \frac{\delta w_2}{\delta z} = \frac{1}{\rho h f} \left(\frac{\delta \tau_y}{\delta x} - \frac{\delta \tau_x}{\delta y} \right)$$

où

τ_x et τ_y	sont les moyennes des composantes de la force d'entraînement du vent
w_1 et w_2	sont les composantes en Z des vitesses pour un océan à deux couches

▽ Équation 7

Composante verticale de la force d'entraînement.

La force d'entraînement du vent (τ) est estimée à partir de valeurs « individuelles » du vecteur vent issues des données ERS, par l'équation suivante :

$$\vec{\tau} = \rho_a C_d \vec{V} |\vec{V}|$$

où

ρ_a	est la densité de l'air ambiant
C_d	est le coefficient de traîné (<i>drag coefficient</i>)
$\vec{V}$	est la vitesse du vent

▽ Équation 8

Force d'entraînement du vent.

Sources d'erreur

Plus en amont dans le calcul théorique du vent, σ^0 ne peut être estimé que suite à des approximations (notamment l'approximation de Kirchhoff) qui s'appliquent à quelques cas relativement simples. Lorsque l'angle d'incidence θ_i est grand et que les vagues sont plus hautes que la longueur d'onde du rayonnement, alors les vagues font de l'ombre et les phénomènes de diffractions deviennent importants. Dans ces conditions, l'approximation de Kirchhoff ne tient plus.

De plus, les ondes capillaires sont une source de diffusion. Elles affectent les mesures des diffusiomètres qui utilisent de courtes longueurs d'ondes. Ces ondes capillaires dépendent de la tension de surface de la mer, qui dépend elle-même de la température. Les films organiques (Chl-*a* ou matière organique dissoute) présents à la surface de l'eau affectent à la fois les ondes capillaires et les propriétés optiques de la surface. Ces films organiques ne sont pas bien modélisés et introduisent une incertitude dans l'interprétation des données des diffusiomètres¹³. La température et la salinité influencent la conductivité et la constante diélectrique de l'eau et donc ses propriétés optiques. Ces changements affectent le σ^0 mesuré. De plus, les vents forts produisent de l'écume et des embruns qui compliquent l'interprétation du signal capté.

Les valeurs à la côte sont sources d'erreurs en raison de la friction du fond, qui est négligeable au large.

Lorsque la direction du vent est dans la trace du satellite, il arrive que l'erreur de la direction du vent soit de 180°. Alors, le seul moyen de lever l'incertitude est de faire appel à un modèle météorologique. Le problème est que des événements exceptionnels peuvent alors être masqués.

Le modèle de calcul de la force d'entraînement du vent fait l'hypothèse d'une vorticité relative dérivée de la friction entre les couches d'eau négligeable. Les autres erreurs d'estimation, liées à notre calcul de vorticité, proviennent de l'estimation de la force d'entraînement du vent à partir des valeurs individuelles. C_d dépend de la vitesse du vent et de la stabilité atmosphérique, mais la seule formulation qui existe à l'heure actuelle est assez simple¹⁴.

Les autres erreurs proviennent enfin de la superposition des traces de satellite. Pour une trace, la vorticité est calculée et la répétitivité du satellite fait qu'en certains points, trois valeurs se superposent, en d'autres seulement deux ou une. Par endroit, enfin, il n'y aura jamais de valeurs de vent calculées. Lorsqu'on a plusieurs valeurs, une moyenne mobile est faite afin de donner plus de poids à la dernière mesure.

13. Comme d'habitude en télédétection, le bruit des uns est le signal des autres. La sensibilité du diffusiomètre aux films organiques est utilisée pour le suivi de la pollution.

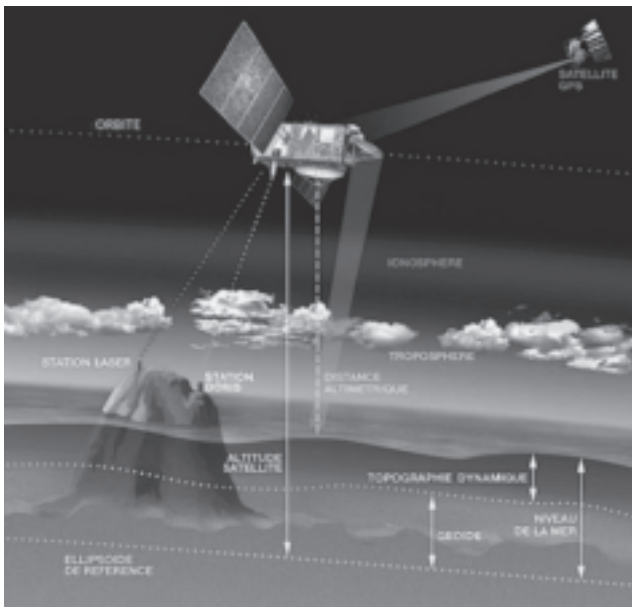
14. Le coefficient de traînée C_d n'est approximativement constant que pour les faibles vitesses (inférieures à 10 m/s). Il augmente avec les vitesses plus élevées. Cette dépendance de la force de traînée avec w_1 ou w_2 suggère qu'une grande quantité de mouvement est transmise à l'océan durant de brèves mais intenses tempêtes. Toutefois, les tempêtes sont entrecoupées de longues périodes de vents plus faibles qui entraînent aussi des courants. Pour une description précise des courants entraînés par les vents, il faut tenir compte à la fois des tempêtes et des périodes de vents constants.

La topographie de la surface de l'eau

La masse liquide des océans ne présente pas une surface homogène ; au contraire, « vallées et collines » se succèdent et, de plus, sont mobiles. Ces déformations sont dues à plusieurs phénomènes physiques. L'attraction terrestre tout d'abord détermine la topographie statique dont l'océan s'écarte rapidement suite au mouvement de rotation de la Terre et des vents qui sans cesse entraînent avec eux les eaux de surface. C'est ce que l'on nomme la topographie dynamique de surface. Elle est de l'ordre de deux mètres d'amplitude. D'une connaissance de la topographie dynamique précise, on peut donc déduire des informations sur la vitesse et la direction des courants. Les altimètres des satellites ERS et surtout celui de Topex/Poséidon ont la précision requise en mesurant la distance altimétrique avec une erreur de l'ordre du centimètre.

Principe des mesures de la hauteur de l'eau

L'altimètre fonctionne en envoyant une courte salve d'impulsions radar vers la Terre et en mesurant le temps requis pour que les impulsions reviennent au capteur après avoir été réfléchies par la surface de la mer. La distance obtenue est la *distance altimétrique*, illustrée à la figure 11. Le niveau de la mer est la différence entre l'altitude du satellite et la distance altimétrique.



▽ Fig. 11

Principe des mesures altimétriques.
(Source : Aviso)

Le niveau de la mer est mesuré par rapport à un ellipsoïde¹⁵ de référence (fig. 11). Les mesures du niveau de la mer sont particulières du fait que leur valeur (en plus de leur position sur une carte) dépendent de l'ellipsoïde choisi. Les mesures altimétriques dont nous disposons utilisent un ellipsoïde spécifique au projet Topex/Poséidon. Le tableau I donne les paramètres de cet ellipsoïde, ainsi que celui couramment utilisé, WGS 1984.

▽ Tableau I
Paramètres de l'ellipsoïde WGS 1984 et de celui de Topex/Poséidon.

	WGS 1984	Topex/Poséidon
Longueur du demi-axe équatorial	6 378,137 km	6 378,1363 km
Longueur du demi-axe polaire	6 356,752 km	6 356,7516 km
Aplatissement	1/298,257223563	1/298,257

Le niveau de la mer est mesuré par rapport à l'ellipsoïde de référence, tandis que la topographie dynamique (la mesure qui nous intéresse) est plutôt mesurée par rapport au géoïde. Le géoïde est la hauteur qu'aurait la mer en l'absence de toute perturbation (marées, vents, courants, etc.). Il correspond à une surface équipotentielle du champ gravitationnel terrestre.

La topographie dynamique nous renseigne sur les courants, qui sont une des causes des écarts entre la hauteur réelle de la mer et son géoïde. Ces courants comprennent une circulation stationnaire (due entre autres à la rotation de la Terre et aux vents permanents) et une partie fortement variable qui dépend de la marée et des conditions météorologiques.

Le pourquoi des anomalies de la hauteur de l'eau

L'anomalie de hauteur de la mer est la hauteur de la mer par rapport à une moyenne, d'où le terme « anomalie » ou « déviation ». Il existe une variété de moyennes, qui peuvent être annuelles ou saisonnières. Les anomalies calculées dépendent donc des critères choisis pour déterminer la moyenne.

Nous utilisons des anomalies de hauteurs plutôt que la topographie dynamique (fig. 11) afin de pallier notre connaissance insuffisante du champ gravitationnel terrestre, qui affecte les prédictions de l'orbite des satellites ainsi que du géoïde terrestre. Puisque la gravité ne varie pas dans le temps, elle affecte de la même manière chaque passage du satellite au-dessus d'un même point. En retranchant la hauteur moyenne de l'eau, on supprime cette erreur mais on fait disparaître du même coup la circulation océanique moyenne. Néanmoins, les cartes d'anomalies

15. Un ellipsoïde est une forme géométrique relativement simple (une sphère aplatie aux pôles) qui donne une approximation de la forme complexe de la Terre. L'aplatissement polaire est pris en compte mais pas le relief de la croûte terrestre. Il est décrit par les longueurs de ses axes équatorial et polaire, dont les valeurs « idéales » dépendent de la région géographique étudiée. Les ellipsoïdes sont un des paramètres des projections cartographiques. Plusieurs images satellitaires (par exemple, les images de température acquises par l'antenne de l'IRD-Réunion) sont projetées sur une carte qui utilise l'ellipsoïde WGS 1984.

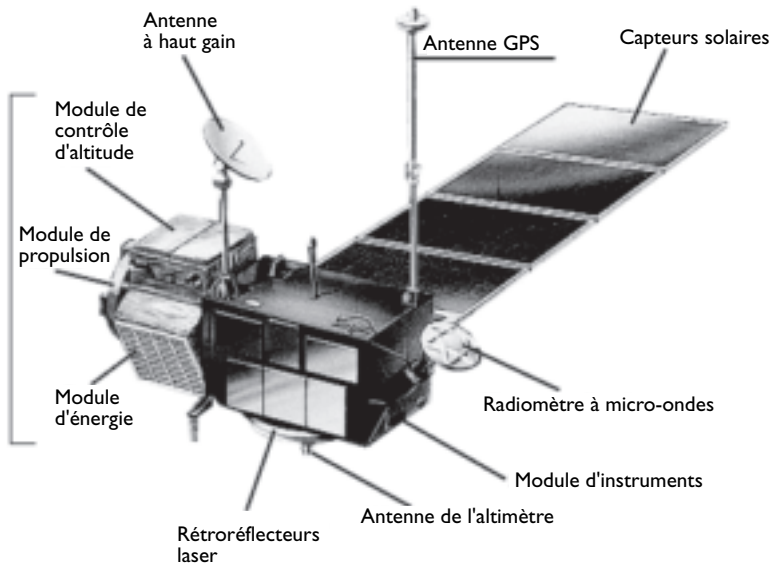
sont utiles pour observer comment les courants varient sur de courtes périodes de temps et de courtes distances en fonction des tourbillons, des conditions de vents ainsi que des changements de la température dans la couche de surface de l'eau.

Capteurs disponibles

Le satellite GEOSAT¹⁶ de la marine américaine a été lancé le 12 mars 1985 et s'est arrêté en janvier 1990. Un an et demi après son lancement, il fut placé sur une orbite répétitive de 17 jours pour suivre les variations du niveau des océans pendant plus de trois ans. Ses données sont disponibles à la communauté scientifique via la NOAA⁸. Il a été remplacé par le satellite GFO¹⁷, lancé sur la même orbite le 10 février 1998.

Le satellite Topex/Poséidon (fig. 12) est le fruit d'une coopération entre la France (Cnes) et les États-Unis (Nasa). Il a été lancé le 10 août 1992 avec pour mission « d'observer et comprendre la circulation océanique ». Son orbite se répète tous les 10 jours environ. Son successeur, Jason, a été lancé en décembre 2001.

Le centre Aviso (situé à Toulouse) traite, valide, archive et distribue les données du satellite Topex/Poséidon ainsi que celles d'autres missions altimétriques (notamment les satellites ERS, déjà mentionnés). Les opérations quotidiennes d'Aviso sont assurées par le laboratoire CLS¹⁸.



▽ Fig. 12
Schéma du satellite Topex/Poséidon.
(Source : Aviso)

16. GEOdesic SATellite.

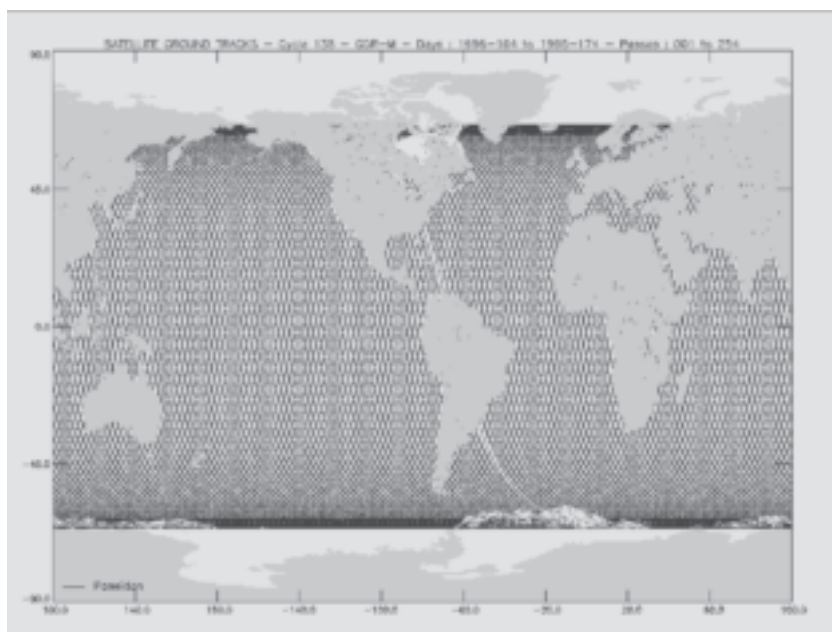
17. Geosat Follow-On.

18. Collecte Localisation Satellite.

Le satellite est composé de deux altimètres, Topex et Poséidon, qui se partagent la même antenne. On ne peut donc faire fonctionner qu'un seul altimètre à la fois. L'altimètre Poséidon étant expérimental, c'est l'altimètre Topex qui fonctionne dans la majorité des cas (90 % du temps). Mais on observa une dégradation de la performance du capteur A de l'altimètre Topex à partir du cycle 130 (fin mars 1996). Afin d'éviter une dérive des mesures, l'instrument B fut utilisé à la place du A à partir du cycle 236 (début décembre 1999). Les mesures de ce dernier se sont révélées cohérentes avec celles des altimètres Poséidon et ERS-2.

L'orbite de Topex/Poséidon est inclinée à 66° par rapport à l'axe nord-sud de la Terre. Elle couvre donc la région entre 66° de latitude nord et sud (fig. 13) et se répète tous les 10 jours. L'orbite choisie résulte d'un compromis entre plusieurs besoins. Elle couvre la majorité des océans qui ne sont pas couverts par les glaces. Elle est assez haute pour minimiser la friction dans l'atmosphère, ce qui aide à déterminer plus précisément l'orbite.

La figure 13 illustre bien le fait que les traces ascendantes et descendantes dessinent des losanges. La distance moyenne entre les traces est égale à la demi-diagonale latitudinale. À l'équateur, cette distance est de 300 km pour Topex/Poséidon et de 85 km pour ERS. Dans les deux cas, l'altimètre effectue une mesure par seconde, *i.e.* tous les sept kilomètres le long de la trace. L'échantillonnage spatial du premier est donc plus lâche que celui du second.



▽ Fig. 13
Trace au sol du satellite Topex/Poséidon.
(Source : Aviso)

En revanche, la durée du cycle de Topex/Poséidon est de 10 jours, soit un échantillonnage temporel plus de trois fois plus fin que celui d'ERS dont la période est de 35 jours. En combinant les données en provenance des deux satellites, on en optimise donc les caractéristiques.

Sources d'erreur

Trois types de sources d'erreurs peuvent être distingués : des erreurs liées au trajet de l'onde, des erreurs liées au bruit d'autres phénomènes (qui constitue par ailleurs aussi une information), enfin des erreurs liées à des manipulations techniques (généralement bien maîtrisées).

EFFETS LORS DU TRAJET DE L'ONDE

Pour obtenir une estimation précise du niveau de l'eau, il faut que la vitesse de propagation de l'onde soit bien connue. Or, la propagation de l'onde est affectée par de nombreux facteurs, qui doivent être pris en compte pour corriger les observations de l'altimètre. Le tableau 2 énumère les principaux facteurs qui changent la vitesse de propagation de l'onde, avec un ordre de grandeur des corrections à appliquer. Un signe positif signifie que l'erreur amène l'altimètre à surestimer la distance qui le sépare de la surface de la mer. L'importance de corriger ces erreurs apparaît clairement lorsque l'on songe que la précision désirée est de l'ordre de 2 cm.

▽ Tableau 2

Principales perturbations affectant la vitesse de propagation de l'onde.

Troposphère sèche	230 cm
Troposphère humide	- 6 à - 30 cm
Ionosphère	0,2 à 20 cm

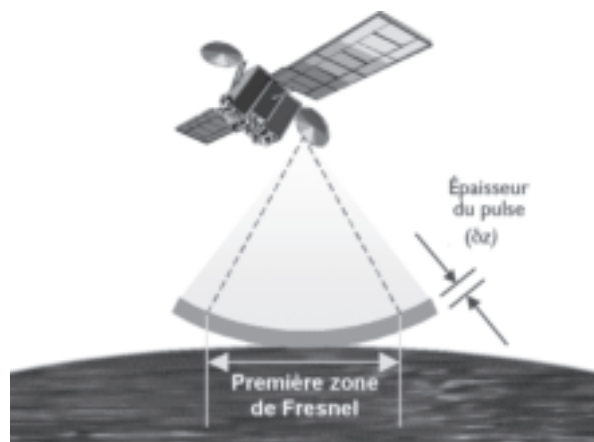
La vitesse de propagation de l'onde radar est diminuée par les gaz et la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre. L'influence de la masse totale de l'atmosphère (troposphère sèche) est assez prévisible. Mais l'influence de la vapeur d'eau (troposphère humide) est plus variable et plus difficile à déterminer.

Le nombre d'électrons libres dans l'ionosphère (fig. 11) influence la vitesse de propagation de l'onde. Cette quantité d'électrons varie entre le jour et la nuit (il y a très peu d'électrons libres la nuit), entre l'été et l'hiver (il y en a moins durant l'hiver de l'hémisphère sud) et en fonction du cycle solaire.

LES PERTURBATIONS « INDÉSIRABLES »

Si l'on s'intéresse à la topographie dynamique de la mer (fig. 11), il faut aussi tenir compte des perturbations indésirables, telles que la marée.

Certaines erreurs peuvent aussi provenir des vagues. Le capteur reçoit davantage d'ondes réfléchies dans les creux des vagues qu'à leurs crêtes. La hauteur moyenne à laquelle l'onde est réfléchie paraît donc légèrement plus basse que



▽ Fig. 14
Géométrie d'un pulse d'altimètre sur la surface de la mer.

la hauteur moyenne de la mer. Cette erreur peut être corrigée si on connaît la hauteur significative des vagues ($\xi_{1/3}$). Or cette hauteur peut être déterminée à partir de la forme du pulse qui revient vers l'altimètre. Une mer calme retourne un pulse étroit, tandis qu'une mer agitée avec des vagues plus hautes retourne un pulse plus étiré. En effet, les ondes réfléchies sur les crêtes des vagues parviendront à l'altimètre avant celles qui ont été réfléchies dans les creux des vagues. Les impulsions émises par les altimètres ont toujours une certaine étendue spatiale et une certaine épaisseur. Sur la figure 14, on observe que la courbure de l'onde sphérique du pulse, combinée avec la courbure de la Terre, fait que l'onde n'atteint pas la surface de la mer partout en même temps. La région dans laquelle l'onde ne retarde pas de plus de δz (l'épaisseur du pulse) est appelée « première zone de Fresnel » et les pulses des altimètres sont généralement un peu plus larges que la première zone de Fresnel.

Notons que la mesure de la hauteur significative des vagues n'est possible qu'à condition que la hauteur $\xi_{1/3}$ des vagues soit supérieure à l'épaisseur δz du pulse (fig. 14).

La hauteur de la mer réagit aussi à la pression atmosphérique. Une augmentation de la pression atmosphérique de 1 hPa abaisse le niveau de la mer de 1 cm. Notons toutefois que la réponse de la surface de la mer aux variations de la pression atmosphérique est encore l'objet d'études. Les valeurs des effets barométriques sont séparées des valeurs corrigées dans les fichiers de données fournis ; ils pourront donc être recalculés si besoin est lorsqu'on connaîtra mieux cet effet.

Après avoir obtenu une mesure précise de la distance séparant l'altimètre de la surface de la mer, il faut encore prendre en compte les marées. Non seulement les forces gravitationnelles externes génèrent les marées océaniques, mais elles déforment aussi la Terre elle-même (ce qu'on appelle la marée solide). La réponse de la Terre à ces forces externes est suffisamment rapide pour que l'on

puisse supposer un état d'équilibre. La surface de la marée solide est alors parallèle à la surface équipotentielle : il existe donc une constante de proportionnalité entre la hauteur de la marée solide et le potentiel gravitationnel. Cette constante est à peu près indépendante de la fréquence de la marée, sauf à une fréquence proche de celle de la composante KI à cause d'une résonance dans le manteau liquide.

L'axe de rotation de la Terre oscille avec des périodes apparentes de 12 et 14 mois. Du point de vue d'un observateur terrestre, il en résulte une force centrifuge supplémentaire dont l'effet sur la surface des océans ne se distingue pas des marées. On appelle ce phénomène la « marée polaire » et on considère sa période suffisamment longue pour permettre un équilibre avec à la fois l'océan et la Terre solide.

LES MANIPULATIONS TECHNIQUES

À l'altitude du satellite Topex/Poséidon (1 330 km), la friction de l'atmosphère est encore suffisante pour faire lentement baisser l'orbite du satellite. D'autres perturbations sont causées par des variations dans le champ gravitationnel de la Terre ainsi que dans la pression de la radiation solaire. De temps à autre, des manœuvres sont nécessaires pour maintenir le satellite sur son orbite. La fréquence de ces manœuvres dépend principalement du flux solaire et varie entre 40 et 200 jours. Ces manœuvres durent de 20 à 60 minutes et sont effectuées de préférence lorsque le satellite survole les continents. Aucune mesure scientifique n'est prise pendant ces manœuvres.

En conclusion, les données apparaissant dans les fichiers fournis par CLS ont subi toutes ces corrections, excepté la correction de la pression atmosphérique qui apparaît dans un champ séparé. Pour le satellite Topex/Poséidon, la précision moyenne instantanée de l'estimation locale du niveau de l'océan est inférieure à 5 cm et la précision moyenne sur un mois inférieure à 2 cm.

Calcul des courants géostrophiques

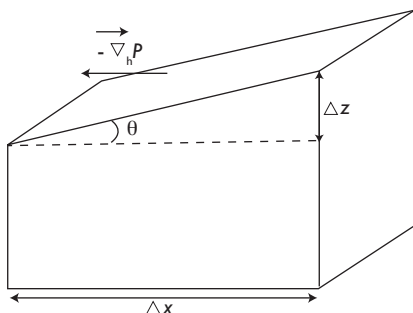
Les courants géostrophiques sont une composante des courants marins. Parce que ces courants dépendent de la hauteur de l'eau (nous le verrons plus bas), on peut les estimer à partir des images altimétriques.

Considérons une masse d'eau en mouvement à une vitesse constante. Si le système est dans un état stationnaire (c'est-à-dire s'il n'y a pas d'accélération ni de ralentissement), alors toutes les forces s'annulent. Plusieurs forces peuvent être en cause (vent, friction sur le fond, etc.). Ce qu'on appelle « l'équilibre géostrophique » est un modèle simplifié dans lequel on ne considère que deux forces : le gradient horizontal de pression et la force de Coriolis. Toutes les autres forces sont négligées.

GRADIENT DE PRESSION

La pression (P) est le « poids » que subit une surface de 1 m^2 de la mer à une profondeur donnée. Cette pression dépend de l'épaisseur de la colonne d'eau au-dessus de cette surface ainsi que de la densité (ρ) de cette eau. Le gradient

de pression (∇P) est un vecteur qui pointe dans la direction où la pression augmente. La figure 15 illustre le gradient de pression qu'on observerait à une profondeur z sur une masse d'eau de densité ρ uniforme.



▽ Fig. 15
Gradient de pression barotrope.

Dans le cas simple de la figure 15, le gradient horizontal de pression se calcule par :

$$\nabla P = \frac{\Delta P}{\Delta x} = \rho g \frac{\Delta z}{\Delta x} = \rho g \tan \theta$$

▽ Équation 9.

Dans la pratique, les variations de la température et de la salinité induisent des changements de densité. On peut les négliger jusque dans une certaine mesure pour la couche de surface, en revanche pas pour les calculs de courants géostrophiques dans les couches plus profondes. Une campagne d'échantillonnage en mer devient nécessaire dans ce dernier cas.

FORCE DE CORIOLIS

Les lois de la cinématique s'appliquent lorsque les vitesses sont mesurées dans un référentiel inertiel. Mais dans la pratique, nous mesurons les vitesses dans un référentiel lié à la Terre, un référentiel accéléré (l'accélération étant la force centripète) du fait de la rotation de la Terre. Nous utilisons ce référentiel accéléré comme s'il s'agissait d'un référentiel inertiel en y ajoutant des « pseudo-forces » (aussi appelées « forces inertielles ») : la force centrifuge et la force de Coriolis.

Sur une sphère, la force de Coriolis n'est pas un vecteur strictement horizontal. Toutefois, la composante verticale de la force de Coriolis est négligeable comparativement à la force gravitationnelle. Pour cette raison, en océanographie les termes « force de Coriolis » ne se réfèrent qu'à la composante horizontale de cette force. Elle s'exerce perpendiculairement à la vitesse du corps :

$$\vec{F} = -mf \times \vec{u}$$

où $\left\{ \begin{array}{ll} \vec{F} & \text{est la force de Coriolis} \\ m & \text{est la masse du corps en mouvement} \\ f & \text{est le paramètre de Coriolis (décrit plus bas)} \\ \vec{u} & \text{est la vitesse du corps en mouvement} \end{array} \right.$

▽ Équation 10.

Selon cette expression, la force de Coriolis dépend de la vitesse de déplacement et dévie les courants vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Le paramètre de Coriolis f s'exprime par :

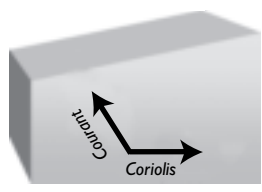
$$f = 2\Omega \sin \phi$$

où $\left\{ \begin{array}{ll} \Omega & \text{est la vitesse de rotation de la Terre} \\ \phi & \text{est la latitude} \end{array} \right.$

Selon cette dernière expression, la force de Coriolis est nulle à l'équateur et maximale aux pôles.

ÉQUILIBRE GÉOSTROPHIQUE

Les composantes (u , v) du courant induisent une force de Coriolis (F_u , F_v) perpendiculaire au courant. Si le système est dans un état d'équilibre, cette force de Coriolis doit équilibrer le gradient de pression selon les équations suivantes. Notez les signes différents pour F_u et F_v .



$$F_v = + \frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x} \qquad F_u = - \frac{1}{\rho} \frac{\delta P}{\delta y}$$

où $\left\{ \begin{array}{ll} \rho_a & \text{est la densité de l'eau} \\ P & \text{est la pression} \\ F_u & \text{est la force de Coriolis due à la composante } u \text{ de la vitesse} \\ F_v & \text{est la force de Coriolis due à la composante } v \text{ de la vitesse} \end{array} \right.$

▽ Fig. 16

Schéma et équations de base de l'équilibre géostrophique.

À partir des mesures de la hauteur de l'eau et en supposant que la densité est constante (ou connue) dans la couche de surface, on arrive à estimer le courant géostrophique à la surface.

Hydroclimat du Sud-Ouest de l'océan Indien et océanographie spatiale

DAVID GUYOMARD, MICHEL PETIT,
MARTIN DESRUISSEAUX,
JEAN-MICHEL STRETTA, LAURE GARDEL



Makaira mazara (Jordan & Snyder, 1901)

© P. Opic

Caractéristiques générales connues de l'océan Indien

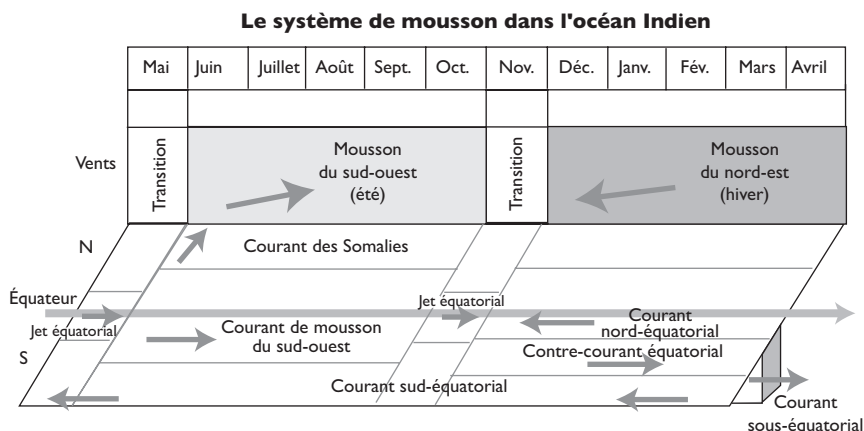
L'océan Indien est un des derniers océans étudiés par les océanographes et les connaissances sur les phénomènes qui le caractérisent sont relativement épar-
ses. Nous présentons ici toutefois un florilège de ces acquis, en focalisant notre
analyse sur sa partie sud-ouest.

Les moussons, un couplage atmosphère-océan aux conséquences à l'échelle du bassin océanique

L'océan Indien est le moins étendu des trois grands océans mondiaux
(49 millions de km² en prenant comme limite australe la séparation induite par
les caractéristiques hydrologiques de l'océan Antarctique). Sa configuration, au
regard des deux autres, le fait paraître comme un « demi-océan », sa partie
boréale étant bordée au nord par l'imposante masse continentale asiatique.
C'est d'ailleurs cette configuration particulière qui donne lieu à la deuxième
particularité de cet océan, le régime de moussons.

Il existe une forte interaction météorologique et océanographique induite entre
les masses d'air continentales et océaniques, par l'intermédiaire du phénomène de
mousson. L'inversion des flux thermiques entre l'hémisphère nord et l'hémisphère
sud au cours d'une année provoque un renversement des vents dominants à plus

de 90° entre l'été et l'hiver (fig. 17). La mousson concerne surtout la partie boréale de l'océan Indien. Ses conséquences sont observables sur ses bordures est et ouest (nord du canal de Mozambique) et elles se font sentir jusqu'aux latitudes australes de 10 à 20° S (LEBLANC, 2001).



▽ Fig. 17

Le système des moussons dans l'océan Indien
(Flinders Institute for Atmospheric and Marine Sciences, cité par LEBLANC, 2001).

La mousson dite « de nord-est » concerne les mois de novembre à avril, soit la saison d'été austral. Les vents dominants sont établis conformément au gradient de pression nord-sud, entre les masses d'air sec d'Arabie, chargées en humidité au-dessus de la mer d'Arabie d'une part et les masses d'air de basse pression de la zone de convergence intertropicale, d'autre part (ZCIT). À l'équateur, une zone de basses pressions à la circulation faible et instable, s'établit un flux d'alizés de sud-est assez faible. Inversement un faible flux vers l'ouest à travers tout l'océan s'établit entre l'Inde et l'équateur, ce qui fait qu'un flux inverse de sud doit se produire sur la côte africaine. La mer d'Arabie et le golfe du Bengale sont occupés par des courants variables durant cette saison.

La mousson de « sud-ouest » s'établit entre les mois de mai et octobre, en hiver austral. Les masses continentales asiatiques surchauffées sont le siège d'ascendances, provoquant au nord de l'équateur un régime de vents orientés au sud-ouest. Le flux de mousson de sud-ouest est plus intense. Ce flux, qui traverse l'équateur est une prolongation du flux d'alizés. Il renverse les flux, faisant tourner sur elles-mêmes les cellules anticycloniques de la mer d'Arabie et du golfe du Bengale, en établissant un flux vers l'est à travers l'océan au nord de l'équateur et, plus intensément, un courant profond et rapide vers le nord le long de la côte de Somalie (le Jet de Somalie). De fait, le courant (côtier) de Somalie s'inverse vers le nord, modifiant à l'extrême les conditions hydro-biologiques de la zone avec l'apparition d'un upwelling de façade orientale de continent.

Dans l'hémisphère austral de décembre à mars, les cyclones se développent dans la ZCIT active (55°E - 95°E , 6°S - 15°S), quand les eaux sont chaudes (28°C à 30°C) et l'atmosphère humide sur une grande épaisseur. Les cyclones suivent alors la circulation générale d'est en ouest, au sud de 8°S et rencontrent sur leurs trajets les Mascareignes et Madagascar.

Comme la réponse de l'océan est décalée, souvent d'un mois, les extrêmes dans la circulation océanique apparaissent en février et en août. À l'inter-mousson (avril-mai et octobre-novembre), une transition s'établit entre ces deux régimes, avec un fort flux d'ouest en est à l'équateur. Du fait de ce phénomène des moussons, il n'existe pas de réel upwelling équatorial dans l'océan Indien, les vents n'étant pas réguliers à travers l'équateur comme dans le Pacifique ou l'Atlantique (LEBLANC, 2001). Une autre conséquence est un niveau moyen de la mer proche de zéro, ce qui ne sera pas sans importance sur le calcul de l'anomalie du niveau de la mer déduit des mesures altimétriques.

LONGHURST (1998) cite d'autres caractéristiques particulières à l'océan Indien : les bassins d'évaporation de la mer Rouge et du golfe Persique, le bassin de dilution du golfe du Bengale très estuarié, les effets du renversement de mousson à travers l'archipel indonésien, l'eutrophisation saisonnière et dynamique du nord-ouest de la mer d'Arabie et enfin les latitudes basses extrêmement oligotrophes, en plein océan.

Les courants principaux de l'océan Indien

Du fait des moussons et de la configuration particulière de ce « demi-océan », les grands systèmes de courants de l'océan Indien sont très variables (fig. 18). Nous nous intéresserons ici principalement à la partie occidentale et australe de l'océan Indien, où l'activité de la pêche palangrière réunionnaise est la plus concentrée.

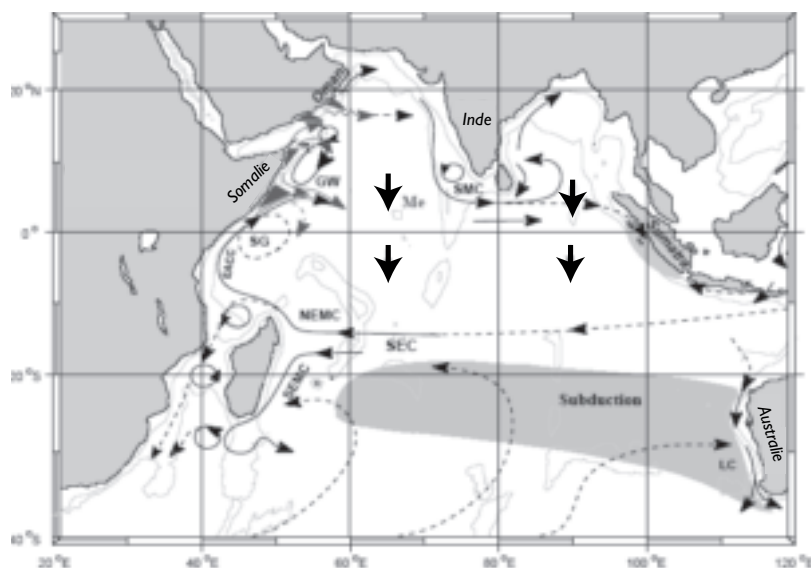
La description des courants est issue de LEBLANC (2001).

LES COURANTS ÉQUATORIAUX

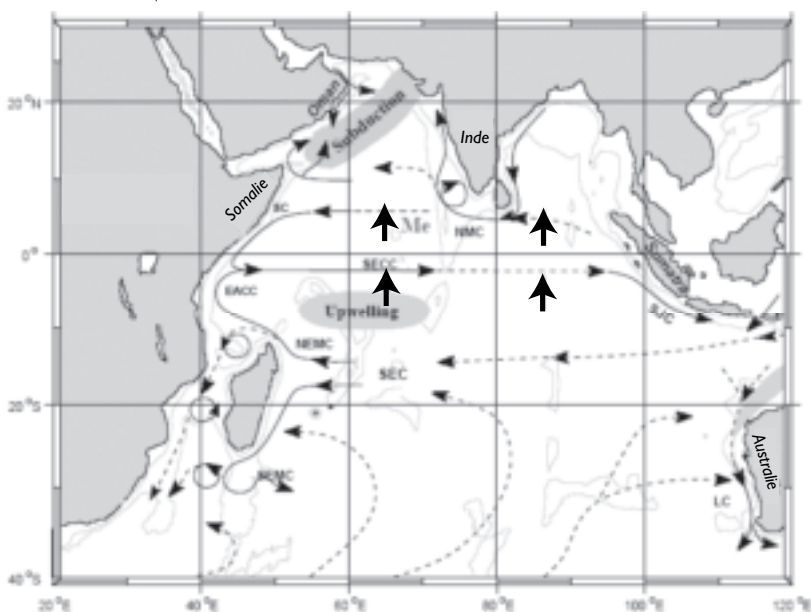
Les courants de surface de la mousson

On distingue trois courants, généralement plus forts que dans l'Atlantique et le Pacifique (avec une vitesse moyenne de $0,8\text{ m.s}^{-1}$) :

- le courant nord-équatorial (CNE ou NEC en anglais) qui porte vers l'est, entre 5°N et 2°S , se renverse à la mousson de sud-ouest (juin-septembre) pour devenir le courant de mousson de sud-ouest ;
- le contre-courant équatorial (CCE ou ECC) entre 2°S et 8°S , faiblit pendant la mousson de sud-ouest et se combine avec le courant de mousson du sud-ouest précédemment cité ;
- le courant sud-équatorial (CSE ou SEC) qui occupe une région au sud de 8°S , avec des vitesses rarement supérieures à $0,3\text{ m.s}^{-1}$; son flux est plus fort pendant la mousson de nord-est que pendant celle de sud-ouest.



↓ Transport d'Ekman de part et d'autre de l'équateur



EACC : East African Coastal Current
ECC : Equatorial Counter Current
GW : Great Whirl
Me : Ekman transport
NEMC : North East Madagascar Current

SC : Somali Current
SEC : South Equatorial Current
SEMC : South East Madagascar Current
SG : Southern Gyre

▽ Fig. 18

Circulation générale des courants de surface dans l'océan Indien, en été (haut), en hiver (bas).
(Source : SCHOTT et al., 2002)

Les jets inter-mousson

Pendant les périodes de transition (avril-mai et octobre-novembre), des jets s'installent vers l'est à des vitesses de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ ou plus. Ces courants font 500 km de large, le long de l'équateur.

Le sous-courant équatorial

Plus présent dans la partie occidentale du bassin océanique, il est souvent associé aux vents dominants soufflant de l'est. Ce stress de surface correspond à une élévation du niveau de la mer. Il est compensé par un gradient de pression zonal entre les frontières du bassin. Ce gradient disparaît à la mousson de sud-ouest. Le phénomène est le même que dans le Pacifique et l'Atlantique.

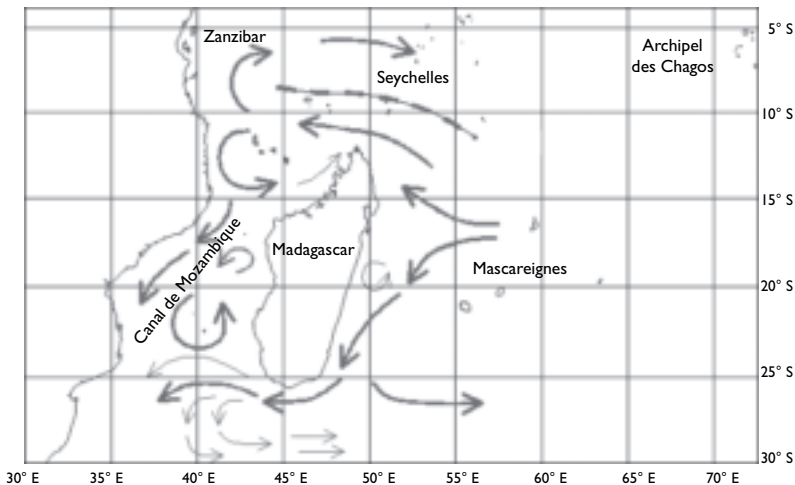
LE COURANT SUD-ÉQUATORIAL ET LES ONDES DE ROSSBY ASSOCIÉES

Le courant sud-équatorial (CSE) sépare le vortex cyclonique tropical au nord de celui anticyclonique subtropical au sud.

La variabilité saisonnière dans la latitude du CSE est générée par le cycle annuel des vents (est de 100° E) et se propage avec une onde de Rossby vers l'ouest à la vitesse d'environ $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

Ces ondes sont en partie bloquées par l'arc des Mascareignes (Maurice-Rodrigues). De mars à juin, un tourbillon (« eddy » en anglais) cyclonique (dans l'hémisphère sud, il tourne dans le sens des aiguilles d'une montre) se forme à l'est de cet arc entre 10° S et 12° S , à cause d'interactions non linéaires entre les ondes longues de Rossby et les ondes courtes de Rossby reflétées. À partir de juillet, ce tourbillon devient assez petit pour qu'il traverse le passage Seychelles-Maurice (12° S - $13,5^\circ \text{ S}$) et continue vers l'ouest. Cette oscillation advective semble être la source d'oscillations de la surface de la mer de 70 jours de période, observées sur la côte est malgache (LEBLANC, 2001).

LE COURANT CÔTIER EST-AFRICAIN



▽ Fig. 19

Courants principaux du sud-ouest de l'océan Indien.

Une partie du CSE passe donc dans le passage Seychelles-Maurice (12°S - $13,5^{\circ}\text{S}$) vers la côte malgache, tandis qu'une partie substantielle bifurque vers le sud, en évitant l'arc Mascareignes, puis vers l'ouest (entre 17°S et 19°S , fig. 19).

La partie nord qui passe à travers l'arc Mascareignes dépasse le cap d'Ambre (au nord de Madagascar) et continue vers la côte est-africaine où elle alimente le courant côtier est-africain (EACC en anglais). Ce courant coule vers le nord toute l'année entre 11°S et 3°S , avec des vitesses de plus de 1 m.s^{-1} en hiver austral, saison de la mousson du sud-ouest.

En été austral (mousson de nord-est), le courant côtier est-africain rencontre le courant de Somalie vers 3°S et forme avec lui le contre-courant équatorial vers l'est à la surface.

LE CANAL DE MOZAMBIQUE ET LE COURANT DES AIGUILLES

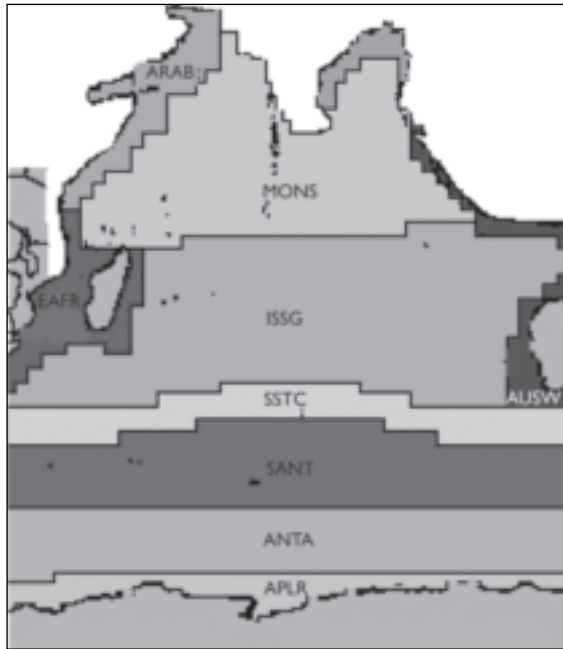
Le courant du Mozambique, le courant est-malgache et le courant des Aiguilles vont tous en sens inverse des vents dominants pendant la mousson de sud-ouest. Les vents près de l'Afrique du Sud sont tous d'ouest ou sud-ouest toute l'année. Le courant des Aiguilles est un des courants les plus forts au monde ($1,6\text{ m.s}^{-1}$, avec de faibles variations, mais des pics de $2,5\text{ m.s}^{-1}$) : il semble surtout constitué par le courant est-malgache, le courant du Mozambique étant moins important.

Les principales régions biogéographiques, d'après LONGHURST (1998)

Longhurst a établi une classification biogéographique des océans mondiaux à partir de données récentes, issues principalement des capteurs satellitaires de couleur de l'eau (*Coastal Zone Color Scanner* : CZCS), qui ont fourni une description à la fois globale et dynamique des phénomènes de surface (climatologie saisonnière et phénomènes particuliers). Il a aussi intégré les études des grands phénomènes physiques océanographiques (courantologie générale, campagnes océanographiques) en les couplant avec ces données télémétriques. L'intérêt de cette classification, communément acceptée dans la communauté océanographique, réside dans le fait que l'auteur a pris soin de ne pas généraliser une méthode unique pour toutes les régions de l'océan mondial, mais plutôt de synthétiser les connaissances issues de ces différentes sources afin de dégager les caractéristiques essentielles à ses yeux pour la détermination de provinces biogéographiques homogènes.

L'île de La Réunion, et les eaux dans lesquelles se distribuent les captures de la pêche palangrière réunionnaise, se situent à la limite de trois grandes provinces décrites par Longhurst : la province du vortex indien de mousson (appelée MONS), la province du vortex indien subtropical sud (appelée ISSG) et la province côtière est-africaine (appelée EAFR). Les deux premières sont à classer dans les grandes régions océanographiques globales (*trades provinces*) tandis que la troisième est une région côtière (fig. 20).

Cette configuration donne à la région qui nous intéresse des caractéristiques « hybrides » de ces trois provinces et sa description océanographique n'en est



APLR : Austral Polar Province

ANTA : Antarctic Province

SANT : Subantarctic Water Ring Province

SSTC : South Subtropical Convergence Province

ISSG : Indian South Subtropical Gyre Province

AUSW : Australia Indonesia Coastal Province

EAFR : Eastern Africa Coastal Province

MONS : Indian Monsoon Gyre Province

ARAB : Northwestern Arabian Upwelling Province

▽ Fig. 20

Provinces biogéographiques de l'océan Indien selon LONGHURST (1998).

que plus complexe. C'est pourquoi nous avons choisi de reprendre la description détaillée de ces trois provinces par Longhurst, afin de préfigurer des caractéristiques susceptibles de la concerner.

LE VORTEX INDIEN DE MOUSSON (MONS)

Il s'étend depuis 10° S jusqu'aux limites au large des provinces côtières au nord. Il comprend le sud du golfe du Bengale et de la mer d'Arabie et subit l'influence du plateau des Maldives, orienté nord-sud au milieu de l'océan. Il peut être considéré comme une sorte de prolongation du bassin d'eau chaude (*warm pool*) du Pacifique ouest.

Une zone frontale à 10° S sépare les eaux faibles en oxygène et peu salées au nord des eaux riches et salées du sud ; c'est un front de convergence qui se situe sur le flanc équatorial du flux du courant sud-équatorial (qui coule vers l'ouest de manière permanente). Dans l'est de la province, elle est moins marquée et la limite entre les domaines tropical et subtropical se situe autour de 20-22° S, vers 110° E.

En mousson de nord-est (été austral), quand le vortex anticyclonique de la mer d'Arabie s'affaiblit, un flux vers l'ouest à travers l'océan s'établit (c'est la dérive

de mousson de nord-est ou courant nord-équatorial), entre 2° N et le sud du continent indien. Ce flux s'initie dans le golfe du Bengale et se joint aux eaux qui ont été transportées vers l'ouest à travers l'archipel indonésien. De fait, la salinité de surface est faible dans la partie orientale de cette province pendant la saison. Le flux divergent à l'équateur (upwelling équatorial) est ici moins développé que dans les autres océans : c'est en février-mars qu'il est le plus intense. Les images du capteur CZCS dans l'océan Indien confirment que la divergence équatoriale est relativement faible et éphémère : un flux d'ouest convergent au sein du jet équatorial indien (600 km de large) apparaît même à la transition entre les moussons de sud-ouest et nord-est. Ce flux ne supporte pas les mêmes effets biologiques que la divergence équatoriale dans les autres océans.

Le courant côtier dirigé au sud qui se développe le long de la côte est-africaine pendant la mousson de nord-est retourne vers l'est au sein du contre-courant sud-équatorial le long de la pente nord du front thermique vers 5-10° S. La convergence a ainsi lieu vers 2-5° S entre le courant nord-équatorial et le contre-courant sud-équatorial.

En hiver austral, l'établissement de la mousson de sud-ouest fait disparaître la circulation hivernale et, en avril-mai, force le renversement du courant nord-équatorial vers l'est en tant que courant de mousson de sud-ouest, de 5° S à 10° N environ. Ce courant SMC est associé à une thermocline établie proche de l'équateur. À la même saison, un vortex anticyclonique s'établit dans la mer d'Arabie. Le flux du jet de Somalie maintenant établi au nord passe aux alentours de la bordure est de ce vortex et s'oriente à l'est en tant que courant de mousson de sud-ouest, à la même latitude qu'occupait le courant nord-équatorial en été austral. Le courant profond équatorial de l'océan Indien est singulier en ce sens qu'il n'est pas présent à l'échelle entière de l'océan et qu'il n'est pas permanent : il n'y a donc pas de friction due au vent (*wind stress*) vers l'ouest toute l'année et donc pas de dérive vers l'ouest due au vent qui doit être compensée par un flux de retour de subsurface. On a ici juste besoin de s'intéresser au jet de surface équatorial (large de 600 km) qui coule vers l'est le long de l'équateur brièvement à chaque transition de mousson, en avril-mai et septembre-octobre.

La province entière a une thermocline permanente, habituellement vers 30-50 m, à l'exception de l'île indonésienne de Sumatra où elle s'approfondit vers 100 m en mousson de sud-ouest. Dans la zone des courants de mousson de sud-ouest, la thermocline est plus proche de la surface, plus fine et plus marquée dans l'ouest et plus profonde, plus épaisse et plus faible dans l'est car forcée par une friction due au vent d'est dans la région équatoriale et le transport résultant dans le contre-courant équatorial.

Une importante couche pauvre en oxygène se situe sous la thermocline à des profondeurs intermédiaires à travers la majeure partie de la mer d'Arabie orientale, s'affaiblissant progressivement vers le sud à travers le front hydrochimique décrit précédemment. Cette couche est maintenue par le lent passage d'eaux australes à ces profondeurs, déjà déficientes en oxygène, combinées à la

grande consommation d'oxygène résultant d'un fort taux de plongée de matériel organique issu de blooms algaux proches de la surface.

Le vortex de la mer d'Arabie est un système bien établi et confiné. Mais cette province à part entière ne nous concerne pas ici. De même, le vortex du golfe du Bengale, à la circulation plus faible qu'en mer d'Arabie et moins prévisible, se trouve trop éloigné de nos zones de pêche pour être d'un intérêt direct. Néanmoins, certains cyclones tropicaux qui peuvent intéresser les Mascareignes naissent dans ces eaux chaudes.

Réponse biologique et écologie régionale

Dans la province MONS la chlorophylle de surface est faible ($< 0,05-0,1 \text{ mg.m}^{-3}$), sauf en mer d'Arabie et dans les régions côtières (fig. 24). En mousson de nord-est, les valeurs sont à leur minimum, les nitrates étant absents de la surface sauf en zones côtières où existent quelques taches isolées, particulièrement à l'extrémité nord du golfe du Bengale, du fait d'estuaires de fleuves ou de dômes émergents de tourbillons (*eddies*) cycloniques, ainsi que dans l'est de la province où existe un flux à travers l'archipel indonésien.

La divergence équatoriale et la production équatoriale sont faibles. Il n'existe aucun bloom phytoplanctonique équatorial à aucune saison dans l'océan Indien. Il n'y a que dans la zone occidentale du bassin, où existe un faible flux orienté au sud le long de la côte africaine en hiver boréal qui se refléchit vers l'est, qu'apparaît un bloom aligné sur l'équateur, qui peut parfois s'étendre jusqu'aux Maldives. La partie côtière de ce phénomène est due à un upwelling de tourbillons dans la zone de réflexion.

En hiver, le refroidissement et l'approfondissement de la couche de mélange du sud de la mer d'Arabie induisent un faible bloom algal atteignant seulement environ $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$, variant en intensité et en étendue selon les années. Toutefois quand le processus est actif, l'augmentation du signal de chlorophylle, observé par le capteur CZCS, se situe le long d'un arc à travers l'ensemble du vortex de mousson vers le pôle aux environs de 15° N . La ligne méridionale des Maldives le long de 73° E forme une structure sur les images de CZCS : en été austral avec un flux vers l'ouest le long de cette ligne, l'augmentation de chlorophylle-*a* a lieu à l'ouest, dans le sens du courant. La situation est inverse en hiver austral, quand le sens du courant s'inverse.

L'inter-mousson de printemps boréal (mai) est la saison oligotrophe extrême et des valeurs moyennes ($> 0,1 \text{ mg.m}^{-3}$) restent seulement observables en mer d'Arabie sur de petites taches côtières. Quand la mousson de sud-ouest s'installe dans les mois suivants (juin, juillet), et avec la réponse rapide de l'océan, les valeurs de surface des nitrates augmentent. Près de la zone d'upwelling en mer d'Arabie, la réponse biologique est suffisamment rapide pour que les nitrates de surface soient indétectables, ou n'apparaissent qu'au sein de taches temporaires ($< 0,5 \text{ mg.m}^{-3}$). Les valeurs de chlorophylle en surface atteignent plus de $0,3 \text{ mg.m}^{-3}$ sur la partie ouest et nord du vortex de mousson, alors que les valeurs les plus faibles apparaissent dans la moitié orientale du bassin de la mer d'Arabie.

Le minimum d'oxygène profond (vers environ 200-500 m) de la mer d'Arabie s'étend sur la plus grande partie du nord de l'océan Indien. Cependant, il a un impact apparemment faible sur la distribution verticale du mésoplancton au-delà de la mer d'Arabie. La distribution verticale des genres planctoniques tropicaux typiques suit celle du Pacifique est.

En résumé

La profondeur de la pycnocline (profondeur où la densité de l'eau varie verticalement de manière rapide) répond au flux du courant de Somalie, mais reste toujours plus superficielle que la profondeur euphotique. Il y a une augmentation marquée du taux de production primaire au début de la mousson de sud-ouest et du développement de l'upwelling côtier et peut-être une réponse (en mars) au mélange des vents de nord-est en été austral. La productivité au niveau de la zone DCM (*Deep Chlorophyll Maximum*) augmente de 20 % environ lorsque la concentration baisse. Le signe d'accumulation de chlorophylle suit celui de changement du taux de production primaire, indiquant une forte consommation ou un fort taux de perte.

LE VORTEX INDIEN SUBTROPICAL SUD (ISSG)

La province s'étend depuis le front hydrochimique vers 10-15° S jusqu'à la convergence subtropicale vers environ 30° S. La frontière orientale est la frontière côtière australienne à la limite extérieure du courant de Leuwin et la frontière occidentale est la limite de la province de la côte africaine (EAFR), à la limite extérieure des courants des Aiguilles et est-malgache.

Une des caractéristiques de cette province est la présence de grandes zones de bancs peu profonds (hauts-fonds), de moins de 200 m de profondeur, qui s'étendent le long de l'arc Mascaraignes (Maurice-Seychelles, par Nazareth, Saya de Malha et le banc des Seychelles) (fig. 21, cf. cahier hors-texte).

La province est constituée par le vortex subtropical de l'océan Indien austral, pour lequel n'existent que très peu d'informations organisées. La circulation y est beaucoup plus variable que dans les autres océans, du fait de la variabilité liée aux courants de mousson dans l'océan Indien. En hiver austral, les vents dominants de sud-ouest traversent l'équateur vers le nord. La zone de convergence intertropicale arrive à s'étendre en travers du sous-continent indien le long du flanc sud de l'Himalaya en août. La circulation anticyclonique due aux vents au sud de l'équateur est alors complètement établie. Le tourbillon anticyclonique dû à la friction du vent s'étend d'environ 10-15° S jusqu'à la branche australe du vortex. Cet effet est plus fort en été austral et à l'automne, atteignant son intensité maximale vers 30° S. En été austral, quand la convergence intertropicale s'étend au sud de l'équateur, les vents et la circulation induite par le vent sont plus faibles et plus variables et la thermocline centrale traverse les hauts-fonds et se trouve subdivisée en une série de bassins distincts séparés par des crêtes moins profondes.

La crête zonale de la thermocline située vers environ 10° S est la limite du flux vers l'ouest du courant sud-équatorial de faible salinité sur sa pente sud et la limite du flux vers l'est du contre-courant sud-équatorial sur sa pente nord. Sous

la pente sud de la crête et ainsi sous le minimum de salinité, le front hydrochimique plonge vers le sud et sépare les eaux riches en nutriments/pauvres en oxygène du vortex de mousson des eaux pauvres en nutriments/riches en oxygène du vortex subtropical. La localisation de cette crête change saisonnièrement : en mousson de sud-ouest, quand le courant sud-équatorial se renforce, la crête thermique se déplace progressivement vers le nord (vers 5° S) et se rapproche de la surface, la profondeur de la couche de mélange (*Mixed Layer Depth*, MLD) étant alors inférieure à 30 m. Durant la mousson de nord-est, elle se situe vers 10° S et est plus profonde (MLD inférieure à 40 m).

La faible salinité de la masse d'eau transportée par le courant sud-équatorial a son origine *pro parte* dans la partie sud-est du golfe du Bengale et dans les eaux dessalées de l'archipel indonésien, ainsi que dans la ceinture de très fortes pluies (> 200 cm/an) de 3° N à 10° S, à l'est de 60° E. Ces dernières diluent les eaux de surface dans la partie nord du courant sud-équatorial. Enfin, il y a aussi un apport d'eau douce dans le courant sud-équatorial quand il passe au nord de Madagascar du fait des fleuves et de fréquentes précipitations. La profondeur de la couche de mélange homogène pourrait y être plus influencée par la salinité que par la température.

Bien que le flux de la zone de convergence intertropicale (ZCS) soit placé dans une province séparée, il est notable que le retour vers l'est à la limite polaire se fait le long de la ZCS, soit environ 40° S. Le cœur de ce flux est la bande de courant (ou jet océanique) du courant du sud de l'océan Indien, continuant depuis le courant de retour des Aiguilles jusqu'à la côte est de l'Australie. Le transport en masse dans ce jet océanique diminue progressivement vers l'est du fait que des tourbillons (*eddies*) et des méandres amènent de l'eau vers le centre du vortex. C'est la bordure de ce champ de tourbillons et de flux de méandres (nord, vers l'équateur) qui est proposée comme limite de la province ISSG.

À travers la province entière en été austral, la thermocline est plus superficielle dans l'ouest, plus profonde dans l'est et conduite par une friction due au vent vers l'est le long de la zone de convergence intertropicale. Au sud de 15-20° S, l'approfondissement de la couche de mélange pendant l'hiver austral jusqu'à 95-100 m, pour des valeurs estivales de 33-46 m, a lieu le long de la thermocline entre Madagascar et le nord-ouest de l'Australie, autour de quoi se produit la circulation du vortex. L'ensemble forme un vortex subtropical anticyclonique montrant des isoplèthes de nitrates plus profondes en région centrale qu'en périphérie. Ici aussi, comme dans les autres océans, cette remontée superficielle des nitrates est clairement et généralement reflétée dans les champs de surface de la chlorophylle.

Réponse biologique et écologie régionale

C'est une région de grande clarté de l'eau, où la chlorophylle de surface excède rarement 0,05 mg.m⁻³. Des flux divergents et des upwellings potentiels apparaissent sur la crête de la thermocline vers 10° S et devraient être reflétés dans le développement biologique en surface. En effet, un maximum de chlorophylle existe en hiver austral (juillet-octobre) avec des contenus chlorophylliens en surface qui peuvent atteindre 0,2 mg.m⁻³ dans une région où ils atteignent

généralement $0,05 \text{ mg.m}^{-3}$. Cela se produit quand la couche de mélange s'approfondit à travers la zone euphotique et un entraînement de nutriments est susceptible d'apparaître. L'équilibre production/perte calculé d'après les données issues du capteur CZCS suggère que le couplage entre herbivores et phytoplancton est extrêmement proche : les taux d'accumulation suivent le développement de la production primaire très brièvement, puis déclinent bien avant que la productivité se relâche.

L'examen des données du capteur CZCS révèle des blooms saisonniers discrets associés aux bancs peu profonds de la ride océanique Maurice-Seychelles et des Chagos pendant l'hiver austral. Cela semble confirmer les suggestions précédentes selon lesquelles l'arc Maurice-Seychelles entraîne des divergences dans le courant sud-équatorial pendant la saison, amenant un enrichissement de surface sur le côté ouest (effet d'île). Des effets similaires apparaissent aux Seychelles elles-mêmes, qui se situent en travers de la crête thermique à 10° S .

La meilleure source de données pour la zone se situe le long de la radiale 110° E , au sud de Java : les données intégrées de production primaire montrent des valeurs similaires ($40\text{-}60 \text{ mg.m}^{-2}$) de juin à octobre, de 10° S à 35° S , pendant le bloom saisonnier de l'hiver austral, bien qu'à la fois ce champ saisonnier et celui de la chlorophylle intégrée ($< 20\text{-}30 \text{ mg.m}^{-2}$) soient spatialement assez hétérogènes. Fréquemment, un maximum éphémère apparaît à l'extrême nord de la radiale (province MONS). Le champ saisonnier pour la biomasse intégrée de zooplancton nocturne à 200 m montre de plus fortes valeurs entre $10\text{-}12^\circ \text{ N}$ et 30° S .

On peut interpréter le cycle saisonnier des provinces MONS et ISSG comme suit :

- printemps austral, début d'été : transport méridional (est-ouest) d'eau subtropicale dans la province MONS ;
- fin d'été : appauvrissement de la stratification thermique de la province ISSG ;
- automne : transport méridional d'eau tropicale dans la province ISSG ;
- hiver austral : enrichissement d'eau tropicale dans la province MONS par élévation dynamique du courant sud-équatorial.

Le couplage entre la production et la consommation est proche dans ces régions : pour les provinces MONS et ISSG, les taux de productions de nitrates, primaire et de biomasse zooplanctonique varient tous saisonnièrement d'environ 40-50 % par rapport à la moyenne annuelle, alors que la biomasse de phytoplancton (estimée par la concentration de chlorophylle) ne varie que de 20 % (fig. 25). Cela confirme ce que l'on constate d'après les données du capteur CZCS et de l'écologie des eaux chaudes. Cependant, en observant attentivement la succession trophique, on remarque le mécanisme suivant : dans la province MONS (eaux tropicales), le temps de développement de la biomasse zooplanctonique est bien corrélé à la productivité et aux nitrates. En revanche, dans la zone ISSG (eaux subtropicales), la chlorophylle est positivement corrélée à la productivité mais négativement au zooplancton. Cela pourrait signifier que la réponse de consommation est instantanée dans la province MONS mais décalée de plusieurs semaines dans la province ISSG.

En résumé

Il y a un mélange modéré en hiver austral, quand la pycnocline se situe brièvement sous la zone euphotique (juin-août). Le taux de production primaire répond à l'apport de nutriments en liaison avec l'approfondissement de la couche de mélange. Il atteint un large pic en été-automne, initialement suivi d'une accumulation de biomasse. Toutefois, la consommation réduit la biomasse après deux ou trois mois d'accumulation quand la population d'herbivores se développe. Le pic de chlorophylle est ainsi bref et apparaît tôt dans l'année hydrologique.

LA PROVINCE CÔTIÈRE EST-AFRICAINE (EAFR)

Cette province comprend la bordure côtière de l'océan Indien à l'ouest depuis le Kenya au nord jusqu'au cap de Bonne Espérance, incluant le canal de Mozambique et la côte est de Madagascar. La limite orientale est la limite du flux significatif des courants de frontière occidentale. On y inclue aussi la rétroflexion des Aiguilles, au sud de l'Afrique. On peut subdiviser cette province en quatre sous-provinces :

- la côte est-africaine équatoriale ;
- la région subtropicale de Madagascar ;
- la région tempérée des Aiguilles ;
- la rétroflexion des Aiguilles.

Les deux dernières sous-provinces ne sont quasiment pas exploitées par la pêche palangrière réunionnaise et ne seront décrites ici que succinctement.

Topographie du plateau continental et fronts de bordure de plateau et de marée

Le long d'une grande partie de la côte est-africaine le plateau continental est étroit et quand il y a des récifs frangeants, comme au Kenya et en Tanzanie, le plateau a disparu. Sur les côtes est et ouest du canal de Mozambique, le plateau est plus large (40 km sur la côte ouest de Madagascar et 80 km au niveau de l'embouchure du Zambèze). Le plateau est aussi plus large (50 km) au niveau de la baie du Natal dans la région des Aiguilles. La zone la plus grande de ce plateau se situe entre la péninsule du Cap et Port Elizabeth et atteint 150 km au sud du cap des Aiguilles.

Caractéristiques de l'océanographie générale

Le courant de bordure occidentale le long de la côte est-africaine comprend plusieurs entités océanographiques qui correspondent à autant de sous-systèmes écologiques :

- le flux côtier aux basses latitudes du courant est-africain variable en direction et en intensité avec la mousson ;
- le flux tourbillonnaire du canal de Mozambique ;
- le flux relativement rapide et direct le long de la côte est-malgache ;
- le courant des Aiguilles d'eau subtropicale du sud de Madagascar jusqu'à la péninsule du Cap ;
- la rétroflexion des Aiguilles au sud de l'Afrique.

Ces flux individuels qui combinent le transport du courant sud-équatorial depuis le nord de Madagascar jusqu'aux hautes latitudes représentent la composante

de retour vers le pôle du vortex subtropical sud de l'océan Indien (côté ouest). La profondeur saisonnière de la couche de mélange y varie de manière assez similaire, mais elle est forcée de manière différente sur toute la province. Pendant la mousson de sud-ouest en hiver austral (juin-septembre), il y a une tendance générale à l'inclinaison vers l'ouest de la pycnocline de l'océan Indien, il en résulte un approfondissement de la pycnocline le long de la côte nord de Madagascar, de 40-60 m à 80-100 m environ. Le mélange dû aux vents et la perte de chaleur à la surface se combinent pour approfondir la couche de mélange jusqu'à environ 100 m jusqu'au sud de Madagascar.

- *Le courant est-africain*

Ce nom est souvent appliqué au flux variable le long de la côte de Somalie jusqu'au canal de Mozambique. Vers environ 10° S, au nord de Madagascar, le courant sud-équatorial rencontre le continent africain et diverge vers le nord et le sud tout au long de l'année. Pendant l'été boréal, le flux de nord est continu avec le flux profond du courant jet de Somalie et s'y agrège. Ce jet de Somalie est induit par les forts vents de la mousson de sud-ouest. En été austral, le flux orienté au nord du courant sud-équatorial rencontre le flux vers le sud du courant de Somalie, renversé et plus lent, qui pendant cette saison s'étend le long de la côte africaine. Les deux courants divergent alors de la côte vers environ 2-3° S au large de Malindi (Kenya) et entrent alors dans le contre-courant sud-équatorial qui passe vers l'est à travers l'océan.

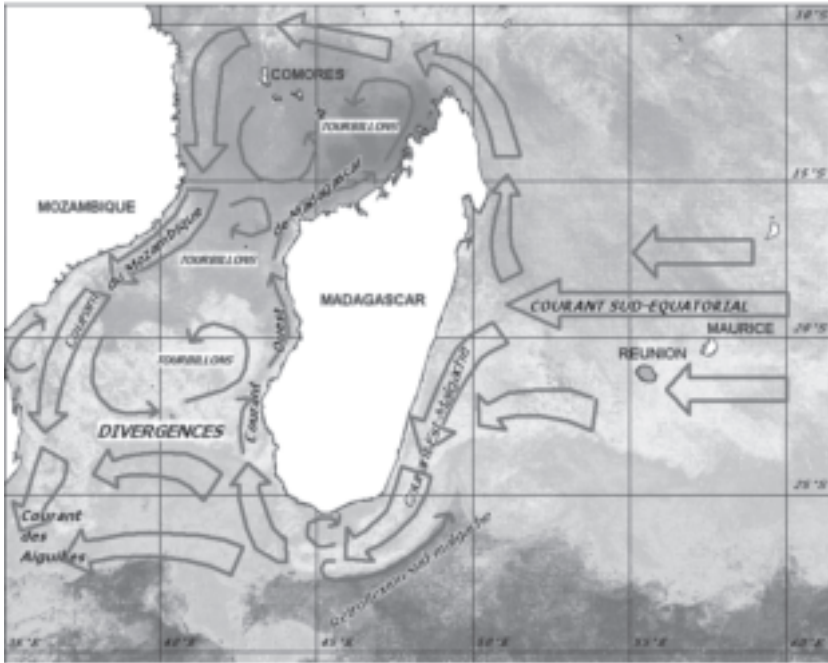
- *Le canal de Mozambique et Madagascar*

Le flux dans le canal de Mozambique est généralement orienté au sud, influencé par un champ de vortex anticyclonique à méso-échelle, ayant trois tourbillons majeurs (peut-être dus à la topographie), habituellement dans le nord, le centre et le sud du Canal. Le flux du Canal qui entre dans le courant des Aiguilles circule de nouveau à travers ces tourbillons et est donc intermittent.

Le long de la côte remarquablement linéaire de l'Est malgache, il y a un faible courant de frontière occidentale, avec un flux maximal pendant la mousson de nord-est. Selon LUTJEHARMS *et al.* (1981), ce courant est-malgache, étroit et intense, a toutes les caractéristiques d'un courant de façade occidentale (estimation du transport de masse à $41,106 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ du même ordre de grandeur que le courant des Aiguilles, entre $56,106 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $62,106 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La partie de grande vélocité est cependant limitée au talus de la pente continentale et la vitesse du courant décroît avec le flux, comme pour le courant des Aiguilles.

Le courant est-malgache suit la rupture du plateau continental quand celui-ci s'incurve du sud vers le sud-est, juste au sud de 25° S (LUTJEHARMS *et al.*, 1981). De son côté, LONGHURST (1998) note aussi que la topographie nord-sud de la crête de Madagascar, au sud de l'île, induit parfois une bifurcation du flux, directement dans le vortex subtropical par réflexion au sud de Madagascar. Le courant est-malgache alimente en général directement le courant des Aiguilles en surface. La réflexion du courant est-malgache est alors accompagnée par une activité intense de méandres et de tourbillons.

Selon LUTJEHARMS *et al.* (1981), il n'y a pas de lien direct entre le courant est-malgache et le courant des Aiguilles : pour ces auteurs, le premier ne semblerait



▽ Fig. 22

*Courantologie des Mascareignes sur fond de carte de température de surface (STT)
« vue » par satellite (d'après TCHERNIA, 1978 et LUTJEHARMS et al., 1981).*

influencer le second que de manière sporadique. Le transport de masse de ce système de courants augmente fortement dans le sens du flux et les masses d'eau impliquées sont plus probablement issues du vortex subtropical de l'océan Indien austral dans l'ensemble et pas seulement du courant est-malgache (fig. 22).

- *Le courant des Aiguilles*

La force du courant des Aiguilles ne varie pas saisonnièrement pour les mêmes raisons que ces grands courants analogues, comme le Gulf Stream dans l'Atlantique nord à des latitudes similaires, où la friction due aux vents est transformée en mélange plutôt qu'en moment cinétique. C'est pourtant le plus fort de tous les courants de bordure occidentale et sa vitesse atteint fréquemment 5 nœuds.

Ce fort courant vers le sud est contrarié par la houle de tempêtes générées dans l'océan Austral (Antarctique) qui se propage vers le nord et qui peut ainsi doubler en amplitude par cette interaction. Ces très longues longueurs d'ondes et très grosses houles sont parmi les plus impressionnantes au monde.

L'origine du courant des Aiguilles se trouve dans la région de circulation très variable à l'extrême sud du canal de Mozambique, vers environ 25° S. Le flux est essentiellement continu depuis la baie de Delagoa (26° S) jusqu'à l'extrémité australe de l'Afrique.

- *La rétroflexion des Aiguilles*

C'est une structure unique et persistante située à l'endroit où le courant de bordure occidentale se retrouve sans topographie côtière à l'extrémité sud de l'Afrique et qu'il rencontre le courant orienté à l'est du flux de la circulation polaire. Ce système de rétroflexion est particulier, mais ces effets écologiques sont comparables à ceux des bancs des Aiguilles. On peut aussi le considérer comme une partie de la zone de convergence subtropicale du Sud, puisque son flux alimente directement le jet vers l'est autour du cœur annulaire de la zone de convergence.

Réponses biologiques et écologie régionale

La connaissance de l'écologie de cette province est fragmentaire, bien que les données du capteur CZCS puissent être pertinentes : du fait des faibles apports terrigènes et de matières en suspension, seule la sortie du « grand fleuve vert » Limpopo à l'extrémité sud du canal de Mozambique est bien observée sur les cartes issues des données du CZCS.

Le long de la côte est-africaine (Tanzanie et Kenya), un downwelling a lieu tout au long de l'année, mais spécialement pendant la mousson de sud-ouest quand le courant est le plus fort. Peu d'observations écologiques existent dans cette région au large de Daar-Es-Salaam et Zanzibar, à 5° et 6° S, qui devraient être typiques de l'ensemble de la baie est-africaine (0-10° S). Pendant la mousson de sud-ouest (mai-septembre), l'irradiance à la surface de la mer chute de 520 à 380 langley et la température de surface chute de 29,5 °C à 26 °C. La hauteur des vagues et les pluies sont aussi largement augmentées. Tout cela est associé à un approfondissement de la couche de mélange, une réduction de la chlorophylle et du nombre de grandes cellules algales et généralement une abondance plus faible du zooplancton. La production primaire planctonique est plus forte et les algues à grandes cellules sont plus diverses pendant la mousson de nord-est au large de Daar-Es-Salaam, quand la stabilité est plus forte dans la colonne d'eau, bien que les variations saisonnières ne soient pas très fortes : la chlorophylle de la couche de mélange est de 0,3-0,6 mg.m⁻³ pendant la mousson de sud-ouest et de 0,5-1,0 mg.m⁻³ pendant celle de nord-est. Un maximum d'azote dans la période de pré-mousson (février-mars) pourrait être associé à la fixation d'azote au cours de forts blooms de la cyanobactérie *Oscillatoria erythraea*.

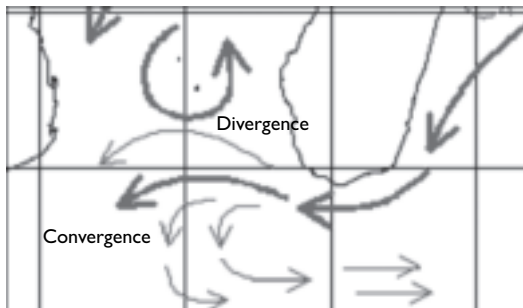
À l'endroit où les flux convergents du courant est-africain et de la reverse du courant de Somalie quittent la côte en hiver boréal, il existe un upwelling dans la zone de rétroflexion vers environ 2° S au large de Malindi au Kenya et un bloom algal associé à cette rétroflexion est observé sur quelques images du CZCS, présentant un filament vers l'est aligné le long de l'équateur.

Au large du sud de l'Afrique, des upwellings locaux sont induits par la topographie dans le courant des Aiguilles, à l'aval des majeures proéminences côtières à 25° S et 34° S. Plus au nord, dans le même système de courant de bordure occidentale, le courant est-malgache induit un upwelling au large de la pointe sud de Madagascar (LUTJEHARMS et al., 1981). Le même phénomène se produit dans le courant du Mozambique sur la côte africaine durant la mousson de nord-est quand le flux est le plus fort. Ces blooms peuvent être observés sur

les images CZCS qui montrent un développement de chlorophylle dans l'axe du courant des Aiguilles, dans sa partie côtière. Au large de la côte ouest de Madagascar, des blooms apparents côtiers pourraient simplement refléter les estuaires de fleuves drainant les plaines côtières sur la côte ouest de l'île.

PITON et MAGNIER (1975) ont dressé un bilan des conditions favorables à l'exploitation thonière dans cette région de l'océan Indien : ils mettent en exergue le caractère potentiellement productif de la côte nord-ouest de Madagascar, du fait d'apports nutritifs terrigènes et de la circulation générale anticyclonique (convergence et concentration des éléments nutritifs), ils soulignent, toutefois, que la faiblesse des courants limite cette productivité. Dans le centre du canal de Mozambique, ils notent l'existence de zones ponctuelles d'enrichissement, mais souvent très variables, comme autour des « îles éparées » comme Juan de Nova.

Ils notent également que la zone entre la circulation anticyclonique du sud du canal de Mozambique et la partie sud du courant est-malgache (portant à l'ouest) crée les conditions favorables à des divergences de courants et au développement d'upwellings en surface. Inversement, le renversement des courants d'est-ouest à ouest-est dans le sud de Madagascar provoque une zone de convergence (fig. 23). Ce sont des conditions particulièrement favorables au développement de réseaux trophiques dans cette région (SINCLAIR, 1987 ; BAKUN, 1996). Les upwellings d'accrores de plateau insulaire au large de Fort-Dauphin à l'extrême sud de Madagascar sont aussi des zones potentielles d'enrichissement.



▽ Fig. 23

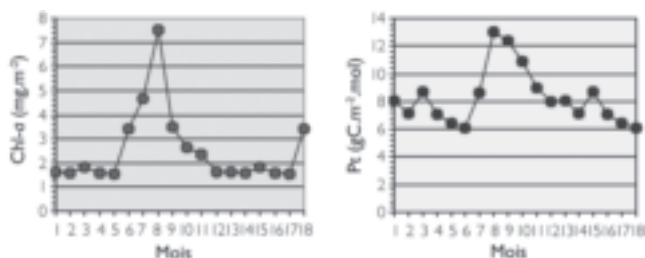
*Convergence et divergence au sud du canal de Mozambique, du fait des courants
(d'après PITON ET MAGNIER, 1975).*

En résumé

Dans le sud, en hiver austral, un approfondissement faible de la couche de mélange, dû au vent avec une thermocline qui s'approfondit vers l'ouest dans la région tropicale, occasionne une dépression du taux de production primaire et une pycnocline au-dessous de la profondeur euphotique, alors que la concentration chlorophyllienne saisonnière reste faible quand elle est intégrée sur cette longue province.

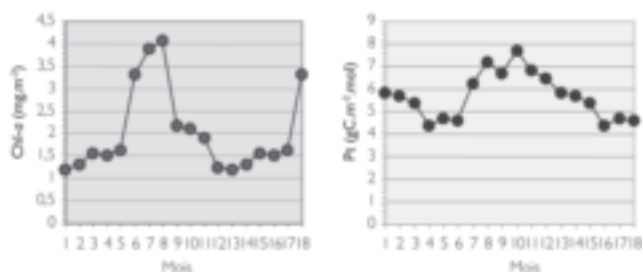
QUELQUES ÉLÉMENTS SYNTHÉTIQUES QUANTITATIFS

Les figures 24, 25, 26 synthétisent l'évolution des contenus moyens en chlorophylle-*a* et carbone dans les trois provinces biogéographiques qui nous concernent¹. Ces trois graphiques indiquent un pic de productivité primaire (approchée par le contenu chlorophyllien) en période de mousson de sud-ouest



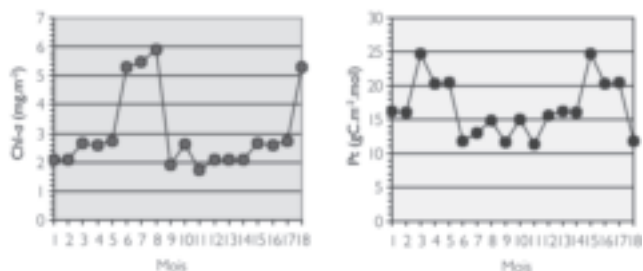
▽ Fig. 24

Évolution des contenus moyens en chlorophylle-*a* et carbone dans la province MONS (d'après LONGHURST, 1998).



▽ Fig. 25

Évolution des contenus moyens en chlorophylle-*a* et carbone dans la province ISSG (d'après LONGHURST, 1998).



▽ Fig. 26

Évolution des contenus moyens en chlorophylle-*a* et carbone dans la province EAFR (d'après LONGHURST, 1998).

1. LONGHURST, 1998 (site internet : <http://www.mar.dfo-mpo.gc.ca>)

(de juin à août), pour les trois grandes régions (EAFR, MONS, ISSG). Cela montre la forte influence du régime de mousson sur la productivité globale de l'océan Indien. Mais l'auteur indique bien dans ses commentaires que cette productivité n'est pas également répartie et qu'elle est marquée par une forte variabilité spatio-temporelle et parfois une apparition très fugace (fort taux de perte, consommation rapide par le zooplancton...).

L'intégration du contenu en carbone est aussi très intéressante, car elle permet de rendre compte de l'ensemble du développement biologique. Elle met en évidence un décalage temporel dans l'enrichissement des eaux océaniques entre le nord et le sud de l'océan Indien : la province MONS présente un pic de carbone quasiment corrélé à celui de chlorophylle-*a* (au mois d'août), tandis que celui observé dans la province ISSG, beaucoup moins marqué (différence absolue sur l'année de seulement $4 \text{ gC.m}^{-2}.\text{mois}^{-1}$, contre $7 \text{ gC.m}^{-2}.\text{mois}^{-1}$ dans la province MONS), se trouve décalé de 1 à 2 mois (septembre-octobre). La province EAFR, beaucoup plus riche que les précédentes, aussi bien en contenu chlorophyllien (pic à 6 mg.m^{-2}) qu'en carbone (pic à 25 gC.m^{-2}), montre là un décalage de près de dix mois entre le pic de chlorophylle (juin-août) et celui de carbone (mars-mai).

L'océan Indien revisité par l'océanographie spatiale

Comme nous l'avons vu, les principaux paramètres issus de l'océanographie spatiale exploités au cours du Programme palangre Réunion sont la couleur de l'eau (exprimant un contenu en chlorophylle-*a* en mg.m^{-3}), la température de surface de l'eau (SST², exprimée en °C), la vorticité (issue du rotationnel des vents de surface) et l'anomalie de topographie de surface de l'eau, (SLA³, calculée par rapport au niveau moyen des océans et exprimée en cm) et de courants géostrophiques. Un paramètre supplémentaire a pu être exploité, qui est la bathymétrie du fond océanique obtenue à partir de mesures satellitaires gravimétriques (altimètres de Geosat, Topex/Poséidon et ERSI).

À la lumière des pages qui précèdent, issues principalement de l'océanographie physique, nous allons essayer de trouver les éléments du *paysage océanique* (PETIT *et al.*, 1994) qui sont couplés aux phénomènes intéressant l'halieutique pélagique. De ce point de vue, l'océanographie biologique a depuis longtemps tenté de classer les structures hydrologiques à méso-échelle susceptibles de provoquer l'enrichissement de surface profitable au développement de réseaux trophiques, jusqu'aux grands organismes pélagiques (SUND *et al.*, 1981 ; PITON et MAGNIER, 1975 ; POSTEL, 1969 ; STRETTA, 1991 ; UDA et ISHINO, 1958).

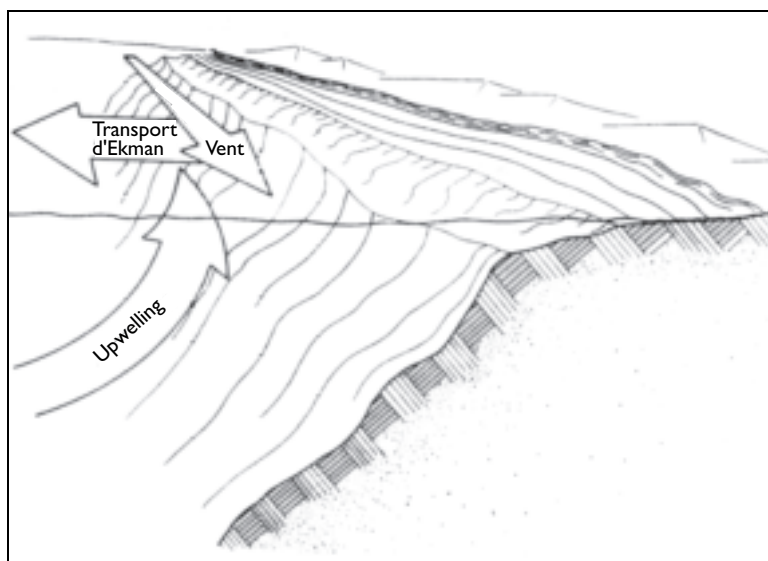
2. Sea Surface Temperature.

3. Sea Level Anomalies.

Ainsi STRETTA (1991) a établi une liste de ces structures dont nous nous inspirerons ici :

- *Les eaux côtières*

Ce sont des eaux subissant l'influence terrigène (ruissellement, fleuves avec effets de dessalure, objets flottants charriés...) et/ou situées au-dessus du plateau continental. L'auteur propose d'étendre cette définition aux eaux sous effets continentaux et structures de type upwelling. Les upwellings côtiers (fig. 27) notamment établissent des structures frontales en surface (fronts thermiques).



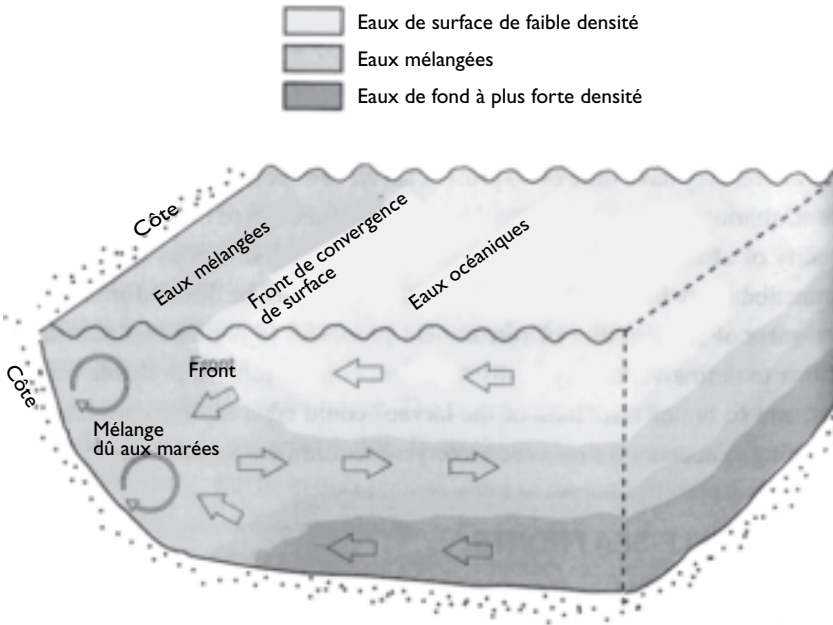
▽ Fig. 27

Schéma d'un upwelling côtier dans l'hémisphère nord (d'après BAKUN, 1996).

- *La zone de rupture du plateau continental*

C'est une zone située entre une isobathe précise (dans le golfe de Guinée, au large du Sénégal par exemple, c'est l'isobathe 200 m qui est repérée par les thoniers senners) et la limite du plateau. Le repérage de cette isobathe est très pratiqué en pêche sportive pour la recherche des poissons porte-épée. L'effet biologique de cette zone est lié aux phénomènes de courants qui remontent le long des pentes du plateau et enrichissent le milieu dans cette zone « de frontière » (écotone).

BAKUN (1996) décrit ces fronts proches des ruptures de plateau. Il précise que là où les effets des courants se contrebalancent, l'eau du large (plus salée et plus dense) plonge et s'évacue à mi-profondeur. Inversement, l'eau côtière moins dense que l'eau du fond, a tendance à s'évacuer vers le large. Se créent alors des zones de rétention, d'une part entre les courants vers le large à mi-profondeur et d'autre part à la côte, en surface et près du fond (fig. 28).

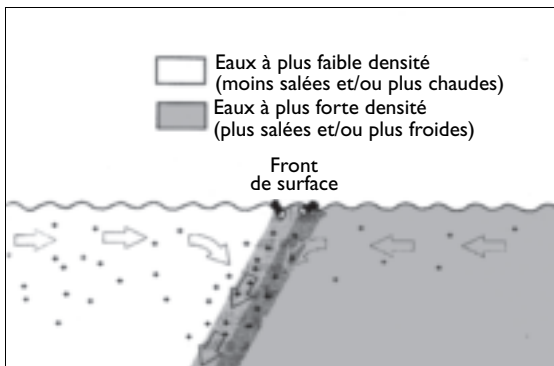


▽ Fig. 28

Schéma d'une zone de front de rupture de plateau (d'après BAKUN, 1996).

- Les zones de convergence

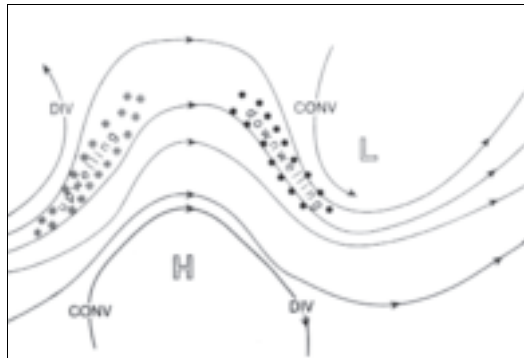
Elles sont souvent peu étudiées (à l'inverse des zones de divergence, siège de remontées massives d'eau profonde issue de couches plus riches en nutriments), elles représentent toutefois des zones de pêche non négligeables.



▽ Fig. 29

Schéma du processus de convergence amenant la concentration des matières en suspension et du plancton au niveau d'un front de densités d'eaux différentes (température, salinité) (d'après BAKUN, 1996).

En effet, comme divers auteurs l'ont décrit (BAKUN, 1996 ; PITON et MAGNIER, 1975 ; SINCLAIR, 1987), les zones de convergence, en concentrant les éléments nutritifs et (ou) en suspension (plancton notamment), favorisent le développement de réseaux trophiques localisés dans l'espace et le temps (fig. 29). BAKUN (1996) décrit notamment ce phénomène dans le grand système de courant du Gulf Stream, où divergence et convergence se succèdent le long de la bordure du courant principal (fig. 30). C'est aussi ce phénomène que PITON et MAGNIER (1975) décrivent au sud du canal de Mozambique (fig. 23).



▽ Fig. 30

Schéma des zones de divergence/convergence se succédant en bordure d'un vaste courant océanique, comme le Gulf Stream (repris de BAKUN, 1996).

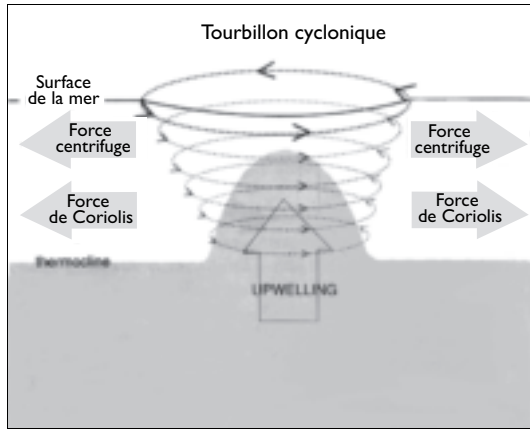
- *Les eaux issues de l'upwelling équatorial*

Peu productives en elles-mêmes, mais reprises par le vortex anticyclonique (gyre océanique), elles représentent une zone de pêche substantielle. Dans l'océan Indien, l'upwelling équatorial est beaucoup moins développé que dans les autres océans.

- *Les crêtes et dômes thermiques*

Dans l'Atlantique sud notamment en hiver boréal, la pression du vent induit une remontée verticale des isothermes sans qu'il y ait de refroidissement en surface. Cette remontée de la thermocline est favorable à la capturabilité des thonidés. Les juvéniles et les bonites sont particulièrement attirés par ces régions de forte variation verticale de la température. Un dôme thermique naît selon le même principe que la crête thermique, la remontée des isothermes étant ici plus localisée, sous la forme d'un dôme.

C'est ce type même de processus (fig. 31) qui peut être bien mis en évidence par le paramètre de vorticité (vorticité négative rémanente), avant qu'il ne soit marqué par les paramètres SST (température) ou Chl-*a* (indice chlorophyllien). Le même processus, mais inversé, donne lui lieu à des downwellings, sous l'effet de la convergence des courants au sein de tourbillons anticycloniques (*anticyclonic eddy*).

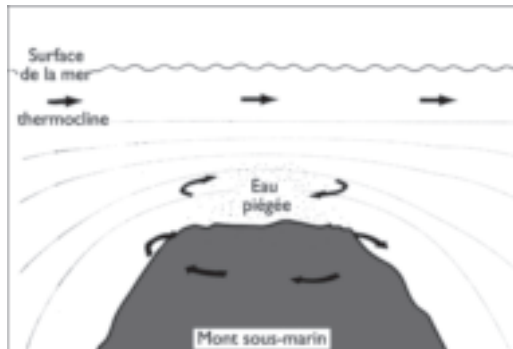


▽ Fig. 31

Schéma d'un upwelling de « haute mer », issu d'un tourbillon cyclonique sous l'effet du vent et induisant une remontée de la thermocline sous la forme d'un dôme dans l'hémisphère nord (d'après BAKUN, 1996).

- Les guyots ou monts sous-marins

Les hauts-fonds sous-marins, souvent le sommet de volcans sous-marins, favorisent les rassemblements de poissons (PETIT et al., 1989). Notamment, le phénomène des colonnes de Taylor (BAKUN, 1996) induit la « capture » d'une masse d'eau, qui se trouve bloquée au-dessus du mont sous-marin et induit le même effet qu'une zone de convergence de courants, concentrant matière en suspension et organismes vivants (fig. 32).

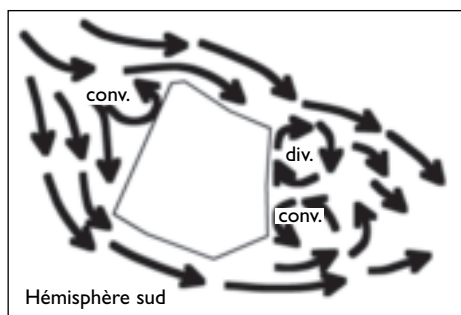


▽ Fig. 32

Schéma d'une colonne de Taylor stratifiée, se créant au-dessus d'un mont sous-marin en plein océan (d'après BAKUN, 1996).

- *Les effets d'îles*

On appelle « effets d'îles » les perturbations hydrologiques produites par une île au sein de la circulation océanique. Cela va être à l'origine d'un accroissement de la biomasse planctonique autour de l'île ou dans un site particulier (par exemple, sous le vent de l'île, fig. 33).



▽ Fig. 33

Schéma des effets d'îles observés au vent et sous le vent d'une île, placée en travers d'un courant océanique (d'après UDA et ISHINO, 1958).

- *Les eaux oligotrophes ou les eaux du large*

La couche homogène de surface, dépourvue de nitrates, est éventuellement favorable au développement des larves. L'enrichissement de ces eaux est le fait de phénomènes localisés dans l'espace et le temps, comme le développement de tourbillons cycloniques créant une divergence avec remontée d'eau profonde (vortex cyclonique, vorticité « positive ») ou une convergence avec plongée d'eau (déjà évoquée plus haut).

Ces phénomènes, particulièrement localisés et fugaces, correspondent à un élément essentiel du paysage océanique tropical en constituant en quelque sorte des « oasis » de nourriture dans un milieu relativement oligotrophe. Ils sont difficilement observables du fait des échelles de temps et d'espace employées dans la description du milieu hauturier, même avec les satellites actuellement opérationnels. L'utilisation du paramètre de vorticité pour repérer ces zones de tourbillon, sans pour autant présager de leur effet sur l'enrichissement nutritif réel de la zone ou de la concentration de proies de grands pélagiques notamment, est une piste qui est exploitée dans notre étude.

La télédétection spatiale permet de mettre en évidence certaines de ces structures. Nous présentons ici quelques exemples d'utilisation du Système d'information océanique (SIO) décrit dans la troisième partie de ce document et issus de la base de données satellitaires fournies dans le cadre du programme.

Eaux côtières, upwellings et downwellings

L'upwelling de Somalie est particulièrement observable sur les cartes de températures de surface, de vorticité et de couleur de l'eau (fig. 34 et 35, cf. cahier hors-texte). Bien utilisé, l'outil satellitaire et le SIO fourni donnent l'extension, la dynamique et l'intensité en temps quasi réel du phénomène.

Au sud de Madagascar, les upwellings d'accotes de plateau en face de Fort-Dauphin, de même que les zones de divergence/convergence au sud du canal de Mozambique sont particul rement mis en évidence sur les cartes de température de surface et de chlorophylle. La vorticité, paramètre le moins conservatif, anticipe très bien ce type de phénomènes.

Effets d'îles

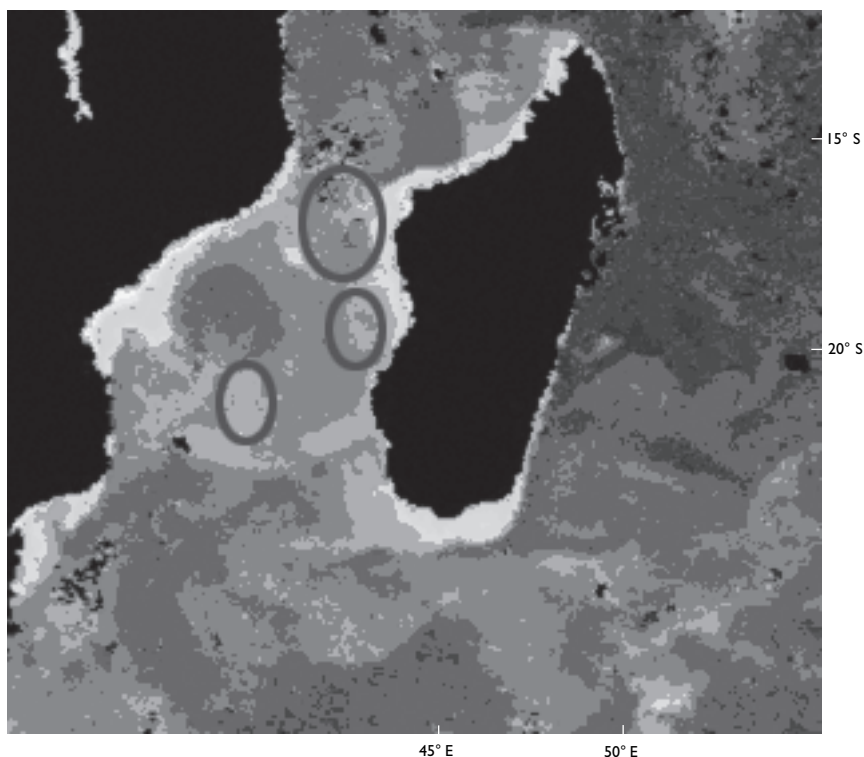
Une  le constitue un obstacle aux courants et en arrière de l' le (« sous le vent ») se forment deux gyres de vortex opposés. Ces phénomènes s'observent sur les images de vorticité, notamment autour des Mascaraignes (Réunion, Maurice), la température de surface pouvant parfois signer ces phénomènes (fig. 36, cf. cahier hors-texte).

Tourbillons ou vortex (*eddies*)

Dans le canal de Mozambique, les grands systèmes tourbillonnaires apparaissent parfois sur les images de synthèse de couleur de l'eau, souvent sur celles de température, mais les algorithmes de synthèses, indispensables pour pallier la nébulosité, lissent le phénomène et le rendent peu lisibles sans une certaine habitude. Il est nécessaire de revenir aux images de nuit, voire aux données des températures de brillance d'un des satellites pour appréhender correctement la géométrie du vortex. Sur la figure 37 (cf. cahier hors-texte), les tourbillons du canal de Mozambique apparaissent faiblement contrairement à ceux du sud de Madagascar. La figure 38 donne un exemple de tourbillons bien marqués par la production primaire.

Au niveau de la rétroflexion sud-malgache, les tourbillons et méandres, caractéristiques de ce flux de mélange des eaux tropicales et tempérées (vers 25  S) sont bien restitués sur les images de SST (fig. 34).

Par nature, ce sont les calculs d'anomalies du niveau de l'océan (SLA) et des courants géostrophiques induits qui donnent le meilleur suivi des tourbillons (fig. 39, cf. cahier hors-texte). Les méthodes mises au point au cours du projet PELOPS (projet *Principal Investigator* du programme Nasa/Cnes, Jason) rendent compte en temps quasi réel de l'évolution des tourbillons de quelques dizaines de milles nautiques.   partir d'une grille maill e au quart de degré, la spatialisation sous forme d'images hebdomadaires de ces calculs aide à la visualisation de ce type de phénomènes.



▽ Fig. 38
*Tourbillons dans le canal de Mozambique
marqués par les concentrations en chlorophylle.*

Monts sous-marins

Il ne s'agit ici évidemment pas d'un phénomène hydrologique à proprement parler, mais d'une structure statique pouvant provoquer des phénomènes de blocage d'une eau au sommet du mont, appelés colonnes de Taylor stratifiées (BOEHLERT 1987 ; FONTENEAU, 1991 ; PETIT *et al.*, 1989 ; ROGERS 1994). Les effets éventuellement visibles en surface de la présence de ces hauts-fonds sont de même type que les effets d'îles évoqués plus haut.

Dans notre étude, nous avons utilisé deux sources de données :

- la bathymétrie (fig. 40, cf. cahier hors-texte) calculée par BAUDRY *et al.* (1994) lors du projet thonier régional (PTR2, CAN Réunion), la plus précise mais concernant des zones limitées ;
- la bathymétrie (fig. 41, cf. cahier hors-texte) de Sandwell (SMITH ET SANDWELL, 1997) issu du fichier mondial.

Cette bathymétrie générale de l'océan Indien a été obtenue sur le site Internet http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi. Les extractions fournies sont des fichiers texte contenant la localisation des points de mesure et la bathymétrie

issue de mesures gravimétriques corrigées. Une correction par interpolation spatiale a été appliquée à ces données afin d'obtenir une répartition régulière des données en latitude et longitude identique de 2 minutes. Divers auteurs considèrent que cette bathymétrie est la meilleure que l'on puisse obtenir à partir de données gravimétriques dans l'océan Indien (PADFIELD *et al.*, 2000).

La bathymétrie plus précise de BAUDRY *et al.* (1994) a pu être intégrée à la base de données. Elle ne concerne qu'une zone restreinte au sud de la Réunion, centrée sur un mont sous-marin. Celui-ci représente toutefois un intérêt particulier pour la pêche palangrière réunionnaise dans la mesure où plusieurs patrons pêcheurs posent régulièrement leurs lignes à proximité.

Eaux du large, vortex subtropical

Un phénomène particulièrement spectaculaire, témoin de la circulation du vortex subtropical sud de l'océan Indien (la province ISSG de LONGHURST, 1998), est la bifurcation du flux du courant est-malgache (réminiscence du courant sud-équatorial après avoir longé la côte est-malgache) dans la circulation du vortex subtropical. Une longue langue de température plus chaude se déplace alors vers l'est (vers 25° S), bien visible sur les cartes de température de surface (fig. 42, cf. cahier hors-texte)

Les phénomènes de remontée superficielle des nitrates en périphérie du vortex subtropical, comme expliqués par LONGHURST (1998), de même que les flux divergents et upwellings potentiels apparaissant sur la crête de la thermocline, vers 10° S notamment, peuvent être observés sur les cartes de couleur de l'eau, au sein d'un milieu oligotrophe où la chlorophylle de surface excède rarement 0,05 mg.m⁻³ (fig. 38 et fig. 43, cf. cahier hors-texte).

A black and white photograph of a rugged coastline. In the foreground, dark, jagged rocks are scattered across the lower half of the frame. To the left, a dense line of trees, possibly pines, grows on a slight incline. The ocean is visible on the right, with white foam from waves crashing against the rocks. The sky is overcast with soft clouds.

2

La pêcherie palangrière
développée
depuis l'île de la Réunion

L'espadon, espèce cible de la pêche palangrière réunionnaise

DAVID GUYOMARD, FRANÇOIS POISSON,
JEAN-MICHEL STRETTA



© D. Guyomard

Le comportement de l'espadon à partir de rares observations directes

Le marquage d'espadon (*Xiphias gladius* Linnaeus, 1758) constituait l'une des opérations du PPR (Programme palangre réunionnais). Il s'agissait en fait d'opérations pilotes, dont le caractère expérimental a été souligné par POISSON et REYNAUD (2001). Les résultats issus de ces marquages ne permettent pas d'évaluer les caractéristiques du comportement individuel des déplacements de l'espadon propres à l'environnement de l'océan Indien. Le fort taux de mortalité des espadons marqués pourrait notamment constituer un obstacle rédhibitoire à la réussite de ce genre d'opérations (SEDBERRY et LOEFER, 2001).

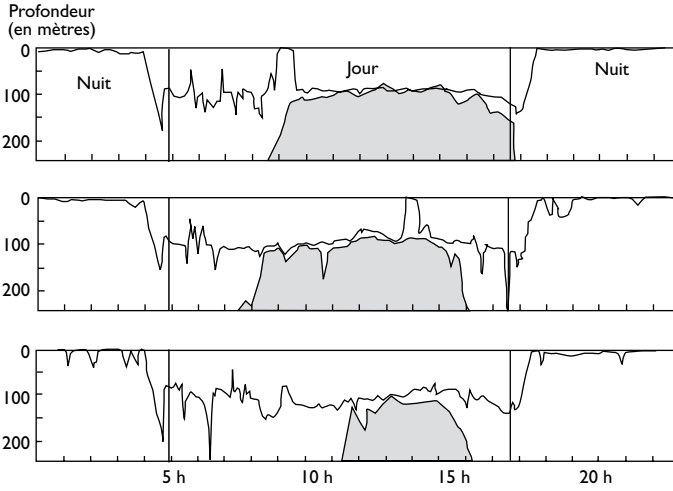
Le fait de ne disposer d'aucun suivi réel d'espadon dans l'océan Indien, et plus particulièrement dans la « zone Réunion », est un handicap certain dans l'analyse du comportement de l'animal. Ces données auraient pu nous fournir des éléments essentiels sur le comportement de l'animal au cours d'une journée complète, puisque les éléments dont nous disposons ne sont issus que des pêches, nocturnes et en surface, effectuées par les navires réunionnais. Le comportement diurne de l'espadon et ses déplacements en profondeur nous sont ainsi parfaitement inconnus dans la zone géographique qui nous intéresse.

Les seuls suivis acoustiques d'espadons marqués ont été réalisés par CAREY et ROBISON (1981), puis complétés par CAREY (1990). Les auteurs soulignent que cette opération nécessite une très bonne organisation à bord, car la manipulation

d'un espadon vivant de 70 kg remonté le long du bord du navire de suivi est dangereuse pour l'équipage. En effet, les suivis acoustiques ne peuvent se faire que sur des individus suffisamment grands pour survivre. L'opération de marquage nécessite de pêcher puis d'immobiliser l'animal en surface pendant quelques instants. L'animal doit ensuite pouvoir poursuivre son activité vitale sans être gêné par la marque. Ainsi, les connaissances sur les déplacements réels à échelle journalière de l'espadon n'ont pour le moment été réunies que sur de gros individus (plus de 32 kg pour CAREY, 1990). Même si les observations restent relativement homogènes selon la taille des individus marqués, on manque de connaissances sur les déplacements des jeunes individus. Les auteurs ont effectué le marquage de 7 espadons entre 1977 et 1985, pour un total de 457 heures de suivi acoustique.

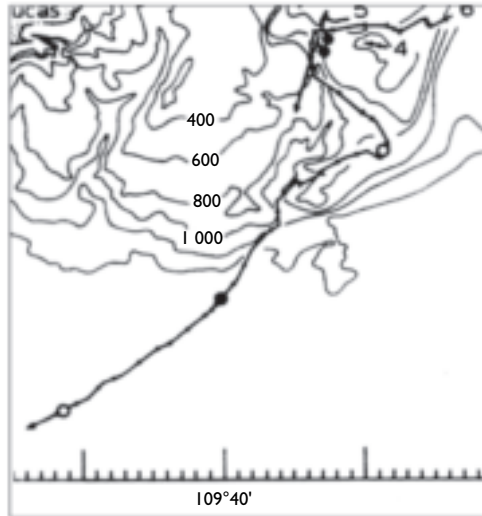
Malgré tout, plusieurs faits sont établis sur le comportement de l'animal grâce à ces expérimentations. Les marquages réalisés par Carey ont ainsi montré la capacité des espadons adultes (de 30 à plus de 150 kg) à subir des variations de températures extrêmes (jusqu'à 19 °C d'amplitude thermique en 2 heures et demie), depuis des températures de 8 °C jusqu'à des extrêmes à plus de 30 °C en surface. Ce phénomène d'adaptation thermique est garanti par la physiologie particulière de l'animal, doté d'un système de circulation « en circuit fermé », assurant le maintien d'une température crânienne et rétinienne supérieure à celle du milieu extérieur (CAREY, 1990 ; MOYLE et CECHE, 1996), lui permettant notamment d'effectuer des déplacements verticaux jusqu'à des profondeurs où les valeurs de température, oxygène et (ou) salinité pendant la durée de la plongée dépassent largement les gammes de valeurs rencontrées en surface. Sa capacité à atteindre des profondeurs importantes (jusqu'à 600 m ou plus) est *a priori* aussi une adaptation physiologique majeure. Malgré la densité assez faible de son corps du fait de ses os gras et poreux, la compression sans échanges gazeux de sa vessie natatoire en profondeur associée à un hydrodynamisme particulier (rostre plat et nageoires pectorales rigides) permettraient d'équilibrer l'animal dans ses plongées. La figure 44 montre la succession de plongées/remontées qu'effectue un animal marqué au cours des quelques dizaines d'heures que dure un suivi acoustique.

Le caractère relativement « sédentaire » de l'animal a été mis en évidence, ou du moins sa tendance à retrouver un endroit favorable. Les poissons marqués par Carey ont manifesté un comportement nettement cyclique entre le large et la surface pendant la nuit et les zones de hauts-fonds (bancs, zone côtière sur le fond) pendant la journée (fig. 44). Les marquages réalisés par Carey ont toutefois tous été réalisés en zone côtière, et il n'est pas exclu que le comportement d'espadons qui évoluent dans un milieu « strictement » pélagique (loin des côtes) puisse être sensiblement différent (fig. 45). Ces comportements laissent penser qu'il existe des populations « résidentes » d'espadons (forte viscosité de la population) au niveau de structures bathymétriques telles que les monts sous-marins, les hauts-fonds ou les zones côtières et les îles. Au cours d'un laps de temps de quelques jours, on peut considérer que l'animal exploite un « territoire de chasse » stable, concentrant sa recherche de proies autour d'une zone géographique où celles-ci se trouvent concentrées.



▽ Fig. 44

Enregistrements de la profondeur atteinte par un espadon marqué en basse Californie en 1981 (CAREY et ROBISON, 1981), sur 3 jours, montrant que le poisson plonge pendant la journée (intervalle entre les lignes verticales) et se déplace à proximité immédiate du fond (les surfaces grisées représentent des hauts-fonds).



▽ Fig. 45

Exemple de la trajectoire suivie par un espadon marqué par CAREY et ROBISON (1981) en basse Californie, représentée sur les lignes de niveau de bathymétrie de cette zone démersale.

Les observations de CAREY et ROBISON (1981) et CAREY (1990) confirment le comportement prédateur très opportuniste de l'animal, mis en évidence à partir des analyses de contenus stomacaux. Il semble même que la physionomie du poisson soit adaptée à des déplacements sur le fond marin pour pourchasser des espèces benthiques : ses nageoires pectorales rigides et sa queue forment un tripode qui facilite la nage stabilisée près du substrat solide (CAREY et ROBISON, 1981). L'espadon semblerait donc suivre ses proies selon leur disponibilité : espèces de fond le jour, céphalopodes remontant en surface au large la nuit pour chasser. La réalité d'une attirance particulière des espadons pour certains fonds marins, particulièrement le long des canyons océaniques perpendiculairement à la côte (pente du talus continental ou canyons sous-marins insulaires) est une idée partagée par de nombreux pêcheurs professionnels et sportifs.

Mais les mouvements nycthéméraux observés ont aussi peut-être une cause plus directement physiologique et indirectement trophique. Les observations sur les masses d'eau traversées par l'animal (profils profondeur/température effectués le long du suivi) indiquent une relation assez nette entre les mouvements verticaux de l'animal et les variations de la luminosité du milieu. Les résultats des études effectuées sur la comparaison entre les phases de la lune et le niveau de captures palangrières sur l'espadon sont parfois contradictoires. Nos résultats concernant la pêche palangrière suggèrent que les espadons sont plus capturables en périodes de lune ascendante et descendante. DRAGANIK et CHOLYST (1986) avaient ainsi suggéré que l'espadon « suivait » un isolume particulier dans ses déplacements de chasse. Cette hypothèse pourrait être relativement crédible, en considérant qu'une gamme d'éclairement constituerait « l'habitat lumineux » préférentiel de l'animal. Encore une fois, l'absence de marquages ne permet pas de confirmer ou même de tester une telle hypothèse...

Il est vraisemblable que la vue est un sens primordial chez l'espadon : ses gros yeux, l'efficacité des leurres bioluminescents (cylumes) et les observations effectuées lors des suivis acoustiques indiquent une forte sensibilité à la luminosité. Une étude récente (FRISTSHES et WARRANT, 2001) a mis en évidence l'adaptation particulière de la vision des grands poissons pélagiques selon leur habitat et leur comportement privilégié. Elle a ainsi montré que l'espadon a une vision adaptée à une faible lumière et à de faibles variations d'intensité lumineuse : ses gros yeux lui assurent une bonne détection des proies à la fois en profondeur le jour, là où la lumière du jour ne pénètre que très peu, et la nuit en surface.

Des chercheurs japonais (TAKAHASHI *et al.*, 2001) ont récemment marqué un espadon avec une marque de type « archive », permettant d'enregistrer les profondeurs atteintes par l'animal pendant près d'une année entière. Ce qui a été mis en évidence, c'est d'abord le comportement de « homing » (retour au bercail) de l'animal, qui a été recapturé dans la même région que celle où il avait été capturé initialement. L'analyse des profondeurs atteintes et des températures associées a aussi permis aux auteurs de proposer un trajet « migratoire » de l'animal, qui se déplacerait entre les régions tropicales et subtropicales en été (période de reproduction) et plus tempérées en hiver, comme suggéré par DE MARTINI (1999), WARD et ELSCOT (2000) ou les connaissances acquises pendant le PPR (POISSON et REYNAUD, 2001). La profondeur maximale atteinte

par l'espadon marqué était de 990 m (mais la fiabilité de la sonde utilisée, limitée à 700 m peut être discutée).

SEDBERRY et LOEFER (2001) ont aussi entrepris de marquer des espadons avec des marques de type « archive », mais aussi auto-détachables (type « pop-up » ou « pop-off »), dans l'Atlantique nord-est. Les marques ont été programmées pour être larguées au bout de 30 jours (pour 10 des poissons marqués), 60 jours (10 poissons marqués) et 90 jours (9 poissons marqués). Les espadons ont tous été marqués au-dessus d'une structure bathymétrique remarquable appelée le « banc de Charleston », sur le plateau de Blake, à l'est de la Caroline du Sud et de la Géorgie (États-Unis). Cette structure est considérée comme une zone de ponte et de nourricerie pour l'espadon. Bien que quatre espadons aient été repérés aux alentours du Banc de Charleston jusqu'à 90 jours après le marquage, la plupart des poissons marqués ont parcouru des distances considérables vers l'est et le nord-est, et se trouvaient situés en association avec des hauts-fonds du large, des canyons sous-marins de la Middle Atlantic Bight et aux fronts thermiques du côté nord du Gulf Stream. La plus grande distance minimale (i.e., en ligne droite) suivie était de 2 497 km (à une vitesse moyenne de 27 km/jour), et la vitesse maximale déduite des suivis de 34 km/jour. La température de l'eau mesurée et archivée par les marques reflète les migrations journalières de l'espadon entre la surface et les plus grandes profondeurs. L'observation des relevés de températures montre souvent de fortes baisses de température jusqu'à des valeurs très basses, vraisemblablement associées à de très grandes profondeurs, indiquant que les individus marqués n'ont pas survécu à la manipulation et ont coulé dans les quelques heures suivant le marquage. Le taux de mortalité chez les poissons marqués a été estimé à près de 52 %.

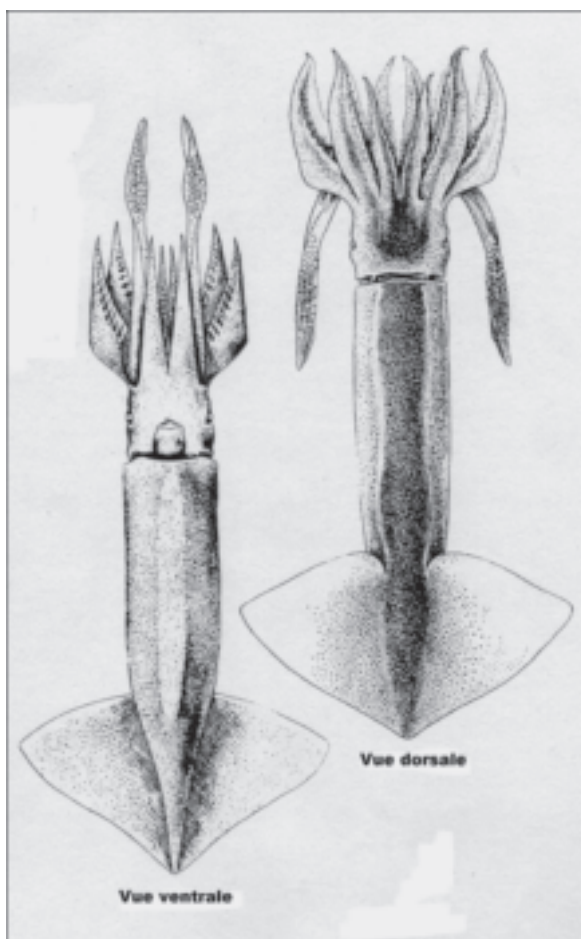
Toutefois, ces dernières données de marquage confirment les observations de CAREY (1990) et CAREY et ROBISON (1981), selon lesquelles les espadons effectuent des migrations journalières entre les grandes profondeurs et la surface. Elles indiquent aussi la forte propension des espadons à s'associer aux structures bathymétriques telles que canyons et monts sous-marins, ainsi qu'aux fronts thermiques. Les calculs de vitesses moyennes établis d'après ces marquages montrent des déplacements plus lents que ceux observés par ces auteurs, du fait que les suivis ont été réalisés sur de plus longues périodes et que les espadons marqués ont pu effectuer de nombreuses circonvolutions au cours de leurs déplacements.

Le régime alimentaire de l'espadon, marqueur de son comportement

Les espadons adultes sont des prédateurs chassant à vue, se servant de leurs yeux très développés pour détecter leurs proies dans des eaux où la lumière est faible et diffuse (MOYLE et CECI, 1996). Ils sont ainsi susceptibles de s'alimenter de jour comme de nuit, pouvant s'adapter à une large gamme de conditions de

luminosité. Les analyses de contenus stomacaux effectuées sur l'espadon ont ainsi permis de mettre en évidence une grande diversité de proies, qu'il est capable d'ingérer tout au long du nyctémère, à des profondeurs variables. Les espadons utilisent leur rostre pour assommer leurs proies en donnant de vigoureux coups de têtes latéraux quand ils se trouvent dans une zone de concentration de proies.

L'espadon est très vorace tout au long de sa vie (WARD et ELSCOT, 2000). Des études ont reporté des larves d'espadons avalant des larves de poissons de leur taille (Taning, 1955, in PALKO et al., 1981). Les larves d'espadon (< 14 mm) se nourrissent de zooplancton, les juvéniles commençant progressivement à se nourrir d'amphipodes, de mysidacés et de larves de poissons épipélagiques au-delà d'une certaine taille, variable selon les auteurs (PALKO et al., 1981).



▽ Fig. 46

Le calmar volant (« red flying squid », *Ommastrephes bartrami*, source FAO).

Le régime alimentaire de l'espadon varie selon l'endroit et les espèces disponibles. La majeure partie de son régime est constituée d'encornets, de poissons et de crustacés (PALKO *et al.*, 1981). Dans l'Atlantique nord-ouest, l'encornet (*Ommastrephes* sp.) et particulièrement l'encornet volant (*Ommastrephes bartrami*, fig. 46) constituent près de 60 % (en nombre) des proies de l'espadon (Stillwell et Kohler, 1985 in WARD et ELSCOT, 2000). Divers poissons, dont le maquereau atlantique, la morue, le barracuda et le hareng sont aussi des proies communes. CAREY et ROBISON (1981) précisent que les espadons se nourrissent de poissons nectoniques (anchois, harengs, maquereaux), de poissons micronectoniques (Myctophidés, Paralepididés) et d'espèces mésopélagiques à migration verticale, exploitant ainsi quasiment toute la couche d'eau où la biomasse de proies est significativement présente. CAREY (1990) précise que les espèces *Peprilus triacanthus* et *Centrolophus medusophagus*, qui sont des espèces intermédiaires entre le fond et la pleine eau, associées aux discontinuités de température (couche d'eau froide dans une eau plus chaude), constituent des proies privilégiées de l'espadon. On a aussi trouvé des espadons au large de la Floride avec des oiseaux marins dans l'estomac. WARD et ELSCOT (2000) n'ont pas reporté de proies courantes composées de thonidés dans la bibliographie consacrée, mais des observations récentes dans l'océan Indien indiquent que des jeunes bonites (*Katsuwonus pelamis*) sont ingérées par des espadons (Michel Potier, *comm. pers.*).

L'importance du calmar pélagique dans le régime de l'espadon a été mise en exergue par une étude dans l'Atlantique centre-est où l'espadon avait consommé au moins 29 espèces de calmars (HERNADEZ-GARCIA, 1995). Les calmars (*Ommastrephes* sp. et *Illex* sp.) constituaient la plus abondante famille représentée dans les contenus stomacaux analysés. Ceux-ci ont révélé une grande variété de proies, depuis des céphalopodes pélagiques de pleine eau jusqu'à divers organismes benthiques (crustacés, poissons), selon que l'habitat principal soit pélagique ou néritique. En zone néritique (dans le détroit de Gibraltar), les proies benthiques constituaient la ration de jour (*Capros aper* et *Micromesistius poutssou*) et les proies pélagiques migrantes celle de la nuit (*Todarodes sagittatus*). En zone océanique, la ration est constituée de céphalopodes surtout (*Sthenotheuthis pteropus*, *Todarodes sagittatus* et *Ommastrephes bartrami* dans le golfe de Guinée). Selon HERNADEZ-GARCIA (1995), les espadons pourraient se distribuer dans les zones de préférences de leurs proies (les femelles mûres de *Sthenotheuthis pteropus* ont la même distribution thermique que l'espadon entre 24 °C et 30 °C). PODESTA *et al.* (1993) indiquent que l'espèce de céphalopode *Illex illecebrosus* constitue aussi une proie fréquemment ingérée par l'espadon.

SEKI (1999) note que dans le Pacifique nord autour de Hawaii, la préférence de l'espadon va aussi au calmar volant *Ommastrephes bartrami*, dont les migrations de reproduction vers le sud depuis le front polaire correspondent aux pics de captures d'espadon, qui semble le suivre. Pendant le programme Ecotap (1995-1997) mené autour des îles de la Polynésie française dans le Pacifique sud, des échantillonnages des contenus stomacaux des quelques espadons capturés ont aussi été effectués. L'analyse taxonomique des poissons et céphalopodes

rencontrés confirme l'habitat profond de l'espadon, pour des besoins nutritionnels, puisque bon nombre d'entre eux appartiennent à des groupes dont la distribution est méso- ou bathypélagique. 60 % des proies sont constitués de poissons (Diretmidés, Scopelarchidés, Paralepididés, genre *Bathylagus* et Myctophidés) et 39,2 % de céphalopodes (*Moroteuthis* sp., *Ommastrephes bartrami*). *Myctophum selenops* est une espèce particulièrement profonde, restant toujours en dessous de 200 m. Pour les céphalopodes, la présence de *Moroteuthis* dans les estomacs va dans le même sens et constitue le témoignage d'un comportement nutritionnel profond comme celui décrit pour le thon obèse (*Thunnus obesus*) ou les castagnoles (*Chromis chromis*), tout au moins sous des latitudes tropicales. Ce céphalopode est également une espèce d'eaux froides et il est, de ce fait, difficile de faire la part entre les composantes bathymétrique et thermique dans le déterminisme de ce comportement alimentaire. Les auteurs précisent à ce sujet qu'un espadon de 80 kg, capturé par un navire polynésien par environ 27° S avait avalé un *Ommastrephes bartrami* de plus d'un kilo, céphalopode adulte connu pour fréquenter, à ce stade de développement, les zones de contact à fort gradient thermique (15° à 24 °C). Ce type de gros individus d'encornets a aussi été observé dans les contenus stomacaux d'espadons capturés aux alentours de la Réunion (fig. 47).

Une étude préliminaire menée par MARSAC et POTIER (2002) a aussi permis d'aborder le régime alimentaire de l'espadon dans le sud-ouest de l'océan Indien, par l'analyse des prélèvements de contenus stomacaux d'espadons capturés



▽ Fig. 47

Spécimen de calmar (espèce indéterminée) de plus de 1 kg
trouvé dans un estomac d'espadon ramené à bord d'un palangrier réunionnais
(photo : D. Guyomard).

aux Seychelles (26 espadons collectés en août 2001). Deux sous-zones de pêche ont été définies par les auteurs : une zone dite « océanique » entre 2° S et 3° S, et une zone proche du plateau seychellois entre 3° S et 4° S. Comme pour les quelques estomacs d'espadons collectés au cours du PPR autour de la Réunion, une faible proportion d'estomacs étaient vides (12 %), indiquant une activité alimentaire élevée des espadons aux heures de captures. Dans cet échantillon de faible effectif, les poissons constituaient la majorité des proies ingérées (en poids, nombre et occurrence), suivis par les céphalopodes et les crustacés (crevettes). Les céphalopodes étaient constitués majoritairement d'Ommastrephidés. Les poissons étaient constitués d'organismes mésopélagiques (*Cubiceps pauciradiatus* et les *Diretmidés*, *Diretmoides parini* et *Diretmus argenteus*). Les poissons dominent ainsi dans les régimes alimentaires à la fois des espadons capturés en zone océanique et près du plateau seychellois. Paradoxalement, et à l'exact inverse des observations de HERNADEZ-GARCIA (1995) en Atlantique, les crustacés dominent en zone océanique tandis que les céphalopodes dominent en zone de plateau. Toutefois, cette étude étant préliminaire, il n'est pas exclu que ces résultats soient substantiellement modifiés par la suite en disposant de plus de contenus stomacaux.

La ration journalière requise par un adulte a été estimée entre 0,9 et 1,6 % de son poids corporel, sa consommation annuelle atteignant de 3 à 6 fois son poids moyen sur l'année (Stillwell et Kohler, 1985 in WARD et ELSHOT, 2000). De fortes concentrations de métaux lourds, comme le mercure et le sélénium, peuvent s'accumuler dans la chair de l'espadon du fait de leur longue durée de vie, de leur position de prédateur apical avec un taux métabolique relativement élevé (MONTEIRO et LOPES, 1990).

Ces éléments indiquent que l'espadon est un prédateur très actif, jour et nuit en quête de nourriture, et que la motivation trophique constitue sans doute la principale motivation de ses déplacements à méso-échelle.

Ainsi, l'espadon se déplace parfois sur de très longues distances dans les grands bassins océaniques. Le suivi des captures sur plusieurs années permet de mettre en évidence certains patrons de distribution de la population d'espadons dans l'océan Indien, notamment des variations spatio-temporelles de capturabilité, particulièrement nettes selon les classes de taille et vraisemblablement entre mâles et femelles. Si on considère l'hypothèse d'une accessibilité différente entre les sexes et entre les juvéniles et les adultes, il semble que les mâles, et (ou) les juvéniles, privilégient les eaux chaudes de la zone intertropicale toute l'année (Seychelles, vraisemblablement canal de Mozambique), se déplaçant vers les latitudes plus hautes au moment où les femelles sont gravides (novembre-avril autour de la Réunion¹). À l'échelle journalière ou celle d'une marée de pêche, les variations des rendements par hameçons en espadons expriment aussi une certaine hétérogénéité de la distribution de la population d'espadons. Dans les deux cas, les individus qui la composent se déplacent sans cesse, sous l'influence de leur forte musculature et des courants, suivant des trajectoires complexes pouvant

1. Dans la zone Réunion entre 15° S et 25° S, entre Madagascar (35° W) et Maurice (60° W).

être mises en relation avec certains éléments du paysage océanique (CAREY et ROBISON, 1981). L'effet de la convergence de leurs propres mouvements et de ceux de leurs congénères forme ainsi des « concentrations » à toutes les échelles considérées : concentrations génésiques à l'échelle océanique (rapprochement des mâles et des femelles), concentrations trophiques à méso-échelle. Ces concentrations ne présentent pas le caractère stable et auto-entretenu des concentrations de thons tropicaux des zones de pêche de surface, mais elles sont caractéristiques de la population d'espadons. La dynamique de leur formation revêt un caractère à la fois déterminé, du fait des déplacements individuels *a priori* orientés, et stochastique, puisque chaque individu n'est pas lié à ses congénères de la même manière que les thons au sein des bancs et se « retrouvent » concentrés par le fait d'une convergence globale de comportements individuels.

Questions soulevées à partir de ces comportements

Comment les individus exploitent-ils les informations qu'ils perçoivent dans leur environnement proche ? Quels mécanismes de comportement individuel sont mis en œuvre par les individus, qui provoquent de tels déplacements ? Comment les distributions spatiales observées émergent-elles de ces déplacements individuels ? Quelle est l'influence de ces distributions dynamiques sur les captures palangrières ? C'est pour aborder ces questions qu'un modèle informatique permettant d'explorer différentes hypothèses comportementales sur l'espadon dans le paysage océanique est proposé dans la troisième partie.

Synopsis de la pêche palangrière réunionnaise

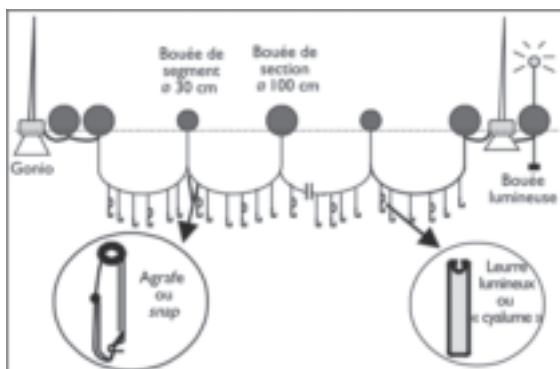
DAVID GUYOMARD, FRANÇOIS POISSON,
JEAN-MICHEL STRETTA



© D. Guyomard

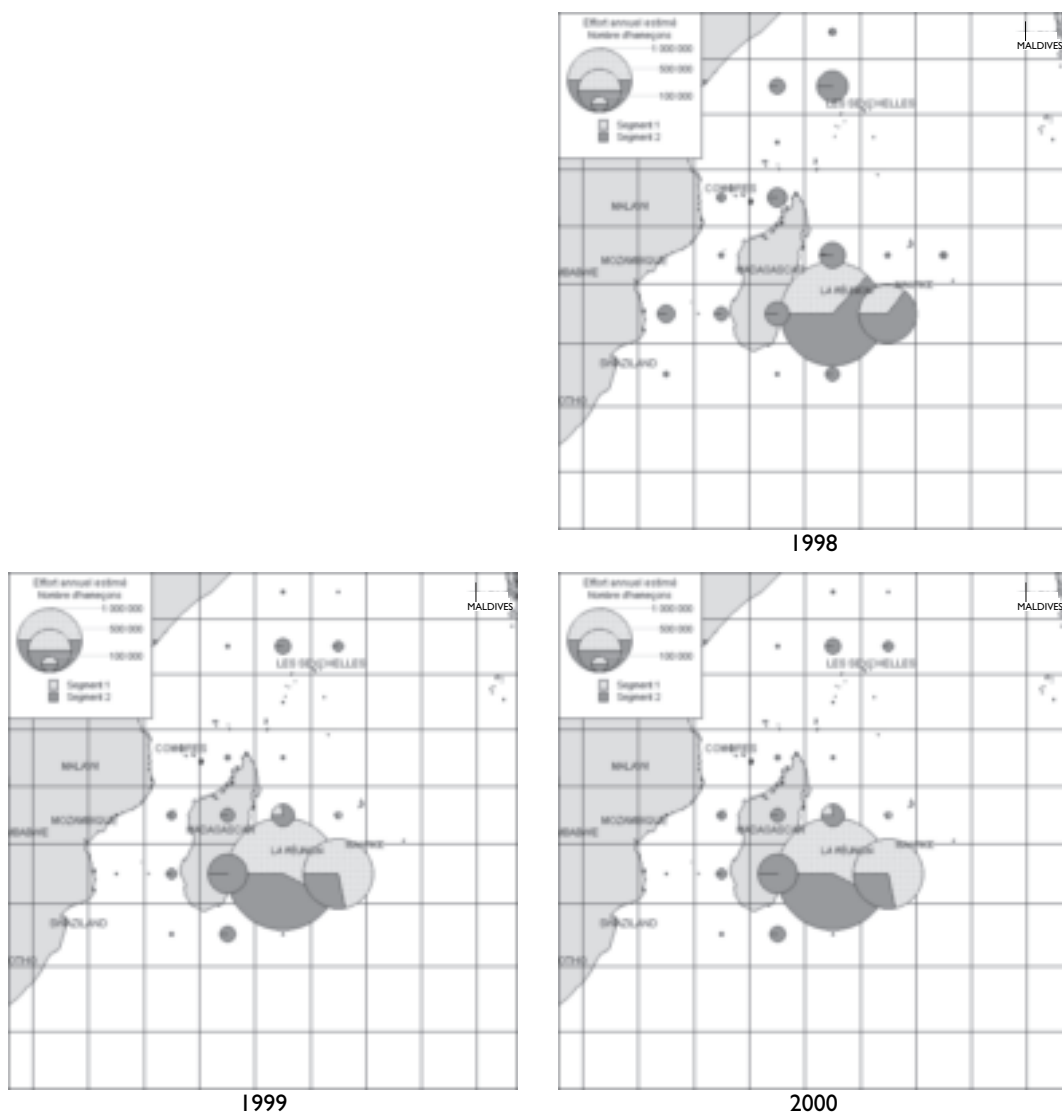
Présentation

La pêche palangrière réunionnaise s'est développée depuis 1991 à partir de la Réunion. Initialement ciblée sur les thonidés, la technique s'est progressivement adaptée à la capture des espadons (*Xiphias gladius* Linnaeus, 1758) par l'adoption



▽ Fig. 48

Schéma du gréement d'une palangre horizontale dérivante de surface (longline)
tel que pratiqué à la Réunion.
(Source : D. Roos, Ifremer, comm. pers.)



▽ Fig. 49

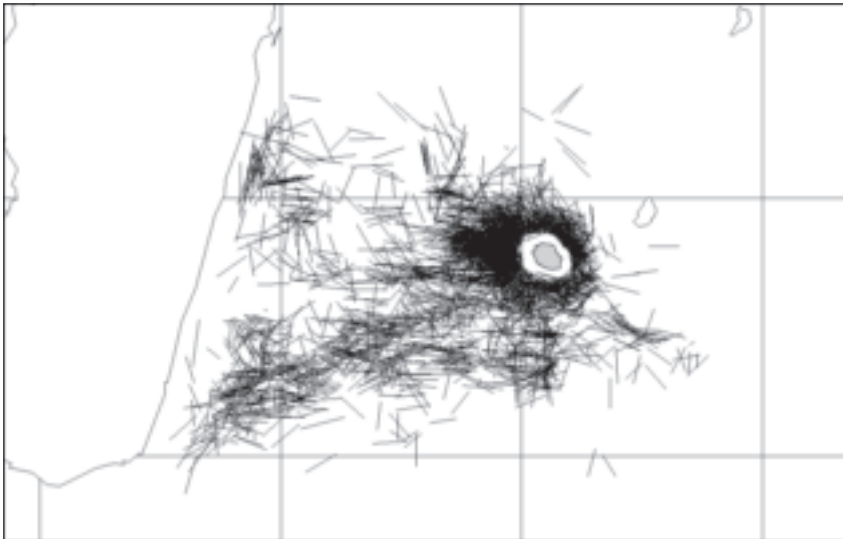
*Extension géographique de la pêche à l'espadon en 1998, 1999 et 2000
pour les deux catégories de bateaux de la flottille réunionnaise :
petits (segment 1), grands (segment 2).*

du calmar comme appât, de filages le soir au coucher du soleil pour laisser la ligne dériver de nuit en subsurface et des cyalumes (bâtonnets lumineux) attirant les proies de l'espadon en surface, calmars et petits poissons pélagiques migrant la nuit vers la surface avec la couche diffusante (*Deep Scattering Layer*) (fig. 48).

La zone de pêche explorée s'est petit à petit étendue par la mise en exploitation de navires capables d'effectuer des marées de plus de 15 jours et disposant de capacités de stockage en frais et congelé des captures. Les navires de la pêche réunionnaise pratiquent leur activité dans la région des Seychelles, dans le canal de Mozambique jusqu'au sud de Madagascar et dans toute la région entre l'arc des Mascareignes et la côte est de Madagascar (fig. 49). C'est cette dernière région (la zone Réunion située précisément entre les latitudes 18° et 25° S et les longitudes 47° et 59° E) qui est la plus exploitée, notamment par le segment des plus petits navires de la flottille, effectuant des marées courtes (de moins de deux semaines). Elle sera la zone d'étude sur laquelle nous focaliserons notre analyse (fig. 50).

La description de la pêche, des techniques et indices halieutiques de suivi de l'activité fait l'objet des actions 1 et 2 et dans une certaine mesure, de l'action 3 du PPR. Nous ne reprendrons ou développerons ici que les aspects de cette analyse en rapport avec la problématique de l'action 4, à savoir les relations fonctionnelles entre l'environnement océanique, la ressource et la dynamique spatio-temporelle de la flottille.

La distribution et la collecte régulière de carnets de pêche auprès des patrons pêcheurs ont permis de constituer une base de données palangrières extrêmement précieuse pour la compréhension des phénomènes halieutiques. La collecte de ces données a été entreprise grâce à la relation de confiance entre les chercheurs de l'Ifremer et les professionnels de la pêche (patrons et armateurs),



▽ Fig. 50

Les filages de la zone Réunion représentés en lignes (certains de ces filages n'ont pas été conservés dans les traitements : positions aberrantes sur la terre, durée du filage ne correspondant pas à l'intervalle entre les positions reportées).

ce qui est un gage de pertinence des informations recueillies. Celles-ci ont, en outre, fait l'objet d'un effort de recherche soutenu, complété par une phase de vérification, de mise en forme et d'analyse qui garantit leur fiabilité.

La description précise des positions de pêche (filage et virage de la ligne), des captures (en nombre d'individus) et des facteurs opérationnels (durée de filage, nombre d'hameçons, longueur des avançons d'hameçons) fournit les éléments essentiels à la connaissance de la variabilité des captures d'espadons par la pêcherie, à une échelle spatio-temporelle fine (journée, dizaine de milles). Les expérimentations embarquées ont précisé les heures et les tranches de profondeur les plus propices à la capture de ces poissons.

Analyse des données palangrières

Dans un souci de synthèse, quelques informations issues des actions 1, 2 et 3 du PPR sont ici reprises. Toutefois, certaines analyses ont été menées spécifiquement dans le cadre de l'action 4 et font l'objet de développements particuliers.

Données issues des carnets de pêche

L'analyse des résultats de pêche (captures et CPUE) a mis en évidence un certain nombre d'éléments préliminaires à toute analyse complémentaire.

Les techniques de pêche sont relativement homogènes au sein de la flottille : on peut considérer que les facteurs opérationnels d'un navire par rapport à un autre, plus encore d'une action de pêche par rapport à une autre, n'interviennent que très peu dans la variabilité des résultats. Notamment, il semble que les pêcheurs s'échangent les techniques les plus efficaces, ce qui a tendance à homogénéiser les pratiques. Cela est particulièrement vrai pour les années qui nous intéressent (1998-2000), après plus de sept ans de développement de la pêcherie. L'influence de ces facteurs sera ici négligée, afin de focaliser notre analyse sur l'influence des facteurs environnementaux et ceux liés à la répartition spatio-temporelle de la flottille.

L'indice d'effort généralement proposé pour la palangre est le nombre d'hameçons mis à l'eau. Cet indice est généralement corrélé à la longueur de ligne filée, qui est beaucoup plus explicite du point de vue de l'analyse spatiale. Seuls quelques filages montrent une nette différence entre les deux indices, généralement du fait d'une forte incertitude dans le calcul de la longueur filée. La longueur de ligne sera surtout utilisée ici, l'influence de l'intervalle moyen entre deux hameçons ayant été dégagée dans les analyses (POISSON et TAQUET éd., 2001).

LES LIGNES DE PÊCHE ET L'EFFORT DE PÊCHE EN LONGUEUR DE LIGNE FILÉE

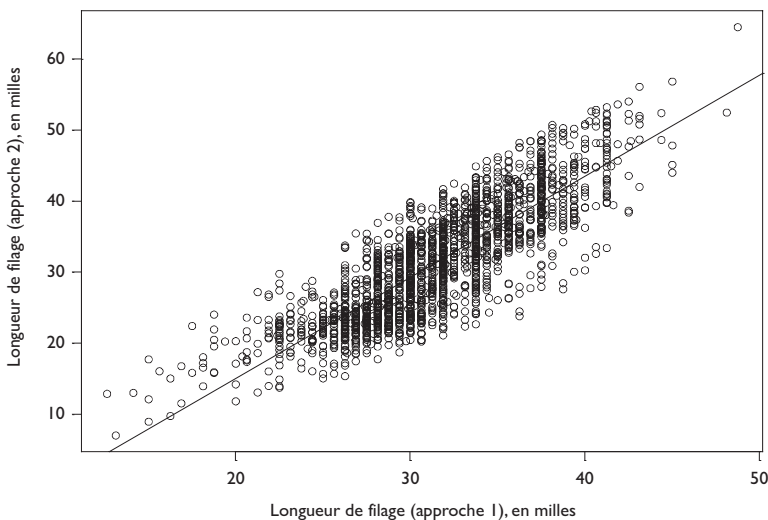
Les données descriptives des lignes de pêche disponibles dans la base de données de l'Ifremer sont les positions de début et de fin de filage, les heures de pose de

la ligne et le nombre d'hameçons. Ces données ne permettent pas de connaître directement la configuration géographique exacte des lignes de pêche, celles-ci pouvant en effet être filées « en ligne » ou former un ou plusieurs « coudes ».

Deux approches ont donc été entreprises pour estimer à la fois la véritable longueur de ligne filée (qui constitue un paramètre d'effort nominal pertinent) et les filages « en ligne », pour lesquels les positions de début et de fin de filage permettent d'en représenter la configuration réelle.

La première approche est basée sur la durée du filage et deux valeurs de vitesse de filage arbitrairement fixées pour les deux segments de la flottille palangrière ; les filages « en ligne » sont alors définis comme ceux pour lesquels la différence entre cette longueur de ligne estimée d'après les durées de filage d'une part, et la distance séparant les points de début et de fin de filage d'autre part, est inférieure à 10 milles. Cette approche repose donc sur deux postulats arbitraires (vitesses de filage et différence de 10 milles) mais permet de ne pas écarter trop de données du jeu initial.

La deuxième approche se base sur une expertise des données et l'établissement de critères techniques établis d'après les paramètres disponibles. La distance entre les positions de filage est considérée comme la longueur de ligne effective. Les vitesses de filage sont ainsi estimées d'après les durées de filage, de même que le nombre d'hameçons moyen par 100 m de ligne filée et l'intervalle de temps moyen entre hameçons successifs. Les distributions de ces paramètres sont analysées et l'expertise permet d'éliminer les valeurs *a priori* aberrantes. Les filages filtrés sont alors considérés « en ligne » et la longueur de ligne calculée fiable. Cette approche semble plus robuste dans la définition des filages « en ligne », mais élimine un plus grand nombre de données et le paramètre d'effort de longueur de ligne ne peut être appliqué qu'aux filages « en ligne ».



▽ Fig. 51

Comparaison des deux approches pour le calcul des longueurs de ligne filée.

Les calculs de longueur selon les deux approches sont particulièrement bien corrélés ($R^2 = 0,7$, fig. 51).

Ces deux approches sont ainsi complémentaires. Si la configuration réelle précise de la ligne est exigée dans les analyses, la deuxième procédure est choisie. S'il est préférable de disposer d'un plus grand nombre de données de longueur de ligne avec juste une position moyenne, la première procédure est choisie.

Lors de l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des données de captures et de CPUE d'espadon, l'indice d'effort choisi est la longueur de ligne. Comme les captures d'espadon ne sont pas précisément localisées le long de la ligne de pêche, le fait de disposer des positions précises des débuts et fins de ligne n'apporte pas d'information supplémentaire. Le point central des lignes a donc été choisi pour caractériser la position des captures. Pour disposer d'un jeu de données plus conséquent, c'est le calcul de la longueur de ligne selon la première approche qui a été choisi comme valeur du paramètre d'effort. Comme la position des captures est ici une approximation, il est nécessaire d'en tenir compte dans l'analyse géostatistique des résultats de pêche, dont les positions peuvent être décalées de quelques milles à quelques dizaines de milles.

Par contre, pour l'analyse de déplacements individuels d'espadon et des captures simulées par les lignes de pêche, la position précise de la ligne est exigée. C'est donc la longueur de ligne et la définition des filages « en ligne » selon la deuxième approche qui sont choisies.

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES PÊCHES À L'ÉCHELLE DE LA PÊCHERIE RÉUNIONNAISE

La pêcherie palangrière réunionnaise ciblant l'espadon s'étend des latitudes très australes du sud de Madagascar jusqu'aux Seychelles, à la fois dans le canal de Mozambique et du côté oriental, jusqu'aux alentours de 60° E. La zone de pêche principale est la zone appelée « zone Réunion » définie plus haut. Elle constitue la zone d'étude privilégiée pour nos travaux. Les actions de pêche reportées dans la base de données palangrières de l'Ifremer y représentent 3 602 filages entre le début 1998 et la fin 2000 (POISSON et TAQUET éd., 2001).

La variabilité saisonnière et interannuelle des captures et les résultats de pêche en classes de tailles et par sexe fournissent des indices sur la structuration spatio-temporelle de la population d'espadon exploitée par cette pêcherie.

La tendance interannuelle de l'effort de pêche palangrière réunionnais est à une augmentation très nette de la part des plus petits navires (< 16 m) entre 1998 et 2000. Ces petits navires exploitent la zone Réunion exclusivement du fait de leur rayon d'action limité (POISSON et TAQUET éd., 2001). Après des tentatives de redéploiements vers les Seychelles et le canal de Mozambique entre les années 1996 et 1998, le recentrage sur la zone Réunion s'est effectué en même temps que le développement du segment palangrier des plus petites unités (segment I, fig. 49). Les captures d'espadon en 1998 s'effectuaient principalement autour de La Réunion et sur une ligne zonale autour des latitudes 23-24° S entre 48 et 55° E. En 1999, la zone sud-malgache (vers 24° S/48° E) a été particulièrement productive en plus des abords de la Réunion (jusqu'au sud vers 24° S). En 2000, les plus fortes captures ont été enregistrées au sud-est de la

Réunion, sur une diagonale entre la Réunion (toujours de fortes captures) et la latitude 24° S à la longitude de l'île Maurice (vers 57-58° E). Il est évidemment difficile de discerner dans ces résultats de captures quelle est la part du redéploiement de l'effort de pêche d'une éventuelle variation des abondances relatives d'espadon dans ces zones. Les rendements annuels moyens (en nombre d'espadons capturés pour 1 000 hameçons) montrent une légère décroissance entre 1998 (environ 9 espadons pour 1 000 hameçons) et 2000 (8 espadons pour 1 000 hameçons), tendance observée depuis 1994 mais moins marquée à partir de 1996. Les rendements moyens annuels des plus petits navires sont plus faibles (6 espadons pour 1 000 hameçons) que ceux des plus grosses unités, exprimant peut-être un effet de déplétion d'un stock « local » d'espadons autour de la Réunion (POISSON et TAQUET éd., 2001).

Les rendements moyens mensuels d'espadons sur la période 1997-2000 montrent une nette saisonnalité. Les rendements sont plus élevés en été pour le segment des petits navires (ceux qui surtout exploitent la zone Réunion), les mois de septembre à mars présentent des rendements plus proches de 8 espadons par 1 000 hameçons. Ces observations sont confirmées par les apports des études biométriques et sur la reproduction menées pendant le PPR. Ces résultats montrent principalement que la saison de reproduction autour de la Réunion se situe en été austral, période pendant laquelle les mâles semblent rejoindre les femelles mûres et ainsi augmenter l'abondance locale des espadons.

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES PÊCHES À MÉSO-ÉCHELLE

Les embarquements à bord des palangriers au cours des campagnes de collecte de données de biométrie ou d'échantillons biologiques pour l'étude de la reproduction et la croissance de l'espadon ont permis de se rendre compte de la variabilité des captures pouvant exister à l'échelle de la journée de pêche. Selon les dires des pêcheurs, certains navires pêchent « bien », d'autres « moins bien », alors que leurs positions de filages ne sont parfois éloignées que de quelques dizaines de milles. Cette constatation soulève la question de l'accessibilité différentielle du poisson sur une surface exploitée relativement restreinte à l'échelle du bassin océanique.

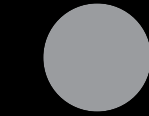
L'étude de la variabilité journalière et hebdomadaire (i.e., par période de luminosité lunaire, d'une durée d'environ une semaine chacune) des captures a ainsi été menée, afin de distinguer les périodes pour lesquelles cette hétérogénéité des captures est significative.

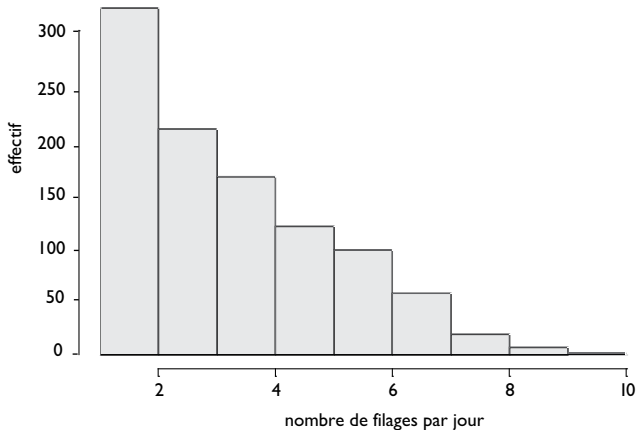
Les indices lunaires ont été établis selon l'homogénéité présumée de la luminosité due à la lune. Plutôt que de considérer les quartier lunaires, le choix a été de décaler les périodes en fonction de la luminosité et ce sont ces périodes qui ont servi à déterminer les 148 indices lunaires entre le 1^{er} janvier 1998 et le 31 décembre 2001 (tabl. 3).

Le nombre journalier de filages reporté dans la base de données de l'Ifremer est en moyenne de 3,6 entre 1998 et 2000. Les jours pendant lesquels au moins 3 filages ont été reportés représentent 675 jours, soit 67,7 % des 996 journées étudiées (fig. 52). Ces filages sont tous situés dans la zone Réunion qui nous intéresse.

▽ Tableau 3

Le calcul des indices de luminosité lunaire à partir des jours lunaires
et la correspondance avec les quartiers lunaires ;
l'indice *l* a été fixé à la période de luminosité lunaire du premier jour de pêche disponible,
le 3 janvier 1998 (jour lunaire 6, 1^{er} quartier, période 2).

									
Nouvelle lune		Premier quartier		Pleine lune		Dernier quartier		Nouvelle lune	
jour lunaire 1		jour lunaire 8		jour lunaire 15		jour lunaire 22		jour lunaire 1	
4 ^e qu.		1 ^{er} quartier		3 ^e quartier		4 ^e quartier		1 ^{er} qu.	
Période 1		Période 2		Période 3		Période 4		Période 1	
jour lunaire 27...		jour lunaire 5...		jour lunaire 12...		jour lunaire 20...		jour lunaire 26...	
Indice <i>i</i>		<i>i</i> + 1		<i>i</i> + 2		<i>i</i> + 3		<i>i</i> + 4...	

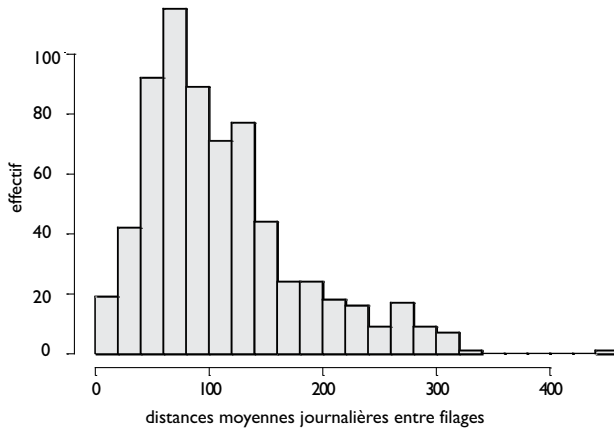


▽ Fig. 52

Distribution du nombre de filages disponibles par jour dans les données de pêche exploitées ;
les jours pendant lesquels au moins 3 filages ont été reportés représentent 675 jours,
soit 67,7 % des 996 journées étudiées.

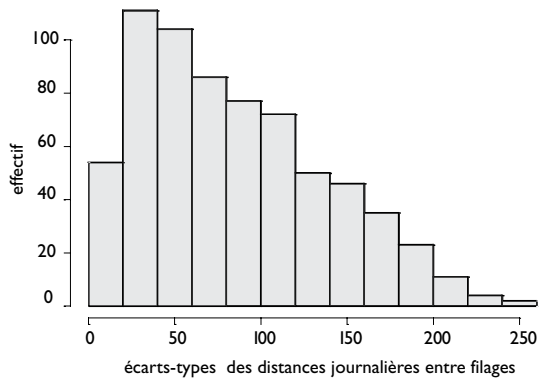
La distance moyenne entre deux filages journaliers est de 111 km (119 km par période lunaire), pour une longueur de ligne moyenne de 58 km (filages en ligne, fig. 53). Les écarts-types journaliers les plus nombreux se situent autour de 40 km, puis deviennent de moins en moins fréquents à mesure que la distance augmente (fig. 54). Ces observations rendent compte de la forte concentration de l'effort autour de la Réunion notamment.

Les échelles des distances ainsi rencontrées sont très comparables, pour les distances moyennes comme pour les écarts-types, vis-à-vis de la longueur des lignes de pêche. Il devient ainsi extrêmement difficile de distinguer *a priori* des phénomènes spatiaux à partir de ces seules données, les positions précises des



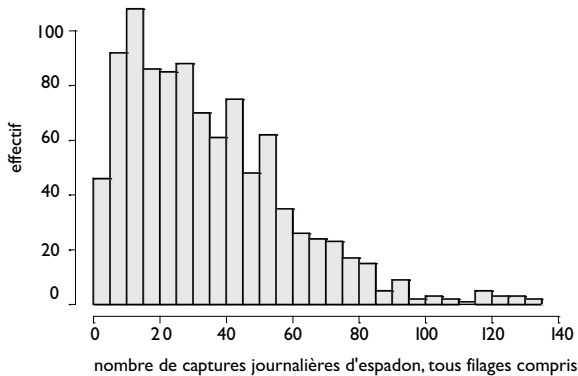
▽ Fig. 53

*Distribution des distances moyennes journalières entre filages
(les distances ont été calculées à partir des positions médianes des lignes
quand elles étaient disponibles, sinon à partir des positions de début de filage).*



▽ Fig. 54

Distribution des écarts-types des distances journalières entre filages.



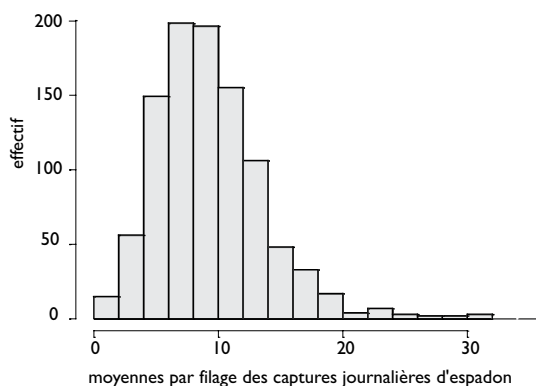
▽ Fig. 55

Distribution des sommes journalières de captures d'espadon.

captures étant reportées pour une ligne dans son ensemble (donc avec une variabilité d'environ 60 km), alors que les distances entre filages sont très proches de cette échelle spatiale.

La variabilité journalière des captures et CPUE d'espadon (exprimées ici en nombre d'individus capturés par kilomètre de ligne mouillée) a été étudiée pour les journées où étaient reportés au moins trois filages (fig. 54).

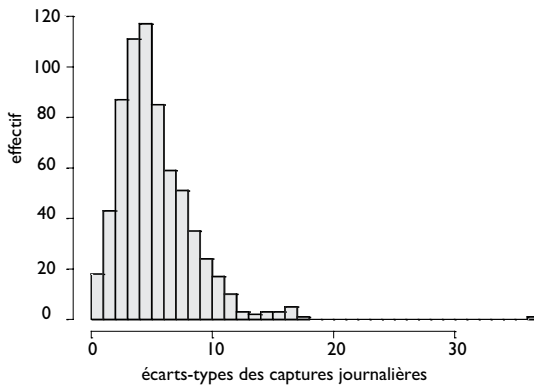
Les sommes journalières de captures d'espadon montrent une assez forte variabilité (fig. 55) qui s'observe toutefois un peu moins dans les captures moyennes journalières (fig. 56). Les captures moyennes journalières d'espadon semblent se centrer sur huit individus et se distribuer de manière quasi normale autour de cette référence. L'observation de la distribution des écarts-types (fig. 57) confirme cette observation, l'écart-type journalier entre filages étant en général très peu supérieur à dix individus et plutôt centré sur cinq individus. Un indice de dispersion de ces captures journalières est le coefficient de variation (écart-type $\times$ 100 / moyenne) de ces captures journalières. Il est clairement centré sur 50 (fig. 58), indiquant une relative homogénéité des captures journalières au sein de la pêcherie. Ramenées à la longueur de ligne filée, les captures moyennes journalières ne présentent pas une plus grande variabilité, confirmée par les coefficients de variation (fig. 59).



▽ Fig. 56

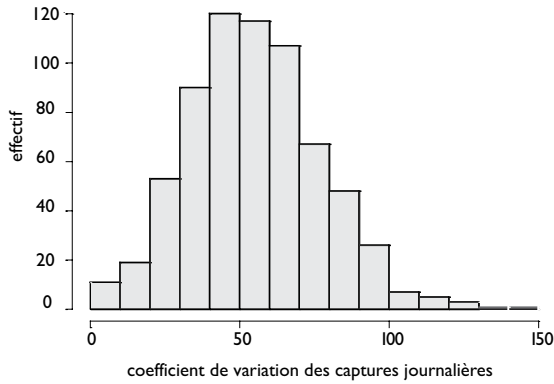
Distribution des captures moyennes journalières d'espadon.

Ces observations semblent indiquer que la capturabilité de l'espadon n'est pas liée à des phénomènes purement temporels à grande échelle, comme par exemple l'arrivée massive dans la zone d'individus accessibles à la pêcherie ou la capturabilité brutalement améliorée par un phénomène océanographique à grande échelle, comme l'inversion de la pente de la thermocline à l'échelle océanique pendant un épisode El Niño (MARSAC et LE BLANC, 1998). Les phénomènes critiques apparaissent vraisemblablement à une échelle beaucoup plus petite, peut-être de quelques heures à quelques jours.



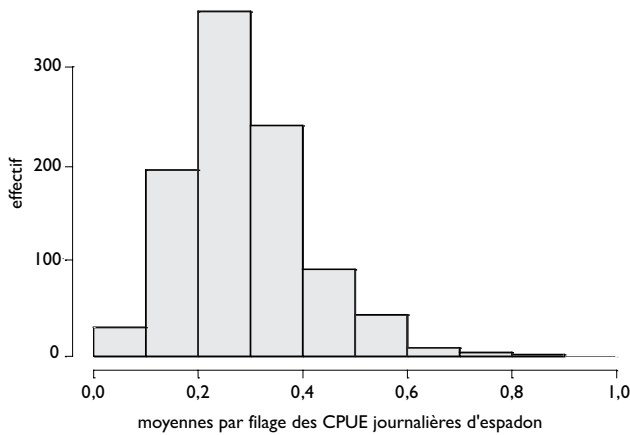
▽ Fig. 57

Distribution des écarts-types des captures journalières d'espadon entre filages.



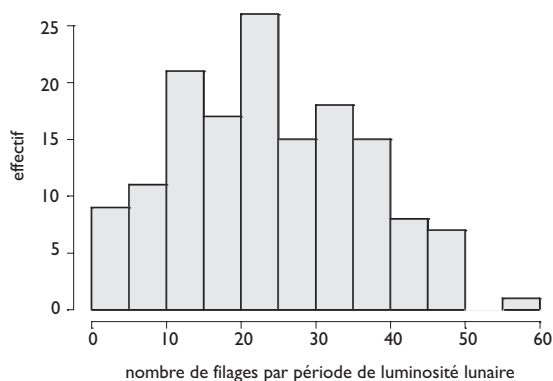
▽ Fig. 58

Distribution des coefficients de variation des captures journalières d'espadon entre filages.

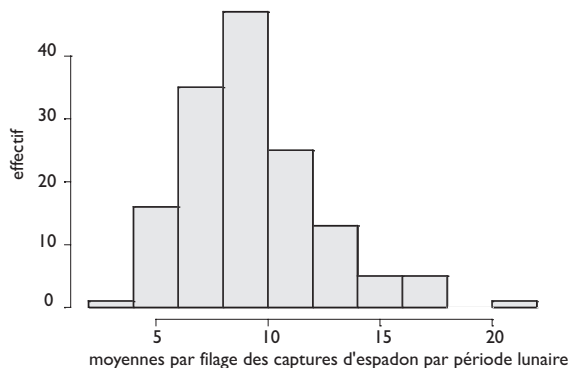


▽ Fig. 59

Distribution des CPUE moyennes journalières d'espadon.



▽ Fig. 60
Distribution du nombre de filages par période lunaire.

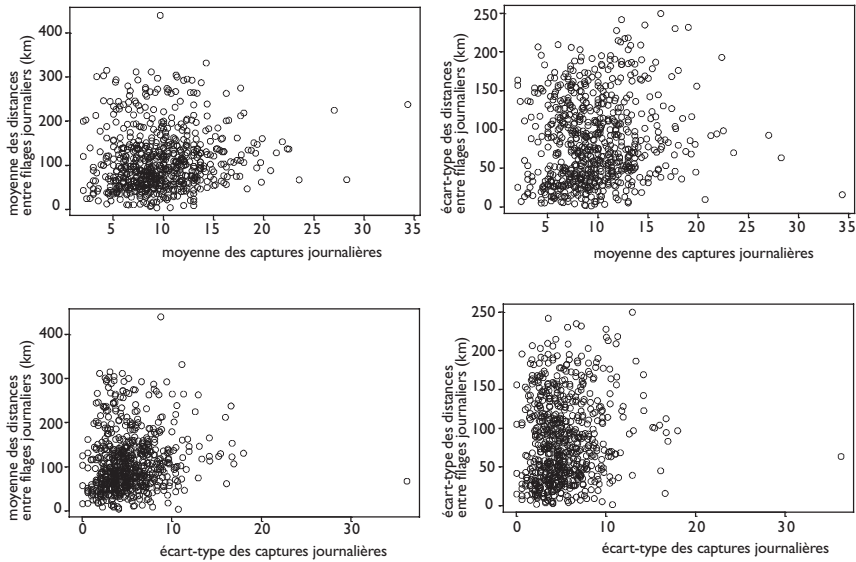


▽ Fig. 61
Distribution des moyennes des captures d'espadon par période lunaire.

La variabilité lunaire a été ici abordée car elle s'impose à l'échelle temporelle de la semaine, qui est la durée moyenne d'une marée des plus petits navires palangriers, exploitant la « zone Réunion ». Le nombre moyen de filages par période lunaire est de 24 (fig. 60). Les captures moyennes par période lunaire montrent une distribution proche de celle des captures journalières, mais elle est plus resserrée du fait du plus grand nombre de filages par période lunaire que par jour (fig. 61).

La variabilité journalière et lunaire des pêches d'espadon est-elle liée à la distance séparant les filages ? Cette question sous-tend l'existence de structures spatiales particulières dans la distribution des espadons capturables, comme des zones de plus fortes concentrations, à des échelles propres. Les relations entre les distances moyennes entre filages journaliers et les captures journalières ne semblent pas indiquer l'existence de telles structures. Aucune relation majeure ne semble émerger des comparaisons distances/captures.

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des captures et CPUE d'espadon à méso-échelle n'indique *a priori* aucune échelle privilégiée dans les phénomènes liés à la capturabilité du poisson (fig. 62). Il semble qu'une analyse plus précise à l'échelle du filage et de son contexte environnemental soit nécessaire à la détermination de ces processus. L'analyse géostatistique peut permettre d'apporter des éléments complémentaires à cette compréhension.



▽ Fig. 62

Relations entre captures et distances entre filages journaliers.

A black and white photograph showing three people on a boat. In the foreground, a person is seen from the back, wearing a light-colored t-shirt and glasses, pulling on a rope. In the background, two other people are visible; one is wearing a cap and sunglasses. They appear to be working with a large fishing net or trawl. The boat is on the water, and the net is partially visible in the foreground.

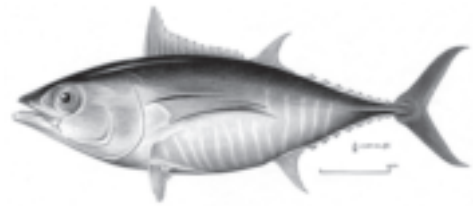
3

Analyse croisée
des données
environnementales océaniques
et des captures palangrières

▼ *Action de pêche à bord
d'un palangrier réunionnais*
© D. Guyomard

De la statistique élémentaire à l'analyse de co-inertie

GUILLAUME CONSTANTIN DE MAGNY,
MARTIN DESRUISSEUX, MICHEL PETIT



Thunnus obesus (Lowe, 1939)

© P. Opic

Les analyses ont concerné quatre des neuf espèces présentes dans la base de données des captures du Programme palangre réunionnais (PPR). Il s'agit des quatre espèces les plus abondantes : l'espadon (symbole utilisé : SWO), le germon (ALB), l'albacore (YFT) et le thon obèse (BET).

La distribution spatiale des pêches est divisée en trois zones (fig. 63, cf. cahier hors-texte) :

- la zone s'étendant de la côte est de Madagascar jusqu'à autour de l'île de la Réunion (zone où la majorité des pêches a été réalisée) ;
- la zone entre la côte ouest de Madagascar et la côte est de l'Afrique ;
- la zone aux alentours des Seychelles.

Les données concernent des pêches de nuit pour des palangres dont les hameçons sont immergés à une profondeur maximale de soixante mètres.

D'une part, n'ayant pas d'information plus précise concernant la profondeur des hameçons, nous considérons que ces pêches sont réalisées dans des conditions homogènes.

D'autre part, aucune information n'est disponible sur la trajectoire de la palangre entre les points de début et de fin, nous supposons que celle-ci est linéaire. La valeur des variables environnementales correspond à la valeur du pixel (de l'image satellite concernée), localisé au point médian de la droite qui passe par les positions des extrémités de la palangre.

Enfin, nous devons tenir compte du fait que la position des poissons pêchés le long de la palangre (numéro d'hameçon) n'est pas disponible.

Une espèce pêchée garantit sa présence mais la réciproque n'est pas valide. Par ailleurs, la présence de prédateurs peut influencer les prises le long de la palangre car une fois un individu accroché, celui-ci peut être éliminé par ces derniers. La prise peut, elle-même, avoir un effet sur le niveau de capture pour une palangre car lorsqu'un poisson est accroché, celui-ci se débat. La zone autour de lui ne devient plus propice à la capture d'autres poissons compte tenu du signal de stress que ce dernier génère.

Sachant que les lignes sont immergées à une profondeur maximale de 60 mètres, nous considérerons que la température de surface est un indice représentatif des processus thermiques qui affectent la colonne d'eau jusqu'à cette profondeur. Nous avons estimé que la concentration en chlorophylle-*a* était sensiblement homogène sur cette même colonne d'eau.

Ainsi, on définit comme « abondance », le nombre total d'individus capturés sur une palangre.

Description des données

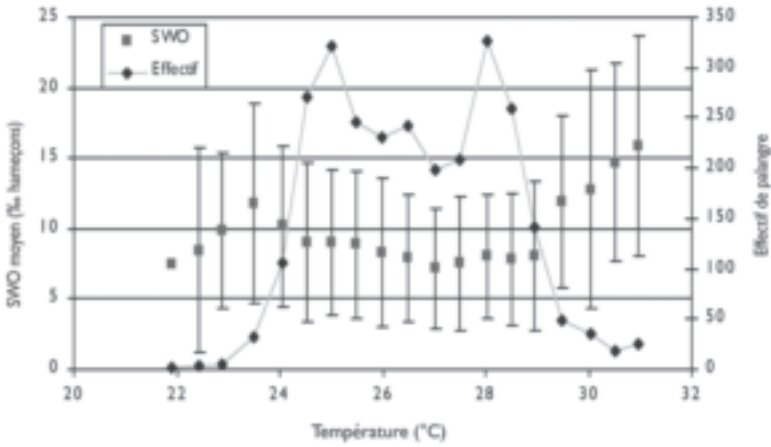
Dans un premier temps, nous avons cherché à savoir comment évoluait l'abondance de chaque espèce en fonction des différents paramètres environnementaux pris un à un. Les paramètres environnementaux étudiés sont extraits d'images satellites et concernent :

- la température de surface de l'eau (SST) ;
- la concentration en chlorophylle-*a* en mg.m^{-3} (Chl-*a*) ;
- l'anomalie de hauteur de l'eau (SLA) ;
- les composantes du courant géostrophique (U et V) ;
- la vitesse du courant.

Dans ce but, nous avons fait des représentations en nuage de points de la variable « Pêche par unité d'effort » (PUE) en fonction de certains paramètres.

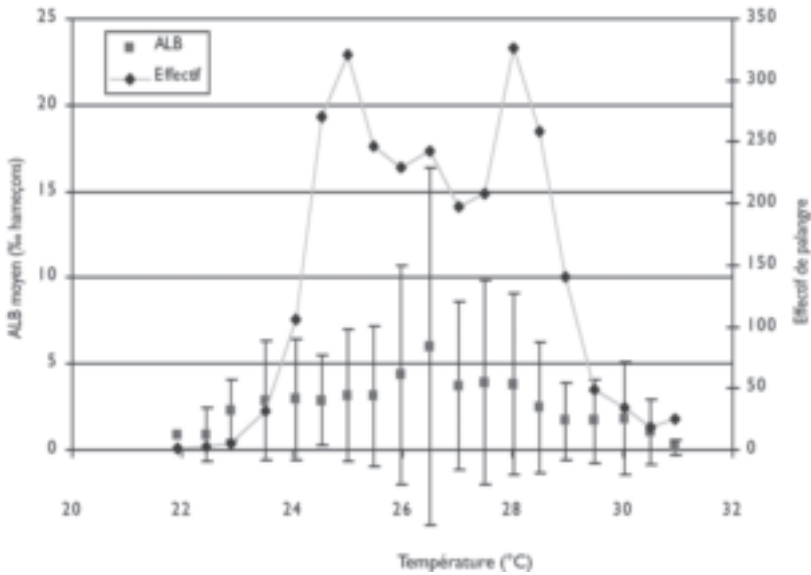
La PUE est obtenue en divisant le nombre d'individus pêchés pour une espèce et par palangre par le nombre d'hameçons disposés sur cette palangre. Les données ont été regroupées dans des classes d'intervalles réguliers en fonction de chaque variable environnementale. L'effectif des palangres dans ces classes apparaît comme échelle secondaire des ordonnées. Les écarts-types des effectifs par classe figurent également sur les graphiques. Seuls les graphiques les plus significatifs sont présentés sur les figures 64, 65, 66.

Il semble exister deux modes sur les effectifs de palangre à 25 °C et 28 °C, il se pourrait que ces valeurs soient tout simplement représentatives des conditions de surface respectives des deux zones principales étudiées autour de la Réunion (25 °C) et dans les eaux seychelloises (28 °C) ainsi que de l'effet de la saisonnalité de la température dans la zone totale des pêches sur la période (cf. fig. 68).



▽ Fig. 64

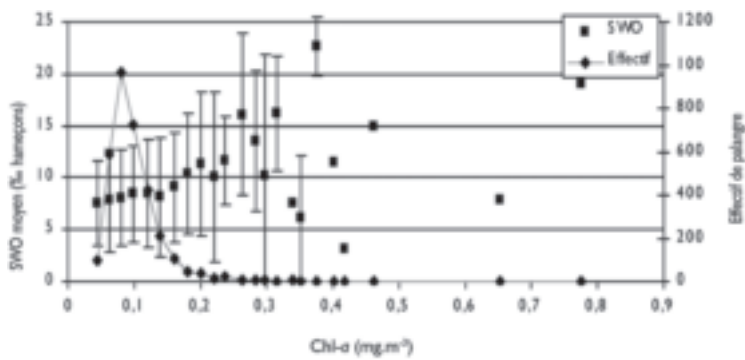
Prises par unité d'effort (PUE) d'espadon
et température de surface aux positions de pêches (1998-2000).



▽ Fig. 65

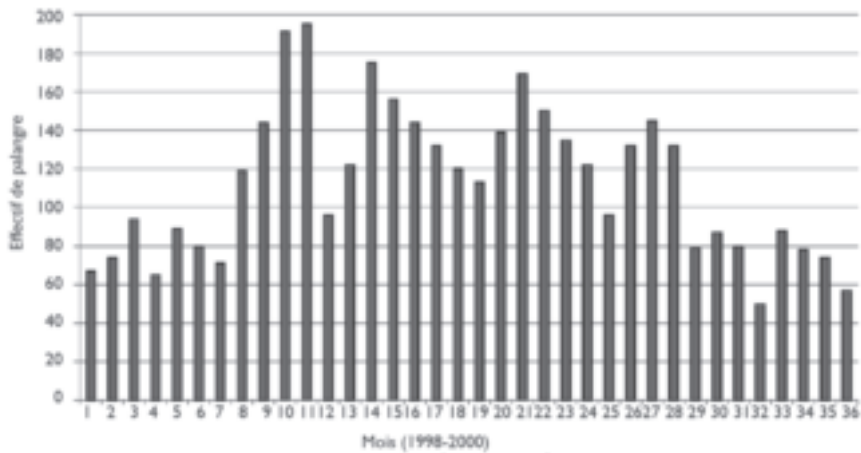
PUE d'albacore et température de surface aux positions de pêches (1998-2000).

Ce type de représentation donne les tendances qui existent entre les abondances et les différentes variables. Ainsi, pour tester si ces dernières sont significativement différentes d'une tendance nulle, il faut tester la normalité de la distribution de ces variables (abondance et paramètres environnementaux). Ces tests sont détaillés plus loin dans le chapitre.

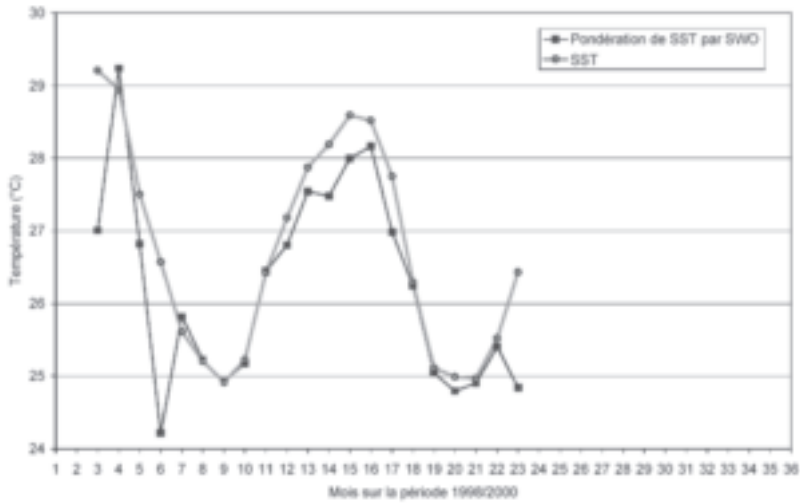


▽ Fig. 66
PUE d'espadon et concentration de chlorophylle-a aux positions de pêches
(1998-2000).

Ainsi, le produit des PUE par les valeurs des paramètres environnementaux le jour de la pêche est additionné et divisé par la somme des abondances mensuelles.
Soit n pêches dans le mois, on a une température moyenne observée aux positions de pêches qui est : $\Sigma T_i/n$ (pour i allant de 1 à n).
C'est ce qui est représenté sur la courbe paramètre (SST ou Chl-a, SLA).
On calcule pour chaque pêche, une valeur pondérée du paramètre observé de la PUE de la pêche divisée par le total des PUE observées dans le mois : $PUE_j/\Sigma(PUE_i)$ (pour j et i de 1 à n).

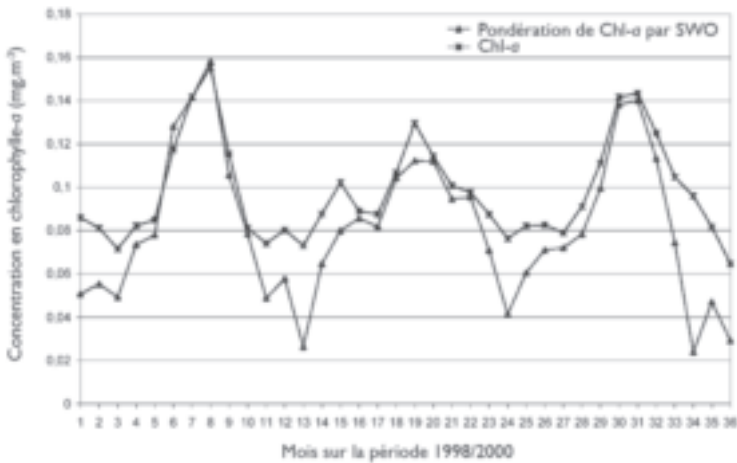


▽ Fig. 67
Effectif mensuel des palangres sur la période 1998-2000.



▽ Fig. 68

Variations mensuelles de la température de l'eau en surface aux points de pêches et de la température pondérée par la PUE.

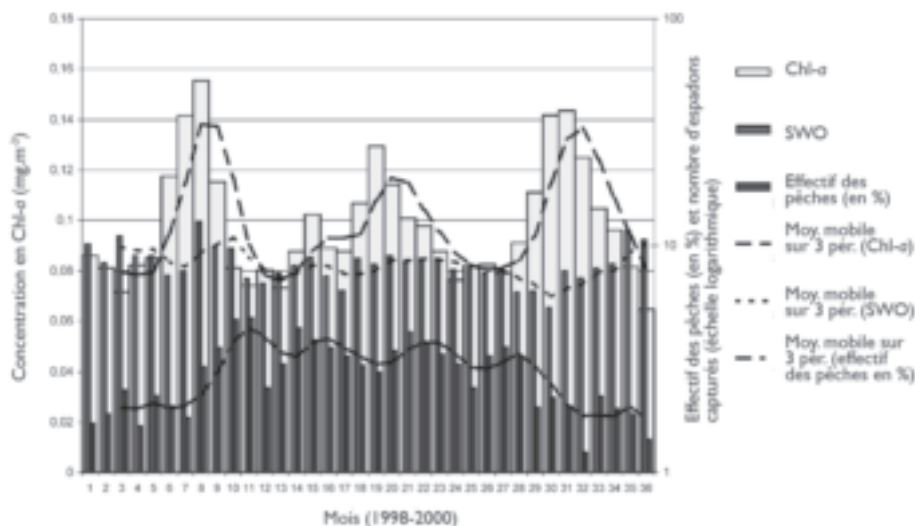


▽ Fig. 69

Variations mensuelles de la concentration en chlorophylle-a aux points de pêche et de la chlorophylle-a pondérée par la PUE.

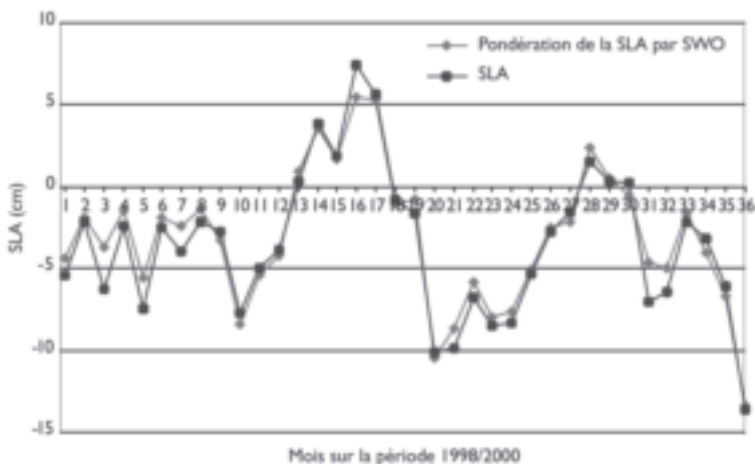
Ensuite, on somme les valeurs pondérées et on obtient une valeur du paramètre pondéré par l'efficacité des pêches. Cela est représenté par la série « pondération de (paramètre) par SWO » (fig. 68).

Pour information, l'effectif mensuel des pêches est représenté sur la période 1998-2000 (fig. 67). L'effectif mensuel des palangres analysées n'est pas distribué de façon uniforme au cours du temps.



▽ Fig. 70

Variation mensuelle de la concentration moyenne en chlorophylle-a, du nombre moyen d'espadons capturés et de l'effectif des pêches en fonction du temps sur la période 1998-2000.



▽ Fig. 71

Variations mensuelles de l'anomalie de hauteur d'eau (SLA) aux points de pêche et de l'anomalie de hauteur d'eau pondérée par l'abondance.

Afin d’analyser la figure 69, un graphique supplémentaire représentant la variation de concentration moyenne de chlorophylle-a, du nombre moyen d’espadons capturés et de l’effectif des pêches en fonction du temps sur la période 1998-2000 est nécessaire (fig. 70).

Sur les figures 69, 70, 71, l'écart en valeur absolue qui sépare chaque point pour un mois donné entre les deux courbes représente une dissymétrie de la distribution de l'efficacité des pêches au cours du mois par rapport à la moyenne du paramètre observé aux positions de pêches.

– SST/SWO : on constate que la différence entre les points lorsqu'elle existe, est de faible amplitude. Cependant lorsque les points ne sont pas superposés, la pondération a tendance à abaisser la valeur de température par rapport à la température moyenne observée. On peut en conclure que les pêches les plus efficaces ont été réalisées dans des eaux aux températures inférieures à la température moyenne mensuelle des pêches. On constate pour quelques points un écart beaucoup plus important. Le manque de données et la faible répétition de ces écarts ne permettent pas d'interprétation.

– Chl-*a*/SWO : la distance en valeur absolue entre les courbes pour chacun des points pour le même mois est d'amplitude variable et apparaît saisonnière. En effet, les amplitudes les plus grandes concernent pour l'année 1998 les mois de janvier à mai, pour l'année 1999 les mois de novembre à mai et pour l'année 2000 les mois de septembre à décembre. D'après la figure 70, la saisonnalité observée sur la valeur de la chlorophylle-*a* pondérée par l'efficacité ne semble pas être influencée par le nombre moyen mensuel de palangres. Le nombre moyen d'espadons capturés ne semble pas non plus avoir de variation saisonnière.

– SLA/SWO : on constate pour ce paramètre, peu d'influence de la pondération de l'efficacité par rapport à la moyenne observée aux positions de pêches. Cependant, un effet saisonnier est visible pour le paramètre aux positions de pêches sans influence visiblement sur l'efficacité.

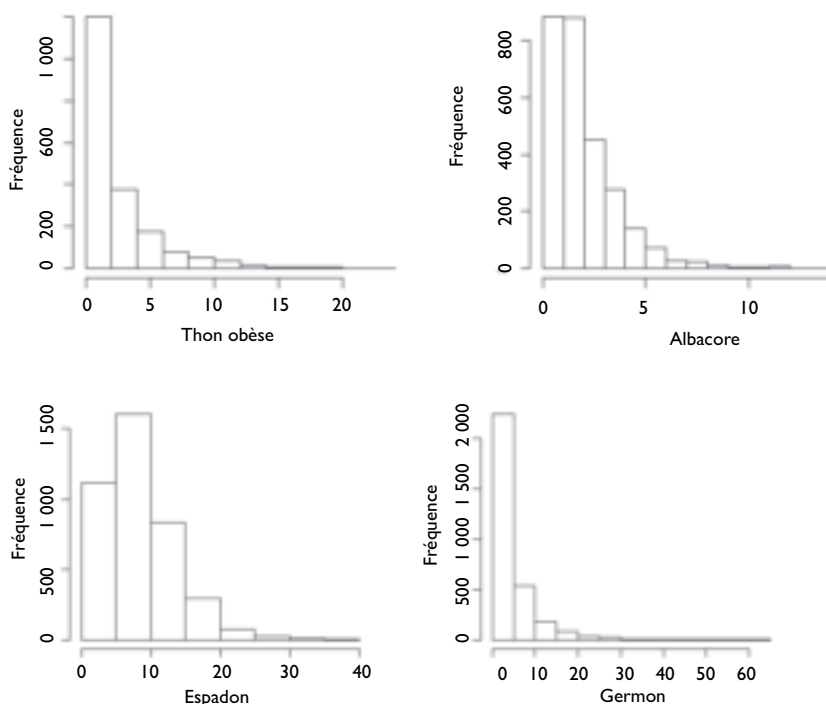
Test de la distribution des variables

La représentation par des histogrammes de la distribution des observations pour chacune des variables du vecteur « palangre posée » permet d'apprécier si ces variables se distribuent de façon gaussienne ou non. Les abondances d'espèces sont ramenées pour mille hameçons (fig. 72, 73).

La forme des distributions de chacune des variables n'est pas de forme gaussienne pour la majorité des variables. Ainsi, pour rechercher s'il existe des tendances linéaires entre les PUE et les paramètres environnementaux, les nuages de points entre chacune des variables et les PUE vont être réalisés.

Nuage de points entre l'abondance et les paramètres

Afin de rechercher des relations linéaires entre les variables et l'abondance, nous représenterons l'abondance de l'espadon uniquement (représentative des autres espèces) en fonction des paramètres au point de pêches le jour même.

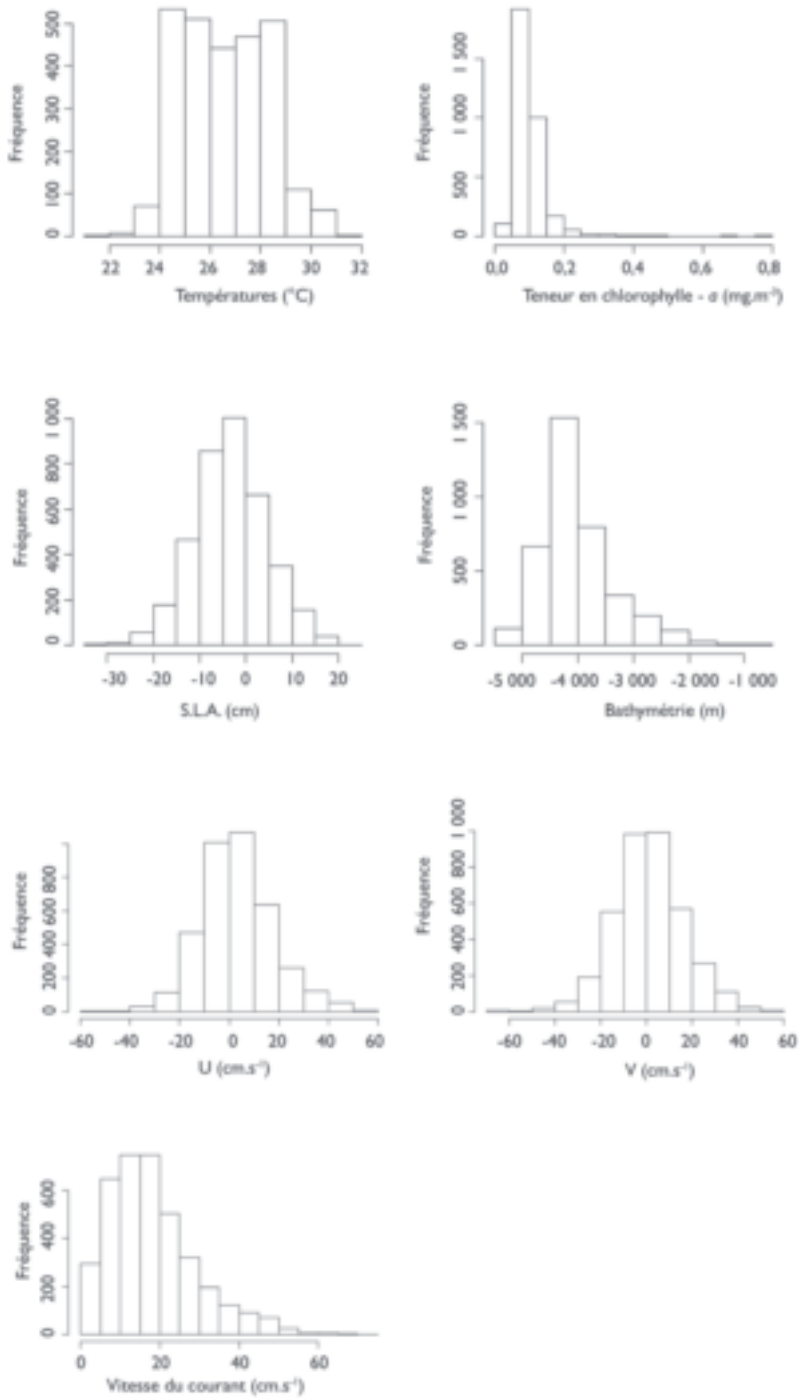


▽ Fig. 72

Histogrammes du nombre de palangres en fonction de l'effectif d'espadons, germons, albacore et thon obèse pour mille hameçons.

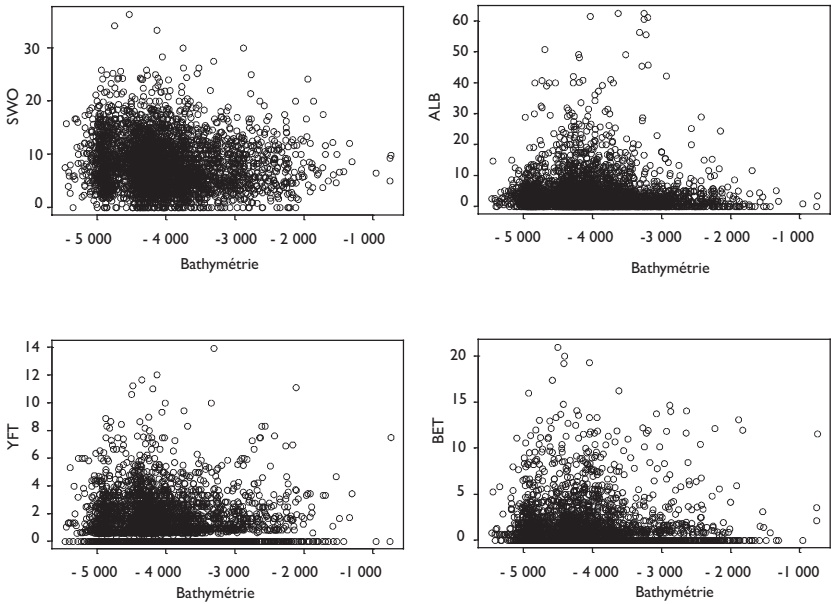
Quel que soit le couple paramètre/abondance (PUE), les différentes représentations ne montrent pas de relation linéaire (fig. 74 à 82). Plusieurs origines à cela peuvent être identifiées.

D'une part, le jeu de données, tel qu'il est, ne nous permet pas de prendre en compte la variabilité environnementale proche des points de pêches. D'autre part, les valeurs des paramètres, sauf pour la bathymétrie, seraient potentiellement de meilleurs indicateurs si elles étaient prises à des jours précédents le jour de la pêche. En effet, la présence du poisson le jour de la pêche peut être conditionnée par des situations thermiques antérieures, 5, 10 ou 15 jours. D'autre part, la structure temporelle des données ainsi que la structure spatiale n'ont pas été prises en compte dans ces analyses. L'effectif restreint des données lors de leur segmentation temporelle et spatiale n'a pas permis de l'envisager. Enfin, l'observation des couples température/abondance peut donner lieu à une hypothèse intéressante. La structure bimodale du cumul des PUE pour trois des quatre espèces pourrait trouver son origine dans la préférence de ces espèces à se localiser près des fronts thermiques qui se distribuent en terme de fréquence dans la zone étudiée autour des températures de 25 °C et 28 °C (le plus fréquemment).

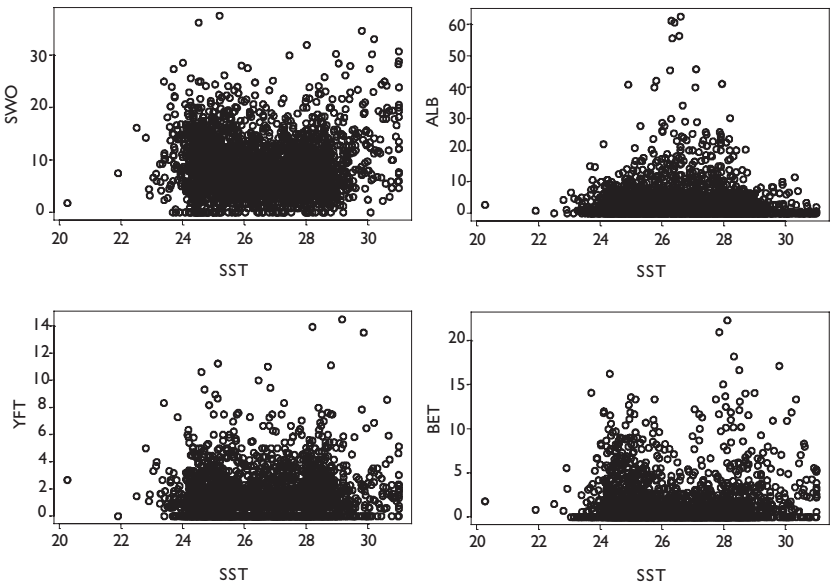


▽ Fig. 73

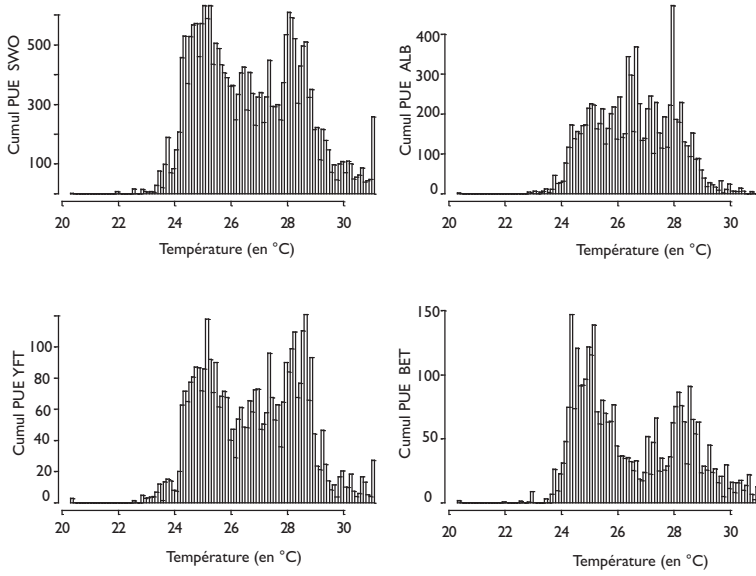
Histogrammes représentant le nombre de pêches
en fonction des variables d'environnement.



▽ Fig. 74
PUE en fonction de la bathymétrie au point de pêche.

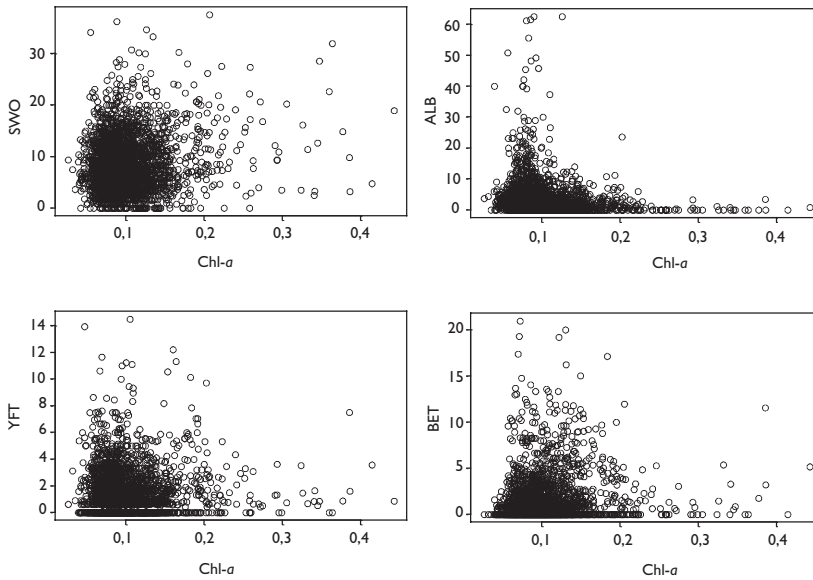


▽ Fig. 75
PUE en fonction de la température.



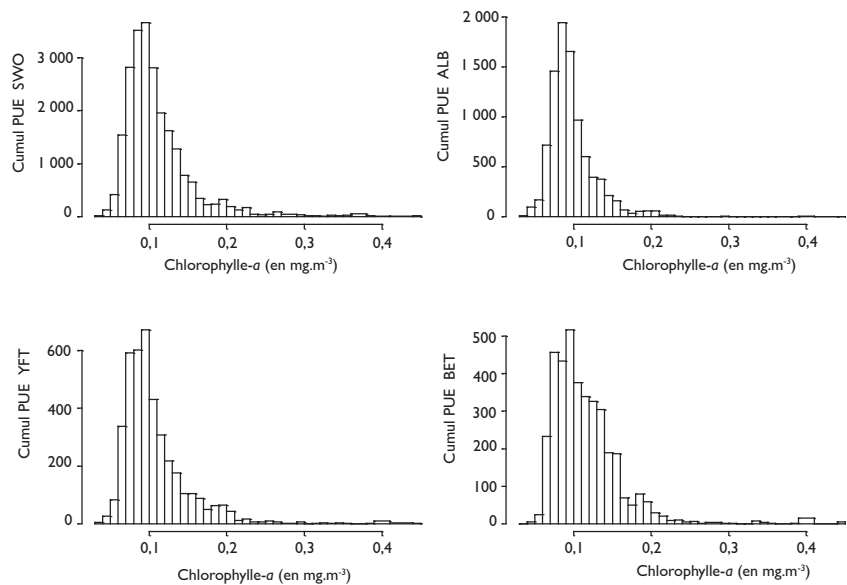
▽ Fig. 76

Histogramme des PUE en fonction de la température.

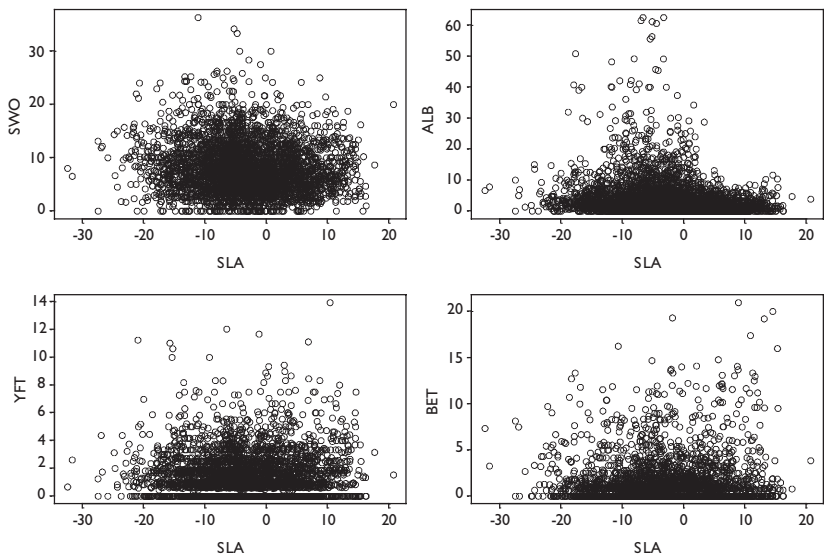


▽ Fig. 77

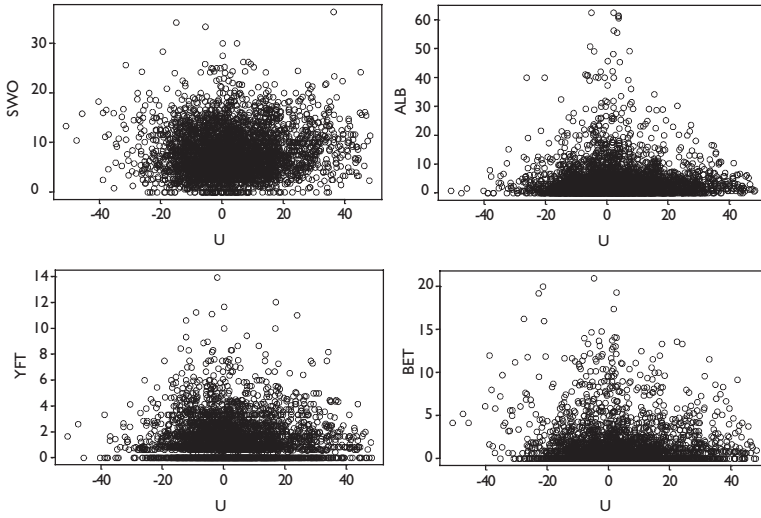
Effectif d'espadon en fonction de la chlorophylle-a.



▽ Fig. 78
Histogramme des PUE en fonction de la chlorophylle-a.

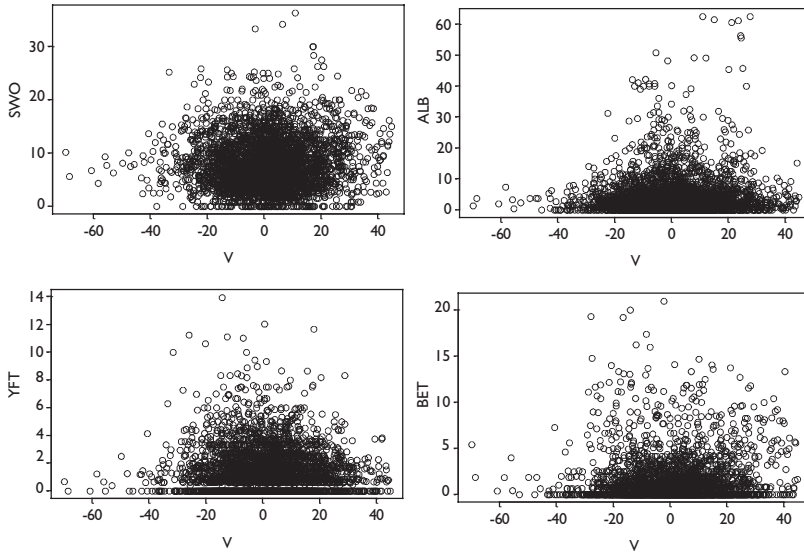


▽ Fig. 79
PUE en fonction de l'anomalie de hauteur de l'eau.



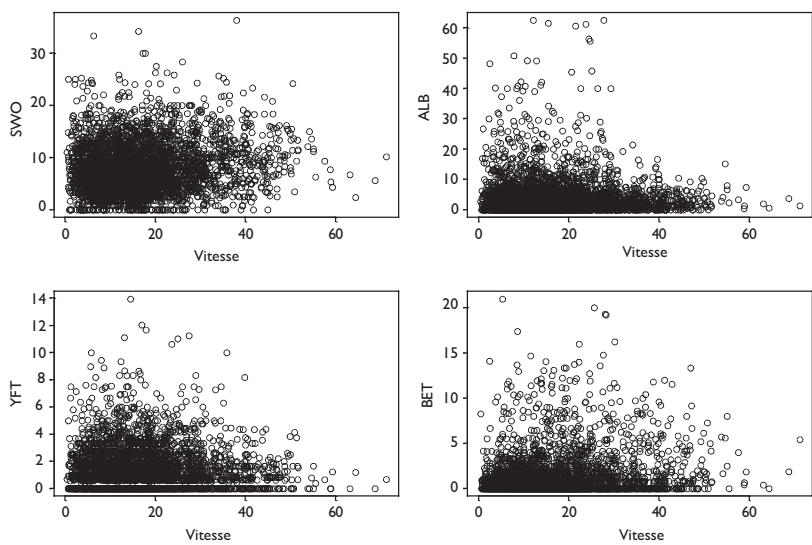
▽ Fig. 80

PUE en fonction de la composante longitudinale du courant géostrophique.

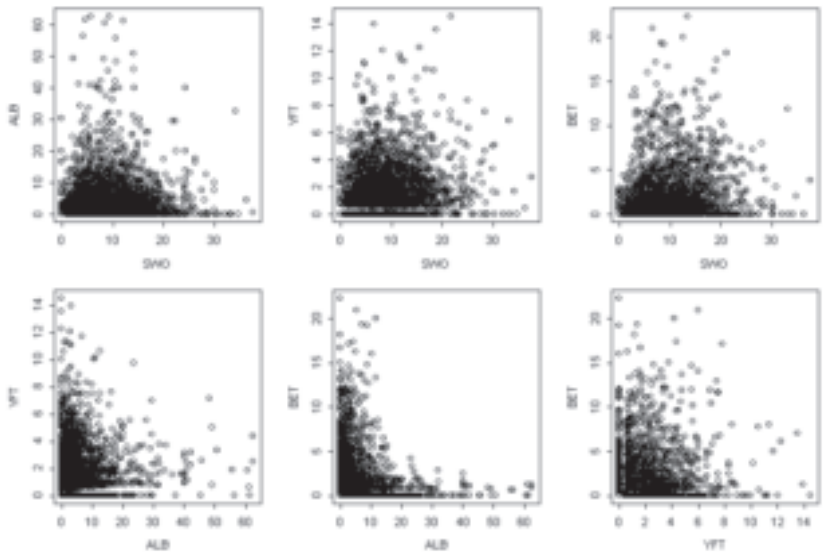


▽ Fig. 81

PUE en fonction de la composante latitudinale du courant géostrophique.



▽ Fig. 82
PUE en fonction de la vitesse du courant géostrophique.



▽ Fig. 83
Nuage de points entre les espèces (PUE) prises deux à deux.

Nuage de points des abondances entre elles

Afin d'explorer les relations qui existent au sein du jeu de données entre les abondances (pour mille hameçons), la figure 83 représente les abondances observées deux à deux.

La distribution des données d'abondance entre l'espadon et les autres espèces peut être assimilée à une distribution selon une loi de Poisson. Il existerait une tendance positive dans l'association des espèces avec l'espadon jusqu'à un seuil où plus le nombre d'espadons capturés est grand, moins les autres espèces sont capturées. On peut envisager l'hypothèse des tensions causées par les espadons capturés qui éloigneraient les autres espèces. Pour étudier cela, il faudrait avoir la distance entre les prises sur une même palangre pour étudier la structure spatiale des prises en fonction des espèces. Pour les relations d'abondances entre les trois autres espèces entre elles, la distribution des valeurs est proche d'une exponentielle négative.

Analyses en composante principale et de co-inertie

L'objectif de cette analyse est de décrire comme le proposent DOLÉDEC et CHESSEL (1994), la structure commune de deux tableaux correspondant à des nuages de points portant sur les mêmes unités statistiques. Dans un premier temps, les tableaux sont analysés de manière indépendante par une méthode d'analyse multivariée à un tableau, l'analyse en composante principale (ACP). Une ACP sur matrice de corrélations est réalisée sur le tableau des variables environnementales. Une ACP sur matrice de covariances est réalisée sur le tableau des abondances d'espèces.

Le tableau des espèces est constitué de quatre colonnes des prises par espèce (SWO, ALB, BET, YFT) lors des 607 pêches réalisées sur la période 1998/1999. Le deuxième tableau est constitué par 66 variables environnementales (en colonne) récoltées pendant les 607 pêches (en ligne). En effet, la possibilité de donner une dimension temporelle aux variables environnementales a fait augmenter considérablement leur nombre. Le calcul de gradient pour ces variables a également contribué à l'augmentation de ce nombre. Les valeurs de la profondeur correspondent à la valeur absolue de la bathymétrie. Les gradients des variables environnementales ont été estimés de deux façons : 1) par l'opérateur de Sobel pour la température, la chlorophylle-*a*, l'anomalie de hauteur d'eau, les composantes U et V du courant géostrophique ; 2) par une valeur supérieure ou égale à 80 % de tous les gradients trouvés dans un cercle de rayon de 10 minutes d'angle¹ centré à la position de pêche. Dans les deux cas, la « position de pêche » est définie comme étant le point médian entre les deux extrémités de la palangre. La seconde méthode n'a été utilisée que pour les gradients de bathymétrie, de température et de concentration en chlorophylle-*a*.

1. 10 minutes d'angle à l'équateur correspondent à 10 milles.

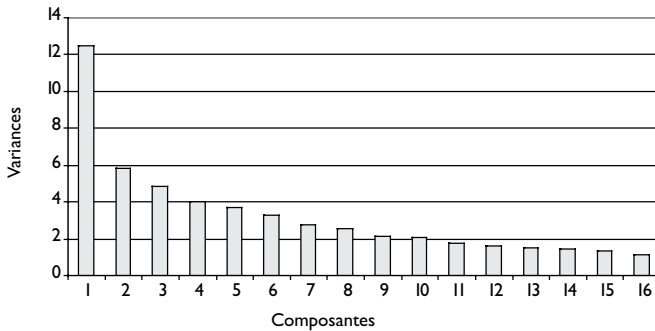
Seules 607 pêches ont été prises en compte pour l'analyse. Il s'agit des pêches pour lesquelles toutes les informations concernant les 66 variables environnementales, détaillées ci-dessous, étaient toutes disponibles.

- La distance à la côte (*distance_côte*).
- La distance minimale séparant la pêche d'une autre le même jour (*distance_pêche*).
- Le nombre d'hameçons (*nb_hameçons*).
- La profondeur du plancher océanique au point de pêche (*z*).
- La concentration en chlorophylle-*a* déterminée au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*Chl-a*).
- La température de l'eau en surface au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*SST*).
- L'anomalie de hauteur d'eau au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*SLA*).
- La composante U du courant géostrophique au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*U*).
- La composante V du courant géostrophique au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*V*).
- Le gradient de la profondeur du plancher océanique estimé par l'opérateur de Sobel au point de pêche (*gr_z*).
- Le gradient de la concentration en chlorophylle-*a* estimé par l'opérateur de Sobel au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*gr_Chla*).
- Le gradient de la température de l'eau en surface estimé par l'opérateur de Sobel au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*gr_SST*).
- Le gradient de l'anomalie de hauteur d'eau estimé par l'opérateur de Sobel au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant ainsi que le jour même et 5 jours après (*gr_SLA*).
- Le gradient de la composante U du courant géostrophique estimé par l'opérateur de Sobel au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*gr_U*).
- Le gradient de la composante V du courant géostrophique estimé par l'opérateur de Sobel au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*gr_V*).
- Le gradient dans un cercle de la profondeur estimé au point de pêche (*grC_z*).
- Le gradient dans un cercle de la concentration en chlorophylle-*a* estimé au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*grC_Chla*).
- Le gradient dans un cercle de la température de l'eau en surface estimé au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après (*grC_SST*).

Les analyses suivantes ont été réalisées à partir du programme ADE 4².

ACP sur matrice de corrélations

Le graphe des valeurs propres (fig. 84) représente la manière dont la variabilité est prise en compte. Seules les 16 premières composantes ont été représentées compte tenu de la faible part de variabilité apportée par les autres.



▽ Fig. 84

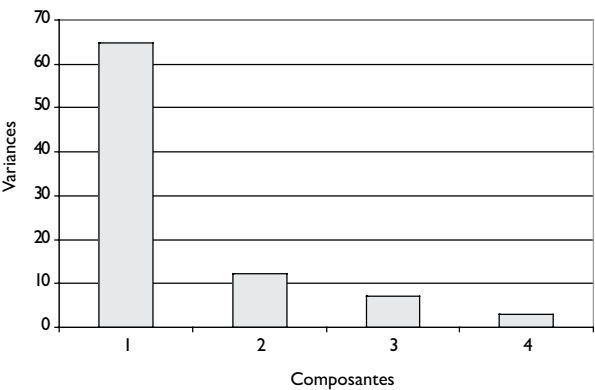
Graphique des valeurs propres de l'ACP sur matrice des corrélations obtenues à partir du tableau des variables environnementales.

▽ Tableau 4

Part de chaque composante dans la variabilité pour les 16 premières composantes de l'ACP sur matrice des corrélations.

Composantes	Valeurs propres	Part de variance (%)	Part de variance cumulée (%)
3	+ 4,8259E + 00	+ 0,0731	+ 0,3510
4	+ 4,0162E + 00	+ 0,0609	+ 0,4118
5	+ 3,6901E + 00	+ 0,0559	+ 0,4677
6	+ 3,2897E + 00	+ 0,0498	+ 0,5176
7	+ 2,7498E + 00	+ 0,0417	+ 0,5592
8	+ 2,5615E + 00	+ 0,0388	+ 0,5981
9	+ 2,1348E + 00	+ 0,0323	+ 0,6304
10	+ 2,0597E + 00	+ 0,0312	+ 0,6616
11	+ 1,7952E + 00	+ 0,0272	+ 0,6888
12	+ 1,6361E + 00	+ 0,0248	+ 0,7136
13	+ 1,4837E + 00	+ 0,0225	+ 0,7361
14	+ 1,4456E + 00	+ 0,0219	+ 0,7580
15	+ 1,3297E + 00	+ 0,0201	+ 0,7781
16	+ 1,1458E + 00	+ 0,0174	+ 0,7955
Inertie totale = 66			

La présence de la première composante nettement distincte des autres indique une vraie pertinence. Un seul axe sera conservé. Le tableau 4 reprend les valeurs propres des 16 premières composantes, ainsi que leur part dans l'inertie totale. L'analyse est réalisée sur le tableau comportant les abondances de chacune des quatre espèces. Le graphe des valeurs propres est présenté figure 85.



▽ Fig. 85

Graphe des valeurs propres de l'ACP sur matrice des covariances obtenu à partir du tableau d'abondance des espèces.

Un seul axe sera également conservé. Les valeurs propres des composantes ainsi que leur contribution dans l'inertie totale et le cumul de cette contribution sont présentées dans le tableau 5.

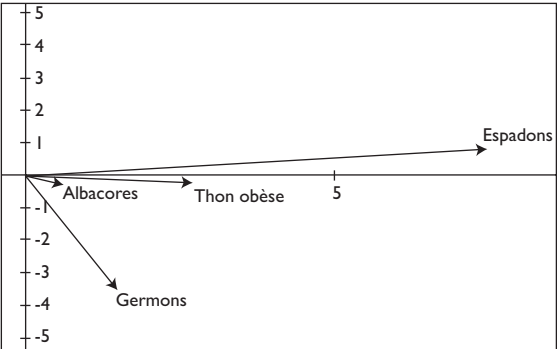
De la même façon que précédemment, les variables sont projetées sur le plan factoriel composé des deux premiers axes (fig. 86).

La position commune des taxons sur un même demi-plan traduit un « effet taille », c'est-à-dire l'augmentation simultanée de l'abondance de tous les taxons dans les relevés. Le premier axe caractérise ainsi l'abondance des taxons dans les pêches.

▽ Tableau 5

Part de chaque composante dans la variabilité des composantes de l'ACP sur matrice des covariances.

Composantes	Valeurs propres	Part de variance (%)	Part de variance cumulée (%)
1	+ 6,4805E + 01	+ 0,7432	+ 0,7432
2	+ 1,2329E + 01	+ 0,1414	+ 0,8845
3	+ 7,1593E + 00	+ 0,0821	+ 0,9666
4	+ 2,9082E + 00	+ 0,0334	+ 1,0000
Inertie totale = 87,2021			



▽ Fig. 86

Carte factorielle de la projection des variables (abondance des espèces)
sur le plan des deux premiers vecteurs propres de l'ACP sur matrice des covariances.

L'analyse de co-inertie

Les deux analyses (ACP et co-inertie) sont associées. La co-structure observée des deux tableaux est comparée à un grand nombre de permutations aléatoires dans l'appariement des deux tableaux. Un test de Monte-Carlo est réalisé à l'endroit où les lignes des deux tableaux sont permutées simultanément. À chaque permutation aléatoire un recentrage des tableaux est assuré. La pondération associée aux lignes reste fixée. Le nombre de permutations réalisées est de 50 000.

Il en résulte que la co-structure observée des deux tableaux est totalement étrangère à l'ensemble des valeurs simulées. L'analyse de co-inertie peut ainsi être exécutée et débute par l'analyse du tableau croisé. La matrice traitée contient les covariances entre l'abondance d'un taxon et une variable de milieu normalisée. Une analyse d'inertie standard d'une matrice croisée est alors obtenue (tabl. 6).

Les analyses de co-inertie fournissent souvent des graphes de valeurs propres très explicites car celles-ci sont des produits d'indices de structures de chaque tableau par un indice de co-structure.

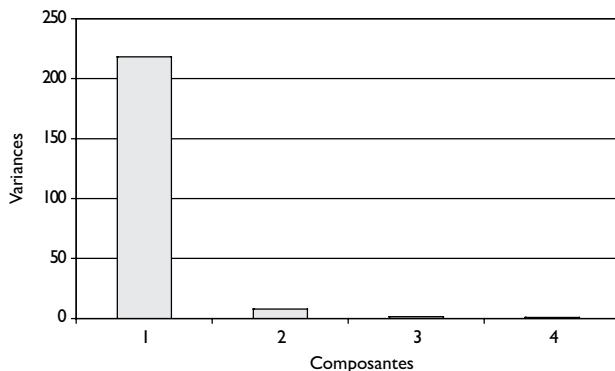
▽ Tableau 6

Part de chaque composante dans la variabilité de l'analyse de co-inertie
sur la matrice croisée.

Composantes	Valeurs propres	Part de variance (%)	Part de variance cumulée (%)
1	+ 2,1812E + 02	+ 0,9551	+ 0,9551
2	+ 7,9290E + 00	+ 0,0347	+ 0,9899
3	+ 1,7222E + 00	+ 0,0075	+ 0,9974
4	+ 5,9371E - 01	+ 0,0026	+ 1,0000

Inertie totale = 228,369

La représentation des valeurs propres de l'analyse de co-inertie permettra de choisir le nombre d'axes à conserver (fig. 87).



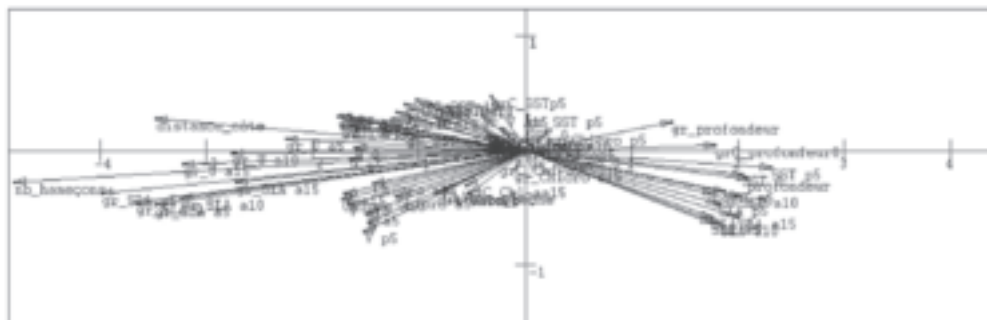
▽ Fig. 87

Graphes des valeurs propres de l'analyse de co-inertie sur la matrice croisée.

Les deux premiers axes seront conservés et permettront de faire les cartes factorielles représentant les variables et les abondances liées entre elles par l'analyse de co-inertie (fig. 88, 89, 90).

La structure des variables dans les plans factoriels sont sensiblement les mêmes. En effet, l'analyse tient compte de la structure dans chaque tableau et aussi du lien qui les unit.

Le tableau croisé représente des covariances et a une signification qui dépend entièrement des analyses de base (ici deux ACP). La représentation de ce tableau permet d'apprécier par une valeur de covariance la relation entre les variables d'abondances et environnementales (fig. 91).



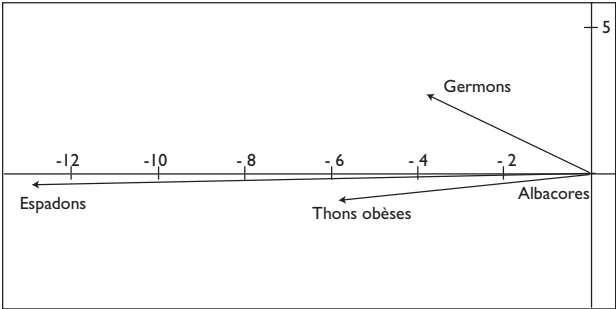
▽ Fig. 88

Projection des 66 variables environnementales
sur le plan factoriel composé des deux premiers axes d'inerties.



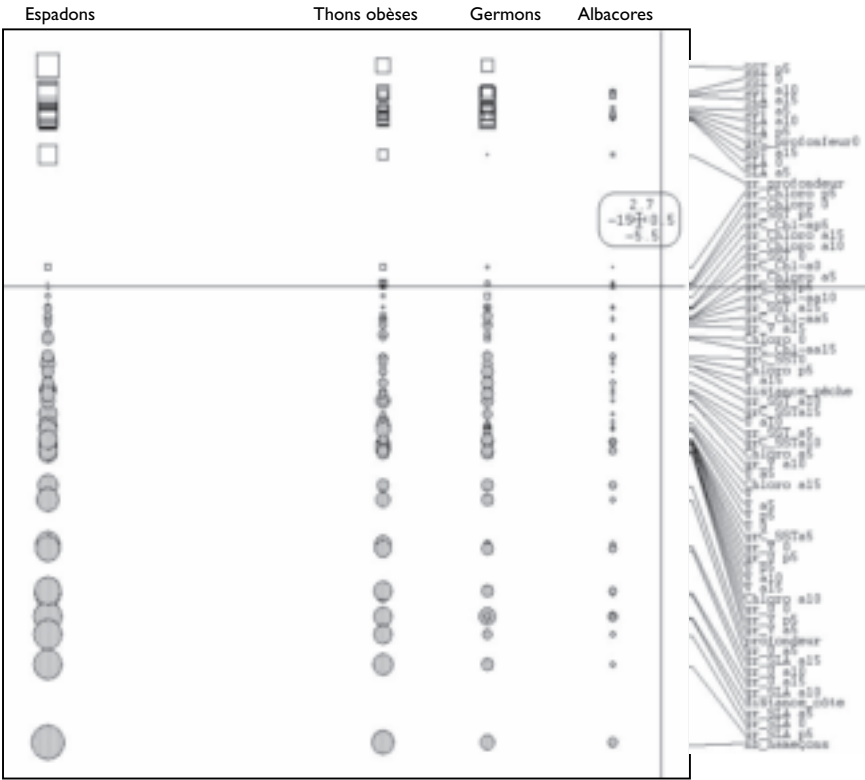
▽ Fig. 89

Projection des 66 variables environnementales sur le plan factoriel composé des deux premiers axes d'inertie (échelle des ordonnées considérablement augmentée).



▽ Fig. 90

Projection des 4 variables d'abondances sur le plan factoriel composé des deux premiers axes d'inertie.



▽ Fig. 91
Représentation des valeurs de covariance du tableau croisé.

Les symboles pleins et ronds expriment une covariance positive entre les deux variables. Les symboles carrés et vides représentent une covariance négative entre les deux variables. Les effectifs pêchés pour chacune des espèces s'élèvent à 5 854 espadons, 1 726 thons obèses, 955 germons et 1 062 albacores. Les informations contenues dans le tableau 7 résument l'information acquise par l'analyse.

▽ Tableau 7
Résumé de l'information acquise par l'analyse de co-inertie.

N° ACP	Covariance	Variance 1	Variance 2	Corrélation	Inertie 1	Inertie 2
1	14,77	64,11	11,04	0,5552	64,81	12,5
2	2,816	11,69	4,167	0,4034	12,33	5,84

Les colonnes Inertie 1 et Inertie 2 rappellent les inerties maximales qui peuvent être projetées sur des axes dans chaque espace (obtenus par les analyses séparées). Les colonnes Variance 1 et Variance 2 donnent les inerties projetées sur les axes de co-inertie. Les plans 1-2 de co-inertie sont très sensiblement de même

qualité que les plans 1-2 de chaque analyse. En plus, les deux projections sont reliées par les corrélations (Corrélation) entre systèmes de coordonnées de même rang, respectivement pour l'axe 1 et l'axe 2 de co-inertie. Ces valeurs sont obtenues partiellement par optimisation car la covariance est optimisée.

La possibilité de pouvoir compiler l'information concernant les relations entre les variables entre elles ainsi qu'avec l'abondance des espèces pêchées fournit une description synthétique. Les variables environnementales qui possèdent la plus forte covariance (aussi bien positive que négative) avec la variable d'abondance d'espadons sont les suivantes :

Covariance positive :

- Le nombre d'hameçons.
- La valeur du gradient (I)³ d'anomalie de hauteur d'eau (SLA) à la position de la pêche 5 jours après la pêche.
- La valeur du gradient (I) de SLA à la position de la pêche le jour de la pêche.
- La valeur du gradient (I) de SLA à la position de la pêche 5 jours avant la pêche.
- La distance de la pêche à la côte la plus proche.
- La valeur du gradient (I) de SLA à la position de la pêche 10 jours avant la pêche.
- La valeur du gradient (I) de la composante U du courant géostrophique à la position de la pêche 15 jours avant la pêche.
- La valeur du gradient (I) de la composante U du courant géostrophique à la position de la pêche 10 jours avant la pêche.
- La valeur du gradient (I) de SLA à la position de la pêche 15 jours avant la pêche.
- La valeur du gradient (I) de la composante U du courant géostrophique à la position de la pêche 5 jours avant la pêche.
- La profondeur à la position de pêche.

Covariance négative :

- La valeur de température de la surface de l'eau (SST) à la position de pêche 5 jours après la pêche.
- La valeur de SST à la position de pêche le jour de la pêche.
- La valeur de SST à la position de pêche 10 jours avant la pêche.
- La valeur de SLA à la position de la pêche 15 jours avant la pêche.
- La valeur de SST à la position de pêche 5 jours avant la pêche.
- La valeur de SLA à la position de la pêche 10 jours avant la pêche.
- La valeur de SLA à la position de la pêche 5 jours avant la pêche.
- La valeur du gradient (II)⁴ de bathymétrie (méthode du cercle) à la position de pêche.
- La valeur de SST à la position de pêche 15 jours avant la pêche.
- La valeur de SLA à la position de la pêche le jour de la pêche.
- La valeur de SLA à la position de la pêche 5 jours avant la pêche.
- La valeur du gradient (I) de bathymétrie à la position de pêche.

3. Gradient (I) : méthode de calcul du gradient par l'opérateur de Sobel.

4. Gradient (II) : calcul du gradient par la méthode du cercle décrite précédemment.

Parmi les 23 variables citées ci-dessus, le nombre d'hameçons, la distance à la côte, ainsi que la bathymétrie et ses deux gradients sont des variables fixes dans le temps. La valeur négative de la covariance pour les variables concernant la bathymétrie révèle que les valeurs prises pour ces variables ont été laissées en valeurs négatives. Il n'est pas anormal de trouver ainsi une covariance négative. Compte tenu des spécificités de la pêche à la palangre, un lien manifeste existe entre l'abondance d'espadons pêchés et le nombre d'hameçons disposés sur la palangre. De même, il existe une forte corrélation positive entre les variables du nombre d'hameçons et de la distance à la côte.

Les modèles linéaires généralisés

GUILLAUME CONSTANTIN DE MAGNY,
MARTIN DESRUISSEAUX, MICHEL PETIT



© P. Opic

Les modèles linéaires généralisés (GLIM) sont une généralisation bien connue de modèle de régression linéaire dans les cas où la réponse est une variable discrète ou que le modèle est différent des modèles linéaires standards. Les modèles linéaires généralisés utilisés le plus souvent sont des modèles de régression logistiques pour des données binaires et des modèles log-linéaires pour des données non binaires. Le modèle linéaire généralisé contient deux éléments fondamentaux. Le premier est le type d'erreur qui suit une loi normale de variance constante. Le second est la fonction de lien. Dans le modèle linéaire *sensu stricto*, la liaison sous la forme $y = ax + b$ est directement cherchée. Dans le modèle linéaire généralisé le but est de prédire la fonction de lien sous la forme :

$$\text{Log} [p / (1 - p)] = ax + b \quad \text{soit} \quad p = 1 / (1 + e^{-(ax + b)})$$

Un modèle linéaire est un modèle linéaire généralisé d'erreur normale et de lien identité.

Le fichier de données concerne les pêches dont les valeurs des variables sont complètes. Les analyses sont réalisées avec le programme S-plus 2000 de la société MathSoft.

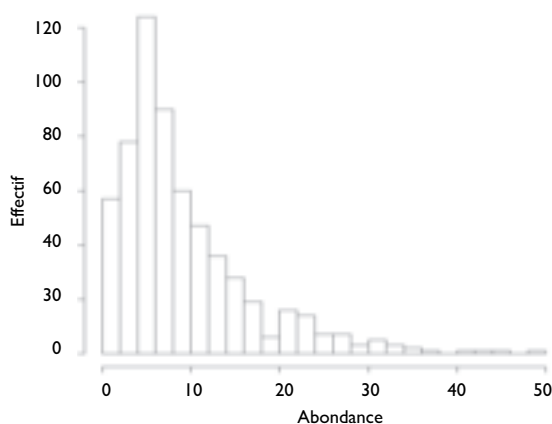
La variable « réponse » du modèle est l'abondance d'espadons « SWO » issue de pêches à la palangre. Les variables explicatrices choisies sont les 29 variables suivantes :

- La distance à la côte (distance_côte).
- La distance minimale séparant la pêche d'une autre le même jour.
- Le nombre d'hameçons (nb_hameçon).

- La bathymétrie au point de pêche.
- La concentration en chlorophylle-*a* déterminée au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après.
- La température de l'eau en surface au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après.
- L'anomalie de hauteur d'eau au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après.
- La composante U du courant géostrophique au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après.
- La composante V du courant géostrophique au point de pêche 15, 10 et 5 jours avant, ainsi que le jour même et 5 jours après.

Pour construire un modèle, il est nécessaire de connaître la loi de la distribution de la variable de réponse. Un histogramme des abondances d'espadons pêchés permet de la déterminer (fig. 92).

La forme de la distribution des données d'abondance d'espadons pêchés est similaire à une distribution selon la loi de Poisson. Le type de modèle sélectionné est poissonnien et le lien sera logarithmique « log ».



▽ Fig. 92

Histogramme de l'effectif des palangres en fonction de l'abondance d'espadons pêchés.

Création du modèle maximal

Les variables seront injectées dans un premier modèle. Aucune interaction ne sera prise en compte dans un premier temps.

Pour l'optimisation des paramètres, le nombre d'itérations utilisées est de 50 000 et la tolérance de convergence de 0,05. Ce critère permet d'éliminer les variables colinéaires.

Lors de l'étape de construction du modèle, le calcul « d'une analyse de variance à un facteur » (*anova*) est réalisé. Une étape supplémentaire est ajoutée ensuite qui fait appel à la fonction « *step* ». Elle a pour but d'éliminer du modèle les facteurs colinéaires. Les facteurs présentés en fin de rapport de la commande *step* sont repris et constituent le nouveau modèle maximal. Ces étapes seront répétées jusqu'à ce que la totalité des facteurs colinéaires soit retirée. Étant donné que le nombre de facteurs est encore élevé, seuls les facteurs les plus significatifs dans l'*anova* qui a précédé seront gardés.

Dans le cadre de l'analyse de l'abondance des espadons pêchés, les facteurs conservés dans le modèle maximal sont :

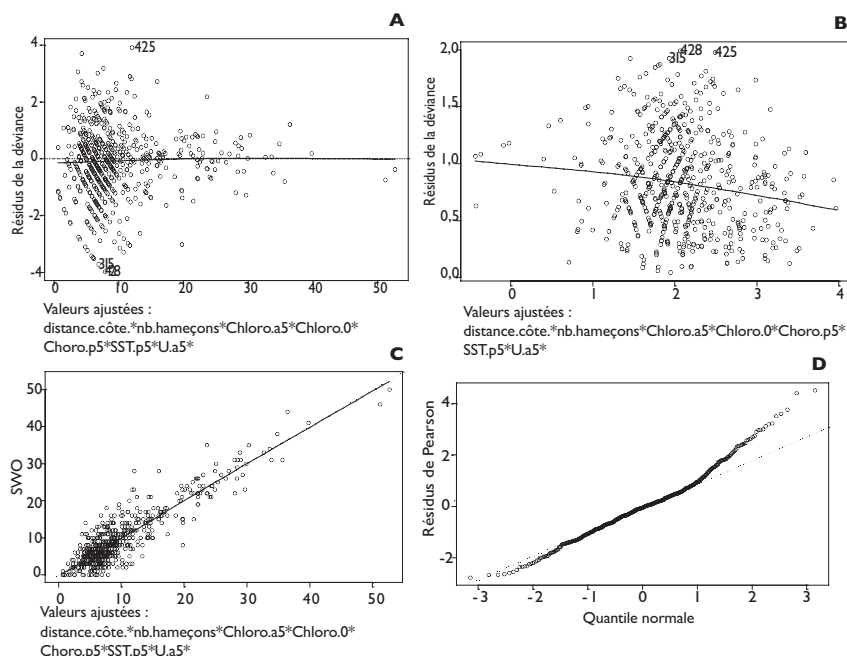
- La distance à la côte (*distance_côte*).
- Le nombre d'hameçons (*nb_hameçon*).
- La concentration en chlorophylle-*a* déterminée au point de pêche 5 jours avant (*chloro a5*).
- La concentration en chlorophylle-*a* déterminée au point de pêche le jour même (*chloro 0*).
- La concentration en chlorophylle-*a* déterminée au point de pêche 5 jours après (*chloro p5*).
- La température de l'eau en surface au point de pêche 5 jours après (*SST p5*).
- La composante U du courant géostrophique au point de pêche 5 jours avant (*U a5*).
- La composante V du courant géostrophique au point de pêche le jour même (*V 0*).

Le modèle maximal est créé en ajoutant les facteurs simples et toutes les interactions possibles entre ces facteurs. Il est constitué de 8 variables. Cela fait 255 facteurs de 8 niveaux d'interactions différents résumés dans le tableau 8.

La déviance expliquée par le modèle maximal est de 72,54 %. En d'autres termes, le modèle explique 72,54 % de la variation de l'abondance d'espadons observée.

▽ Tableau 8
Récapitulatif de l'information concernant le modèle maximal à 255 termes.

Nombre de facteurs composant les interactions	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Effectif	8	28	56	70	56	28	8	1	255
Somme de la déviance	1 277,93	214,88	222,78	299,21	186,87	58,68	31,56	0,04	2291,96
Part dans la déviance (en %)	55,76	9,38	9,72	13,06	8,15	2,56	1,38	< 0,01	100
Déviance (en %)	40,45	6,80	7,05	9,47	5,92	1,86	1,00	< 0,01	72,54



▽ Fig. 93

Représentation des différents paramètres du modèle.

- A : les résidus vs les valeurs ajustées ;
- B : les valeurs absolues des résidus élevées au carré vs les valeurs ajustées ;
- C : la réponse vs les valeurs ajustées,
- D : graphique quantile-quantile normal des résidus (normalité des résidus).

Les différents graphiques de la figure 93 permettent de juger de la qualité du modèle. Le graphique D montre un écart de la distribution des résidus par rapport à la normalité. Il s'agit d'une sous-dispersion de la réponse du modèle pour de faibles valeurs ajustées ainsi qu'une sur-dispersion pour des valeurs ajustées élevées.

Le tableau 8 résume les caractéristiques du modèle.

La première ligne du tableau classe les facteurs par catégories. Il y a dans la colonne 1, les 8 facteurs correspondants aux 8 variables retenues pour le modèle maximal. Dans les colonnes 2 à 8 sont regroupées les interactions d'ordre 2, 3 à 8. La colonne totale indique que le modèle prend en compte 255 termes. La somme de la déviance correspond au cumul des déviations de chacun des termes regroupés dans les colonnes. La part dans la déviance pour chaque classe de facteurs et interactions est calculée de la manière suivante : la somme de la déviance pour chaque classe de facteurs est divisée par la déviance totale (ici égale à 2 291,96). La valeur est donnée en pourcentage. Cela nous renseigne sur la part de chacune des classes de facteurs dans la déviance totale expliquée par le modèle. La dernière ligne du tableau correspond à la déviance expliquée par chacune des classes.

▽ Tableau 9
Facteurs simples et interactions de type 2 et 3 hautement significatifs
et leurs valeurs de déviations et contribution dans la déviance
ainsi que les coefficients déterminés par le modèle.

	Contribution des facteurs dans la déviance (en %)	Déviance (en %)	Coefficients
Ordonnée à l'origine			- 36,43744
Nb_hameçons	25,36	18,40	- 0,1731539
Distance_côte	22,98	16,67	8,030329
U a5	2,56	1,86	10,10388
Chloro p5	2,22	1,61	- 4259,952
U a5*V	1,70	1,23	- 0,4894207
Distance_côte, U a5, V 0	1,58	1,14	0,05906905
Nb_hameçons, SST p5	1,55	1,13	0,00901742
Nb_hameçons, Chloro a5	1,32	0,96	0,2491969
Nb_hameçons, Chloro p5, V 0	1,13	0,82	- 0,2748209
Chloro 0	0,95	0,69	11501,15
Distance_côte, Chloro p5, U a5	0,81	0,59	2,782335
SST p5	0,80	0,58	38,6342
Distance_côte, U a5	0,80	0,58	- 0,2391531
Chloro a5	0,79	0,57	11551,35
Chloro p5, SST p5	0,77	0,56	199,9692
Distance_côte, Chloro 0	0,60	0,44	93,37972
Nb_hameçons, Chloro a5, U a5	0,55	0,40	- 0,9301072
Nb_hameçons, SST p5, U a5	0,49	0,35	- 0,0007529
Total	66,97	48,58	

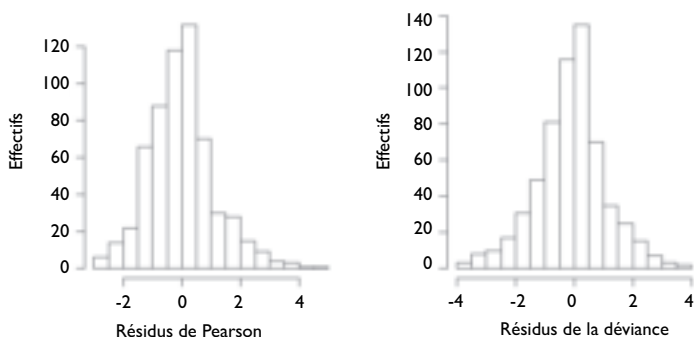
Les facteurs simples sans interactions représentent 55,76 % de la déviance expliquée par ce modèle, 9,376 % par les interactions de type 2 et 9,72 % par les interactions de type 3. La part importante des interactions associant au moins deux facteurs dans cette déviance montre que le modèle est multifactoriel.

Les différents facteurs et interactions de type 2 et 3 hautement significatifs ($Pr < 0,001$) sont résumés dans le tableau 9.

Ainsi, 66,97 % de la déviance sont expliqués par les 18 termes les plus significatifs. En d'autres termes, le modèle explique 48,58 % de la variation de l'abondance d'espadons pêchés avec ces 18 facteurs.

La distribution des résidus est représentée graphiquement afin de vérifier si leur distribution est de forme gaussienne (fig. 94). Les résidus de Pearson sont une version des résidus de travail sur une autre échelle. Leur somme des carrés des écarts est une statistique du χ^2 . Les résidus de travail sont déterminés par la soustraction de la valeur ajustée du modèle à la valeur de la réponse.

La forme des deux courbes est semblable à une distribution gaussienne. La légère tendance aux deux distributions d'être déséquilibrées vers la partie gauche trouve son origine dans la sur-dispersion du modèle dans le cadre de la prédiction des grandes valeurs.

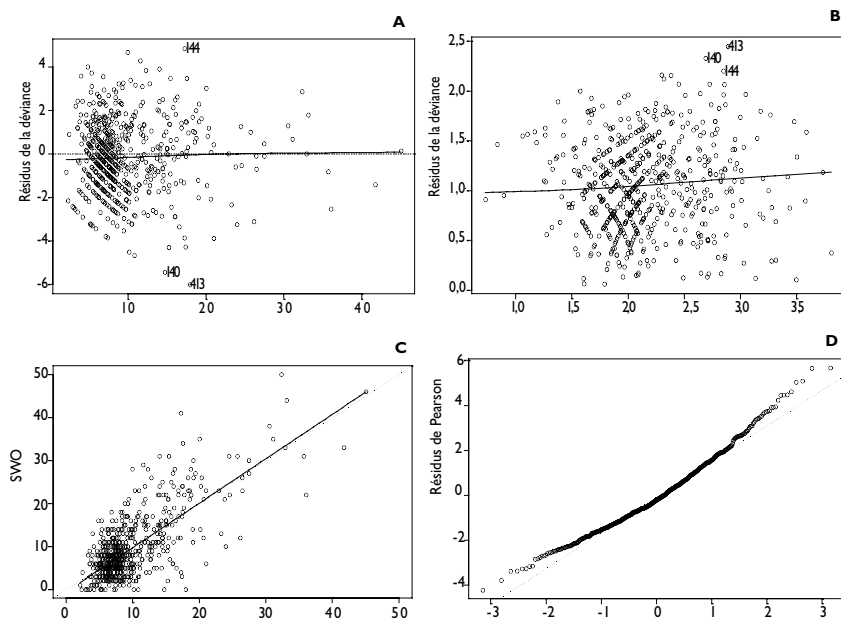


▽ Fig. 94

Histogramme des résidus de Pearson (résidus calculés sur une autre échelle) et de la déviance pour le modèle maximal.

Simplification du modèle maximal :

L'étape suivante consiste à construire un modèle plus simple. Le modèle est constitué des 8 facteurs simples et des 28 interactions à 2 termes uniquement. Il est constitué ainsi de 36 termes. La déviance expliquée par ce modèle est de 47,25 %. La déviance du modèle expliquée par des facteurs significatifs ($Pr < 0,001$) est de 45,22 % (fig. 95).



▽ Fig. 95

Représentation des différents paramètres du modèle simplifié.

A : les résidus vs les valeurs ajustées ;

B : les valeurs absolues des résidus élevées au carré vs les valeurs ajustées ;

C : la réponse vs les valeurs ajustées,

D : graphique quantile-quantile normal des résidus (normalité des résidus).

Ce modèle présente une sur-dispersion des valeurs ajustées faibles et élevées.
Le tableau 10 résume les caractéristiques du modèle.

▽ Tableau 10
Récapitulatif de l'information concernant le modèle à 36 termes.

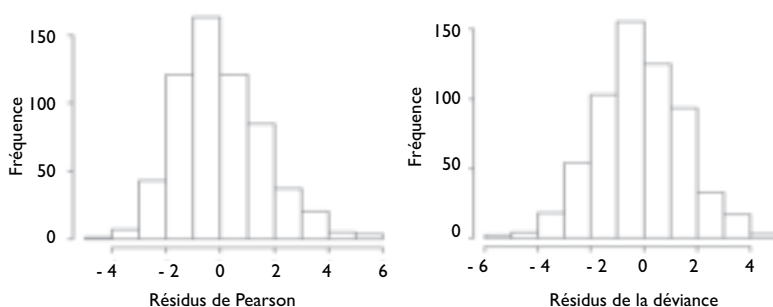
Nombre de facteurs composant les interactions	1	2	Total
Effectif	8	28	36
Somme de la déviance	1 277,93	214,88	1 492,82
Part dans la déviance (en %)	85,61	14,39	100,00
Déviance (en %)	40,45	6,80	47,25

Il apparaît que ce modèle explique 47,25 % de la variation de l'abondance d'espadons pêchés. Les facteurs hautement significatifs de ce modèle sont rassemblés dans le tableau 11.

▽ Tableau 11
Facteurs simples et interactions de type 2 hautement significatifs
avec leurs valeurs de déviations et contribution dans la déviance
ainsi que les coefficients déterminés par le modèle.

	Contribution des facteurs dans la déviance (en %)	Déviance (en %)	Coefficients
Ordonnée à l'origine			- 2,27
Nb_hameçons	34,88	18,4	0,0044
Distance_côte	31,61	16,67	0,0055
U a5	3,52	1,85	- 0,0039
Chloro p5	3,05	1,6	68,4648
U a5, V 0	2,34	1,23	0,0004
Nb_hameçons, SST p5	2,13	1,12	- 0,0002
Nb_hameçons, Chloro a5	1,82	0,96	0,0081
Chloro 0	1,31	0,69	- 30,882
SST p5	1,10	0,58	0,1645
Distance_côte, U a5	1,10	0,57	0,0001
Chloro a5	1,08	0,57	- 49,6965
Chloro p5, SST p5	1,06	0,55	- 2,1726
Distance_côte, Chloro 0	0,83	0,43	0,0450
Total	85,83	45,22	

Les facteurs résumés dans le tableau constituent 85,83 % de la déviance expliquée par le modèle, la déviance du modèle étant de 47,25 %. Les histogrammes de la figure 96 représentent les résidus de Pearson ainsi que les résidus de la déviance.



▽ Fig. 96
*Histogramme des résidus de Pearson
et de la déviance pour le modèle.*

La normalité de distribution des résidus est vérifiée. La sur-dispersion mentionnée précédemment affecte légèrement la forme des distributions pour les valeurs extrêmes. Dans la démarche d'analyse et de modélisation par la méthode des modèles linéaires généralisés, une double approche par une autre catégorie de ces modèles est intéressante.

Modèle de maximum de vraisemblance

Le même type d'analyse est réalisé en utilisant le modèle de maximum de vraisemblance afin d'avoir une double approche de la modélisation de la variable de réponse.

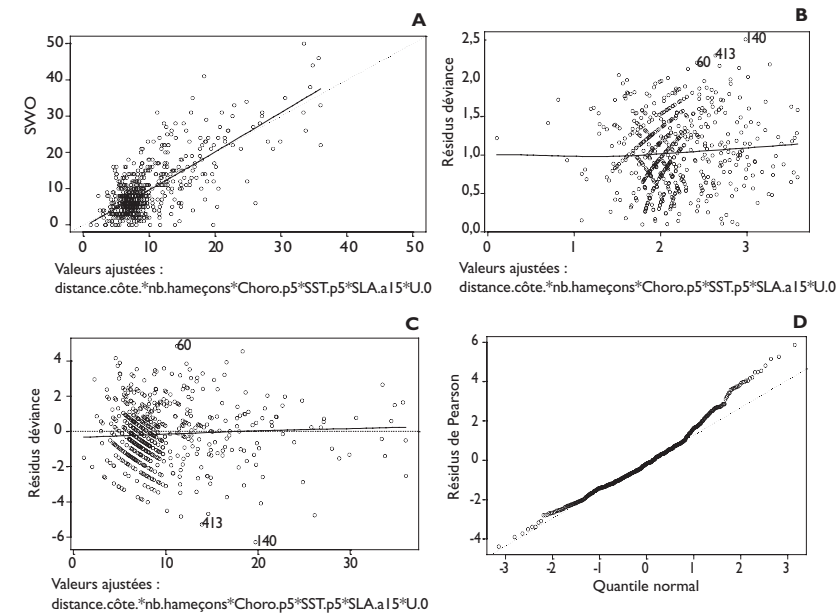
Tous les différents types de modèles, excepté le modèle utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, sont associés à une distribution de la famille exponentielle. Pour chacun, ils ont une fonction de variance fixée. Il y a un choix typique de la fonction de lien. La famille des modèles de maximum de vraisemblance ne demande pas de correspondre à une distribution particulière pour la variable de réponse. Ainsi, les modèles dit « quasi » peuvent être définis par différents liens et fonctions de variance.

Les facteurs simples sont déterminés de la même manière que pour les deux précédents modèles. Il s'agit des facteurs suivants :

- La distance à la côte la plus proche.
- Le nombre d'hameçons.
- La concentration en chlorophylle-*a* déterminée au point de pêche 5 jours après.
- La température de l'eau en surface au point de pêche 5 jours après.
- L'anomalie de hauteur d'eau au point de pêche 15 jours avant.
- La composante U du courant géostrophique au point de pêche le jour même.

Le modèle maximal est constitué des 6 variables ci-dessus ainsi que de l'ensemble des interactions possibles entre ces facteurs. Ainsi, 63 termes constituent le modèle. Le type de lien utilisé reste « log », la fonction de la variance est égale à « mu ». Pour l'optimisation des paramètres, le nombre d'itérations utilisées est de 50 000 et la tolérance de convergence de 0,05.

La déviance expliquée par le modèle minimal est 47,36 %. Le paramètre de dispersion donné pour le modèle utilisé montre qu'il est sur-dispersé. Les différents graphiques de la figure 97 le représentent.



▽ Fig. 97

Représentation des différents paramètres du modèle.

A : les résidus vs les valeurs ajustées ;

B : les valeurs absolues des résidus élevées au carré vs les valeurs ajustées ;

C : la réponse vs les valeurs ajustées,

D : graphique quantile-quantile normal des résidus (normalité des résidus).

▽ Tableau 12

Récapitulatif de l'information concernant le modèle à 63 termes.

Nombre de facteurs composant les interactions	1	2	3	4	5	6	Total
Effectif	6	15	20	15	6	1	63
Somme de la déviance	1 277,10	131,92	81,00	38,32	23,76	0,047	1 496,15
Part dans la déviance (en %)	81,62	8,82	5,41	2,56	1,59	0,003	100,00
Déviance (en %)	38,65	4,18	2,56	1,21	0,75	0,001	47,36

De la même manière que dans le précédent modèle, la réponse est sur-dispersée pour les faibles ainsi que les fortes valeurs ajustées. Les tableaux 12 et 13 résument les caractéristiques du modèle.

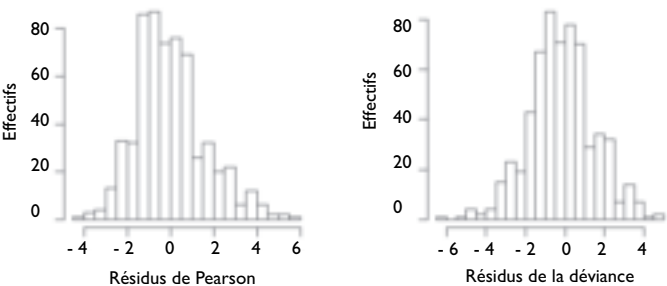
La déviance totale apportée par ce modèle n'explique que 47,36 % de la variation de l'abondance d'espadons pêchés. Les facteurs simples ont une grande part dans la variance expliquée du modèle (81,62 % de la déviance).

▽ Tableau 13
Facteurs simples et interactions hautement significatifs
avec leurs valeurs de déviations et contribution dans la déviance
ainsi que les coefficients déterminés par le modèle.

	Contribution des facteurs dans la déviance (en %)	Déviance (en %)	Coefficients
Ordonnée à l'origine			- 45,68
Nb_hameçons	38,85	18,40	0,038
Distance_côte	35,20	16,67	0,447
Nb_hameçons, SST p5	3,11	1,47	- 0,001
SLA a15	2,72	1,29	- 1,597
Distance_côte, U 0	2,50	1,19	0,030
U 0	2,00	0,95	- 5,079
SST p5	1,71	0,81	1,848
Total	86,10	40,77	

Plus nettement, les effets de sur-dispersion du modèle sont visibles sur les graphiques de distribution des résidus (fig. 98).

D'autres ajustements, en particulier concernant les fonctions de variance ont été réalisés. Mais les modèles obtenus n'expliquaient pas autant de variance que le modèle présenté.

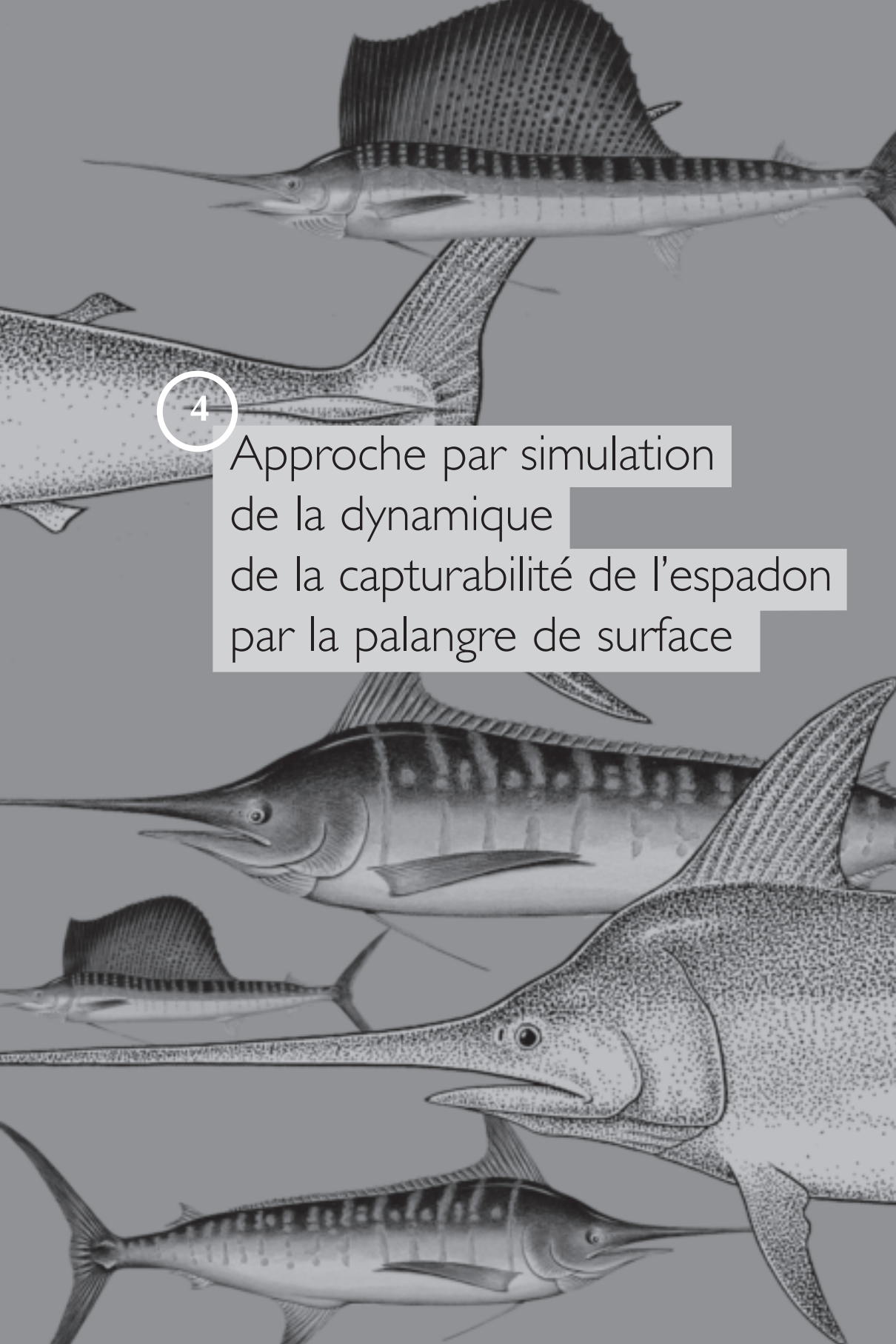


▽ Fig. 98
Histogramme des résidus de Pearson et de la déviance
pour le modèle de maximum de vraisemblance.

Discussion

Les différents modèles construits permettent d'expliquer au maximum 72,54 % de la variation des abondances d'espadons pêchés parmi les 607 pêches considérées. Les facteurs simples décrivent 40,45 % de cette variation et les interactions à 2 termes et plus décrivent les 32,09 % restant. Il apparaît une sur-dispersion pour les grandes valeurs ajustées quel que soit le modèle. La description de la variation de l'abondance des pêches d'espadons apparaît difficilement interprétable car elle fait appel à de nombreux mécanismes et interactions. Il est probable que les mécanismes à l'origine de l'abondance d'espadons lors des pêches sont d'ordre stochastique. Il ressort clairement que le nombre d'hameçons disposés sur la palangre est responsable en grande partie de la variation de l'abondance observée lors des pêches. La part des variables environnementales qui semble influencer le plus cette abondance apparaît 10 fois plus faible que le nombre d'hameçons et la distance à la côte la plus proche quel que soit le modèle. Cela peut permettre de faire un tri entre les différentes variables environnementales prises également à une échelle de temps différente.

L'utilisation d'un réseau de neurones dans un modèle prédictif semble hasardeuse compte tenu du caractère multifactoriel du système. La génération d'une variable aléatoire et introduite en tant que variable indépendante explicatrice dans ce type de système apparaîtrait comme prépondérante dans la description de la variation de l'abondance d'espadons observée. Toutefois, il serait intéressant de compléter ces différentes approches par une analyse de tableaux de contingence.



4

Approche par simulation
de la dynamique
de la capturabilité de l'espadon
par la palangre de surface

La modélisation dans la compréhension des déplacements de grands pélagiques exploités par la pêche

DAVID GUYOMARD, JEAN-CHRISTOPHE SOULIÉ,
MARTIN DESRUISSEAUX, JEAN-MICHEL STRETTA,
MICHEL PETIT



Katsuwonus pelamis (Linnaeus, 1758)

© P. Opic

L'approche classique de la théorie des pêches

L'exploitation des populations de poissons et autres organismes marins par l'homme, par l'extraction directe de la pêche, est un phénomène fondamentalement opaque et quasi mystérieux, puisque le plus souvent réalisé par le biais d'engins de captures posés ou halés sur le fond ou en pleine eau, à des endroits inaccessibles à l'observation jusqu'il y a encore peu de temps. Malgré tout, c'est aussi une activité économique, soumise à une régulation et un contrôle administratif qui en assurent un suivi quantitatif, quoique généralement imparfait. Cela constitue une des caractéristiques les plus singulières du système pêche (REY *et al.*, 1997). Les modèles classiques de dynamiques des populations ont été élaborés dans le souci d'une meilleure compréhension des phénomènes globaux qui les animent, généralement pour en rationaliser l'exploitation et notamment donner des indices sur leur éventuelle surexploitation par la pêche (LAUREC et LE GUEN, 1981). Ils ont dans ce sens été conçus comme des simplifications du réel, en application de raisonnements phénoménologiques pertinents par rapport aux situations observées à différentes échelles, par le biais principalement de la pêche dans le domaine halieutique. Ces modèles peuvent être structurés en classes d'âge ou en sous-populations distinctes géographiquement, mais ne permettent de soulever que des questions globales sur les processus à l'échelle de la population entière et assument l'hypothèse que tous les individus

sont identiques et évoluent dans un milieu unique (TYLER et ROSE, 1994). Ils considèrent des processus au sein d'unités spatiales et démographiques homogènes et ne figurent pas explicitement l'influence des relations spatiales, des différences de comportement entre individus ou des dynamiques de l'environnement sur ces processus écologiques. Plus généralement, ce sont les éléments de la théorie des pêches (BEVERTON et HOLT, 1957) qui concernent la question de la variabilité spatio-temporelle des captures et les moyens de les appréhender dans le suivi de l'état de santé des stocks qui sont présentés ici.

La capturabilité et la théorie des pêches

La capturabilité est un concept clé de la théorie des pêches et de l'halieutique : elle relie l'effort de pêche (les moyens de capture) à la mortalité par pêche (la fraction pêchée de la population), elle a une vocation de relier la cause à l'effet engendré.

$$F = qf_n \quad \text{équation (1)}$$

F : mortalité par pêche (une probabilité)

q : la capturabilité (une probabilité)

f_n : l'effort de pêche « nominal » (peut-être un facteur multiplicatif relatif à une unité d'effort de référence)

Le taux de capture est constitué par les captures par unité d'effort nominal (CPUE). Celui-ci est défini par LAUREC et LE GUEN (1981) comme « l'accumulation d'un travail et non la mesure de son résultat ». Cette mesure du résultat de la pêche est exprimée par F , la mortalité par pêche.

$$CPUE = \frac{C}{f_n} \quad \text{équation (2)}$$

C : captures réalisées avec l'effort nominal f_n

Inversement, HILBORN et WALTERS (1992) relient les taux de captures aux abondances relatives du stock dans un endroit et à une période donnée (correspondant à ces captures) par un coefficient k que les auteurs appellent « efficacité ».

$$CPUE = kA \quad \text{équation (3)}$$

A : abondance relative (c'est-à-dire à l'endroit et pour la période donnée correspondant à l'effort déployé et aux captures réalisées)

Les captures réalisées constituent la fraction de l'abondance qui meurt par la pêche.

$$C = AF \quad \text{équation (4)}$$

Les équations (1) et (4) mettent en relation l'abondance avec les captures et l'effort de pêche nominal et on montre très directement que $k = q$ et que ce paramètre efficacité/capturabilité est extrêmement polymorphe. Dans l'équation (1), il s'agit d'un paramètre plutôt en relation avec l'effort de pêche (le fait du pêcheur), tandis que dans l'équation (3), il s'agit plutôt d'un lien à la ressource

(sans considérer explicitement un concept d'effort, on peut espérer des résultats de pêche – CPUE – correspondant à k fois l'abondance du poisson).

À la suite de LAUREC et LE GUEN (1981), GASCUEL (1995) a explicité ce dualisme en décomposant la capturabilité entre ses composantes anthropique et ichtyologique :

- Facteurs ichtyologiques : c'est la disponibilité d , composée de l'*accessibilité* (liée à l'endroit de pêche et à l'environnement) et de la *vulnérabilité* (liée au comportement très local du poisson vis-à-vis de l'engin de pêche).

- Facteurs anthropiques : c'est la puissance globale de pêche P_g , dépendant uniquement du pêcheur (sa technique – *puissance locale* – et sa stratégie de répartition spatio-temporelle – *efficience de pêche*)

$$q = dP_g \quad \text{équation (5)}$$

Cette décomposition (équation 5) est très pratique, car elle permet de poser certaines hypothèses concernant l'un des effets (variations sans tendances de la disponibilité ou tendance d'évolution sans biais de la puissance de pêche par exemple) et ainsi de mieux caractériser les processus qui déterminent la dynamique de l'exploitation halieutique. Une grande partie des études halieutiques est ainsi menée en posant de telles hypothèses (assez contraignantes mais très simplificatrices) et en analysant les variations des autres facteurs.

La capturabilité est un paramètre indispensable à toute analyse de la dynamique d'exploitation halieutique, mais elle est rarement déterminée de manière analytique. Elle constitue plutôt un paramètre « intermédiaire », qui englobe la connaissance approximative, voire nulle qu'ont les halieutes des véritables mécanismes qui déterminent le fait qu'un poisson soit pêché par un pêcheur dans des conditions particulières.

La standardisation des CPUE par la prise en compte des facteurs affectant la capturabilité, une approche statistique de la variabilité spatio-temporelle

Les CPUE constituent l'indice de rendement de la pêche utilisé pour rendre compte des abondances relatives des poissons pêchés corrigées du paramètre de capturabilité (équation 3). Pour pouvoir comparer des CPUE entre elles et discuter des abondances relatives de poissons entre différentes zones et surtout de leur évolution (qui rend compte en partie de l'état d'un stock exploité), il est nécessaire de corriger les CPUE de l'effet « capturabilité » et d'opérer leur standardisation, c'est-à-dire d'estimer les variations d'effort effectif liées à la capturabilité du poisson qui varie dans l'espace et dans le temps.

L'opération consiste tout d'abord à stratifier les données de CPUE nominales en strates techniques (segments de flottilles, catégories de navires aux « efficacités » de pêche homogènes), temporelles (années, saisons) et spatiales (zone de pêche, carré statistique) sensées être homogènes du point de vue de la capturabilité du poisson. La technique de standardisation des CPUE par l'utilisation d'un GLM (*Generalized Linear Model*) a été particulièrement employée par HILBORN et WALTERS (1992) ainsi que par FRÉON et MISUND (1999). Elle consiste en la

recherche par la modélisation statistique des effets conjugués des facteurs techniques, temporels et spatiaux sur les CPUE :

$$CPUE_{t,i,j} = CPUE_{I,I,I} a_t b_i c_j \varepsilon_{t,i,j}$$

	$CPUE_{I,I,I}$	est la CPUE moyenne de l'unité de pêche I de référence pendant la période I de référence dans la zone I de référence
	a_t	est le facteur reliant l'efficacité de l'unité de pêche t à la catégorie I de référence
où	b_i	est le facteur reliant la CPUE moyenne de la période i à la période I de référence
	c_j	est le facteur reliant la CPUE moyenne de la zone j à la zone I de référence
	$\varepsilon_{t,i,j}$	sont les résidus.

Une estimation raisonnable des séries de CPUE moyennes par classe de navires, période et zone peut être obtenue à partir de ce modèle – souvent appelé « moyenne des moindres carrés » – et l'effort effectif standardisé correspondant est simplement obtenu en divisant les captures totales par les CPUE ainsi mesurées. Une transformation logarithmique permet de linéariser le modèle :

$$\log (CPUE_{t,i,j}) = \log (CPUE_{I,I,I}) + \log (a_t) + \log (b_i) + \log (c_j) + \varepsilon'_{t,i,j}$$

Cette transformation limite l'influence des valeurs les plus élevées, mais son intérêt est réel pour l'application à un modèle global de dynamique de population et l'estimation d'abondances corrigées des effets (ainsi quantifiés) de cette capturabilité différentielle.

FRÉON et MISUND (1999) rappellent les améliorations possibles à apporter à cette approche, notamment en considérant l'influence de facteurs externes explicites liés au comportement du poisson vis-à-vis de l'environnement, à l'accessibilité de la biomasse et au taux d'échange entre stocks ou aux changements dans la zone couverte par la pêcherie.

Toutefois, cette approche reste très dépendante du choix de la classe de navires, de la période et de la zone de référence standard (et donc de la valeur $CPUE_{I,I,I}$).

Cette approche a été utilisée par de nombreux auteurs pour standardiser les CPUE de la pêche palangrière ciblant l'espadon (FARBER et CONSER, 1983 ; MEJUTO, 1994 ; NAKANO, 1994 ; SCOTT et BERTOLINO, 1994 ; UOSAKI et TAKEUCHI, 1998).

Concernant le choix de la strate de référence employée dans le modèle, FARBER et CONSER (1983) préconise le choix des années où la pêcherie couvre toute l'aire de répartition de l'espèce et pour lesquelles la taille du stock est *a priori* relativement stable. Il reconnaît toutefois que ce choix est parfois subjectif. Par ailleurs, le choix des strates temporelles et spatiales se limite le plus souvent aux données statistiques généralement disponibles, à savoir le mois, voire la quinzaine ou la semaine, pour un carré de $1^\circ \times 1^\circ$ au maximum. Mais ces périodes/zones ne correspondent pas forcément à des zones homogènes vis-à-vis du comportement de l'espadon et de son accessibilité ; il est alors difficile de définir des indices d'abondances fiables et d'apporter aux modèles de dynamique des prédictions pertinentes sur les niveaux d'exploitation durables.

Une solution pertinente serait d'identifier clairement le facteur clé responsable de la sélection de l'habitat ou des déplacements de la ressource d'une partie de l'océan à une autre comme cela est suggéré par FRÉON et MISUND (1999). Ainsi, la CPUE pourrait être calculée uniquement sur cette période/zone, assumant ainsi que des rendements nuls sont liés à l'absence du poisson. La stratification d'un modèle GLM pour la standardisation des efforts pourrait alors être établie selon ces facteurs et rendrait plus directement interprétables les variations d'abondance observées.

Les connaissances actuelles de l'écologie du poisson autorisent rarement à utiliser une telle méthode. En clair, l'approche « classique » de la théorie des pêches introduit les paramètres clés mais ne résout pas la question. L'hétérogénéité de l'environnement est une caractéristique nécessitant la mise en œuvre d'approches nouvelles pour en aborder la complexité. C'est un des enjeux majeurs de la science halieutique actuelle. C'est également un des objectifs poursuivis dans la présente étude et les actions de recherche ou de transfert qui suivront.

Les modèles dynamiques et spatiaux

L'hétérogénéité de l'environnement et la variabilité individuelle des populations sont des caractéristiques essentielles des dynamiques spatiales des populations animales (TYLER et ROSE, 1994). La prise en compte dans les modèles de dynamique de populations du « paysage environnemental » et de son hétérogénéité spatio-temporelle, dans lequel évoluent des individus aux caractéristiques différentes (variabilité phénotypique), est récente. Elle a bénéficié des développements parallèles des outils de collecte de l'information environnementale, notamment l'observation des océans depuis l'espace, des outils de représentation, de manipulation et d'analyse cartographique de cette information à échelle et résolution adaptées (systèmes d'information géographique - SIG) et des outils informatiques de modélisation et de simulation des phénomènes étudiés.

Cette complexité intrinsèque aux dynamiques naturelles est observée depuis toujours, mais elle s'offre désormais comme une donnée de base dans les modèles de dynamiques de populations et un objet d'étude fondamental.

Le rôle de l'environnement et les échelles impliquées dans la dynamique spatio-temporelle des populations de grands pélagiques

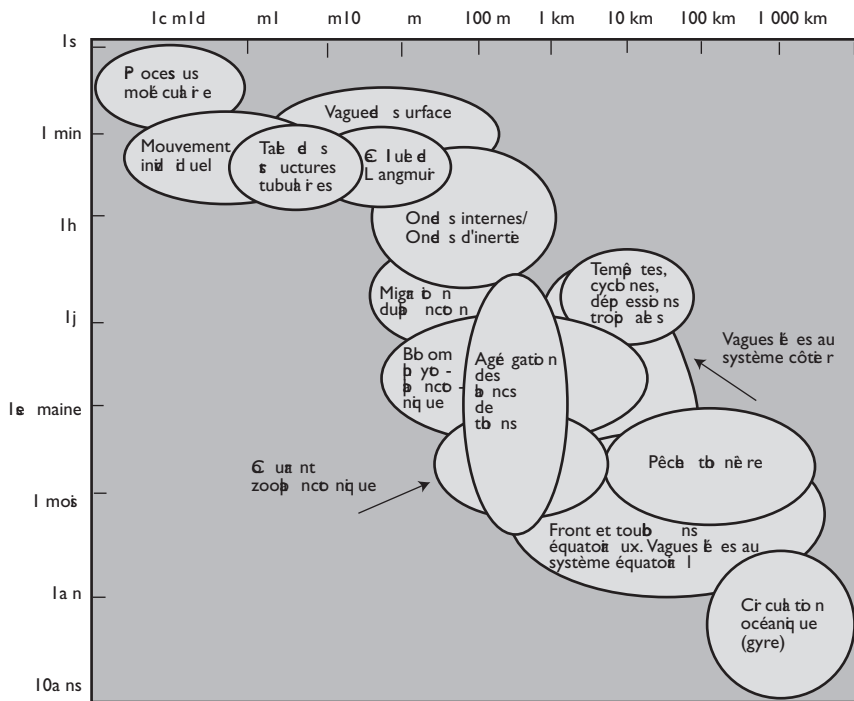
À l'échelle océanique, les grands mouvements des populations de grands pélagiques répondent à des cycles annuels qui ont longtemps été considérés comme des **migrations**, caractérisées par des « mouvements à grande échelle, où les influences de l'environnement sont inhibées pendant le déplacement,

mais souvent induisent son origine » (DUGLE, 1983). Cette vision des choses a été relativisée par CAYRÉ (1990), qui précise que ces grands déplacements cycliques sont aussi « guidés » par l'environnement, échappant ainsi à la stricte définition des migrations révisée par les écologues. À la suite de POSTEL (1969) et de la première définition de l'intervalle d'euphorie décrivant l'affinité des grands poissons pélagiques pour certaines configurations environnementales, l'auteur synthétise les aspects importants de ces déplacements : déclenchement des grands déplacements par des « stimuli » de départ saisonniers (photopériode, température de l'eau...), puis déterminisme des déplacements selon des mécanismes de régulation « statistiques » qui font se reproduire dans l'hydroclimat les mêmes phénomènes océanographiques saisonnièrement et amènent les poissons, qui les suivent « pas à pas » à « retrouver » les mêmes zones d'une année sur l'autre.

LEHODEY *et al.* (1997) illustrent particulièrement bien cette influence des facteurs environnementaux dans les déplacements à grande échelle des populations de grands pélagiques. Leur étude porte sur les liens entre la distribution des fortes CPUE de bonites (*Katsuwonus pelamis*) dans le Pacifique par les navires sennears à l'est de 150° W et les paramètres environnementaux. La plupart des captures (90 %) sont réalisées dans la zone d'eau très chaude et dessalée (*warm pool*) du Pacifique ouest. Les auteurs ont nettement mis en évidence le déplacement des fortes concentrations de bonites vers l'est en même temps que le déplacement des isothermes de surface, indicateurs du phénomène El Niño. Les trajets « migratoires » ne sont pas inscrits une fois pour toutes et de façon immuable, mais ils dépendent des conditions du milieu, celui-ci pouvant être l'objet d'anomalies par rapport aux cycles saisonniers « habituels », entraînant les populations marines dans cette dynamique.

La généralisation de ces mécanismes a été entreprise par SINCLAIR (1987). Son hypothèse des « membres/vagabonds » repose sur l'implication des dérives (*shifts*) existant dans les phénomènes océanographiques, pouvant amener les populations marines à se scinder entre les « membres » qui restent inscrits dans les schémas spatio-temporels « habituels » de l'espèce et les « vagabonds » qui en échappent du fait de ces dérives. Ces derniers peuvent alors être amenés à se séparer du corps de leur population, essaimer dans d'autres configurations environnementales dans lesquelles ils s'adaptent et éventuellement se spécifient différemment, ou s'éteignent. Le pouvoir d'explication de l'hypothèse est très fort, puisqu'il propose un cadre conceptuel du mécanisme écologique de l'évolution (*i.e.* la régulation de la population) tout en rendant compte d'observations à l'échelle annuelle.

CURY (1994) nuance toutefois cette approche. Selon lui, il existe peut-être aussi des phénomènes d'imprégnation et de « retour au bercail » avec orientation à grande échelle. LOHMANN *et al.* (1999) ont ainsi démontré que l'imprégnation magnétique chez les jeunes tortues marines était vraisemblablement responsable de leur faculté, une fois devenues adultes, à retrouver leur site de naissance. Les contraintes spatiales semblent en tous cas dominer dans les populations marines. La théorie de l'éternel retour va dans ce sens (structure spatiale importante)



▽ Fig. 99

Échelles des processus spatio-temporels de l'océan (d'après SUND et al., 1981).

mais apporte aussi l'éclairage de l'importance de l'empreinte individuelle. Les stratégies des tortues, thons, sardines et saumons pourraient ainsi être plus semblables qu'estimées auparavant.

À l'échelle des concentrations localisées de grands pélagiques (échelle spatiale de l'ordre de 1 km, échelle temporelle entre un jour et un mois, fig. 99), l'influence de l'environnement a été largement étudiée. SUND et al. (1981) synthétisent déjà les paramètres et structures impliqués dans la présence de thonidés : température, salinité, oxygène, transparence et courants semblent déterminants, de même que l'existence de structures thermiques comme les fronts, les upwellings, les effets d'îles ou les objets flottants autour desquelles des agrégations parfois substantielles des thonidés sont observées. À la suite de cette synthèse, les paramètres étudiés les relations entre ces paramètres et les concentrations d'organismes pélagiques ont été multiples. L'introduction de la télédétection satellitaire en océanographie a notamment permis d'intégrer l'analyse des relations spatiales. LAURS et al. (1984) utilisent les premiers des cartes de température de surface (SST) de la mer pour tenter d'expliquer à l'aide d'interprétations visuelles directes la présence de concentrations de thons (*Thunnus albacares*) dans certaines zones particulières de la côte ouest-américaine. À leur suite, de nombreux auteurs ont proposé des analyses statistiques plus détaillées sur la base de données de pêche spatialisées et de cartes de différents paramètres

océaniques captés par satellite, à partir desquelles les structures océanographiques telles que les fronts thermiques ont été extraites (FEDER et BERNARD, 1987 ; HERRON et al., 1989 ; PODESTA et al., 1990 ; OLSON et al., 1990 ; SWARTZMAN et al., 1990 ; POLOVINA et al., 1990 ; YOUNG et al., 2000) BAKUN (1996) établit ainsi une remarquable synthèse de ces structures océaniques déterminantes dans la dynamique des populations marines. VALIELA (1995) décrit cette hétérogénéité de l'océan et pointe particulièrement la notion d'imbrication des échelles impliquées dans cette succession de structures en « taches » (*patchiness*) qui est le résultat de phénomènes de « cascades de turbulence », où des événements à une échelle donnée peuvent redistribuer les turbulences à des échelles de plus en plus petites ou grandes. Les phénomènes physiques de l'océan sont typiquement influencés par ce type de transfert et il est important alors de comprendre ces transferts. CUSHING (1995) souligne aussi l'importance de l'analyse à méso-échelle car certains phénomènes d'enrichissement planctonique, qui induisent le développement des proies des grands pélagiques, sont très fugaces. Parfois ces *blooms* phytoplanctoniques n'apparaissent pas en signature de surface chlorophyllienne, ce qui peut remettre en question la définition à grandes échelles de régions homogènes océaniques déterminées par l'utilisation de données satellitaires (LONGHURST, 1998) et milite pour une meilleure compréhension des transferts d'échelle.

Le caractère cyclique des grands mouvements océaniques et annuel des populations de grands pélagiques s'explique ainsi bien par la théorie du « retour au bercail guidé par l'environnement ». De même, les indices du caractère déterminant des structures et dynamiques de méso-échelle dans la distribution des populations marines, notamment celles de grands pélagiques, sont nombreux et documentés. La compréhension des mécanismes de perception et traitement de l'information intervenant à l'échelle du poisson individuel, puis ceux intervenant dans la réalisation de structures collectives et à méso-échelle et enfin ceux qui déterminent le transfert jusqu'à l'échelle océanique, est encore assez éparse et nécessite l'emploi de la modélisation de ces processus pour en appréhender les ressorts. La synthèse des processus et la modélisation de ce transfert d'échelle restent des voies de recherche à exploiter.

Le formalisme physique dans les modèles dynamiques spatiaux de populations de grands pélagiques

Il a été difficile d'imaginer représenter l'hétérogénéité de l'océan jusqu'à ce que les techniques de télédétection satellitaire permettent d'en extraire les composantes à l'échelle spatiale d'un océan et avec une régularité temporelle pertinente au regard des dynamiques observées. Les données récoltées par satellite ne permettent que de caractériser les paramètres de la surface de l'océan, ou certains processus animant sa couche superficielle, mais, en les associant aux bases de données historiques océanographiques qui rassemblent des observations plus ponctuelles mais plus complètes (particulièrement dans la dimension verticale), elles permettent de concevoir des modèles plus pertinents.

Les aspects théoriques les plus exhaustifs de la modélisation des dynamiques spatiales de populations de poissons dans leur environnement océanique sont présentés dans le travail de MAURY (1998), qui les a appliqués à la population de thons albacore *Thunnus albacares* en Atlantique. L'ensemble des considérations les plus adaptées à l'analyse de la dynamique de l'exploitation halieutique d'une population (objectif du produit), dans un formalisme dit d'advection-diffusion-réaction. Les deux premiers termes désignent les déplacements de la population de poissons, ceux-ci étant contraints par un paysage océanique continu et fonctionnel, défini en tout point de l'espace par un indice d'affinité biotique ou *fitness* (ou encore favorabilité). La plate-forme informatique développée à cet effet est un outil de simulation puissant, associant les fonctionnalités SIG à la simulation de processus décrits par la résolution de systèmes d'équations différentielles. Au cours du temps, la population modélisée suit alors le déplacement des isoplèthes d'affinité biotique maximale, avec une inertie (terme de réaction du modèle) prenant en compte les phénomènes démographiques intrinsèques à la population et à son exploitation par la pêche. La population ainsi modélisée dans un paysage océanique entièrement connecté, « en bassin », se comporte comme un liquide qui se répand dans une cuvette au fond bosselé, dont l'inclinaison varie avec les saisons : les zones favorables sont représentées par des « vallées » où le liquide se concentre, les zones défavorables par des « pics » d'où il s'échappe. L'indice d'affinité biotique est défini à partir de l'analyse par GAM (*General Additive Model*) des relations statistiques entre des données d'abondance (CPUE) et d'environnement géoréférencées, en écartant les effets dus à la variabilité de la capturabilité (DE ROSA, 1997). La démarche de simulation est donc fondée ici sur une approche phénoménologique et un formalisme mathématique forts.

L'échelle d'analyse est la considération primordiale. Les processus physiques, écologiques et biologiques étudiés ne sont pas tous observables aux mêmes échelles, et il est fondamental de décrire les composantes du système étudié (ressource/environnement) à des résolutions comparables. MAURY (1998) décrit les dynamiques de la population de *Thunnus albacares* à partir de deux sources de données de captures, agrégées à l'échelle de $1^\circ \times 1^\circ \times 15$ jours (captures des senneurs) et $5^\circ \times 5^\circ \times 30$ jours (captures des palangriers japonais). Cela lui permet d'envisager des phénomènes locaux influençant les concentrations de poissons au niveau le plus fin. Alors que les phénomènes « encore plus locaux » influençant les dynamiques individuelles ou celle des bancs de poissons par rapport aux courants, aux fronts, aux tourbillons, aux zones de convergence et aux structures biotiques et abiotiques décrivant la « peau de panthère » de l'océan tropical) ne peuvent être abordés.

Cette question d'échelle a des répercussions à d'autres niveaux. Le formalisme continu de la description de l'habitat environnemental des thons est intimement lié à l'échelle d'analyse, un habitat microscopiquement discret pouvant être considéré comme continu à une échelle macroscopique. Écarter la composante structurelle discrète d'un paysage et ses conséquences fonctionnelles ne se justifie pas forcément à des résolutions spatiales plus fines.

L'homogénéité des comportements individuels est aussi posée comme hypothèse sous-jacente au modèle de bassin : elle implique que la prise en compte de phénomènes marginaux dans la stratégie individuelle de déplacement des animaux notamment et de leurs conséquences au niveau supérieur (bancs, concentrations de poissons, sous-populations), n'est pas envisagée.

Cette approche « continue » « à formalisme physique » est très souvent pratiquée par les océanographes physiciens et biologistes dans la représentation des phénomènes d'enrichissement planctonique à l'échelle océanique. Ainsi, le modèle de circulation générale de l'océan Pacifique du Lodyc¹ a servi de cadre à la modélisation du développement phytoplanctonique, puis zooplanctonique et enfin des organismes intermédiaires proies des grands pélagiques dans l'étude de LEHODEY *et al.* (1998). Ce modèle a une résolution assez fine, puisque la résolution spatiale est de l'ordre de $1/3^\circ$ en latitude et longitude, qui correspond à un intermédiaire entre la méso-échelle et l'échelle globale. Les auteurs ont ensuite appliqué la même approche que MAURY (1998) en simulant les déplacements de bonites (*Katsuwonus pelamis*) par advection-diffusion en deux dimensions. Ainsi, ils s'affranchissent de la définition d'un indice d'affinité biotique en modélisant explicitement la dynamique des proies des bonites que celles-ci recherchent continuellement. Leurs résultats ont mis en évidence la pertinence des hypothèses de développement du plancton, des proies et l'effet d'entraînement sur les bonites, puisque les CPUE réelles observées correspondaient aux sorties des simulations. Cette approche semble être la plus robuste et la plus séduisante que l'on puisse mettre en œuvre pour modéliser les déplacements de grands pélagiques à l'échelle océanique, mais elle nécessite de disposer d'un très bon modèle de circulation générale, ce qui n'est pas encore le cas dans tous les océans. De plus, la pertinence des couplages entre la dynamique physique et la dynamique biologique est discutée, notamment du fait des échelles qui ne sont pas aisées à ajuster.

À l'échelle appropriée, il apparaît que les déplacements des poissons peuvent être modélisés de manière tout à fait réaliste par une représentation continue du paysage océanique et l'application de phénomènes adaptés de lois physiques sur la population étudiée. La question principale soulevée par ce type de modèles spatiaux reste toutefois celle de la définition de « l'adéquation » (*fitness* en anglais) du milieu et de la manière dont le poisson la perçoit. Tous ces modèles se fondent sur les concepts d'intervalle d'euphorie ou de fenêtre environnementale optimale, mais leur caractérisation et la définition de l'affinité biotique ne sont pas évidentes. Attribuer un rôle fonctionnel au paysage océanique tel qu'il nous apparaît au regard des statistiques de pêche exige de disposer de telles données en quantité significative. Dans le cas de modèles théoriques, la définition de la fonction de *fitness* est arbitraire et sa caractérisation n'apparaît pas dans les objectifs. Dans le cas de LEHODEY *et al.* (1998), la population de grands pélagiques suit les proies que les auteurs ont explicitement modélisées à partir d'hypothèses sur le développement biologique, ce qui est déjà plus robuste.

1. Laboratoire d'océanographie dynamique et de climatologie.

Calquer les déplacements des poissons sur la dynamique spatio-temporelle de cette fonction de *fitness* implique une perception et une évaluation immédiate de la qualité de son milieu par le poisson (distribution des ressources ou satisfaction de contraintes physiologiques) et une adaptation de son comportement en fonction de cette perception. Le concept de « marche au hasard » (*kinesis*) avec ajustement à un gradient « d'adéquation » du milieu, qui est la base du modèle de bassin, implique une perception purement « réactive » et locale du poisson de son milieu, sans erreur. Les mouvements des poissons sont considérés comme ceux de molécules de gaz soumises à un champ de potentiel variable.

Comment considérer alors le concept de « migration » que CURY (1994) considère comme étant susceptible de concerner toutes les populations marines ? Il implique une indépendance locale vis-à-vis des conditions du milieu, permettant aux animaux de traverser d'éventuelles zones inhospitalières pour en atteindre des plus favorables (MAURY, 1998). La notion même de migration implique des mécanismes d'orientation, de prise de décision et de réponses non linéaires face aux conditions du milieu. Les modèles à formalisme physique ne prennent pas en compte ces effets.

À l'échelle de l'individu, considérer que le poisson recherche un habitat favorable à tout instant implique un comportement toujours « parfait », sauf si le milieu lui est défavorable, auquel cas il n'y est même plus adapté. On peut se demander si les poissons sont « guidés » instantanément par « l'adéquation » du milieu, s'ils la détectent localement, ou bien si des processus d'orientation et de décision entre des possibilités de déplacements différentes et des réactions moins systématiques (séquences comportementales variables) sont engagés.

Les modèles individus-centrés proposent un formalisme plus proche du terrain des écologues et ouvrent le champ des hypothèses de comportement

Parce qu'ils considèrent explicitement la diversité phénotypique des individus et de leurs comportements, les modèles individus-centrés (IBM en anglais, pour *Individual Based Models*) constituent une alternative au manque de réalisme des modèles en écologie. Ils rendent plus aisée l'application directe des connaissances de terrain des écologues dans la définition des paramètres du modèle (COQUILLARD et HLL, 1997). Dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle des populations, ces modèles n'appliquent pas que des références « moyennes » aux caractéristiques des populations étudiées et permettent la prise en compte de la « localité » des phénomènes du point de vue de l'espace ou des processus. La situation géographique particulière d'un individu par rapport à ses congénères est en effet susceptible d'affecter leurs relations réciproques et le déroulement des processus collectifs, que l'on ne peut étudier si l'on ne considère que des phénomènes globalement simultanés dans l'espace et le temps. Dans le domaine halieutique, l'utilisation de modèles individus-centrés est de plus en plus répandue, la notion même de stock en tant qu'unité de gestion étant intimement liée aux mécanismes de répartition dynamique des

individus dans l'espace et de leur probabilité de rencontre (co-occurrence spatio-temporelle) en période de reproduction (SINCLAIR, 197

Ce sont les avancées de la technologie informatique, en particulier la programmation dite « *orientée-objet* » qui ont permis les développements conceptuels (MOREAU, 1995). L'établissement de tels modèles s'effectue en général au sein d'environnements informatiques spécialement dédiés, de type laboratoires virtuels ou plate-forme de monde synthétique (TUTORIAL MOBIDYC, 1998 ; BOUSQUET, 1994 ; DAGORN, 1994). La démarche réductionniste classique consistant à étudier les propriétés d'un système à partir de celles de ses composantes « *individuelles* » et des relations qu'elles entretiennent entre elles (approche systémique) dispose ici de véritables outils d'expérimentation virtuelle en écologie des populations. L'étude de la variabilité de la distribution spatio-temporelle d'une population de poissons en fonction des variations individuelles de ses individus ou groupes d'individus est récente. L'approche s'appuie sur une démarche constructiviste dite ascendante ou *bottom-up* consistant à simuler des phénomènes à partir d'hypothèses locales (au sens des individus) et à étudier l'émergence d'organisation aux niveaux supérieurs. L'environnement est généralement représenté explicitement dans sa composante géographique, les phénomènes et entités sont géoréférencés. La description d'individus localisés (ou « *situés* » dans un environnement géographique) dans un modèle individus-centré implique de disposer de la représentation d'un espace topologique structuré, permettant de rendre compte des relations spatiales telles que la distance entre entités, l'orientation et la vitesse des déplacements, les surfaces couvertes. Une grille en deux dimensions, composée de cellules connectées entre elles par des relations de voisinage est le formalisme le plus courant. Une image informatique peut ainsi être considérée comme un type d'environnement constitué d'une grille régulière de cellules atomiques, les pixels. La forme des cellules (carré ou hexagone régulier) détermine le nombre de cellules voisines selon la relation de voisinage définie (cellules adjacentes par un côté ou un sommet). La notion de distance cartésienne entre les cellules permet d'intégrer une topologie spatiale à l'environnement. Chaque cellule représente une aire unitaire de l'espace, caractérisée par des coordonnées *x* et *y* dans l'espace topologique. Chaque cellule peut ensuite être renseignée par divers paramètres environnementaux, la présence d'entités écologiques tels que les proies et (ou) prédateurs ou un indice de qualité du milieu (indice de *fitness*, quantité de ressources, valeur d'un paramètre physique).

Les modèles individus-centrés servent toutefois essentiellement à la simulation exploratoire du « *possible* ». Pour bien cerner la portée des résultats issus de ces modèles (robustesse du modèle), le principe de parcimonie est appliqué afin de limiter les interprétations à un nombre défini de phénomènes. Ces résultats restent en général très théoriques et difficilement généralisables. Comme le souligne LOMNICKI (1999), il est ainsi encore difficile d'établir une théorie unifiée des modèles individus-centrés.

Dans le domaine océanique comme en écologie terrestre, les premières études par simulations au sein de modèles individus-centrés ont été menées avec une représentation théorique (et souvent simulée elle-même) de l'environnement

naturel. Des hypothèses sur la distribution des ressources et des limites des biotopes sont posées et différentes configurations de l'environnement sont explorées. Les objectifs des simulations sont de comprendre les effets des comportements explorés des individus dans ces différentes configurations puis de discuter l'émergence d'organisations de la population globale dans ces conditions. Inversement, l'analyse de comportements différents au sein d'environnements identiques est menée. Les modèles sont encore peu répandus, dans lesquels une représentation réaliste de la dynamique réelle de l'océan constitue l'environnement dans lequel évoluent les individus modélisés.

DAGORN (1994) développe ainsi un outil de simulation des déplacements des thons dans l'océan tropical (modèle Ecothon). Cet outil lui permet de discuter de la distribution des poissons en fonction de considérations physiologiques sur les individus (dépenses énergétiques vs bénéfices alimentaires) et de la distribution de taches de nourriture dans un environnement artificiel. Il vérifie ainsi la théorie de la distribution libre idéale selon les caractéristiques de sa population et la richesse du milieu. Cette théorie est d'ailleurs à la base des modèles spatiaux « en bassin », qui impliquent l'exploitation optimale des richesses du milieu par les poissons. L'échelle est alors la méso-échelle mais la représentation des ressources est simulée et ne représente pas une configuration observée.

LE PAGE (1996) propose aussi un environnement multi-agents (Sealab) dédié à l'étude des stratégies de reproduction des poissons par simulations individus-centrées. Il simule l'hétérogénéité de l'environnement en assignant des valeurs de *fitness* (le succès reproductif) différentes aux cellules de l'environnement : on peut alors décrire la composition du milieu (nombre de cellules pour chaque valeur de *fitness*) et sa configuration (assemblage ou dissémination de ces cellules). La résolution de ces cellules est assimilée à celle des zones homogènes de l'océan de par leur intérêt reproductif et n'est pas un facteur limitant de l'analyse. LE PAGE (1996) compare alors les stratégies de reproduction des poissons et leurs influences sur les dynamiques de populations. Les individus mettent en œuvre des comportements de recherche « obstinée » des cellules d'où ils sont originaires ou ils choisissent de manière « opportuniste » une cellule dans laquelle les conditions ayant prévalu au moment de leur naissance sont présentes. Ce modèle aborde ainsi de manière théorique mais explicite les répercussions de la théorie des « membres/vagabonds » de SINCLAIR (1977).

ANNEVILLE *et al.* (1998) étudient les effets locaux de densité-dépendance sur la variabilité du recrutement à différentes échelles. Ils mettent en évidence que des stratégies d'agrégaions et de déplacements différents aboutissent à une répartition des individus qui ne permet pas de détecter d'effet de densité-dépendance à toutes les échelles. Les contraintes de densité-dépendance qui s'exercent au niveau local ne sont pas forcément détectables au niveau global. Les résultats montrent que l'étude d'un système passe en premier lieu par une bonne définition de l'échelle spatiale d'étude, sans mettre en relation les phénomènes avec des échelles océaniques absolues.

SHIN (2000) aborde la modélisation des interactions trophiques multispécifiques dans les écosystèmes marins exploités par l'approche individus-centrée. Le

modèle Osmose très détaillé repose sur l'hypothèse de prédation opportuniste des individus, fondée sur la taille corporelle des individus et sur leur co-occurrence spatio-temporelle, le caractère omnivore et le cannibalisme au sein des communautés ichtyologiques soutenant cette hypothèse. Ce modèle décrit les dynamiques multispécifiques de populations de poissons structurées en taille, pour lesquelles les individus des espèces piscivores sont susceptibles d'être des prédateurs ou des proies selon la taille des autres individus présents au même endroit. Dans ce modèle, l'environnement est constitué de cellules disposées en grille régulière, chacune caractérisée par une valeur de capacité de charge qui quantifie la possibilité du milieu à soutenir une certaine biomasse de poissons. Cette caractérisation de l'environnement est simulée à partir de scénarios de dynamiques différentes (stationnaire, périodique, aléatoire et stationnaire avec occurrence d'une anomalie) qui rendent compte de manière théorique de la dynamique physique du milieu. Dans ce modèle, les individus piscivores (des « super-individus » ou bancs de poissons comme le suggèrent SCHEFFER *et al.*, 1995) se déplacent de cellule en cellule en tâchant à chaque pas de temps de maximiser la co-occurrence d'une biomasse maximale de proies. Là-aussi, l'hypothèse d'une connaissance parfaite de l'environnement proche (cellules adjacentes) et des ressources présente est posée comme préalable aux simulations. Des scénarios de pêche spatialement explicites et variés sont ensuite appliqués à l'ensemble des cellules de l'environnement, chacune se voyant ainsi attribuée une valeur de mortalité par pêche qui affecte les individus présents.

Dans la série des problématiques halieutiques abordées par la modélisation individus-centrée, le processus d'agrégation des poissons pélagiques en bancs ou autour des structures agrégatives (DCP) a été particulièrement étudié (AOKI, 1982 ; HUTH et WISSEL, 1994 ; DAGORN *et al.*, 2000 b). Cette problématique se prête bien à l'approche individu-centrée, puisqu'il s'agit de processus affectant des individus et qui conduisent à la création de structures émergentes collectives à une échelle supérieure. Les apports directs des observations et connaissances des écologues et des résultats d'expérimentations *in vivo* dans les modèles individus-centrés sont particulièrement bien illustrés par les travaux complémentaires de DAGORN *et al.* (2000 a) et DAGORN *et al.* (2000 c). Ces auteurs effectuent des « allers-retours » continus entre la démarche d'observation, la mesure des déplacements réels de thons autour de structures agrégatives et la modélisation des mécanismes sous-jacents. Cette démarche, appelée parfois « écologie comportementale » est féconde et très opérationnelle.

Dans la modélisation des déplacements de poissons à méso-échelle, les questions sur la perception du milieu et des ressources présentes, de l'utilisation des informations environnementales et les facultés d'orientation des poissons constituent le processus le plus local et le « chaînon manquant » de la cascade d'émergences décrite dans les différents processus de déplacements des populations marines. Les études « de terrain » et expérimentales des ichtyologues sur ces processus sont de plus en plus développées, notamment en intégrant les apports de la physiologie (WESTERBERG, 1984 ; FRÉON et MISUND, 1999) et des marquages et suivis individuels (REESE, 1989 ; BLOCK *et al.*, 1992 ; BLOCK *et al.*, 1993 ; BLOCK *et al.*, 1994 ; CAREY, 1995 ; CAREY et ROBISON, 1996 ; CONAND,

19 ; ITANO et HOLLAND, 2000 ; JOSSE et al., 19 ; DAGORN et al., 2000 a ; TAKAHASHI MD et al., 2001). Les réflexions plus théoriques sur ces processus (DE ANGELIS et YEH, 1984 ; BENHAMOU et BOVET, 1989 ; BENHAMOU et BOVET, 1992) ont permis d'établir une typologie des mécanismes élémentaires du mouvement des poissons à l'échelle individuelle. Ces mécanismes sont toutefois généralement considérés en décrivant le milieu sous son aspect « fonctionnel » (*fitness*, quantités de ressources) ou sous celui de contraintes physiologiques (comme la présence de températures létales pour les poissons) et rarement appliqués aux paramètres réellement observables de l'environnement et perçus plus ou moins directement par le poisson dans une configuration réelle. L'application de ces connaissances et de cette typologie à des individus modélisés au sein d'un modèle individus-centré est une perspective intéressante pour faire « sauter le verrou » du transfert d'échelle de l'individu à la méso-échelle.

Une représentation de la configuration réelle de l'environnement océanique à partir de mesures réelles des paramètres physiques et biologiques de sa couche de surface (le « paysage océanique ») au sein d'un modèle individus-centré est proposée par Dagorn.

Le modèle Grathon de DAGORN (1994) se propose de modéliser la recherche de gradients de températures de surface de la mer pour des bancs de thons artificiels. Le problème de la définition d'un « bon front thermique » est ici éludé en modélisant des bancs de thons qui maximisent les différences de température, dans les limites spatiales que leur permet leur capacité de déplacement. Chaque banc explore son environnement dans un rayon de 60 milles : il calcule alors la différence (en valeur absolue) entre la température locale du jour précédent et les températures de son environnement. Quand cette différence est supérieure à 0,5 °C, le banc se duplique dans autant de pixel obtenus.

Le modèle Apton du même auteur est basé sur le principe de Grathon, en y adjoignant l'apprentissage de déplacements de thons à partir de cartes quotidiennes de températures de surface de la mer. L'apprentissage est réalisé par un réseau de neurones et une approche par algorithmes génétiques, avec renforcement à intervalles irréguliers, permettant l'accomplissement de « suites de comportements ». À chaque pas de temps, le comportement sélectionné par les individus est « ré-évalué » par le mécanisme de l'apprentissage. Les suites de comportements sont constituées de comportements atomiques ou élémentaires sélectionnés dans une série de cinq comportements inspirés de Grathon : 1) rester sur place sur le même pixel, 2) aller vers les cellules les plus proches respectant la plus grande différence (de température avec la position actuelle) positive, 3) aller vers les cellules les plus éloignées respectant la plus grande différence positive, 4) aller vers les cellules les plus proches respectant la plus grande différence négative et 5) aller vers les cellules les plus éloignées respectant la plus grande différence négative (les cas particuliers étaient traités). Le renforcement des comportements en cours de simulation s'effectuait par une contrainte posée sur la trajectoire des bancs de thons simulés : ceux-ci devaient se rapprocher des zones de pêche connues de la zone explorée (océan Indien occidental dans le canal de Mozambique). Les résultats d'apprentissage définissent ainsi quatre régions équiprobables : le nord/nord-ouest des Seychelles, la côte

orientale de l'Afrique, la côte nord malgache et le canal de Mozambique. Ces zones étant des zones de pêche effectivement actives pour la pêche industrielle européenne, l'idée que l'environnement local peut lui-même déterminer les déplacements des thons et générerait ainsi les déplacements à longue distance est ici sérieusement consolidée. Toutefois, malgré ses avancées méthodologiques et ses résultats prometteurs, ce modèle n'a pas eu de valorisation immédiate. Le fait de ne pas proposer d'explication claire du mécanisme de convergence et des meilleures « suites de comportements » d'un point de vue éthologique peut en effet entraver les interprétations (l'auteur le dit lui-même : « Nous disposons maintenant d'un comportement qui, s'il est difficilement interprétable en terme de règles logiques, permet de retrouver un trajet plausible »). Autre hypothèse forte de ce modèle : l'apprentissage, fondé sur l'idée qu'un banc pêché (sur les positions de captures du nord du canal de Mozambique) pouvait indiquer aussi la position initiale d'un autre banc capturé plus longtemps après en zone Seychelles, par exemple.

Nous verrons plus loin, comment intégrer des données d'environnement réelles dans la description de l'environnement de simulation.

Écologie du paysage, Vie artificielle et Systèmes multi-agents : des domaines nouveaux qui se recoupent autour de la modélisation individus-centrée

Autour de la modélisation individu-centrée et plus généralement des approches informatiques permettant la manipulation d'entités individuelles à des fins heuristiques en écologie, les domaines émergents de l'Écologie du paysage, de la Vie artificielle et des Systèmes multi-agents tiennent une place particulière et se chevauchent souvent. Notre travail se réclame en partie de ces domaines, dans une mesure qui est présentée ci-après.

LES APPORTS DE L'ÉCOLOGIE DU PAYSAGE DANS LE DOMAINE OCÉANIQUE

L'écologie du paysage est une discipline dont les principaux développements ont été appliqués au milieu terrestre. Ses principes sont les liens entre structure du paysage (hétérogénéité de l'environnement) et ses aspects fonctionnels, dans le cadre de l'étude des populations qui les habitent (notion d'habitat), leur dynamique spatiale, les échanges entre zones et ce dans un but de gestion du territoire.

Là où l'écologie classique considère les relations physico-biologiques qui gouvernent les différentes unités spatiales d'un écosystème d'un point de vue « vertical » (étude d'une ou plusieurs espèces au sein d'une unité spatiale homogène), l'écologie du paysage se penche sur les relations « horizontales » entre unités spatiales différentes (FORMAN et GODRON, 1996)

D'après ces auteurs, un écosystème est considéré comme un élément homogène du paysage et on peut définir un paysage comme un bouquet d'écosystèmes, dont on peut caractériser les interactions entre eux. Cette définition peut

le domaine océanique, milieu continu où un écosystème peut atteindre des dimensions bien supérieures à celles du milieu terrestre. Les concepts scientifiques utilisables dans cette perspective d'étude des interactions entre éléments physiques (mais aussi biologiques, notamment du fait des effets majeurs du couvert végétal sur les structures géomorphologiques dans le domaine terrestre) du paysage sont :

- La structure : relations spatiales entre les différents écosystèmes ou éléments présents – plus spécifiquement, la distribution de l'énergie, des éléments et des espèces en relation avec les tailles, formes, nombres, types et configurations des écosystèmes.
- La fonction : les interactions entre les éléments spatiaux, i.e. les flux d'énergie, d'éléments et d'espèces entre les écosystèmes constitutifs.
- Les changements : l'altération de la structure et de la fonction de la mosaïque écologique dans le temps (dynamique).

Cette définition d'un élément constitutif du paysage permet d'aborder une caractérisation plus quantitative des milieux, notamment de permettre la comparaison entre différents paysages (typologie) et d'établir des indices synthétiques pour caractériser la dynamique d'évolution d'un paysage. Le caractère fonctionnel (au sens écologique) d'un élément de paysage est intimement lié à sa structure et « émerge » des relations que les populations entretiennent avec ce milieu.

L'approche de l'écologie du paysage appliquée au domaine océanique peut être extrêmement riche dans la mesure où la description d'éléments homogènes du milieu est disponible. Plusieurs auteurs (CUSHING, 1995 ; MAURY, 1998 ; REEB *et al.*, 1998) illustrent ainsi leurs propos océanographiques ou halieutiques de termes directement issus de l'écologie du paysage (matrice, taches ou *patches*, corridors...). Généralement, cette terminologie est utilisée par les écologues qui désirent appréhender les relations entre une population et son milieu et ils discriminent celui-ci en entités distinctes selon un indice d'utilisation du milieu (ou « d'adéquation », de *fitness* ou « d'affinité biotique »), qui revient en fait à de l'écologie classique spatialisée. Ainsi la « matrice » de l'océan tropical oligotrophe présente des concentrations de biomasse (*patches*) plus riches (au sens de ressources disponibles à la population de prédateurs étudiés) où des « corridors » génétiques sont observés entre différentes parties d'un océan. Pourtant, l'étude des relations entre éléments du paysage, dans l'acceptation qu'il en est fait par FORMAN et GODRON (1986), en considérant leurs structurations, puis leurs fonctionnalités réciproques éventuellement synergiques (et non *a priori* en leur attribuant une « qualité ») et leurs dynamiques, mériterait d'être abordée. La compréhension des phénomènes d'enrichissement pris dans leur complexité (et notamment en considérant explicitement les processus liés aux transferts d'échelles) y gagnerait vraisemblablement en pouvoir d'explication. Cette voie est toutefois encore extrêmement nouvelle.

Nous inscrivons notre travail dans cette perspective, en proposant de considérer l'océan tropical comme un paysage fondamentalement structuré, comme l'ont présenté PETIT *et al.* (1994) et dans lequel le caractère fonctionnel des éléments n'est pas posé comme une hypothèse d'étude, mais comme la source

d'information (au sens de la variabilité, spatiale et temporelle) qui « organise » les phénomènes. L'existence de structures océaniques au sein d'un milieu généralement considéré comme homogène n'est plus discutée. La description de ces caractéristiques spatiales et temporelles avec la possibilité de les faire fait l'objet d'une abondante littérature exposée dans les précédents chapitres de cette étude. La volonté de ne pas caractériser *a priori* la fonctionnalité de cette information environnementale à résolution fine issue de la télédétection satellitaire est ici une des volontés affichées de notre étude. C'est le travail des simulations qui doit permettre de faire « émerger » ces relations fonctionnelles, observées *a posteriori* et discutées comme telles.

Le travail de l'analyse des relations structurelles et fonctionnelles entre entités océaniques homogènes telles que décrites objectivement par les paramètres de l'environnement (vortex de vorticité, champs de chlorophylle et de température, fronts thermiques, hauts-fonds, îles, pentes et canyons sous-marins, courants, « bosses » et « creux » de la surface de la mer, etc.) dépasse le cadre de cette étude mais est à entreprendre dans les actions de recherche qui suivront.

La difficulté r s de souvent dans la définition d'indices pertinents et généralisés pour caractériser les éléments du paysage afin de pouvoir disposer d'éléments objectifs de comparaison de configurations environnementales différentes de ce paysage ou de sa dynamique. TURNER et GARDNER (1991), à la suite de FORMAN et GODRON (1986) et des auteurs pour qui l'écologie du paysage tient véritablement une place à part entière dans les études écologiques, proposent des voies d'analyse quantitative des paysages et de leurs dynamiques. Dans un premier temps, les statistiques spatiales et indices de configuration (indice d'hétérogénéité au sens de la théorie de l'information selon Shannon, indice de *patchiness*, de formes :  longation, compacité, porosité, etc.) peuvent être des aides à l'analyse descriptive. La détermination des échelles spatiales pertinentes des structures observées est un point particulièrement essentiel (TURNER *et al.*, 1991). Pour la compréhension des relations complexes entre éléments, il est nécessaire de recourir à des approches plus élaborées telles que les reconnaissances de formes, la modélisation dynamique des flux, les fractales, etc. qui ne sont pas encore au stade de l'opérationnel.

Dans tous les cas, les auteurs insistent sur l'importance des effets de seuil, des configurations spatio-temporelles et des changements qualitatifs dans ces analyses. Seulement quelques variables peuvent être adaptées pour décrire les paysages, à différentes échelles mais la question est de bien pouvoir les définir et les appréhender.

LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS, UNE TECHNOLOGIE INFORMATIQUE DISTRIBUÉE AU SERVICE DE LA MODÉLISATION INDIVIDUS-CENTRÉE

Les systèmes multi-agents (SMA) désignent un type de technologie informatique et des applications particulières héritées de la discipline à la croisée de l'informatique, de l'éthologie et des sciences cognitives appelées Intelligence artificielle distribuée (IAD). L'IAD est basée sur la conception d'agents artificiels capables de s'organiser pour accomplir collectivement les fonctionnalités qui leur sont demandées. Cette notion « d'organisation collective » a pu être abordée par

certaines travaux de modélisation individus-centrée, mais c'est véritablement le but des SMA que de rompre avec l'image du « penseur artificiel solitaire » en mettant à mal l'idée de « société de penseurs » comme support paradigmatique d'une société d'agents artificiels : presque tout peut être considéré comme un processus de fonctionnement collectif (DROGOUL, 2000). Ainsi, les SMA et l'IAD vont concevoir des « agents » (individus informatiques) en mettant l'accent sur leurs formes de communication, de coopération, de coordination et de négociation.

FERBER (1997) définit un système multi-agents comme un système composé des éléments suivants :

- un environnement E ;
- une série O d'objets ;
- une série A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), dotés de capacités de perception et de connaissance ;
- une série de relations R , qui lient les objets (et agents) entre eux ;
- une série de processus P , qui permettent aux agents de percevoir, créer, détruire et manipuler des objets de O .

Selon cette définition, Feber isole deux types d'environnements : les environnements non géoréférencés, quand l'étude des processus n'implique pas que les simulations soient situées dans l'espace et les systèmes géoréférencés, qui nous intéressent ici.

Les SMA proposent une architecture informatique élaborée, permettant de simuler des phénomènes distribués, notamment à différents niveaux hiérarchiques. En ce sens ils constituent un domaine à part de l'informatique. MILLISCHER (2000) note justement que les SMA se situent à un niveau supérieur aux modèles individus-centrés : un SMA est un modèle individus-centré lorsque les « agents » qui le constituent sont explicites (au sens d'individus écologiques par exemple) et situés (c'est-à-dire qui évoluent dans un environnement topologique avec lequel ils interagissent). Mais un modèle individus-centré n'a pas nécessairement besoin d'être conçu selon une architecture multi-agents.

Dans les SMA, les agents peuvent être purement communicatifs ou être « situés », c'est-à-dire plongés dans un environnement qui est différent de la somme seule de leurs congénères. On distingue aussi les agents « réactifs » (qui font montre de comportements relativement simples et mécaniques de type « stimulus/réaction ») des agents « cognitifs » même si un continuum existe entre ces deux définitions. DROGOUL (2000) souligne l'importance des SMA dans la résolution de problèmes complexes, pour lesquels la coopération d'agents simples, mais en étroite relation avec leur environnement est cruciale dans la résolution finale.

En halieutique, MILLISCHER (2000) a développé un modèle de simulation multi-agents pour étudier les conséquences des choix stratégiques des pêcheurs dans la dynamique de répartition spatio-temporelle de l'effort de pêche. L'architecture qu'il propose est explicitement développée sur le modèle d'un SMA, en ce sens que chaque entité individuelle « navire » a toutes les caractéristiques d'un agent au sens informatique. Il est doté de capacité de perception

de son milieu et d'action sur celui-ci, de communication avec ses congénères et de propriétés évolutives. Les « effets de meute » et de stratégies collectives émergeant des décisions individuelles des pêcheurs sont ainsi extrêmement bien rendus dans ce type de modélisation.

LA VIE ARTIFICIELLE EST-ELLE JUSTE LA SIMULATION IN SILICO DU VIVANT ?

Les techniques de modélisation individus-centrée appliquées à la simulation de phénomènes naturels « tels qu'ils pourraient être », constituent un pan méthodologique majoritaire de la discipline appelée Vie artificielle (HEUDIN, 1994). Son objectif est l'abstraction des principes fondamentaux du vivant et l'expérimentation sur des supports nouveaux de ces principes simples pour en étudier la complexité émergente (structure hiérarchisée des systèmes complexes). Les automates cellulaires constituent les premiers supports destinés à l'application de ces principes. Mais cette définition pourrait aussi très bien s'appliquer aux SMA, ce qui montre le continuum qui existe entre ces domaines considérés séparément. La différence fondamentale entre les modèles individus-centrés *sensus lato* et les modèles de vie artificielle réside dans le fait que cette discipline ne se limite pas à la modélisation de phénomènes naturels, mais plutôt des principes issus du vivant, éventuellement et paradoxalement appliqués à des domaines non naturels pour la résolution de problèmes complexes pour lesquels les principes du vivant peuvent apporter des solutions nouvelles (« éco-résolution » ; DROGOUL, 1999). DROGOUL (2000) propose le terme d'« éthologie synthétique », qui peut très bien convenir à cette approche « d'aller-retour » entre les observations éthologiques et la modélisation informatique.

La vie artificielle a développé sa terminologie propre mais ce sont souvent les mêmes concepts que ceux de l'IAD, des SMA et de la modélisation individus-centrée : les « animats » (MEYER, 1990) sont des animaux artificiels simulés, l'émergence de formes d'organisations des processus à des échelles supérieures est appelée ainsi « auto-organisation ». Ainsi, SORIA (1994) pose la question de l'auto-organisation de la constitution des bancs de petits poissons pélagiques. GAUTHIEZ (1997) souligne toutefois un risque de l'approche, qui est le caractère parfois tautologique des modèles de vie artificielle : les comportements émergeant des groupes sont souvent à peu près contenus dans les hypothèses et il est important de considérer cet aspect dans les interprétations qui peuvent être faites des résultats.

Notre approche : résolument synthétique

Les modèles individus-centrés appliqués à la compréhension des comportements individuels et des dynamiques de populations de poissons proposent des approches diversifiées mais reposent systématiquement sur une caractérisation *a priori* de la qualité fonctionnelle du milieu.

À la suite de DAGORN (2000 a), nous proposons ici une approche alternative qui consiste à considérer que le poisson perçoit certains éléments de son environnement et que cette perception lui permet de s'adapter, sans pour autant qu'ils le mènent directement vers le milieu le plus favorable. Dans le domaine pélagique, la « théorie cohérente du comportement » proposée par PETIT (1991) constitue une voie originale et adaptée pour développer cette démarche. D'un point de vue trophique, les aires d'enrichissement de l'océan tropical sont statistiquement associées aux zones de discontinuité, comme les fronts thermiques, signatures de processus physiques initiateurs de l'apport d'éléments nutritifs à la base de la production primaire, puis du reste de la chaîne alimentaire dans l'océan globalement oligotrophe (STRETTA, 1999). En dehors peut-être de périodes particulières comme la reproduction, cette motivation trophique anime les poissons continuellement, du fait de leurs besoins énergétiques élevés. Les zones de discontinuité constituant des anomalies dans le paysage monotone de l'océan, les poissons pélagiques auraient alors adapté leur comportement à la recherche de ces anomalies dans le milieu, au cours de leur longue co-évolution avec l'environnement. À l'échelle journalière et dans l'optique de son application aux déterminismes des déplacements d'individus, cette « théorie cohérente » est robuste. Le transfert d'échelle vers des niveaux plus élevés peut alors laisser apparaître d'un point de vue phénoménologique que les poissons suivent un « gradient d'adéquation », à la dynamique saisonnière.

Notre objectif est d'adopter une démarche « constructiviste » (i.e. réductionniste et ascendante) consistant à représenter l'environnement dans sa complexité structurelle brute et d'étudier la manière dont son caractère fonctionnel émerge à partir du comportement du poisson interagissant avec cet environnement, dans le cadre de la théorie cohérente du comportement.

La description des principes de développement et de l'architecture informatique du simulateur MUFINS (*MU*lti-*F*ish *IND*ian ocean *S*imulator) précise les éléments particuliers de cette approche.

Un applicatif de modélisation individus-centrée fondé sur une architecture de type multi-agents (MUFINS)

JEAN-CHRISTOPHE SOULIÉ,
DAVID GUYOMARD, MARTIN DESRUISSEAUX,
JEAN-MICHEL STRETTA, MICHEL PETIT



© D. Guyomard

À la suite des démarches statistiques exploratoires, qui ont permis de dégager notamment les principales relations pouvant exister entre les paramètres de l'environnement océanique et les résultats des pêches, une approche de modélisation des comportements des grands pélagiques dans le paysage océanique tropical du sud-ouest de l'océan Indien est proposée.

Deux domaines nous ont semblé particulièrement porteurs de concepts et de méthodes originales : l'écologie du paysage et la modélisation multi-agents. Nous en présentons ici les aspects les plus pertinents au regard de notre problématique.

Le modèle MUFINS (*MultiFish Indian ocean Simulator*)

Les avancées permises par la modélisation individus-centrée et les SMA sont d'évidence à leurs prémices. Les techniques de ce type de modèle sont exposées plus haut. Il serait particulièrement intéressant d'intégrer plus systématiquement des données d'environnement réelles dans la description de l'environnement de simulation et de pouvoir considérer cet environnement dans sa composante

structurale fine et sa dynamique. L'intégration de multiples couches d'informations (le modèle de DAGORN, 1994, ne proposait que la température de surface de la mer comme variable descriptive du milieu) au sein d'une architecture de simulation individus-centrée est aussi souhaitable. Il s'agirait alors de simuler des dynamiques comportementales individus-centrées au sein d'un système d'information géographique (SIG) dynamique.

Capturabilité palangrière

L'étude des déplacements individuels de l'espadon dans le contexte environnemental fourni par les cartes satellitaires est le premier objectif de ce travail. Il se situe ainsi dans le domaine de l'« éthologie synthétique » (DROGOUL, 2000) afin d'apporter des éléments de compréhension de la dynamique de la population de poissons étudiée. Il propose une contribution à la compréhension des mécanismes intervenant dans la réalisation de structures collectives à méso-échelle (au sens de la distribution spatiale de la ressource) à partir du traitement de l'information intervenant à l'échelle du poisson individuel. Les effets qui déterminent le transfert jusqu'à l'échelle océanique (celle de la population globale d'espadons) ne seront que peu abordés ici.

L'objectif d'une recherche halieutique est avant tout de proposer des éléments d'analyse et de suivi de l'activité de pêche, dans une optique de gestion durable de la ressource. À l'issue de la 1^{re} partie, il apparaît qu'à méso-échelle, la problématique de la capturabilité différentielle de l'espadon par la palangre de surface constitue un point important de la définition d'indices d'abondance pertinents.

C'est pourquoi nous proposons d'introduire explicitement le processus de capture dans le modèle d'écologie synthétique. Aux agents « animats » qui constitueront la population d'espadons simulés au sein du paysage environnemental, s'adjoindront donc des agents « lignes de pêche », situés et dotés d'un comportement propre. Les positions de ces lignes de pêche seront les positions réelles des lignes de pêche de la pêcherie palangrière réunionnaise des années 1998 à 2000, qui seront insérées dans le modèle en cours de simulation, aux dates correspondantes.

Ces agents « lignes de pêche » sont alors dotés de la capacité de percevoir les agents « animats espadon » dans l'espace topologique du modèle, puis de mettre en œuvre un comportement de « capture virtuelle » de ces animats. Il s'agit ainsi d'explicitement modéliser le processus d'accessibilité du poisson par la palangre, la composante liée aux interactions avec l'engin de pêche (vulnérabilité) étant considérée comme constante dans le modèle (du fait de l'homogénéité des pratiques de pêche). Les aspects liés à la correspondance entre l'habitat vertical de l'espadon seront pris en compte, et seront intégrés à cette composante d'accessibilité.

Ainsi, les captures virtuelles constitueront une forme de validation des déplacements individuels des animats, en les comparant avec les captures réelles de la pêcherie. L'utilisation des captures comme validation des comportements

des animats est toutefois soumise à plusieurs contraintes : la composante de vulnérabilité n'est pas considérée (les effets d'interaction avec l'engin de pêche constituent une part substantielle de la capturabilité ; Bach, *comm. pers.*) et l'effort de pêche n'étant pas distribué de manière aléatoire et homogène sur toute la zone exploitée, il ne permettra pas de mettre en évidence les phénomènes sur toute cette zone. En l'absence de données directes de déplacement des espadons dans la zone (marquage, acoustique et marque-archive), les captures restent les seuls indicateurs indirects de la présence d'espadons.

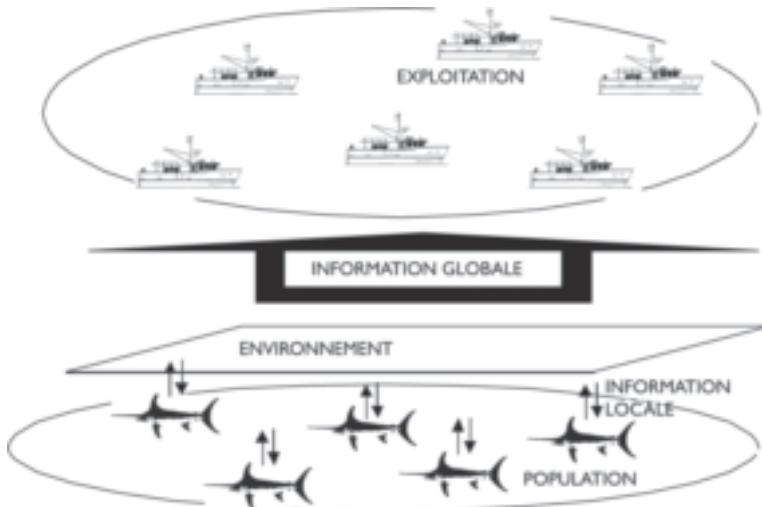
Caractéristiques générales du modèle

Le modèle proposé repose donc sur quatre postulats fondamentaux :

- l'information environnementale est perçue de manière directe par les poissons ;
- c'est cette information structurelle qui détermine leurs déplacements dans le milieu, à méso-échelle, sous contraintes trophiques et reproductives ;
- la fonctionnalité de l'environnement (telle que perçue par les pêcheurs) « émerge » de l'ensemble de ces comportements individuels ;
- la pêche apporte les éléments de validation et la connaissance globale de l'environnement permet de caractériser le paysage environnemental d'un point de vue fonctionnel (stratification spatiale de l'environnement).

On peut résumer cette approche par le modèle d'information présenté à la figure 100.

Modéliser un poisson « de l'intérieur » pourrait apporter des réponses originales aux questions posées par la distribution des ressources dans leur environnement.



▽ Fig. 100
Le modèle d'information.

Pour ce faire, nous disposons de connaissances que les biologistes et éthologues ont pu accumuler sur les espèces, susceptibles de fournir des hypothèses pertinentes sur les processus étudiés. C'est ainsi que certains auteurs évoquent l'étude de « l'énaction¹ d'un monde propre » (*Umwelt*) de l'animal (MATURANA et VARELA, 1994 ; THERAULAZ et SPITZ, 1994). Ce monde propre représente l'ensemble des significations que l'individu animal peut attribuer aux formes rencontrées, et auxquelles il peut répondre.

Nous proposons donc un outil de modélisation individus-centrée développé comme une plate-forme de simulation de type multi-agents pour la simulation du comportement de grands pélagiques (ici appliquée à l'espadon) et de l'exploitation halieutique (ici appliquée à la pêche palangrière réunionnaise) au sein d'un environnement multi-paramètres (ici appliquée aux paramètres de l'environnement océanique de surface captés par satellite). Notre approche se situe donc résolument comme une synthèse des éléments de la modélisation individus-centrée (des animats espadons se comportent dans un espace virtuel selon des hypothèses éthologiques et écologiques), de l'écologie du paysage (l'environnement est représenté par différents paramètres dont on cherche à comprendre les relations horizontales à travers le comportement du poisson), des systèmes multi-agents (des agents « espadons » et des agents « lignes de pêche ») et de la vie artificielle (modélisation de phénomènes « vivants » et émergence d'objets océaniques fonctionnellement cohérents à partir d'hypothèses sur le comportement d'agents poissons).

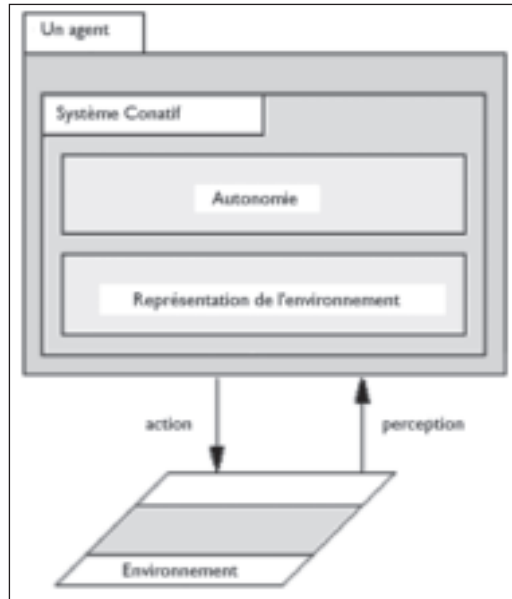
À partir des objectifs et des contraintes de simulation exposées en 2^e partie, un modèle informatique a été conçu et implémenté. La version opérationnelle de ce modèle, MUFINS, s'applique à la simulation de déplacements d'espadons virtuels au sein d'un environnement multi-paramètres décrit par les données satellitaires du sud-ouest de l'océan Indien.

En effet, les aspects de gestion de l'environnement, particulièrement lorsque celui-ci peut-être caractérisé par plusieurs « couches » d'information (à la manière d'un SIG), avaient auparavant été peu abordés dans le domaine de la modélisation multi-agents. La composante dynamique de l'environnement introduit une difficulté supplémentaire à la conception du modèle, qui doit explicitement gérer le déroulement du temps, le renouvellement des cartes et des états des agents, à la manière d'un SIG dynamique (SOULIÉ, 2001 ; SOULIÉ et al., 2001)

Du modèle d'agent...

FERBER (1997) a défini un modèle général pour représenter et gérer les interactions ainsi que les priorités entre les agents et l'environnement (fig. 101). SOULIÉ (2001) s'est attaché à construire un modèle qui, à partir de l'approche proposée par Ferber, permet de gérer des environnements multiples pour un ou plusieurs agents simultanément.

1. Dans le paradigme proposé par l'énaction, l'agent cognitif et le monde qu'il « vit » forment un ensemble cohérent où l'un et l'autre se définissent mutuellement (ROUET, 19)



▽ Fig. 101
Le modèle d'agent de FERBER (1997).

SOULIÉ (2001) souligne la distinction, classiquement établie par les analystes et programmeurs informatiques, entre systèmes multi-agents purement communicants et situés.

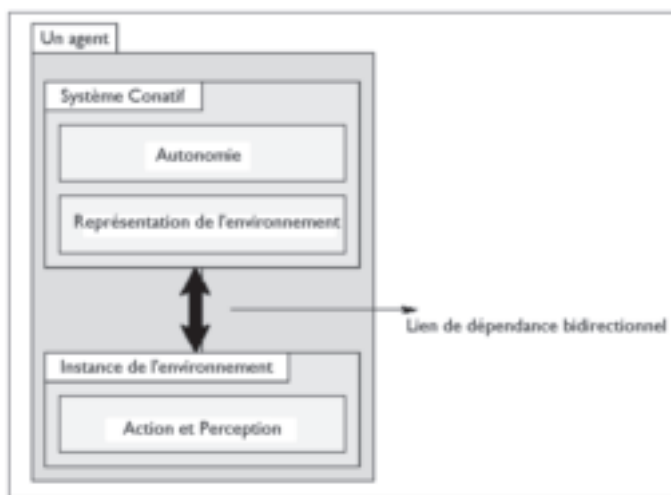
- Lorsque l'environnement est vide et que celui-ci contient des objets, on a un système multi-agents *purement communicant*.
- Lorsque l'environnement est muni d'une métrique ainsi que d'un espace métrique, on a un système multi-agents *situé*.

L'objectif du modèle est justement de permettre de gérer des agents « animats » et des agents « lignes de pêche » qui appartiennent à la fois à un système multi-agents communicant et à la fois à un système multi-agents situé. La présence simultanée d'un réseau d'acointances (entre agents) et d'un environnement réel (ici « multicouches ») nécessite de constituer une architecture qui ait des caractéristiques des deux systèmes.

Pour ce faire, SOULIÉ (2001) a, à partir du schéma du modèle général de FERBER (1997), construit ce nouveau modèle, dit *multi-environnemental*, en plusieurs étapes : séparation des environnements, accès aux données, gestion du temps, maintien de l'intégrité des données et modifications du système conatif lié à l'apport des environnement multiples. Nous tâcherons de mettre en évidence le déroulement de ces étapes au cours des paragraphes suivants qui présentent le modèle et son fonctionnement. Les diagrammes complets des classes de MUFINS et l'organisation des packages sont disponibles en annexe.

... au modèle multi-environnemental

Soulié propose ainsi une définition « élargie » de l'agent de Ferber (fig. 102). L'agent est ici doté d'un *système conatif* et d'une *instance dans l'environnement* chargée de l'action et de la perception. Le système conatif est chargé de la partie raisonnement et de l'autonomie, alors que l'instance dans l'environnement gère tout ce qui a trait à l'environnement uniquement. Entre ces deux entités, le *lien bidirectionnel de dépendance* permet de faire transiter des informations.



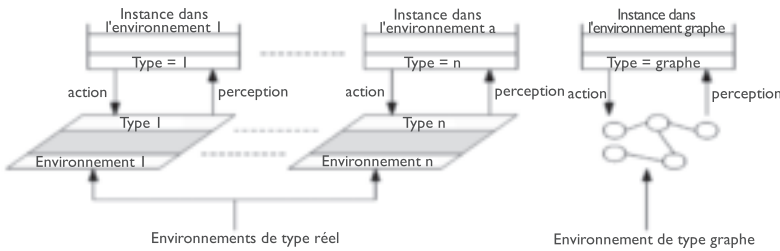
▽ Fig. 102

Un agent avec ses deux parties et son lien de dépendance.

Pour pouvoir agir sur plusieurs couches d'informations environnementales, considérées chacune comme un environnement réel *typé*, il est nécessaire de créer autant d'instances dans l'environnement que de types d'environnements que l'on doit gérer. Le type de l'environnement est constitué d'une simple chaîne de caractères.

Les types d'environnement réels ici correspondent aux différents paramètres océanographiques décrits précédemment, mais aussi aux modifications appliquées à ces paramètres. L'environnement constitué par les positions des animats eux-mêmes, tels que perçus par les agents lignes de pêche, peut être assimilé à un environnement réel typé mais son fonctionnement est bien sûr différent.

Le modèle multi-environnemental générique consiste donc dans un premier temps à créer pour chaque environnement de type t_i une instance dans l'environnement qui va correspondre à ce type t_i . Les principes d'actions et de perceptions sont conservés car tous les capteurs et les effecteurs qui sont contenus dans une instance dans l'environnement de type t_i sont effectivement capables d'agir sur l'environnement t_i . La figure 103 illustre cette première décomposition.



▽ Fig. 103

Le découpage des environnements dans MUFINS.

Afin de pouvoir faire remonter les informations perçues par les instances de l'environnement grâce à leurs capteurs, et, inversement, que le système conatif puisse envoyer des commandes aux instances de l'environnement, il faut créer pour chaque agent autant de liens de dépendances bidirectionnels que d'environnements. Chaque lien bidirectionnel sera ainsi typé, du même type que l'environnement avec lequel il communique. Il pourrait y avoir au moins un lien bidirectionnel pour un environnement réel et un lien bidirectionnel pour un environnement de type graphe, par exemple.

Le diagramme des classes génériques (package `mufins/mas/agent`) illustre la plémentation du simulateur, avec autant de classes que d'éléments spécialisés du modèle d'agent. Un agent créé devra ainsi instancier autant d'éléments que de classes illustrées, et autant que de types d'environnements. Un seul environnement n'est pas typé, il sera présenté ultérieurement dans ce chapitre.

Cette décomposition résulte d'une analogie extrêmement intuitive avec le fonctionnement du système nerveux sensoriel et moteur des vertébrés supérieurs : des cellules spécialisées génèrent, transportent et traitent l'influx nerveux entre les capteurs dédiés dans l'environnement et le cerveau qui traite l'information, qui commande en retour une action sur l'environnement. On peut considérer que chaque classe du modèle correspond à une de ces cellules spécialisées.

De ce diagramme générique, deux packages ont hérité, correspondant aux agents « animats espadons » et agents « lignes de pêche ». Les agents sont spécialisés au sein des classes filles héritées. Ainsi, une instance dans l'environnement d'un animat sera caractérisée par une variable de position point (deux coordonnées, latitude et longitude) tandis qu'une instance d'une ligne de pêche sera positionnée par deux points (positions de début et de fin de filage).

La société des agents rassemble l'ensemble des agents animats et lignes de pêche, et s'occupe de tenir le registre des entrées/sorties des agents du système.

L'accès aux données

Chaque type d'environnement nécessite un accès aux données propres qui le caractérisent. Ici, les données auxquelles ont besoin d'accéder les animats sont

d'abord les images satellitaires, mais les lignes de pêche doivent aussi accéder aux positions des animats pour simuler le processus d'accessibilité. L'architecture générale de MUFINS permet de gérer des données de type graphe, des données provenant d'autres logiciels ou tout simplement des données codées directement dans le simulateur ou calculées et stockées en cours de simulation.

Chaque environnement étant typé, l'accès aux données liées à cet environnement va se faire pour le type de données de cet environnement. Chaque environnement du modèle sera doté d'une *interface d'accès aux données* qui va faire le lien entre les données qui vont être nécessaires pour les agents et les environnements.

Cette interface devra gérer les données stockées dans des bases de données ou des fichiers (et disposer des primitives permettant d'y accéder), et les données calculées en temps réel à chaque pas de simulation. Dans le cas d'un environnement de type réseau d'acointances, l'interface d'accès aux données sera capable de fournir à l'environnement les données liées à l'évolution du graphe à chaque fois que ce sera nécessaire. Ce cas n'a pas été explicitement implémenté dans notre application, mais l'architecture générale le permet.

Dans MUFINS, les données auxquelles accèdent les agents sont donc :

- les données satellitaires typées : SST, SLA, Ekman, Chl-*a*, Bathy, Courants de surface, et produits dérivés (gradients) ;
- les données de position des agents : positions ponctuelles des animats et positions des lignes de pêche.

ACCÈS AUX DONNÉES SATELLITAIRES

Une classe dédiée à la connexion avec la base de données Seas s'occupe de récupérer l'image satellitaire correspondant à la date courante de déroulement de la simulation (classe *SeasConnectivity*, héritée de *DataBaseConnectivity*). C'est cette classe qui ouvre la connexion JDBC avec la base Seas et exécute les requêtes appropriées. Le type de l'image peut être soit le nom du paramètre simplifié (SST, SLA, Chl-*a*, Ekman, CGU, CGV, Bathy), soit un nom de paramètre modifié par les fonctions présentées en 2^e partie. Dans ce cas, l'image renvoyée est différente : soit un filtre convolution lui est appliqué (pour obtenir les valeurs de gradients selon l'opérateur de Sobel), soit l'image renvoyée correspond à la date antérieure ou postérieure précisée dans le type.

Différentes méthodes donnent accès aux valeurs des paramètres au sein des images. Chaque animat récupère systématiquement la valeur du paramètre de chaque environnement à sa position géographique courante dans le pixel correspondant à cette position. Mais le système conatif de l'agent dispose de méthodes plus élaborées (et plus performantes en termes de vitesse d'exécution) qui permettent de récupérer des « tuiles » de valeurs (et les positions des pixels correspondantes) : cela évite de multiplier les boucles de programmation (coûteuses en ressources système) pour évaluer le contexte d'un agent.

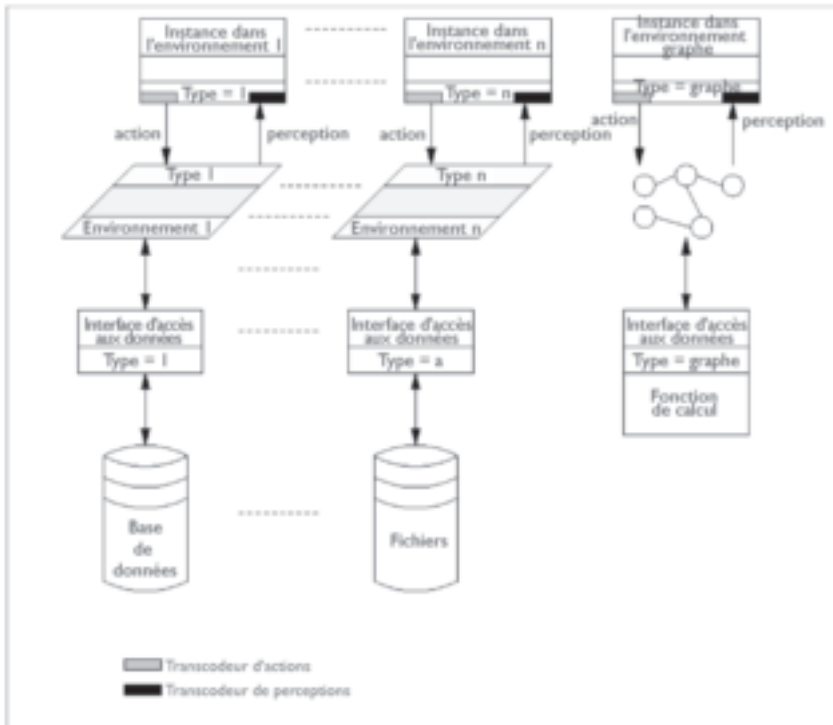
ACCÈS AUX DONNÉES DE POSITIONS DES AGENTS

Les positions des lignes de pêche sont stockées dans une base de données Fishery et accédées de la même manière que décrite précédemment (JDBC MySQL) par la classe FisheryConnectivity.

Les agents lignes de pêche accèdent aussi aux positions des animaux par une classe appelée ResultsConnectivity, qui sert aussi à insérer les positions successives des animaux (et les valeurs des paramètres captées) au fur et à mesure de la simulation.

C'est une architecture semblable à une architecture par tableau noir (FERBER, 1997), la base de données contenant l'ensemble des données des états des autres agents. Toute forme d'interactions entre animaux sera codée de la même manière.

La figure 104 présente la deuxième étape de la construction du modèle multi-environnements.



▽ Fig. 104
L'accès aux données dans MUFINS.

Le système conatif

Le système conatif d'un agent récupère donc facilement toute information de l'environnement à partir de ses instances dans les environnements réels. Il

traite ensuite cette information selon les règles de comportements qui lui sont spécifiées par l'utilisateur, présentées en détails dans le chapitre suivant.

ANIMATS ET COMPORTEMENTS

Le système conatif reçoit des informations typées, encapsulant la valeur au pixel où se situe l'agent avec ses coordonnées géographiques en longitude/latitude. Certains comportements peuvent s'en accommoder comme source d'information avant de mettre en œuvre un comportement et d'envoyer une commande. Mais surtout, le transfert de cette information « marque » le début du processus décisionnel du système conatif dans le système de gestion du temps.

Le système conatif reçoit donc une information typée avec une position, et sa délibération en renvoie une avec une position de destination. C'est le rôle du système conatif que de « décider » d'une destination à chaque étape de simulation. Cette information est ensuite renvoyée aux instances des environnements réels (par l'intermédiaire de l'environnement virtuel, cf. *infra*), qui effectuent un déplacement au sein de chaque environnement réel.

Les comportements sont codés dans une classe *finale* qui va récupérer diverses données par l'intermédiaire de l'architecture multi-environnementale et du système d'accès aux données. Ainsi, chaque comportement établit le contexte environnemental dont il a besoin pour délibérer. Cela permet d'optimiser la quantité d'information qui doit transiter le long de l'architecture des classes selon le degré de complexité du comportement mis en œuvre.

Ainsi, certains comportements récupèrent l'ensemble des valeurs dans une zone située autour du point de départ, d'autres des valeurs captées par l'agent précédemment (mémoire de l'agent).

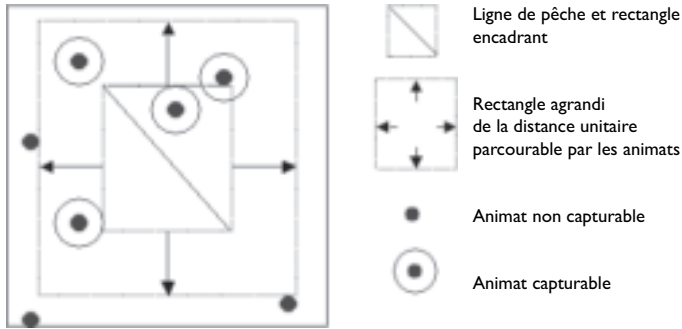
LIGNES DE PÊCHE ET CAPTURE VIRTUELLE

Le comportement des lignes de pêche est différent du comportement des animats : les lignes ne se déplacent pas en cours de simulation, mais elles interagissent avec les animats par le processus de *capture virtuelle*.

À tout instant de la simulation, les lignes de pêche peuvent percevoir les positions des animats au moyen de l'interface dédiée (connexion à la table *Positions* de la base *Simulations*). Le processus de capture virtuelle est basé sur les distances géographiques entre les lignes et les animats : si un animat est proche d'une ligne de pêche, il est considéré comme « capturable ».

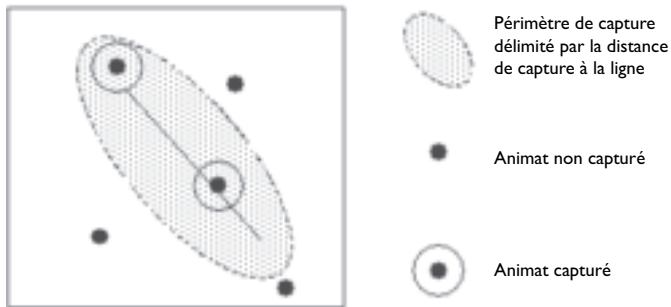
Toutefois, pour optimiser les performances du simulateur, plusieurs options méthodologiques ont été choisies. Ainsi, chaque ligne de pêche ne récupère pas la totalité des distances de tous les animats présents dans la société des agents : un périmètre de capture est défini, en considérant le rectangle délimité par la ligne de pêche, élargi d'une distance correspondant grossièrement au déplacement possible des animats au cours de la durée de simulation pendant laquelle la capture est mise en œuvre. Ainsi, tous les animats présents dans ce périmètre élargi sont susceptibles d'être capturés par cette ligne (fig. 105).

Une fois la liste des animats « capturables » disponible pour chaque ligne, deux types de processus de capture ont été codés.



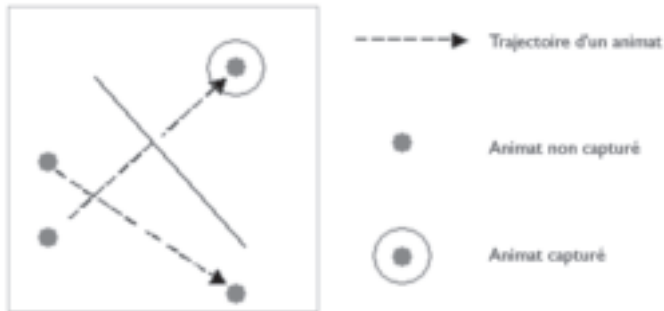
▽ Fig. 105

Schéma de la sélection des animaux « capturables » par les lignes de pêche.



▽ Fig. 106

Schéma du processus de capture statique.



▽ Fig. 107

Schéma du processus de capture dynamique.

Le premier type correspond à la capture caractérisée de *statique* (fig. 106). Dans ce cas, la distance de l'animal à la ligne seule conditionne la capture au pas de temps considéré. La distance de capture est spécifiée par l'utilisateur, en milles nautiques. Si un animal se trouve à une distance euclidienne inférieure à cette distance, il est alors capturé.

Le deuxième type de capture est appelé capture *dynamique* (fig. 107). Cette fois, ce n'est pas la distance de l'animat à la ligne à un instant donné qui détermine la capture. Il est ici nécessaire de disposer de la trajectoire de chaque agent entre l'instant précédent et l'instant considéré : si cette trajectoire croise la ligne de pêche (intersection non nulle), l'animat est capturé.

Dans ce cas, les animats correspondants peuvent être enlevés du système selon la spécification de l'utilisateur.

Le maintien de l'intégrité des données et la gestion des conflits

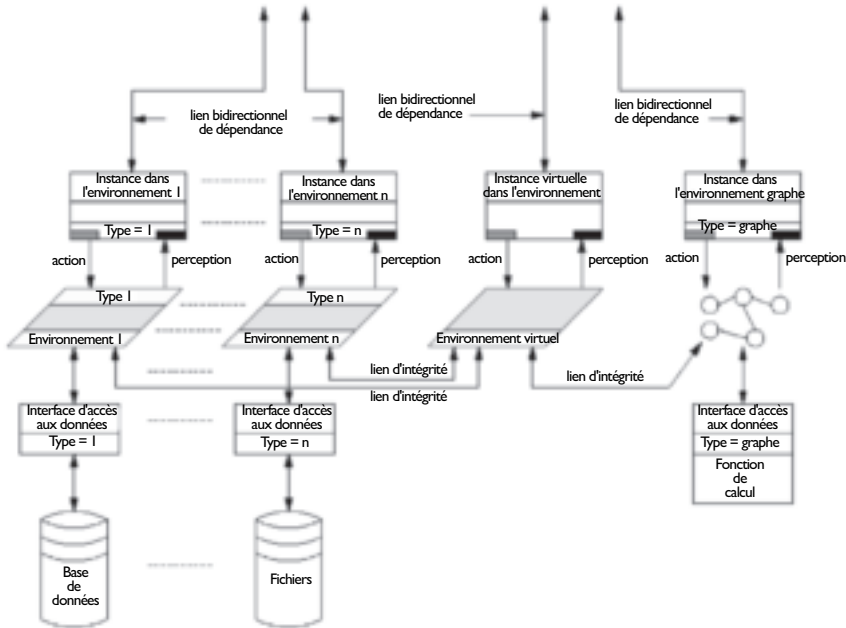
Le modèle d'agent (fig. 101, 102) montre comment les informations perçues dans l'environnement par les capteurs des instances environnementales remontent au système conatif de l'agent, qui « délibère » et renvoie alors les commandes aux effecteurs de ses mêmes instances environnementales par le lien bidirectionnel.

La commande passée envoie une position en coordonnées géographiques longitude/latitude. Mais elle n'est pas directement appliquée aux environnements réels typés. Dans le cas du déplacement d'un animat par exemple, il s'agit d'une action qui agit sur tous les environnements réels de la même manière. Envoyer la même commande à tous les environnements serait une perte de performances. On introduit alors un environnement particulier, déjà évoqué précédemment, l'*environnement virtuel*.

L'environnement virtuel a une connaissance de ce que sont et ce que représentent les autres environnements. Lors de l'initialisation du système, chaque environnement présent dans le système va s'identifier auprès de l'environnement virtuel grâce à un message spécial qui va transiter le long des *liens d'intégrité*.

Toute commande commune à tous les environnements, comme le déplacement d'un animat, est ainsi envoyée à l'environnement virtuel. Celui-ci va ensuite sélectionner les liens d'intégrités des environnements qui sont impliqués par ce changement de position (les environnements réels) et envoyer un message qui va prévenir les environnements que la position de l'agent a été modifiée. Ainsi, chaque agent dispose d'une instance dans l'environnement virtuel qui contient ses coordonnées géographiques longitude/latitude, alors que les instances dans les environnements réels sont caractérisées par des coordonnées en pixels, selon la résolution des données de chaque type d'environnement.

À cet effet, des *transformations affines* sont appliquées par l'environnement virtuel pour garantir l'intégrité des positions des agents dans tous les environnements réels, en fonction de leur propre système de coordonnées. De la même manière, toutes les coordonnées et distances géographiques (en milles) qui sont spécifiées par l'utilisateur (comme la distance de capture, par exemple) sont converties en distance en pixels dans les environnements réels concernés.



▽ Fig. 108
L'environnement virtuel et les liens d'intégrité dans MUFINS.

L'environnement virtuel est une classe mère des environnements instanciés typés, en plus d'être une classe instanciée qui sert à toutes les actions communes. Ce « double rôle » peut susciter une ambiguïté de compréhension, mais est en fait tout à fait logique dans le modèle objet de MUFINS. Cela permet notamment de limiter le trafic le long des liens de dépendance bidirectionnels dans le sens descendant (commandes) des actions communes (type déplacement).

Plus généralement, l'environnement virtuel sert ainsi à assurer l'intégrité des données. En cas de modification sur un environnement réel par l'action d'un agent, susceptible de modifier d'autres environnements, c'est l'environnement virtuel qui s'occupe de maintenir l'intégrité du système, en transmettant les messages *ad hoc* par les liens d'intégrité auprès des environnements réels concernés. Ici encore, l'implémentation de MUFINS n'a pas eu à considérer ce cas, mais il pourrait être envisagé dans des applications ultérieures. La gestion du temps est aussi assurée par l'environnement virtuel (cf. *infra*)

La figure 108 présente la troisième étape de la construction du modèle multi-environnements.

La gestion du temps

La gestion du temps dans MUFINS nécessite une bonne organisation des événements, car les environnements réels sont dynamiques, c'est-à-dire qu'ils doivent renouveler régulièrement leurs données en cours de simulation. De plus, il faut gérer les événements propres aux agents : déplacements des animats et captures virtuelles des lignes de pêche.

SOULIÉ (2001) a proposé un mécanisme de gestion du temps hybride entre la gestion dite *centralisée* du temps, et la gestion dite *dirigée par les événements*. Au sein de l'environnement virtuel, un objet *minuteur* s'occupe de garantir le déroulement des événements dans un ordre cohérent. Le temps est ainsi décomposé en *pas de temps* (en anglais, *step*), correspondant à des fractions égales de la journée de 24 heures : le nombre de pas de temps dans une journée dépend de la spécification de l'utilisateur.

Le minuteur centralise le déroulement des événements, en tenant à jour l'indice des pas de temps (à l'initialisation du système, il est égal à 0) et la date courante du système. Dans le cas des événements liés aux déplacements des animats, lorsque l'environnement virtuel ne reçoit plus de commandes de la part des animats et qu'il a distribué les commandes aux environnements réels, il prévient le minuteur de passer au pas de temps suivant.

L'environnement virtuel tient aussi les autres environnements informé de ce déroulement. Lorsque le nombre de pas de temps correspond à une journée, le minuteur avance la date d'un jour, et un message est passé aux environnements pour leur dire de se mettre à jour. Ce message est passé à tous les environnements, même si ceux-ci ne nécessitent pas de renouveler leurs données tous les jours (comme la SLA, la Chl-*a* ou la bathymétrie par exemple). C'est l'interface d'accès aux données par l'intermédiaire de la base de données des images (*Seas*) qui gère ensuite le renouvellement effectif des données : selon le type de données, la base sélectionne l'image qui correspond le mieux à la nouvelle date.

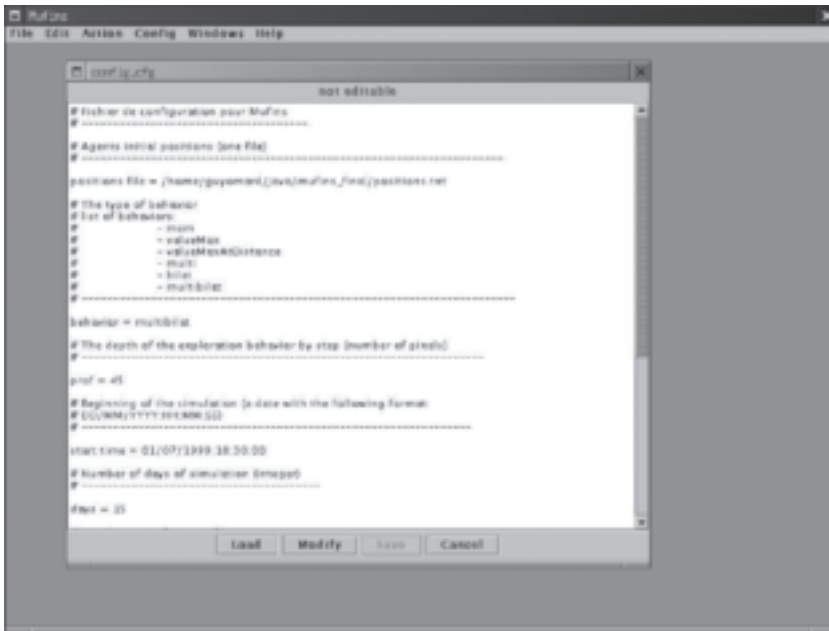
De la même manière, les agents lignes de pêche sont tenus au courant par le minuteur des pas de temps pendant lesquels ils doivent mettre en œuvre le processus de capture. En effet, il apparaît clairement que les captures d'espadon ne se répartissent pas également au cours de toute la journée, mais s'effectuent en majorité dans les premières heures de l'opération de pêche, correspondant aux dernières heures de la journée. Il est ainsi possible de modifier la proportion de pas de temps au cours d'une journée pendant lesquels les lignes de pêche sont « pêchantes » dans le système. Par exemple, pour un nombre de pas de temps journaliers de 24 (soit un pas de temps d'une durée d'une heure), on peut considérer que seules les dernières 6 heures de la journée sont « pêchantes », soit le quart de la journée. Ce paramètre peut être modifié aisément par l'utilisateur.

L'interface graphique de MUFINS

Une interface graphique a été implémentée pour permettre de suivre les simulations des comportements des agents sur les cartes satellitaires. Le package *mufins/gui* se charge de « suivre » les simulations pour mettre à jour les affichages (interface *Observer* et classe *Observable*)

La figure 109 montre ainsi l'interface graphique au chargement du fichier de configuration de MUFINS, qui spécifie les caractéristiques des agents (positions initiales, type de comportement, rayon d'exploration...) et des environnements (paramètres, dates de départ, nombre de jours de simulations, accès aux bases

de données). La figure 110 (cf. cahier hors-texte) montre l'interface de simulation à l'initialisation des environnements (distribution régulière de 200 animaux), avec quatre environnements ici disponibles et représentés (Chl-a, SLA, SST, Ekman). La figure 111 (cf. cahier hors-texte) montre enfin une vue d'écran de MUFINS en cours de simulation : les agents se distribuent de manière cohérente sur les différents environnements, et les lignes de pêche apparaissent explicitement.



▽ Fig. 109
Interface graphique de MUFINS : le fichier de configuration.

Essai d'utilisation des réseaux de neurones

MARTIN DESRUISSEAUX, MICHEL PETIT,
GUILLAUME CONSTANTIN DE MAGNY,
FRÉDÉRIC HUYNH



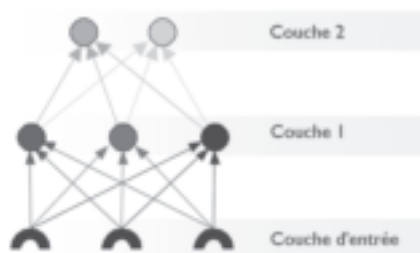
© D. Guyomard

Dans ce chapitre, nous passerons sous silence les délicates questions théoriques, voire philosophiques, qui accompagnent ces recherches pour n'aborder que les aspects pratiques nécessaires à la programmation d'un réseau de neurones de type *feed-forward*.

Il existe une multitude de façons de connecter des neurones entre eux. On pourrait par exemple imaginer un réseau où tous les neurones sont connectés avec tous les autres¹. Le réseau que nous décrirons dans ce chapitre sera fait de couches (fig. 112). Ce type de réseaux (appelé en anglais *feed-forward*) à l'avantage d'être bien étudié par la littérature. La discussion qui suit résume les chapitre V et VI du livre de HERTZ *et al.* (9)

Dans les réseaux à couches, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche précédente. On soumet un problème au réseau en donnant une valeur numérique à chaque neurone de la couche d'entrée. Ces neurones d'entrée ne faisant aucun calcul avec les valeurs qu'on leur donne, on ne considère pas vraiment qu'ils forment une couche du réseau. Dans la première « véritable » couche, chaque neurone utilisera les valeurs de tous les neurones de la couche d'entrée pour calculer sa propre valeur. Une fois cette étape complétée, chaque neurone de la seconde couche utilisera les valeurs de la première couche pour calculer leurs propres valeurs. Le processus continue ainsi pour toutes les autres couches.

1. Ce cas est effectivement étudié. Il représente une étape importante dans la compréhension des réseaux de neurones, un peu comme l'atome de Bohr en physique atomique.



▽ Fig. 112
Exemple de réseau de neurones à deux couches.

Chez les organismes biologiques, les cerveaux forment des réseaux de neurones bien plus complexes que ce réseau *feed-forward*. Les divisions en couches ne sont pas aussi nettes et les neurones se connectent entre eux d'une façon infiniment plus compliquée. Les équations exposées ici s'appliquent au cas relativement simple d'un réseau idéalisé, en aucun cas pour un réseau de neurones biologiques. Pour cette raison, nous n'utilisons le terme de « neurones » que parce qu'il est largement répandu. Pour ne pas pousser plus loin la confusion, nous bannirons de notre discussion le terme de « synapses » ; nous préférons parler de connections entre neurones.

Calcul d'une sortie à partir de valeurs d'entrée

Prenons un premier neurone du réseau, le neurone noir de la figure 113 par exemple. Ce neurone est connecté à tous les neurones de la couche précédente. À chaque connexion entre deux neurones est associé un poids w_{np} où n désigne le neurone étudié et p un neurone de la couche précédente. La sortie O_n du neurone se calcule alors par :

$$O_n = g \left(\sum_p w_{np} V_p \right)$$

▽ Équation 1
Sortie d'un neurone en fonction de ses entrées.

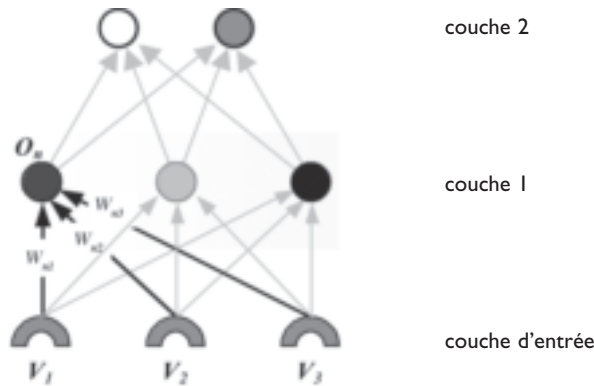
Dans cette équation, $g(x)$ représente une *fonction d'activation* qui sera discutée par la suite. En notation vectorielle, on peut représenter la somme par une multiplication scalaire entre le vecteur d'entrée V et les poids w_n d'un neurone n , que l'on peut voir en programmation comme un tableau à une dimension.

$$O_n = g(w_n V)$$

▽ Équation 2

Sortie d'un neurone (notation vectorielle).

Une fois calculées les sorties de tous les neurones de la première couche, ces sorties deviennent les entrées de la seconde couche et ainsi de suite jusqu'à la dernière couche. La figure 113 donne un exemple de calcul pour les neurones de la première couche d'un réseau qui comporte trois entrées.



▽ Fig. 113

Exemple de calcul de la sortie d'un neurone d'un réseau.

$$O_n = g(w_{n1}V_1 + w_{n2}V_2 + w_{n3}V_3)$$

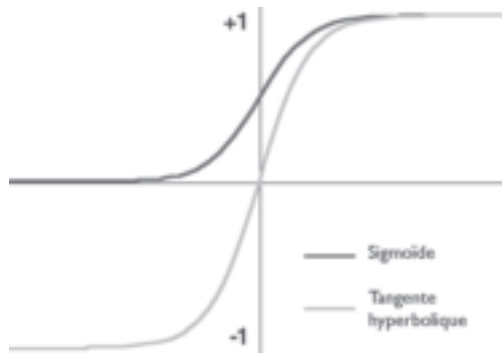
On appelle *couches cachées* toutes les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles tiennent leur qualificatif de *cachées* du fait qu'elles n'ont aucun contact avec l'extérieur du réseau. Si on utilisait le réseau comme une boîte noire, on ignorerait leur présence. La figure 113 montre un exemple de calcul sur l'unique couche cachée du réseau illustré.

Sigmoïde

$$\text{sig}(x) = \frac{1}{1 + e^{-2x}}$$

Tangente hyperbolique

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$



▽ Fig. 114

Illustration de deux sigmoïdes couramment utilisées comme fonctions d'activations.

Toutes les équations exposées dans ce chapitre font intervenir une *fonction d'activation*, dénotée $g(x)$. Cette fonction d'activation est généralement de forme sigmoïdale. De telles fonctions peuvent recevoir une valeur quelconque en entrée, mais retournent toujours une valeur comprise entre deux bornes en sortie. La figure 114 illustre deux sigmoïdes couramment utilisées. La première retourne toujours des valeurs comprises entre 0 et 1, tandis que la seconde (la tangente hyperbolique) retourne des valeurs comprises entre -1 et +1.

Pourquoi s'encombrer d'une fonction d'activation ? Ne pourrait-on pas calculer simplement $O_n = w_n \cdot V$ à la place de l'équation 1 ? En fait, de tels réseaux existent. On les appelle des réseaux *linéaires*, car ils reviennent à utiliser une fonction d'activation $g(x) = x$. MINSKY et PAPERT (1969) ont démontré que les réseaux linéaires ne peuvent résoudre qu'un nombre assez restreint de problèmes. Ils ont donc peu d'utilité dans la pratique. Ajouter des couches n'y change rien, car additionner des relations linéaires donne toujours une relation linéaire. Quel que soit le nombre de couches, un réseau sans fonction d'activation équivaut toujours à un réseau avec une seule couche.

En introduisant un caractère non linéaire, les fonctions d'activations augmentent les possibilités du réseau. Elles rendent utiles les couches cachées qui autrement auraient été superflues. Les fonctions de forme sigmoïdale ont aussi la propriété de présenter une pente plus abrupte pour les valeurs près de zéro. Lors de la phase d'apprentissage du réseau (discutée dans la prochaine section), cette propriété aura pour effet d'appliquer des corrections plus radicales sur les neurones qui « hésitent » encore sur les valeurs à produire.

Apprentissage supervisé du réseau

Pour obtenir du réseau qu'il produise les valeurs que l'on désire, il faut lui donner les bons poids w_{np} . On y parvient en soumettant le réseau à une phase d'apprentissage, pendant laquelle on lui spécifie à la fois les valeurs d'entrée et les valeurs de sortie qu'il devrait obtenir. Les poids appropriés sont alors calculés pour l'ensemble du réseau, y compris pour les couches cachées. L'algorithme effectuant cette tâche est connu en anglais sous le nom de *back-propagation*. Il en existe de multiples variantes, mais cette section ne présente que la plus classique.

On peut initialiser le réseau en donnant à ses poids des valeurs aléatoires. À partir d'un vecteur d'entrée V qu'on lui spécifiera, le réseau calculera évidemment un vecteur de sortie O qui sera très différent de celui qu'on attendait. La différence entre la valeur calculée et la valeur attendue constitue l'*erreur* du réseau. L'idée de la méthode d'apprentissage par *back-propagation* consiste à modifier les poids de chaque connection par un facteur proportionnel à l'erreur. Plus spécifiquement, la correction à apporter au poids de la connexion entre

un neurone n de la couche de sortie et un neurone p de la couche précédente est la suivante :

$$C_{n,p} = \alpha \times O'_n \times (T_n - O_n) \times V_p$$

où t_n est la valeur attendue pour le neurone n .
 α est le facteur d'apprentissage.

▽ Équation 3

Correction à apporter aux poids d'une connexion entre deux neurones.

Dans l'équation 3, O'_n est une expression similaire à O_n (équation 1), mais faisant intervenir la dérivée g' de la fonction de transfert plutôt que la fonction elle-même. Le tableau 14 rappelle les expressions de O_n et O'_n , ainsi que les dérivées premières des deux fonctions d'activations illustrées dans la figure 114.

▽ Tableau 14

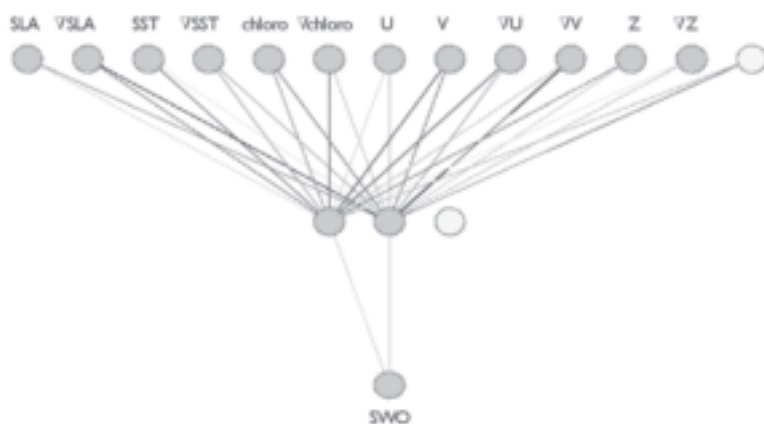
Sortie d'un neurone et fonctions d'activations courantes.

Fonction d'activation $g(x)$ et leurs dérivées premières	
$O_n = g\left(\sum_p w_{np} V_p\right)$	$\text{sig}(\beta x) = \frac{1}{1 + e^{-2\beta x}} \quad \text{sig}'(\beta x) = 2\beta (\text{sig} - \text{sig}^2)$
$O'_n = g'\left(\sum_p w_{np} V_p\right)$	$\tanh(\beta x) = \frac{e^{\beta x} - e^{-\beta x}}{e^{\beta x} + e^{-\beta x}} \quad \tanh(\beta x) = b(1 - \tanh^2)$

WIDROW et STEARNS (1985) ont montré que lorsque α est suffisamment petit, l'application de ces corrections ajuste les poids des connexions vers des valeurs qui minimisent l'erreur.

Application d'un réseau de neurones artificiels aux données de pêche

Nous avons construit un réseau de neurones avec suffisamment d'entrées pour recevoir des paramètres environnementaux sélectionnés et une sortie représentant le « succès » de la pêche (pas nécessairement représenté par le nombre d'individus capturés). Une multitude de configurations est possible pour le réseau. La figure 115 montre l'une de celles que nous avons essayée. Les entrées apparaissent en haut et la sortie en bas, avec une seule couche intermédiaire.



▽ Fig. 115

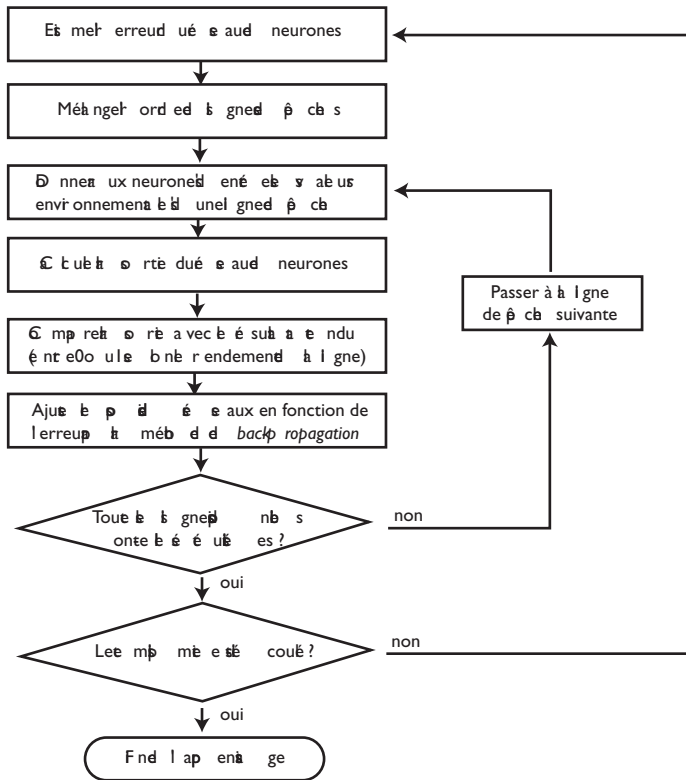
Exemple de réseau de neurones expérimenté sur les données de pêches.

Pour tous les neurones du réseau (incluant le neurone de sortie), nous avons utilisé une fonction d'activation sigmoïde. Cette fonction produit des valeurs proches de 0 ou de 1, avec parfois des valeurs intermédiaires quand le réseau hésite entre deux états. Cette fonction donne un caractère binaire à la sortie, qu'on pourrait décrire par « bonne pêche » ou « mauvaise pêche ». Or, les données de pêches disponibles expriment un rendement en nombre d'individus capturés par 1 000 hameçons. Il nous fallait donc un critère traduisant ce rendement en bonne ou mauvaise pêche. Le choix d'un tel critère est forcément arbitraire. Pour une première approche, nous avons fixé un seuil de rendement à environ 8‰. Ce seuil correspond au rendement moyen des lignes retenu pour notre simulation. Il est peut-être peu réaliste sur le plan halieutique, mais dans un premier temps il a l'avantage de séparer notre jeu de données en deux groupes de bonnes et mauvaises pêches de taille à peu près égale, ce qui facilitera l'interprétation des résultats.

Tous les réseaux ont d'abord été construits avec des poids aléatoires pour chacune de leurs connections. Nous avons ensuite entraîné les réseaux comme indiqué sur la figure 116.

L'erreur du réseau (la première étape du schéma précédent) est estimée en lui soumettant les données environnementales de chaque ligne de pêche, en calculant les sorties et en comparant ces dernières aux résultats attendus. On exprime l'erreur par la valeur RMS des différences entre les sorties du réseau et les résultats attendus (une différence par ligne de pêche).

L'erreur RMS du réseau initialisé avec des poids aléatoires (donc avant la phase d'apprentissage) est typiquement de l'ordre de 0,7. Rappelons que la sortie du réseau est comprise entre 0 et 1 et que l'erreur ne peut donc pas être supérieure à 1. Après la phase d'apprentissage, l'erreur descend à une valeur de l'ordre de 0,4, ce qui est encore élevé. Pour être plus exact, le niveau auquel descend l'erreur dépend de la définition donnée à une bonne et mauvaise pêche.



▽ Fig. 116

Soumission des données environnementales et de pêches pour apprentissage.

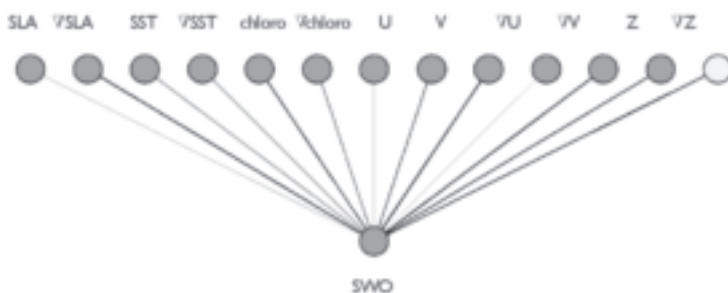
En effet, chaque définition produit sa propre distribution de 0 et de 1 et chaque distribution a sa moyenne et son écart-type. Dans tous nos essais avec les données environnementales et de pêches, l'erreur du réseau de neurones après la phase d'apprentissage était toujours très proche de l'écart-type de la sortie attendue. Un réseau de neurones qui effectue son apprentissage sur des paramètres d'entrée et de sortie aléatoires, sans lien entre l'entrée et la sortie, obtient une erreur RMS à peu près égale à l'écart-type des données des sorties attendues. Nos résultats avec les données environnementales et de pêches donnaient une erreur RMS légèrement inférieure à l'écart-type, mais de très peu. Le faible écart entre les erreurs RMS et les écarts-types suggère qu'aux yeux du réseau de neurones, la relation entre les données environnementales et les captures d'espadons n'est pas très différente d'une relation aléatoire.

Ce résultat ne consacre par pour autant l'échec des réseaux de neurones. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette absence de résultat concluant :

- Le choix de la position à laquelle ont été évalués les paramètres environnementaux (la moyenne des positions de début et de fin) n'est peut-être pas approprié. Seules les positions de début et de fin sont à peu près fiables.

- Les conditions environnementales avant et après les pêches sont probablement des paramètres essentiels pour le réseau de neurones. Les analyses statistiques ont montré qu'ils ont souvent plus de poids que les conditions environnementales le jour de la pêche.
- Les données de pêches sont fortement biaisées par les contraintes du pêcheur (autonomie limitée du bateau, choix « intuitif » ou « guidé » par les cartes de SST, endroit où il met sa ligne à l'eau, etc.). Ce biais est peut-être suffisamment fort pour cacher le signal dû aux paramètres environnementaux.
- Il reste difficile de calibrer le temps d'apprentissage du réseau. Des essais sur des données artificielles (sur lesquelles nous avons volontairement introduit une relation systématique entre les données environnementales et les captures) ont montré que l'erreur du réseau de neurones pouvait plafonner longtemps à la valeur RMS de la sortie avant de chuter lorsque le réseau a trouvé une solution.
- De meilleurs réseaux de neurones et méthodes d'apprentissage peuvent probablement être expérimentés. La méthode d'apprentissage par *back-propagation* est reconnue comme étant lente et peu robuste. Une méthode plus complexe telle que *Scaled Conjugate Gradient* donnerait peut-être de meilleurs résultats. Cependant, nous pensons que le jeu de données de pêche couplées aux données environnementales reste, de façon rédhibitoire, trop biaisé et surtout trop limité (deux années réelles).

Malgré le fait que les erreurs des réseaux de neurones soient proches de l'écart-type, les poids qu'ils établissent sont quand même assez cohérents avec les concepts océanographiques classiques et les résultats des autres méthodes testées. La figure 117 représente un exemple de réseau de neurones sans couche cachée. Un tel réseau n'apporte rien de nouveau par rapport aux analyses statistiques, mais a l'avantage d'être plus facile à interpréter qu'un réseau plus complexe. L'erreur RMS du réseau illustré est de 0,478 alors que l'écart-type est de 0,481. Les connections foncées représentent des poids plus forts que les connections pâles².



▽ Fig. 117

Exemple de réseau de neurones simple après apprentissage.

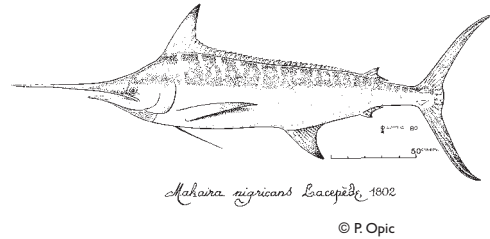
2. Afin d'éviter les biais dus au fait que l'ordre de grandeur de la profondeur est beaucoup plus grand que celui de la chlorophylle (par exemple), les paramètres environnementaux ont été normalisés avant de les soumettre au réseau de neurones. Cette normalisation ne change pas la performance du réseau de neurones, mais permet de relativiser les tons de gris dans des schémas comme celui de la figure 117 (ou 115 ?).

Les intensités des connections varient d'une exécution à l'autre du réseau de neurones. Mais pour le réseau simple illustré dans la figure 117, on retrouve le plus souvent un poids fort pour le gradient de SLA et le gradient de la composante U du courant géostrophique. Les poids de la SST et de la chlorophylle sont assez variables.

Ces observations ne sont peut-être pas significatives. Mais la piste des réseaux de neurones aurait besoin d'être poursuivie un peu plus loin avec un jeu de couples de données plus conséquents et moins biaisés.

Conclusion

MICHEL PETIT et FRÉDÉRIC HUYNH



Les résultats et conclusions, notamment pour le croisement des données de pêche et de l'environnement océanique, ont été étudiés à partir de différentes méthodes employées. Plutôt que de les reprendre ici, nous nous proposons de mettre ce travail dans la perspective des actions de recherche actuelles qui intéressent le secteur halieutique palangrier.

De tout temps, les pêcheurs ont détecté le poisson en associant sa présence avec un ensemble d'indicateurs, qu'ils soient biologiques (couleur de l'eau, présence d'espèces associées...) ou physiques (température de l'eau, phase de la marée, courants...). La télé-détection a élargi le champ de détection du pêcheur de façon spectaculaire : l'océan global est observé et le domaine spectral des observations s'étend des micro-ondes à l'infrarouge thermique, ouvrant ainsi la porte à l'élaboration d'indicateurs jusqu'alors inaccessibles.

Dès le milieu des années 1970, les cartes de température de surface de la mer, obtenues par radiométrie infrarouge, ont été les premiers produits d'océanographie spatiale utilisés par des pêcheurs. Ces produits étaient, et sont toujours, utilisés pour localiser les zones à forte probabilité de présence de poisson et réduire ainsi le temps de recherche.

Mais si les pêcheurs connaissent, empiriquement, les relations qui lient la distribution des populations de poissons à divers phénomènes marins, les scientifiques, par contre, ont du mal à quantifier ces relations et à les prendre en compte

dans les modèles d'évaluation de la ressource. Ce problème est sans doute lié au fait que, il y a encore peu de temps, l'halieute se trouvait dans l'impossibilité de croiser les données de captures (qui constituent l'essentiel des mesures en halieutique) à une description fine de la situation océanographique correspondante. Il a, en effet, fallu attendre les progrès récents de l'océanographie spatiale (en particulier de l'altimétrie radar) et de la modélisation numérique (modèle ROM, par exemple) pour pouvoir décrire globalement l'océan à des échelles spatiales et temporelles adaptées.

Bien que des produits d'océanographie spatiale soient peu ou prou disponibles et connus des pêcheurs depuis le milieu des années 1970, la demande de l'industrie de la pêche en informations satellitaires n'est devenue significative que depuis quelques années. Les raisons en sont multiples :

- le poste « temps de recherche du poisson » est devenu prédominant dans les comptes d'exploitation des unités de pêche, suite à l'augmentation du coût du carburant et de l'extension, dans l'espace et le temps des pêcheries ;
- les progrès en océanographie spatiale ont rendu les paramètres et indicateurs océaniques de plus en plus fiables et opérationnels pour la prise de décision du pêcheur ;
- enfin et surtout l'évolution technique et la baisse des coûts de l'informatique et des télécommunications marines ont permis à un nombre croissant d'unités de pêche de recevoir et d'exploiter à bord des observations spatiales régulièrement mises à jour.

Face à ce marché en croissance, si beaucoup d'initiatives locales apparaissent dans les pays industrialisés, l'offre en service et en information d'océanographie spatiale à l'échelle globale reste encore peu diversifiée :

- elle est essentiellement concentrée aux États-Unis et en France, deux pays en pointe dans le domaine de l'océanographie spatiale ; par contre, le Japon, pays en avance en matière d'information environnementale envoyée à bord, reste dans une logique de service réservé aux flottilles japonaises exclusivement ;
- trois types de produits océanographiques sont principalement commercialisés ; il s'agit de cartes de température de la surface de la mer, de couleur de l'eau (ou de concentration en chlorophylle) et d'anomalie du niveau de la mer.

En France, depuis le début des années 1990, les expériences les plus significatives sont à mettre au crédit de l'IRD et de CLS :

- Entre 1994 et 1999, l'IRD a réalisé des expériences longues de fourniture opérationnelle de cartes de température de surface dérivées des mesures infrarouges du capteur AVHRR des satellites NOAA et de cartes de vorticité dérivées des mesures de vent du diffusiomètre des satellites ERS. Ces expérimentations, très proches du transfert, ont été menées dans le cadre de contrats européens et nationaux pour le développement du secteur pélagique thonier dans l'océan Indien (PTR et PPR).
- Depuis 1998, CLS commercialise des cartes d'anomalies de niveau de la mer et des courants associés, dérivées de la combinaison des mesures altimétriques de Topex-Poséidon et ERS-2. Les thoniers senneurs constituent également

l'essentiel de la clientèle, bien que le produit CLS ait été également présent à bord d'unités plus petites, tels les chalutiers et fileyeurs français qui pêchent le thon germon en Atlantique nord.

Enfin, si le marché de l'information océanographique se développe bien auprès des professionnels de la pêche, il n'est qu'embryonnaire dans les organismes gestionnaires de la ressource halieutique (affaires maritimes, structures internationales, européennes, nationales ou régionales de suivi des stocks...). La nécessité d'utiliser cette même information au niveau des gestionnaires est cependant de plus en plus forte et évidente : il s'agit en effet de mieux connaître l'environnement marin et son influence sur la ressource pour une mise en place raisonnée des règlements (quota, moratoires, etc.). Il n'est plus de mise de se cacher la réalité d'aujourd'hui (c'est-à-dire l'émergence de marchés vrais) par un questionnement théorique sur l'opportunité de mettre à disposition tel ou tel produit auprès des métiers de la pêche. Il est, au contraire, indispensable d'en contrôler le développement par un accompagnement constant. L'implication des structures de gestion de la ressource, comme signalée par plusieurs auteurs dans ce document, est beaucoup trop timide. Il en est de même de la recherche dans le domaine de l'évaluation des potentiels halieutiques et de leurs variations.

En novembre 2001, le ministère de la Recherche, dans le cadre des projets « Réseau Terre et Espace » à finalité appliquée, a accepté de financer le projet SeAGeRH (Service d'Aide à la GEstion des Ressources Halieutiques) présenté par l'IRD et CLS. L'objectif de ce projet est double :

- combiner les compétences et les acquis de l'IRD et de CLS pour développer et commercialiser rapidement une offre française complète et très compétitive dans le domaine des produits d'océanographie spatiale dédiés au marché de la pêche ;
- décliner cette offre dans une version adaptée aux besoins des organismes gestionnaires de la ressource halieutique, un nouveau marché.

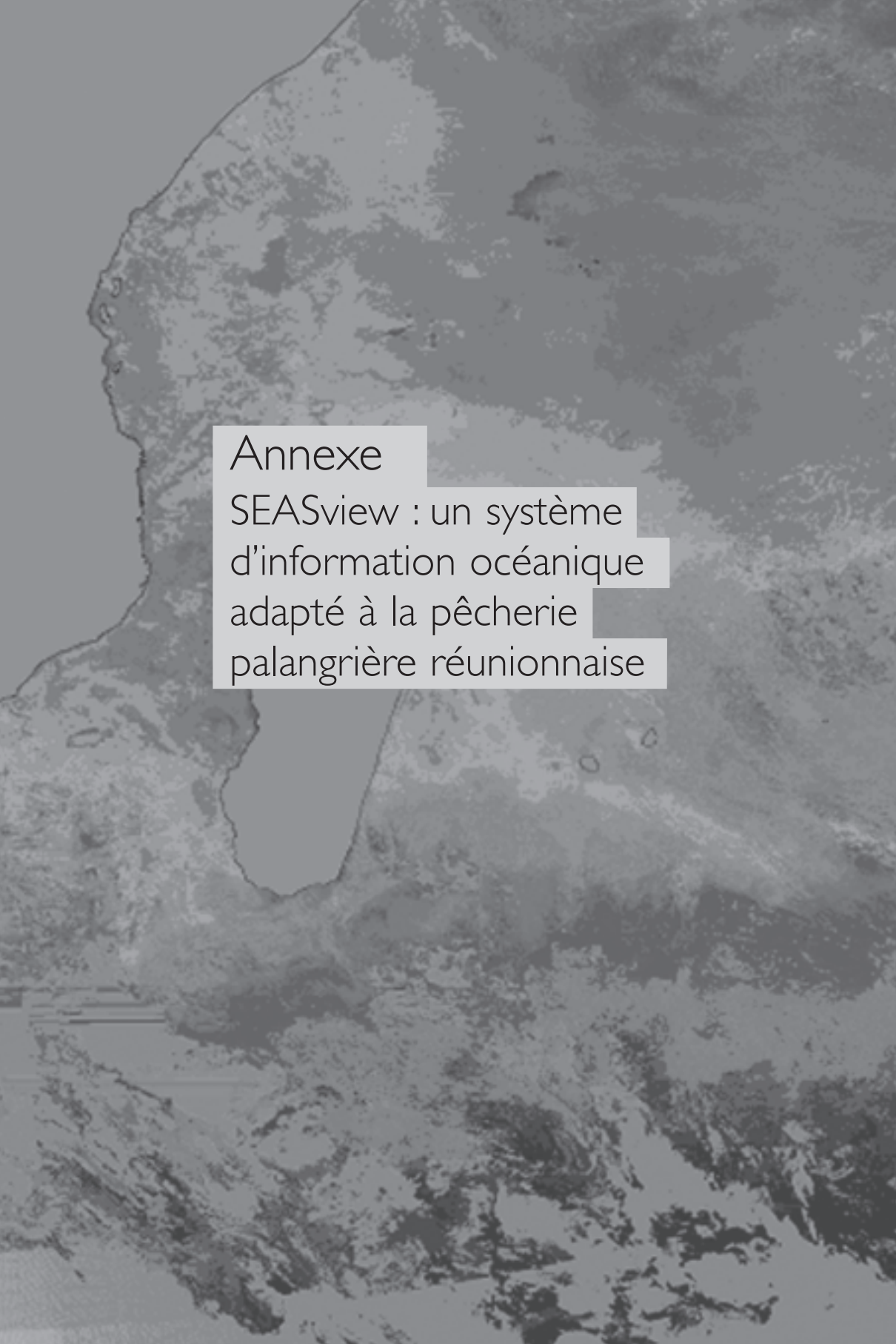
D'une durée de deux ans et demi, ce projet touche à sa fin et les résultats devraient être publiés prochainement.

Dans le domaine de la pêche *sensu stricto*, il s'est agi de fournir à bord et en temps réel les informations disponibles, et d'en faciliter l'exploitation en fournissant un logiciel compatible avec les outils informatiques embarqués (interface avec le système de navigation, le cahier de pêche...). Dans le domaine de la gestion des ressources halieutiques, où l'utilisation des produits et services d'océanographie spatiale est peu développée, il a fallu en premier lieu, faire évaluer par des structures de gestion, partenaires du projet, la pertinence des informations environnementales couplées aux données de pêche en temps quasi réel. Ce travail, plus amont, vise à démontrer l'utilité des produits pour encourager la demande et créer le marché. L'un des sites pilotes de SeaGeRH est la pêcherie palangrière réunionnaise, pour son originalité et son dynamisme.

Parallèlement, suite au travail présenté ici, il a été demandé aux équipes de recherche de suivre les pêcheries palangrières en émergence (Nouvelle-Calédonie)

ou en difficulté (Polynésie française) et des programmes de recherche et de développement sont en cours de montage. Nous espérons que cet ouvrage peut contribuer à aider les acteurs (décideurs, gestionnaires et scientifiques) de tels programmes non seulement par les méthodologies proposées et l'apport des résultats présentés, mais, tout autant, par les limites identifiées de tels projets afin qu'ils ne suscitent pas de faux espoirs. Même si les progrès technologiques sont conséquents et l'utilisation de l'information issue du spatial en halieutique pélagique tend à devenir opérationnelle, les contraintes liées aux pêcheries elles-mêmes, restent prédominantes et le facteur limitant d'un développement durable. Ces contraintes, chroniques, sont liées à la jeunesse relative de ces pêcheries qui tentent d'explorer l'océan dans les limites d'autonomie des navires et au manque de données de pêche en densité et en fiabilité. La cartographie des PUE n'est pas représentative et peut être fortement biaisée si la densité de l'effort de pêche n'est pas d'une certaine homogénéité. Ce biais est un piège bien connu des halieutes mais pas forcément pris en compte. Dans le présent exemple de la pêcherie réunionnaise, la faible densité spatio-temporelle des trois années de données a nécessité de chercher de nouvelles méthodes d'analyse et a aussi montré qu'un recul sur plus de temps était nécessaire et qu'il fallait adapter les programmes de recherche comme d'investissement dans ce sens.

Montpellier, mai 2004



Annexe

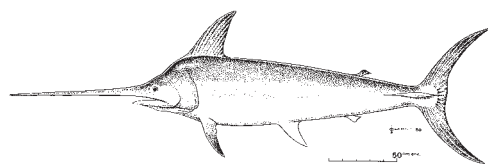
SEASview : un système
d'information océanique
adapté à la pêche
palangrière réunionnaise

▼ Image des températures de surface obtenue à partir des données satellitaires acquises par la station SEAS – Réunion

© IRD, SEASnet, unité Espace

I^{re} partie Description des produits d'environnement océanique fournis en entrée

LAURE GARDEL, MARTIN DESRUISSEAUX,
MICHEL PETIT, ANTONIO RAMOS,
MICHEL SLEPOUKHA, EMMANUEL RIVIÈRE,
JOSEP COCA, YVETTE BASSON



Xiphias gladius Linnaeus, 1758

© P. Opic

Les différents produits fournis dans le cadre du projet palangre ont fait l'objet d'une attention particulière pour être intrinsèquement porteurs de toute l'information géoréférencée indépendamment des logiciels de l'utilisateur (format dit non propriétaire). Ces produits, de format simple et robuste, ne se réduisent ainsi pas uniquement à de l'image-interprétation et peuvent faire l'objet de calculs et traitements.

Structure des cédéroms et format des images¹

L'ensemble des données est livré sur des disques compacts ; les cartes concernent une région géographique dépassant largement celle intéressant les pêcheries palangrières. L'ensemble des données satellitaires acquises ayant une fauchée large, il n'a pas semblé judicieux de perdre cette information. Néanmoins, le logiciel de visualisation fourni avec les données permet de délimiter une zone plus restreinte.

1. Les cédéroms d'installation du logiciel SEASview ainsi qu'un échantillon de données peuvent être obtenus auprès de l'unité Espace de l'IRD ou encore télécharger sur le site suivant : <http://www.seasnet.org/>

Les données sont de deux types :

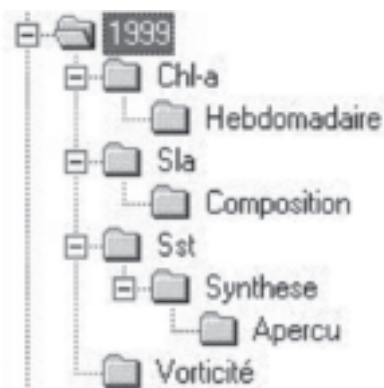
- Les données susceptibles d'être fournies par la station de réception SEAS-Réunion sont : les cartes de températures de surface de l'océan issues des données de surface NOAA et les cartes de vorticité obtenues à partir des données du diffusiomètre ERS. Au début de l'année 2000, un arrêt total de la station de réception de quelques semaines a perturbé la réception des images NOAA. Les données correspondant à cette période seront donc de qualité différente, quant à la résolution et au traitement.

- Les données obtenues par la mise en réseau des moyens, compétences et programmes de recherche au sein de l'US-Espace de l'IRD à savoir, les anomalies superficielles de topographie obtenues par les données altimétriques (ERS et Topex/Poséidon), les concentrations chlorophylliennes disponibles après traitement des données du capteur SeaWiFS et les cartes de température de surface de la mer de la période manquante.

Le cédérom #1 concerne l'installation du logiciel de visualisation SEASview. Les instructions d'installation sont données dans la troisième partie. Les autres cédéroms auront une structure identique. Leur arborescence est illustrée dans la figure 118.

Chaque cédérom de données contient l'ensemble des données satellitaires environnementales pour une période donnée². Les périodes couvertes par les CD-ROMS sont détaillées dans le tableau 15.

Toutes les images sont fournies au format PNG. Ce format est l'un des deux seuls formats officiellement reconnus par le consortium www, l'autre format étant JPEG³. Sa compression est meilleure que PCX et GIF et aucune redevance n'est demandée pour son utilisation.



▽ Fig. 118
Arborescence typique des cédéroms de données.

2. En réalité, les cartes de SST de volume important (3 Mo par jour) ont été séparées par période. On retrouve toute la période des autres cartes (Chl-a, SLA, vorticité) sur chacun des cédéroms de l'année.

3. Le format JPEG est un format dit « destructeur » : il sacrifie la précision de certains pixels pour une meilleure compression. Nous ne pouvons pas utiliser ce format si nous souhaitons conserver toute l'information contenue dans chaque pixel.

▽ *Tableau 15*
Plages de temps couvertes par les cédéroms.

Cédéroms	Période des données
#	1 ^{er} janvier – 10 juillet 1999
#3	11 juillet - 1 ^{er} décembre 1999
#	1 ^{er} janvier – 30 juin 2000
#	1 ^{er} juillet - 1 ^{er} décembre 2000

Les types de produits

Cartes de température de surface de la mer

Les deux types de produits fournis sont la « synthèse glissante » (SYN) et les aperçus de la synthèse correspondante (QL, *Quick Look* en anglais).

LES SYNTHÈSES GLISSANTES

Après l'acquisition, on applique l'algorithme MCSST, avec les coefficients de calibration calculés puis l'image est corrigée géométriquement. Une donnée acquise de jour est calibrée par rapport à une de nuit acquise par le même satellite. En effet, la donnée de jour mesure une température supérieure en raison du réchauffement superficiel provoqué par le soleil, or ce réchauffement ne nous intéresse pas. Les différents passages sont ensuite regroupés dans une seule image : les données de jour, les données de nuit.

Les images de jour et celles de nuit, prises indépendamment sont souvent entachées de nuages et ne couvrent qu'une partie de la zone. Pour y remédier, on a recours à des synthèses. L'hypothèse pour suggérer cette opération de synthèse est la relative stabilité des structures océaniques. Pour cela, un compromis a été trouvé entre la stabilité des masses d'eau et le déplacement des nuages : la synthèse consiste à prendre pour chaque pixel, la valeur maximale sur les cinq derniers jours. Les nuages dont les températures sont inférieures à celles de la surface de la mer, seront alors en grande partie éliminés et la mesure gardée correspondra à une réelle mesure et non à une moyenne calculée.

LES APERÇUS

Il s'agit d'un sous-échantillonnage des images de synthèse. Seule la valeur de 1 pixel sur 6 est gardée, verticalement et horizontalement. Dans la mesure où la donnée de départ est la synthèse et qu'on ne fait pas d'approximation, les valeurs contenues dans les aperçus indiquent là encore des mesures réelles.

Cartes de concentration de Chl-a

Les produits fournis par le site de traitement des données SeaWiFS (*SeaWiFS Data Processing System*) sont dits de niveau 3.

Le niveau 0 (*Level 0*) est la donnée brute acquise par l'antenne. Pour des raisons de volume de données et de place mémoire à bord de la plate-forme, les données enregistrées à bord sont sous-échantillonnées. Elles sont appelées les données de type *Global Area Coverage* (GAC) et leur résolution spatiale est de 4,4 km. Sur certaines zones, définies par la Nasa ou bien à la suite d'une commande, il est néanmoins possible d'obtenir des produits de type *Local Area Coverage* (LAC). Leur résolution est de 1,1 km au nadir. Les stations de réception HRPT mentionnées en début d'ouvrage ont la possibilité d'acquérir les données SeaWiFS de type LAC.

Les résultats des niveaux 1 et 2 sont des images calibrées et corrigées des effets atmosphériques. Les algorithmes appliqués permettent d'obtenir les concentrations en Chl-*a* (mg. m^{-3}), en pigments équivalent-CZCS (mg. m^{-3}) et le coefficient diffus d'atténuation à 490 nm (K_{490} en m^{-1})

Ce n'est qu'au niveau 3 qu'apparaissent les corrections géométriques. Différents produits statistiques sont proposés incluant des moyennes spatiales et temporelles. Des produits sur un jour, sur huit jours, sur un mois ou bien une année sont proposés. En ce qui concerne la résolution spatiale, la grille choisie est composée de structures élémentaires appelés *bin* et approximativement de 9 x 9 km. Ce choix résulte d'un compromis entre l'adéquation entre les phénomènes océaniques et un volume de la donnée acceptable (pour le stockage et le traitement des données). Cette grille est composée d'un nombre entier de lignes de part et d'autre de l'équateur. Compte tenu de la forme de la Terre, chaque ligne a un nombre de *bin* différent selon la latitude. La superficie des *bins* de chaque ligne sera légèrement différente mais cette différence est négligeable.

C'est ce niveau de données qui apparaît dans la base de données : des cartes *binned* de concentrations de chlorophylle-*a*.

Cartes de vorticité

Les cartes de vorticité sont issues des données des diffusiomètres d'ERS-1, ERS-2 et Quicksat. Sur des scènes de 500 km x 500 km, chaque mesure est distante de 25 km et comprend la position géographique, le module et la direction du vent. De ces mesures, les vorticités (liées à la force d'entraînement du vent) sont calculées et une synthèse glissante est réalisée sur 9 jours. Pour les données issues de Quicksat (après juin 1999), il n'est pas nécessaire d'effectuer de telle synthèse, la fauchée du capteur (près de 1 800 km) permettant la quasi complète couverture du globe.

La palette couleur est obtenue à partir des valeurs extrêmes de l'ensemble des résultats de vorticité issues des données traitées entre 1995 et 1998. Les unités spatiales de couleur bleue indiquent une force d'entraînement du vent « positive » (++++), entraînant un pompage et donc une remontée des eaux.

Cartes SLA⁴

Les produits fournis par CLS sont des fichiers texte contenant la localisation des points de mesure et l'anomalie de la hauteur de l'eau corrigée de tous les effets cités. La distance entre deux points de mesure différente est 7 km. Contrairement aux autres produits, les synthèses ne sont pas glissantes : elles sont réalisées à partir de données acquises pendant les 10 jours et la synthèse est remise à jour à la fin de cette période.

Les courants sont matérialisés par des flèches superposables sur différentes cartes (SLA, mais aussi températures de surface) : leur taille est proportionnelle à la force du courant, la direction est donnée par la direction de la flèche.

Qualité des produits fournis

Les produits fournis sont obtenus à la suite d'étapes de traitement de la donnée brute, décrites précédemment et d'étapes de création de produits plus facilement interprétables (synthèse de cartes de température de surface ou carte créée pour l'altimétrie). Gardons en mémoire toute la chronologie de la production afin de lire l'image de la façon la plus juste possible et surtout sans faire de contre-sens.

Sont aussi mises en évidence les observations des utilisateurs quotidiens des données, en particulier pour les cartes de températures de surface, et de l'équipe SEAS-IRD. L'étape d'interprétation des images est une des plus importantes car si un dysfonctionnement apparaît au cours de la chaîne quasiautomatique, il n'échappera pas à l'observateur humain. Cette étape constitue la valeur ajoutée que peut apporter l'expert.

Cette liste ne saurait être exhaustive, l'expert affine toujours sa lecture des données, de plus nous ne sommes pas à l'abri d'une mauvaise acquisition (par exemple problèmes récents dus aux dysfonctionnements de NOAA-I5). Pour chacune des données un principe de base est déjà de ne regarder une donnée d'une série que par rapport aux autres. Ainsi, un phénomène observable sur une seule image sera à interpréter avec précaution. La richesse de la base de données permet d'observer et de comparer différents paramètres lors de l'apparition d'un phénomène océanique. Là encore, la complémentarité des données facilite l'interprétation de données aberrantes.

La couleur de l'eau

Les principales sources d'erreur peuvent provenir des corrections atmosphériques. Il faut garder en mémoire que les calculs des concentrations de Chl-*a* sont précis

⁴. Sea Level Anomaly.

pour les eaux du large, en revanche, il faut se méfier des mesures réalisées près des côtes ou près des estuaires. Les recherches sont actives dans ce sens aussi bien en ce qui concerne les algorithmes de calcul, que les capteurs. Le nombre croissant de canaux dans les satellites à venir (Modis, par exemple) et la précision de la largeur des bandes permettront en particulier la quantification des autres constituants et ce de manière plus précise.

La température de surface

Il faut garder à l'esprit que sont comparées deux mesures différentes : une mesure volumique et une mesure surfacique. La température est une mesure de surface, l'information dynamique combine des phénomènes thermiques et de couche limite de surface. Les mesures réalisées en bordure du champ du satellite doivent aussi être manipulées avec précaution et ce d'autant plus qu'il ne peut y avoir de recoupement avec d'autres passages.

LES NUAGES

L'équipe de la station SEAS a choisi sciemment un seuil faible de détection des nuages. Les contours des nuages peuvent alors apparaître comme des températures plus froides au sein d'une masse d'eau. Ce phénomène s'observe très bien sur l'exemple 1 de la figure 119 (contour bleu) (cf. cahier hors-texte). Les exemples suivants illustrent d'autres cas de contamination par les nuages. L'exemple 2 montre un cas typique : la présence de nuages crée des structures linéaires plus froides. Sur le cas 3, deux « traînées » de nuages sont observables : l'une au sud de l'île de la Réunion (pointe d'« eaux froides »), l'autre au nord-ouest de Madagascar (chevelu jaune). L'exemple 4 illustre ce qu'on pourrait appeler un « coup de pinceau » : ce n'est pas un phénomène océanique tourbillonnaire, mais un ensemble de nuages très fins qui n'ont pas été détectés par le seuillage.

LES CHANGEMENTS LINÉAIRES MARQUÉS DE TEMPÉRATURE

Un autre phénomène apparaît parfois sur les données : ce sont des lignes marquées obliques de changement de température, comme illustré en figure 120 (cf. cahier hors-texte). Le phénomène ne peut se confondre avec un front thermique. Ces lignes se situent le plus souvent dans les zones extrêmes de l'aire d'acquisition : vers le canal de Mozambique, au nord et au sud de la zone. Il semble que ce soit dû à la combinaison de plusieurs facteurs.

Le principal serait une mauvaise calibration des données de jour par rapport à des données de nuit. Si les données de température de la journée ne sont pas comparées aux données de nuit (acquises par le même satellite), le phénomène de surchauffe superficiel n'est pas corrigé, il apparaîtra des zones où les températures très élevées avoisinent des températures plus faibles (corrigées). Ce défaut est de plus transmis sur cinq journées en raison du choix réalisé pour la synthèse.

La vortacité

Les paramètres qui peuvent jouer sur la précision de la mesure du vent sont les caractéristiques physico-chimiques de la masse d'eau. Une brusque chute de température ou l'apparition de films organiques superficiels ont une incidence sur la valeur de σ^0 dans des conditions identiques de vent. L'ensemble de la base de données prend ici tout son sens. En observant des cartes de température ou de couleur de l'eau avec de telles caractéristiques, l'utilisateur doit garder une certaine réserve vis-à-vis des calculs de vent et de vortacité.

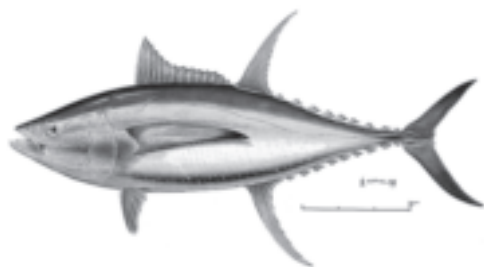
Les anomalies de surface de la mer

Les corrections sont toutes réalisées par le laboratoire CLS. Les modèles atmosphériques revêtent une importance particulière pour ces calculs et ceux-ci sont de mieux en mieux connus. Il semble néanmoins certain que les corrections seront d'autant meilleures que la zone sera idéale : absence de troposphère humide par exemple. Sur les données fournies, il faudra donc être vigilant, particulièrement pour les données de jour, l'été dans cette aire géographique. La topographie de surface de l'océan est une information « intégrée » qui représente la colonne de l'eau. Les cartes d'anomalie de surface et celles de températures de surface sont à la fois distinctes, quant aux phénomènes observés, et complémentaires. Il paraît évident que plus la date de la carte de températures de surface s'éloigne de celle de l'altimétrie et moins la correspondance sera bonne : l'océan évolue sans cesse. Les structures de petite taille ne pourront être observées sur les cartes de SLA comme cela peut-être le cas pour les cartes de températures. En revanche, le signal thermique, par échange avec l'atmosphère, aura tendance à s'affaiblir plus vite que la signature altimétrique.

2^e partie

Un logiciel d'extraction des données environnementales

MARTIN DESRUISSEAUX,
MICHEL PETIT, LAURE GARDEL



Thunnus albacares (Bonnaterre, 1788)

© P. Opic

Le prototype SEASview de SIO (Système d'information océanique) présenté ici est le résultat de plusieurs années d'étude de la station SEAS-Réunion. SEASview a été adapté aux besoins spécifiques de l'Ifremer, l'utilisateur peut afficher, à sa convenance, pour une échelle spatio-temporelle donnée, les différents paramètres océanographiques et halieutiques au sein de cartes géoréférencées sans se soucier des divers fichiers des données de base et des systèmes d'intégration nécessaires.

Le projet Palangre vise entre autres à faciliter les accès à une base de données comprenant l'ensemble des données satellitaires fournies par l'IRD et des données d'abondance fournies par l'Ifremer.

Le prototype SEASview comprend une interface de programmation d'application, API¹, pour les développeurs, sur laquelle est construite une interface graphique pour le reste des utilisateurs. Ses fonctionnalités s'apparentent aux fonctions les plus basiques trouvées dans plusieurs systèmes d'information géographiques (SIG). Le logiciel présenté ici se distingue toutefois des logiciels commerciaux sur trois aspects :

- Il met davantage l'accent sur la navigation dans le temps. La plupart des SIG commerciaux sont conçus pour le domaine terrestre, dans lequel les images sont très contrastées mais ne varient pas beaucoup d'une journée à l'autre.

1. Application Programming Interface.

Le paysage océanographique en revanche est plus nuancé et se transforme rapidement. Une telle dynamique n'est pas très bien gérée par la plupart des outils du domaine terrestre.

– Il représente les données comme des matrices de paramètres environnementaux quantifiables (température, concentration en chlorophylle-*a*, etc.) auxquels s'ajoutent quelques catégories qualitatives (nuage, terre, absence de données, etc.). La plupart des SIG commerciaux savent bien gérer séparément les paramètres quantitatifs et les catégories qualitatives, mais savent moins bien travailler sur des couches qui combinent les deux.

– Il contient quelques facilités pour croiser les données environnementales avec les données de pêches (chlorophylle-*a* aux positions de pêches, etc.).

Les images apparaissant dans l'explorateur sont le fruit de mesures satellitaires et de calculs expliqués dans les chapitres précédents. Dans tous les aspects de la navigation (sélection de la région géographique, extraction des valeurs, etc.), les valeurs des paramètres géophysiques et les coordonnées sont exprimées en unités du monde réel, jamais en indices pixels. Dans le cas des coordonnées, les unités sont les degrés de longitude et de latitude sur l'ellipsoïde WGS 1984.

Installation de l'environnement Java et configuration des sources ODBC

Le logiciel peut être exécuté sur n'importe quelle plate-forme disposant d'un environnement Java récent (Windows, Linux, Solaris, Mac OS-X...), d'un logiciel de base de données (Access, Oracle, MySQL, PostgreSQL...) et de 128 Mo de mémoire vive. L'environnement Java doit comprendre au minimum les deux modules suivants :

- *Java Runtime Environment (JRE)* version 1.4 ou ultérieure ;
- *Java Advanced Imaging (JAI)* version 1.1 ou ultérieure.

Les programmes d'installation sont fournis sur le cédérom SEASview, dans le répertoire install. Deux ensembles de programmes sont proposés : un ensemble pour client (plus compact mais ne comprenant pas les outils de développement) et un ensemble plus volumineux pour développeur. Il faut n'installer qu'un seul de ces deux ensembles ; l'ensemble pour développeur inclut déjà tout l'ensemble pour client. Les deux tableaux suivants énumèrent les programmes d'installation à exécuter dans l'ordre, selon l'ensemble choisi. L'ensemble pour développeur est nécessaire à toute la partie API (cf. *infra*)

Une fois l'installation terminée, il est prudent de vérifier qu'elle s'est correctement effectuée. Vous pouvez faire une première vérification en tapant l'instruction suivante sur la ligne de commande (par exemple dans une fenêtre MS-DOS) :

```
java -version
```

▽ **Tableau 16**

*Ensemble des programmes d'installation pour client seulement
(cédérom #1, répertoire install/JRE/windows)*

Fichiers d'installation (.exe)	Adresse internet
j2re-1_4_0-win-i	http://java.sun.com/j2se/1.4/jre/
jai-1_1_1-lib-win-jre	http://java.sun.com/products/java-media/jai/downloads/download.html dans la section « JRE Install for Windows, Solaris SPARC, Solaris x 86, and Linux »

▽ **Tableau 17**

*Ensemble des programmes d'installation pour client et développeur
(cédérom #1, répertoire install/JDK/windows)*

Fichiers d'installation (.exe)	Adresse internet
j2sdk-1_4_0-win	http://java.sun.com/j2se/1.4/
jai-1_1_1-lib-win-jdk	http://java.sun.com/products/java-media/jai/downloads/download.html dans la section « JDK Install for Windows, Solaris SPARC, Solaris x 86, and Linux »
NetBeans-release321	http://www.netbeans.org/downloads.html
Documentation (.zip)	Adresse internet
j2sdk-1_4_0-doc	http://java.sun.com/j2se/1.4/
jai-1_1_1-pdf1-doc	http://java.sun.com/products/java-media/jai/docs/index.html

Vous devriez obtenir un affichage ressemblant aux lignes suivantes :

```
java version 1.4.0
Java (TM) 2 Runtime Environment, Standard Edition (build 1.4.0)
Java HotSpot (TM) Client VM (build 1.4.0-beta3-b84, mixed mode)
```

L'affichage peut varier. L'exemple ci-dessus était pour le Java de Sun Microsystems. Le Java d'IBM donne un affichage légèrement différent, mais qui est tout aussi correct s'il indique au moins la version 1.4 (sur la première ligne). L'application du projet Palangre ne demande pas d'installation en tant que tel. Il suffit de copier le contenu du répertoire install/Palangre à n'importe quel endroit du disque dur. Ce répertoire doit contenir les fichiers suivants :

```
Palangre.jar : Le code compilé de l'application Palangre.
Images.mdb : La base de données d'images.
Pêches.mdb : La base de données des pêches.
```

Déclaration des bases de données comme source de données ODBC

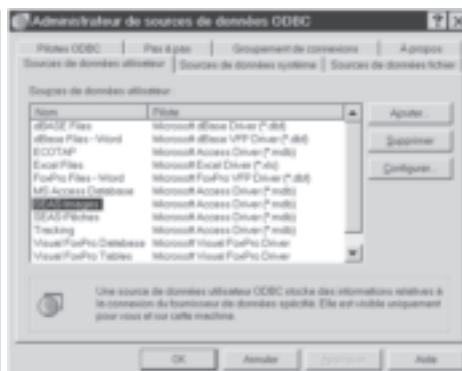
Le logiciel nécessite deux bases de données : une pour les données satellitaires et une pour les données de pêche. Leur structure sera décrite ci-après. Dans

la version actuelle, ces bases de données ont été construites avec le logiciel Microsoft Access sous Windows² et doivent être déclarées comme *Sources de données ODBC* dans le panneau de configuration de Windows.

▽ *Tableau 18*
Déclaration des bases de données.

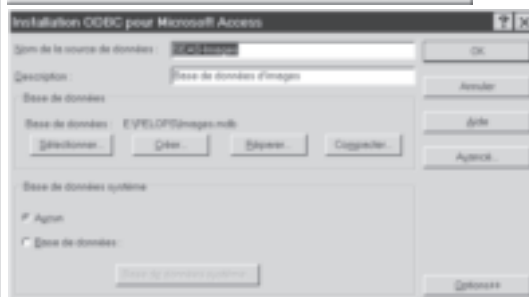
1) Ouvrez la fenêtre d'administration des sources de données ODBC :

Démarrer
Paramètres
Panneau de configuration
Source de données ODBC



2) Ouvrez la fenêtre d'ajout d'une source de données :

Ajouter
Microsoft Access driver
Terminer



1) Ouvrez la fenêtre d'administration des sources de données ODBC

Démarrer
Paramètres
Panneau de configuration
Source de données ODBC

2) Ouvrez la fenêtre d'ajout d'une source de données

Ajouter
Microsoft Access driver
Terminer

Dans le champ **Nom de la source de données**, il faut entrer **SEAS-Images** (en respectant les majuscules et les minuscules). Le contenu du champ Description est laissé libre pour y entrer les commentaires de son choix. Cliquez ensuite sur **Sélectionner** et sélectionnez le fichier **Images.mdb** (sa position sur le disque dur dépend de l'endroit où il se trouve). Cliquez enfin sur **Ok**. La même procédure

2. Nous allons probablement abandonner Microsoft Access dans un avenir proche en faveur d'un autre logiciel de base de données, peut-être MySQL ou PostgreSQL.

doit être répétée pour la base des données de pêches (**Pêches.mdb**). Elle doit être déclarée sous le nom **SEAS-Pêches**.

Configuration de l'application Java

L'application du projet Palangre doit être configurée avant qu'elle ne soit utilisable. Cette configuration consiste surtout à lui spécifier le répertoire racine des images. À partir d'une fenêtre MS-DOS, entrez les commandes suivantes en remplaçant [path] par chemin de l'application :

```
set classpath = [path]\Palangre.jar  
java fr.ird.sql.ControlPanel
```

Le tableau 19 devrait apparaître. Les informations qu'il contient sont appropriées pour les bases de données déclarées ci-dessous (Structure de la base de données satellitaires), sauf le répertoire racine des images. Remplacez ce dernier par celui qui convient pour votre système (exemple : C :/Projets/Palangre/Images) et confirmez avec le bouton **Ok**. Vous pourrez vérifier si la connexion avec la base de données fonctionne en entrant la commande suivante :

```
java fr.ird.sql.image.ImageDataBase -browse
```

▽ Tableau 19
Configuration de l'application Java.

Bases de données

Cette fenêtre vous permet de modifier les paramètres des bases de données d'images et de pêches. Modifiez ces paramètres avec prudence, car de mauvaises valeurs peuvent empêcher l'application de fonctionner, ou produire des résultats erronés.

Images

Répertoire racine:

Pilote JDBC:

Base de données:

Fuseau horaire:

Pêches

Pilote JDBC:

Base de données:

Fuseau horaire:

Structure des bases de données

Les données de pêches et les informations sur les données satellitaires apparaissent dans deux bases de données disjointes, généralement maintenues par des organismes distincts (l'Ifremer et l'IRD) et utilisables indépendamment. Ces bases de données nous servent à la fois :

- de catalogues pour recenser les données disponibles et identifier les trous ;
- de moteurs de recherche pour retrouver rapidement des images ou des données de pêches à des coordonnées spatio-temporelles arbitraires ;
- d'organismes pour construire à la volée des tableaux croisés entre les données de pêches et les données environnementales ;
- d'enregistreurs pour recevoir les résultats de calculs coûteux ou laborieux.

La base de données satellitaires ne contient pas les données environnementales elles-mêmes, mais plutôt des références vers les fichiers qui contiennent ces données. On pourrait plus pertinemment la qualifier de base de méta-données satellitaires.

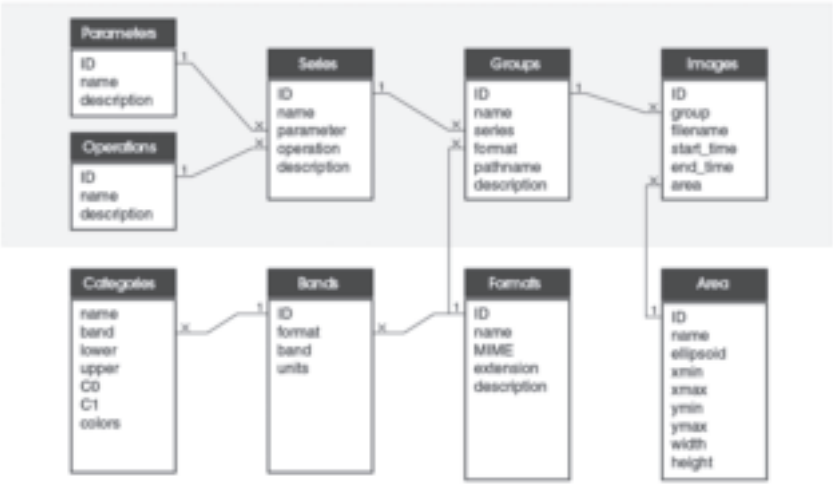
Structure de la base de données satellitaires

La base de données doit pouvoir contenir des informations sur les données de différents paramètres (température, vorticité, altimétrie, concentrations en chlorophylle-*a*...) enregistrées dans différents formats d'image, sur différents cédéroms et couvrant différentes régions géographiques. Il fallait la structurer de façon à couvrir le plus grand champ d'applications possibles sans déboucher sur un système trop compliqué. La structure retenue est bien adaptée à nos données, mais ne saurait couvrir tous les besoins. Les personnes désirant une structure beaucoup plus puissante (quitte à en payer le prix sur le plan de la complexité) sont invitées à consulter les propositions du consortium OpenGIS³.

La figure 121 illustre la structure de notre base de données. Il s'agit du minimum que s'attendra à trouver le programme Java qui l'utilisera. L'utilisateur ne devrait pas supprimer ou renommer des champs qui appartiennent à cette structure minimale. Il peut toutefois ajouter de nouveaux champs, par exemple le nom d'une personne responsable pour chaque série.

Comme toute base de données, celle-ci est composée de plusieurs tables. La table **Images** constitue le but ultime de cette base de données. Chaque image appartient (indirectement) à une série de la table **Series**, qui représente elle-même un paramètre et une opération des tables **Parameters** et **Operations**. Les tables illustrées en dessous (**Areas**, **Formats**, **Bands** et **Categories**) apportent des informations nécessaires à l'interprétation des données mais n'interviennent pas dans les regroupements des images en catégories. La liste suivante (tabl. 20) résume les fonctions de chaque table.

3. In : *OpenGIS simple features specification for SQL* dans <http://www.opengis.org/techno/specs.htm>. Nous ne nous sommes pas rapprochés davantage des spécifications d'OpenGIS, le développement d'outils GIS étant à la limite du cadre du projet Palangre. Toutefois, le respect des normes OpenGIS est un objectif majeur de tous développements futurs.



▽ Fig. 121
Structure de la base de méta-données satellitaires.

▽ Tableau 20
Les tables de la base de méta-données satellitaires et leurs fonctions.

Parameters	Liste des paramètres géophysiques (<i>température, chlorophylle, hauteur de l'eau, etc.</i>) que représentent les images.
Operations	Liste des opérations (<i>moyenne, synthèse, filtre passe-bas, etc.</i>) qui ont servi à produire les images. Cette table complète la table des paramètres pour le regroupement des images.
Series	Combinaison d'un paramètre et d'une opération, ainsi que d'autres critères laissés à la discrétion de l'utilisateur. Par exemple, la combinaison du paramètre <i>température</i> avec l'opération <i>synthèse</i> , à laquelle on ajoute le critère qu'il s'agit d'images acquises par l'antenne de l'île de la Réunion, donne la série <i>Synthèses de température autour de l'île de la Réunion</i> . Cette table serait un endroit approprié où ajouter des informations sur le capteur ou sur l'origine des images.
Groups	Les images d'une série se répartissent parfois dans plusieurs sous-groupes. La définition d'un groupe est laissée à la discrétion de l'utilisateur. Souvent, il s'agit du numéro du cédérom des images. On prend ainsi en compte le fait que les images d'une série peuvent être distribuées sur plusieurs cédéroms. Un groupe pourrait aussi correspondre à une certaine version des images. Notons que c'est à ce niveau seulement qu'apparaît la notion de fichier (son format et sa localisation). Toutes les tables précédentes faisaient abstraction de tout concept de fichiers.
Images	Liste de toutes les images répertoriées. À partir d'une image on peut remonter à son groupe, puis à sa série et enfin au paramètre qu'elle représente. Pour chaque image, nous spécifions une date de début et une date de fin d'acquisition. Pour les images de moyennes ou de synthèses, il s'agira des dates de la première et dernière image ayant servi à calculer la moyenne ou synthèse. Pour les images instantanées dont nous ignorons l'heure exacte de l'acquisition, il s'agira des dates d'une plage de temps (souvent 24 heures) qui contient l'heure à laquelle fut acquise l'image.
Areas	Coordonnées géographiques des régions couvertes par les images. Cette table complète la table Images . La version actuelle ne comprend pas encore d'informations sur les projections cartographiques utilisées, à part l'ellipsoïde.

Formats	Format des images (PCX, GIF, etc.). Cette table peut contenir des informations qui ne sont pas comprises dans le nom du fichier, par exemple le nombre de bits par données dans les fichiers binaires.
Bands	Liste des bandes apparaissant dans chacun des formats. La plupart des images du projet Palangre n'ont qu'une seule bande. Les données altimétriques constituent la principale exception, puisqu'elles forment des images à trois bandes.
Categories	Liste des catégories apparaissant dans chacune des bandes. Cette table indique comment interpréter certaines plages de pixels (<i>terre, nuages</i> , etc.). Si une plage de pixels représente les valeurs d'un paramètre géophysique, alors cette table donne les coefficients C_i de l'équation $y = C_0 + C_1x$ qui serviront à convertir les pixels en valeurs.

MISE À JOUR DE LA BASE DE DONNÉES SATELLITAIRES

Le logiciel Access n'est pas indispensable pour utiliser la base de données avec l'application Java. Son interface graphique se révèle toutefois fort utile pour les mises à jour, notamment l'ajout de nouvelles images. À l'ouverture, la base de données devrait présenter la figure 122.

La table **Series** constitue un bon exemple des liens qui existent entre les tables. Deux de ces colonnes offrent des listes déroulantes qui se réfèrent au contenu des tables **Parameters** et **Operations** (fig. 123). Avant de créer une nouvelle série, il faut d'abord vérifier si les paramètres et opérations d'intérêt figurent dans leurs tables respectives et les ajouter au besoin.

Chaque série peut contenir plusieurs groupes, pour différencier par exemple les images à haute résolution de leur aperçu. Un symbole d'expansion [+] devant chaque ligne permet d'afficher la liste des groupes pour une série (fig. 124).

Structure de la base de données des pêches

La base des données de pêches, fournie par l'Ifremer, ne contient initialement qu'une seule table. Cette table (**Captures**) comporte des coordonnées spatio-temporelles des filages ainsi que le nombre de prises par espèces. Pour le projet Palangre, nous avons ajouté quelques champs supplémentaires à la table des captures et créé deux autres tables. La figure 125 représente les tables de cette base de données ainsi que quelques-uns de leurs champs.

La table des espèces sert à traduire les codes de la FAO (par exemple SWO pour l'espadon, ALB pour le germon, etc.). Cette table doit énumérer au moins toutes les espèces qui apparaissent dans la table des captures, car le programme Java utilise cette liste pour distinguer les champs de la table **Captures** qui correspondent effectivement à des prises.

Le tableau 21 donne les principaux champs de la table des captures. Nous n'énumérons pas tous les champs correspondant aux prises par espèce. Pour nos besoins d'analyse, nous avons calculé et rajouté les champs **distance**, **distance_pêche** et **distance_côte**.

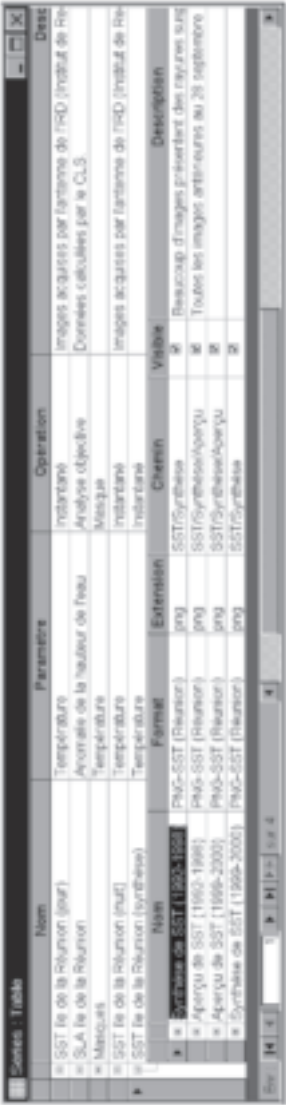
La table **Environnements** contient une sélection de paramètres géophysiques (température, anomalie de la hauteur de l'eau, etc.) associés aux pêches. Les paramètres calculés comprennent :



▽ Fig. 122 – Exemple d’affichage de base de données d’images.

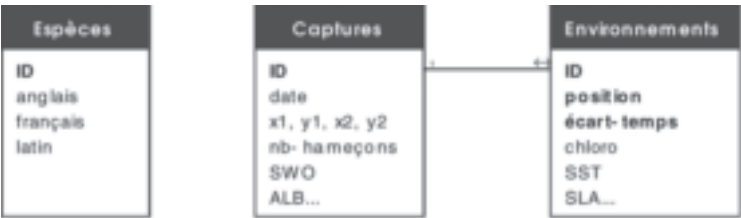


▽ Fig. 123 – Exemple d’affichage de la table série.



▽ Fig. 124 – Exemple d’utilisation des tables : liste de groupe.

- la concentration en chlorophylle-a (mg.m^{-3}) ;
- la température de surface ($^{\circ}\text{C}$) ;
- l’anomalie de hauteur de l’eau (cm) ;
- les composantes U et V du courant géostrophique (cm.s^{-1}) ;
- une estimation du pompage d’Ekman dû au vent (cm.j^{-1}) ;
- la profondeur du plancher océanique (m) ;
- une indication des gradients pour chacun des paramètres précédemment cités.



▽ Fig. 125
Structure de la base de données de pêche.

▽ Tableau 21
Les principaux champs de la table des captures et leurs fonctions.

date	La date du filage (sans indication de l'heure).
x1, y1, x2, y2	Les coordonnées de début et de fin du filage en degrés fractionnaires. Nous n'avons pas à prime abord d'indication sur la trajectoire de la ligne entre ces deux points.
droite	Une valeur booléenne (vrai/faux) indiquant si la ligne a probablement été filée en ligne droite. Cette information a été calculée par l'ifremer en estimant la longueur de la ligne à partir de la durée du filage et en comparant cette valeur à la distance entre les points de début et de fin. Les résultats ont été incorporés dans la base de données par l'IRD.
distance	La distance orthodromique entre les points de début et de fin du filage. Cette distance serait approximativement égale à la longueur de la ligne si celle-ci était filée en ligne droite (en négligeant ses variations de profondeur).
distance_pêche	La distance orthodromique la plus courte entre cette ligne et les autres lignes filées le même jour. La distance est mesurée à partir du milieu du filage, c'est-à-dire la moyenne des positions de début et de fin.
distance_côte	La distance orthodromique la plus courte entre cette ligne et la côte (incluant l'île de la Réunion, Madagascar et la côte africaine).
nb_hameçons	Le nombre d'hameçons sur la ligne de pêche.
SWO,ALB...	Le nombre d'individus capturés pour chaque espèce. La table contient de nombreux champs, mais les principaux sont SWO, ALB, YFT et BET. Ces sigles correspondent aux codes de la FAO pour l'espadon, le germon, l'albacore et le thon obèse.

Les gradients ont été estimés à l'aide de l'opération GradientMagnitude de la bibliothèque *Java Advanced Imaging* (voir ci-dessous). Ce dernier estime d'abord le gradient zonal et le gradient longitudinal à l'aide d'opérateurs de Sobel, puis calcule le module du gradient avec $\sqrt{x^2 + y^2}$

Chacun des paramètres précités et leurs gradients apparaissent dans leur propre champ (colonne) de la table des données environnementales (**Environnements**). Chacune des lignes de cette table commence par trois colonnes qui font le lien avec la table des captures (tabl. 22).

Tous les paramètres environnementaux sélectionnés ont été évalués à cinq positions sur la ligne de pêche : au début (0 %), à la fin (100 %), au milieu (50 %), au quart (25 %) et au trois quarts (75 %). Les valeurs au début et à la fin sont les plus fiables ; les autres supposent que la ligne a été filée en ligne droite. Tous ces paramètres à chacune des cinq positions ont été eux-mêmes estimés avec

▽ Tableau 22
Table des captures.

ID	L'identification du filage pour lequel les paramètres environnementaux ont été évalués. Ce numéro se réfère au champ ID de la table Captures .
position	La position sur la ligne de pêche à laquelle les paramètres ont été évalués. 0 désigne la position du début, 100 la position de fin et les autres valeurs entre 0 et 100 représentent des positions intermédiaires. Les valeurs supérieures à 100 peuvent représenter d'autres régions arbitraires (par exemple, une moyenne dans un rayon de 10 milles nautiques).
écart_temps	L'écart de temps (en nombre de jours) entre le moment de la pêche et le moment où les paramètres environnementaux ont été évalués. La valeur 0 signifie que les paramètres ont été évalués le jour même. La valeur - 5 (par exemple) signifie qu'ils ont été évalués 5 jours avant.

cinq écarts de temps différents : le jour de la pêche, cinq, dix et quinze jours avant ainsi que cinq jours après. Le tout forme un ensemble de plusieurs centaines de variables environnementales par ligne de pêche.

Aperçu de l'interface de programmation (API)

L'exploitation des données fait intervenir des accès aux bases de données, des positionnements géographiques, des traitements d'images, des analyses statistiques, de la modélisation par réseaux de neurones artificiels ainsi que de la programmation pour automatiser le tout. L'industrie informatique a standardisé les accès aux bases de données depuis plusieurs années, grâce au langage SQL⁴. Les positionnements géographiques et les traitements d'images sont aussi en voie de standardisation (notamment par le consortium OpenGIS), mais les efforts en ce sens sont beaucoup plus récents et peu intégrés dans les logiciels commerciaux actuels. Quant aux analyses statistiques et réseaux de neurones, ils ne sont pas à notre connaissance l'objet de standards informatiques. Cet API, développé pour le croisement des données, s'appuie sur les standards précédemment cités et sert lui-même de base à une application graphique. Le tableau 23 illustre les dépendances entre les principaux modules.

▽ Tableau 23
Les principaux modules de l'API développé et utilisé
(en gras la partie développée dans le cadre du projet Palangre).

Interface graphique utilisateur Moteur de croisement des données		
SQL (via JDBC)	OpenGIS	Java Advanced Imaging

4. Structured Query Language.

Les interfaces utilisateurs sont souvent des goulots d'étranglement, à la fois pour l'énergie qu'exigent leurs développements ainsi que pour les fonctionnalités forcément réduites qu'elles offrent à l'utilisateur. Ceux qui voudront tenter de nouveaux types de croisements risquent de subir les limites de l'interface utilisateur, limites dont seul un accès à l'API de programmation permet de s'affranchir.

Introduction aux spécifications OpenGIS

Le consortium OpenGIS publie un grand nombre de spécifications couvrant un vaste champ d'applications : géométrie, imagerie, échange d'informations à travers les réseaux, etc. Le respect de ces spécifications permet à des groupes de recherche *a priori* indépendants d'échanger plus facilement des informations géographiques, même s'ils utilisent des systèmes différents. Le consortium résume ainsi ses objectifs dans son site officiel :

There are many different ways to create digital representations of geospatial information. This richness of alternatives is more a curse than a blessing since it has created the confusing and apparently chaotic variety of Geographic Information System (GIS) data structures and formats now confronting GIS users. The Abstract Specification exists to bring order to this chaos.

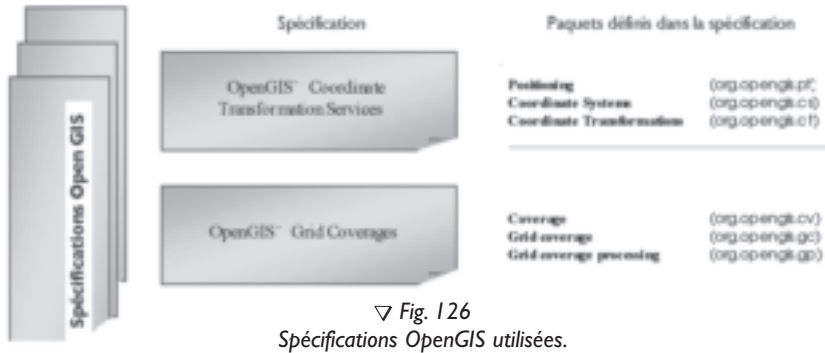
A Geospatial Information Community (GIC) is a collection of systems or individuals who can successfully share digital geospatial information, that is, features. This implies that the members of the community share common chunks of the world, definitions, interests, mutual awareness, and common technology sufficiently that they have the capability to share the information. OpenGIS Consortium is enabling GICs to articulate their domain of interest, and providing two new technologies. First, it is providing GICs with a technology that empowers them to announce the existence of themselves and their information, so that other individuals outside that GIC may discover them and assess whether there may be interest in sharing their information. Second, OpenGIS Consortium is providing GICs with technology that assists the preservation of semantics when transferring information from one GIC to another, even when the representations are very different.

This was undertaken to ensure that the OpenGIS Interoperability specification provides a low cost entry point for existing players in the GIS marketplace while allowing a natural progression towards implementations based on the increasingly popular and powerful distributed and object-oriented technologies such as Java and the Internet. In particular, care was taken to ensure that the powerful aspects of the O-O programming paradigm were exploitable through this specification.

Se familiariser avec les spécifications d'OpenGIS et les appliquer ensuite, demandent un investissement de temps considérable à court terme. La difficulté vient principalement de leur caractère récent. Peu de solutions industrielles ont eu le temps d'intégrer ces spécifications à la fin de 2001, ce qui nous obligea à implémenter nous-même les modules dont nous avons besoin. Nous croyons toutefois que c'est une approche profitable à plus long terme, puisqu'elle offrira vraisemblablement des possibilités accrues d'interactions avec les logiciels industriels du futur.

Les spécifications d'OpenGIS se divisent en un ensemble de documents (plus de 15), chaque document contenant lui-même un ensemble de « paquets ». La figure 126 illustre les deux spécifications que nous avons implémentées, ainsi que leurs paquets. Les paquets sont illustrés dans l'ordre de leurs dépendances. Par exemple, le paquet *Grid coverage* a besoin de *Coverage*, qui a lui-même besoin de *Coordinate System* et ainsi de suite jusqu'à *Positioning*, le seul paquet réellement autonome.

Chacun de ces paquets contient plusieurs classes, qui contiennent elles-mêmes plusieurs méthodes. Pour une liste exhaustive, on se référera au site officiel



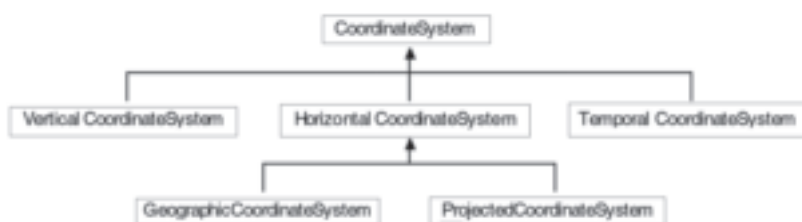
d'OpenGIS (www.opengis.org). Nous n'introduisons ici que les classes les plus importantes pour notre étude. Le lecteur averti notera que certains éléments dans les sections suivantes diffèrent légèrement de la syntaxe officielle d'OpenGIS. Ces différences résultent d'un compromis entre le respect de la spécification OpenGIS (qui se veut neutre quant au langage de programmation) et le respect des standards existants en Java. Dans les cas où ne peut être toléré aucun écart vis-à-vis de la norme OpenGIS (par exemple lors d'interactions avec des logiciels commerciaux), une série d'adaptateurs permet de faire les conversions dans les deux sens entre nos classes modifiées et les classes strictement OpenGIS. Nos classes modifiées ont pour racine le paquet `net.seas.opengis`, alors que les classes officielles restent dans `org.opengis`.

SYSTÈMES DE COORDONNÉES (PAQUET `opengis.cs`)

Tous les systèmes de coordonnées sont représentés par une sous-classe de `CoordinateSystem`. Chacune de ces sous-classes représente un système de coordonnées simple. Par exemple, la sous-classe `VerticalCoordinateSystem` représente un système avec une seule dimension le long de l'axe vertical, tandis que `HorizontalCoordinateSystem` représente un système à deux dimensions dans le plan horizontal. Un système de coordonnées arbitraire peut être construit par l'assemblage de deux ou plusieurs autres systèmes de coordonnées. Par exemple, on peut construire un système à trois dimensions en assemblant `HorizontalCoordinateSystem` et `VerticalCoordinateSystem`. La figure 127 illustre la hiérarchie des principales classes.

Une multitude de combinaisons est possible, du fait qu'il existe plusieurs systèmes de coordonnées de chaque type (vertical, horizontal et temporel). Par exemple, un système vertical qui mesure les hauteurs avec un baromètre n'est pas identique à un système qui mesure les hauteurs avec un GPS⁵. Un système temporel utilisant l'heure UTC n'est pas identique à un autre système utilisant

5. *Global Positioning System*.



▽ Fig. I 27

Hiérarchie des principales classes de systèmes de coordonnées.

l'heure GMT⁶. Enfin, deux systèmes horizontaux peuvent différer par l'ellipsoïde de référence qu'ils utilisent. Ces détails sont précisés par un ensemble de classes secondaires (Datum, Ellipsoid, Projection, etc.).

Dans le cadre du projet Palangre, nous positionnons les données satellitaires dans un système de coordonnées à trois dimensions, soit dans l'ordre la longitude, la latitude et le temps. Il s'agit donc d'un assemblage de `GeographicCoordinateSystem` avec `TemporalCoordinateSystem`. Les angles sont mesurés en degrés sur l'ellipsoïde WGS 1984⁷, tandis que le temps est mesuré en jours écoulés depuis le 1^{er} janvier 1950 à 00 h 00 UTC. Si des transformations de coordonnées sont nécessaires, elles seront effectuées à la volée. Cela s'applique notamment à l'axe du temps, puisque les bases de données et le Java ont déjà leur propre type `Date`.

TRANSFORMATIONS DE COORDONNÉES (PAQUET `opengis.ct`)

Chaque système de coordonnées (`CoordinateSystem`) ignore l'existence des autres. Les transformations sont effectuées par une autre classe, `CoordinateTransform`⁸, qui sert d'intermédiaire entre deux `CoordinateSystems`. Les transformations sont obtenues indirectement, en utilisant encore une autre classe (`CoordinateTransformFactory`) qui sert en quelque sorte d'usine à fabriquer des transformations. La procédure à suivre à cet effet est la suivante :

- Obtenir un premier objet `CoordinateSystem` représentant le système d'origine (source)

6. L'heure UTC (Universal Time Clock) est basée sur une horloge atomique, tandis que l'heure GMT (Greenwich Mean Time) est basée sur des observations astronomiques. L'heure GMT ralentit et s'accélère d'une manière compliquée en fonction de l'orbite terrestre, tandis que l'heure UTC est régulière. De temps à autre, l'heure UTC est synchronisée sur l'heure GMT par l'introduction d'une seconde supplémentaire à la fin de certaines années (par exemple, la dernière minute de l'année 1995 était longue de 61 secondes). Les systèmes GPS sont synchronisés sur l'heure UTC, mais sans la seconde supplémentaire ajoutée à la fin de certaines années (de sorte que l'heure des systèmes GPS s'écarte progressivement de l'heure UTC).

7. Sauf les données dérivées de l'altimétrie, qui utilisent leur propre ellipsoïde. Toutefois, l'ellipsoïde utilisé pour les données de Topex/Poséidon étant très proche de l'ellipsoïde WGS 1984, la version actuelle du logiciel ignore la différence.

8. Les classes décrites dans cette section diffèrent légèrement de la spécification d'OpenGIS. La principale différence concerne la classe `CoordinateTransform`, que nous avons positionnée comme une sous-classe de `MathTransform` et renommée pour refléter ce changement (le nom utilisé dans la spécification d'OpenGIS était `CoordinateTransformation`). Mais le principe reste identique.

- Obtenir un second objet `CoordinateSystem` représentant le système désiré (target)
- Donner ces deux systèmes de coordonnées à `CoordinateTransformFactory`⁹. Cette dernière les analysera et, si elle détermine qu'une transformation est possible, produira un objet `CoordinateTransform` qui permettra de passer du système source vers le système target.
- Utiliser l'objet `CoordinateTransform` obtenu pour transformer autant de coordonnées que l'on veut. La transformation se fera toujours entre les deux systèmes de coordonnées précités. Pour changer de transformation, il faut recommencer la procédure.

Le développeur trouvera les détails de ces opérations dans la documentation *Javadoc* (un ensemble de pages HTML). Dans le cadre du projet Palangre toutefois, il aura rarement besoin d'effectuer lui-même des transformations de coordonnées.

MATRICES DE DONNÉES (PAQUET `opengis.gc`)

Toutes les données représentables sur une grille régulière (par exemple, une image) sont gérées par la classe `GridCoverage`. Les données qui ne sont pas nécessairement distribuées sur une grille régulière sont représentées par la classe plus générale `Coverage`, que l'on pourrait traduire par « couverture » au sens large. Les couvertures, régulières ou pas, possèdent toutes au moins les propriétés suivantes :

- Un système de coordonnées (`CoordinateSystem`) qui s'applique à l'enveloppe (voir le point suivant) ainsi qu'à toutes les coordonnées utilisées avec cette couverture. Le développeur ne travaillant qu'avec les données du projet Palangre peut s'épargner la peine de vérifier le système de coordonnées de chaque couverture, puisque nous utilisons un système assez uniforme (voir ci-dessous). Mais il ne pourra plus ignorer cette information si les données du projet Palangre sont croisées avec encore d'autres sources de données.
- Une enveloppe (`Envelope`) qui donne les coordonnées extrêmes de la couverture. Cette enveloppe doit avoir le même nombre de dimensions que le système de coordonnées. Dans le projet Palangre, chaque couverture (ou image) possède une enveloppe à trois dimensions qui donne dans l'ordre : la longitude minimale et maximale, la latitude minimale et maximale, ainsi que la date de début et de fin de l'image.
- Au moins une bande (`SampleDimension`¹⁰), parfois plusieurs. Chaque bande contient une mesure géophysique (par exemple, la température) à la position de chaque pixel. Les images du projet Palangre n'ont chacune qu'une seule bande, sauf les images dérivées des données altimétriques qui en ont trois (l'anomalie de la hauteur de l'eau ainsi que les composantes U et V du courant géostrophique).

9. Plus spécifiquement à sa méthode `createFromCoordinateSystems(...)`.

10. OpenGIS préfère le terme *sample dimension* plutôt que *band* parce que le terme *band* se réfère trop spécifiquement à l'imagerie satellitaire, alors que les données pourraient avoir une autre origine (par exemple, un modèle numérique).

La classe `Coverage` (dont hérite `GridCoverage`) dispose de méthodes `evaluate` qui permettent d'obtenir la valeur des paramètres géophysiques à une coordonnée quelconque. À chaque appel d'une méthode `evaluate`, les valeurs sont calculées pour toutes les bandes et retournées dans un tableau. Si l'image n'a qu'une seule bande, la longueur de ce tableau sera instanciée 1. L'encadré ci-après est extrait de la documentation *Javadoc* qui donne la signature de la méthode ainsi que sa spécification.

`evaluate`

`public float[] evaluate` (*CoordinatePoint coord*, *float[] dest*)

Returns a sequence of float values for a given point in the coverage. A value for each sample dimension is included in the sequence. The default interpolation type used when accessing grid values for points which fall between grid cells is nearest neighbor. The coordinate system of the point is the same as the grid coverage coordinate system.

Parameters : *coord*- The coordinate point where to evaluate.
 dest- An array in which to store values, or null to create a new array.
 If non-null, this array must be at least
 `getSampleDimensions ().size ()` long.

Returns : The *dest* array, or a newly created array if *dest* was null.

Throws : *PointOutsideCoverageException* if *coord* is outside coverage.

Pour le projet Palangre, la méthode `evaluate` retourne toujours les valeurs géophysiques des paramètres (par exemple, une température en degrés Celsius), jamais les valeurs entières des pixels. Les conversions sont faites à la volée. Si la donnée est manquante (par exemple, si la coordonnée spécifiée tombe sur un nuage ou sur la terre ferme), alors la valeur retournée est NaN (*Not-a-Number*). Les valeurs NaN du Java ont plusieurs propriétés utiles pour les traitements d'images, parmi lesquelles :

- Toute opération arithmétique faisant intervenir une valeur NaN produit un résultat NaN. Ainsi, il est possible d'appliquer des algorithmes déjà existants sur une image sans crainte d'obtenir des pixels aberrants, résultant par exemple de l'addition d'une valeur de température avec un nuage. Si une des données était NaN (le nuage), le résultat sera automatiquement NaN quelle que soit la valeur de température.
- Plusieurs valeurs NaN sont possibles. On peut avoir une valeur NaN pour les nuages et une autre pour la terre. Il est ainsi possible de continuer à distinguer les nuages de la terre même si les images résultent d'un calcul (par exemple, une convolution).

Notre logiciel effectue les conversions des valeurs de pixels en valeurs géophysiques et inversement, grâce à une liste de `Category` gérée par la classe `CategoryList`. Ce sont ces mêmes classes qui permettent à notre logiciel de s'y retrouver parmi les différentes valeurs NaN. La création de ces deux classes est l'ajout le plus significatif que nous ayons fait par rapport à la spécification d'OpenGIS. La spécification officielle d'OpenGIS prévoit en effet la répartition des valeurs de pixels en catégories, mais ne représente ces catégories que par du texte (par exemple forêt, zone urbaine, etc.), dans la plus pure tradition des

SIG commerciaux dédiés au domaine terrestre. Pour le milieu océanique, cela ne suffit pas. Nos images mélangent à la fois des catégories *qualitatives* (nuage, terre, etc.) et des catégories *quantitatives* (température, etc.). Il nous faut donc des structures plus complexes capables de distinguer les deux types de catégories et d'effectuer des conversions adaptées à chacune.

OPÉRATIONS SUR LES MATRICES DE DONNÉES (PAQUET `opengis.gp`)

Le calcul effectué par les méthodes `evaluate` peut être modifié. Par exemple, au lieu de retourner la valeur du pixel sous la coordonnée spécifiée, elles pourraient effectuer une interpolation, calculer le gradient en utilisant les pixels environnants, etc. Ces opérations peuvent être appliquées à des données en utilisant la classe `GridCoverageProcessor`. Cette dernière opère en utilisant les informations suivantes :

- L'opération à appliquer. Il peut s'agir d'un nom (par exemple, `GradientMagnitude`). La liste des opérations disponibles apparaît dans la documentation *Javadoc*.
- Une liste de paramètres (`ParameterList`). Le contenu de cette liste dépend de l'opération à appliquer, mais devrait contenir au moins l'objet `GridCoverage` source.

Le résultat est un nouveau jeu de données `GridCoverage` qui contiendra le résultat de l'opération demandée. Les données originales (c'est-à-dire l'objet `GridCoverage` source) ne sont jamais modifiées. Retenir à la fois les jeux de données originaux et modifiés peut ressembler à un gaspillage de mémoire, mais dans la pratique `GridCoverageProcessor` ne calcule pas immédiatement le résultat de l'opération. Il construit plutôt une chaîne de traitements qui calculera les données à la volée, seulement lorsqu'elles seront nécessaires.

Techniquement, `GridCoverageProcessor` s'appuie sur la bibliothèque *Java Advanced Imaging* pour effectuer les opérations. Cette bibliothèque de Sun Microsystems est conçue pour les traitements d'images en général, que ce soit dans le domaine satellitaire, médical ou astronomique. Son lot d'opérations, déjà assez riche, est utilisable avec `GridCoverageProcessor`. Nous ne faisons qu'y ajouter la notion de positionnement géographique propre aux SIG.

APPELS À DISTANCE AVEC LA TECHNOLOGIE RMI (*REMOTE METHOD INVOCATION*)

OpenGIS a conçu ses spécifications dans l'esprit d'une organisation où les données et les calculs seraient distribués sur plusieurs machines distantes. Les technologies utilisées à cet effet (CORBA en C/C++, RMI en Java) placent des contraintes qui peuvent être pénibles lorsque l'on ne travaille que sur un poste local. Nous avons recherché un compromis en ne prenant en compte la technologie RMI qu'au niveau des adaptateurs qui font le lien entre les interfaces standards (`org.opengis`) et nos classes modifiées (`net.seas.opengis`). De cette architecture, on peut déduire les lignes directrices suivantes :

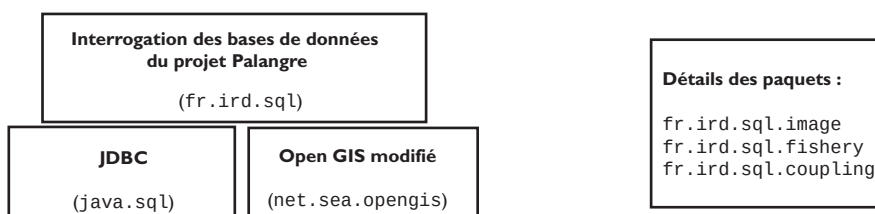
- Pour une utilisation plus aisée en local et une meilleure intégration avec les standards existants de Java, vous pouvez utiliser les classes des paquets `net.seas.opengis`.

– Pour un respect strict des spécifications d'OpenGIS, ou pour une utilisation distribuée à travers un réseau, utilisez les interfaces standards des paquets `org.opengis`.

Ce bref aperçu des spécifications d'OpenGIS sert essentiellement à introduire les notions nécessaires à la compréhension de ce qui suit.

Accès aux bases de données environnementales et de pêches

En utilisant comme brique de base le standard JDBC¹¹ pour les connections aux bases de données et le standard OpenGIS pour les représentations spatiales, nous avons bâti une interface API facilitant l'exploitation des données environnementales et de pêches (fig. 128). Chaque base de données dispose d'un jeu de classes dans un paquet qui lui est propre (`image` et `fishery` dans le cadre de droite). Un troisième paquet (`coupling`) fournit quelques utilitaires pour effectuer des croisements entre les deux bases de données.



▽ Fig. 128
Schéma de l'interface API réalisée.

Ces paquets tentent de fournir une interface API de haut niveau qui ne nécessite pas de connaissance du langage SQL. L'utilisateur interroge l'API en spécifiant les coordonnées spatio-temporelles des données qui l'intéressent, l'opération qu'il veut appliquer, etc. L'API construit des requêtes SQL en fonction de ces demandes, procède automatiquement à la lecture des images lorsque c'est nécessaire et construit lui-même les objets OpenGIS correspondants (notamment `GridCoverage`, qui est d'une construction assez laborieuse).

OBTENTION DES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES (PAQUET `fr.ird.sql.image`)

Toutes les données environnementales sont accessibles par la méthode « *evaluate* » décrite *supra*. Cette méthode évalue toujours une valeur dans un objet `Coverage` donné. De cet objet dépend le paramètre évalué (température, courants, etc.), l'opération (valeur interpolée, gradient, etc.) ainsi que la date des données. Les classes décrites ici ont pour but ultime de produire des objets `Coverage` en fonction de critères simples et en puisant les informations nécessaires dans la base de données d'images. Ces classes s'enchaînent dans

¹¹ Java Database Connectivity.

une suite d'opérations qui font intervenir plusieurs tables, mais la séquence principale peut être résumée comme suit :

ImageDataBase fi ⇒ ImageTable ⇒ ImageEntry ⇒ GridCoverage

La classe ImageDataBase représente une connexion à la base de données d'images. Un seul objet de cette classe suffit pour une session de travail. Un objet ImageDataBase peut produire un ou plusieurs objets ImageTable. Chaque objet ImageTable est une vue sur la table **Images** de la base de données (voir plus haut). Cette vue peut être modifiée en fonction de différents paramètres, par exemple les coordonnées spatio-temporelles de la région d'intérêt. Les objets ImageTable peuvent eux-mêmes produire un ou plusieurs objets ImageEntry, qui représentent chacun une entrée (ou ligne) de la table des images. On peut considérer un objet ImageEntry comme une *référence* vers une image, plutôt que l'image elle-même. Les données de l'image ne sont chargées par ImageEntry que sur demande et retournées sous forme d'objets GridCoverage. Le tableau 24 illustre les classes que nous venons d'énumérer.

▽ Tableau 24
Illustration du séquençage des classes.



Les paragraphes suivants expliquent pas à pas les lignes de code qui doivent être écrites pour accéder à des données à partir d'un programme Java. La première étape est d'obtenir une connexion avec la base de données. Cette étape n'a besoin d'être faite qu'une fois pour toutes au début d'une session de travail.

```
ImageDataBase database = new ImageDataBase ()
```

Les connexions établies de cette façon utilisent la configuration spécifiée plus haut. Si la configuration par défaut ne convient pas, `ImageDataBase` dispose d'un autre constructeur permettant de spécifier explicitement le nom de la base de données, le nom de l'utilisateur et un mot de passe. À partir de cette connexion, on obtient une vue de la table **Images** pour un paramètre donné.

```
ImageTable imageTable = database.getImageTable (SST (synthèse))
```

La ligne précédente construisait une table pour les images de température. Le texte spécifié en argument doit être un des noms qui apparaissent dans la table **Séries** de la base de données. Typiquement, on répètera cette ligne plusieurs fois pour construire plusieurs tables, une pour chaque paramètre d'intérêt. Par défaut, ces tables couvrent toute la plage de coordonnées spatio-temporelles disponibles avec la résolution maximale disponible. Il est possible de se restreindre à une région d'intérêt plus réduite. L'exemple suivant sélectionne une région autour de l'île de la Réunion allant de 50 à 60° E et 15 à 25° S pour la période du 24 au 29 août 1998. Les quatre premières lignes ne font intervenir que des classes de la bibliothèque standard du Java.

```
DateFormat parser = DateFormat.getDateInstance (Locale.FRANCE)
```

```
Date startTime = parser.parse (24/ 08/19)
```

```
Date endTime = parser.parse (29/ 08/19)
```

```
Rectangle2D area = new Rectangle2D.Double (50, -25, 10, 10)
```

```
imageTable.setTimeRange (startTime, endTime)
```

```
imageTable.setGeographicArea (area)
```

Si l'on souhaite non pas la valeur du paramètre, mais plutôt le résultat d'une opération (par exemple, le gradient du paramètre), on peut spécifier le nom de l'opération désirée. Cette opération sera transmise automatiquement à `GridCoverageProcessor` le moment venu. L'exemple ci-dessous demande un calcul de gradient en utilisant les opérateurs horizontaux et verticaux de Sobel.

```
imageTable.setOperation (GradientMagnitude)
```

Maintenant que la table est configurée, on peut demander les images qui interceptent les coordonnées spatio-temporelles spécifiées. Deux méthodes existent à cet effet : `getEntries` retourne la liste de toutes les images qui interceptent la région et la plage de temps, tandis que `getEntry` sélectionne une image parmi les candidates. La sélection se fait en privilégiant celle qui couvre le mieux et est la mieux centrée sur la plage de temps spécifiée (les critères exacts sont

détaillés dans la documentation *Javadoc*, classe `ImageComparator`). L'exemple suivant utilise une première méthode.

```
ImageEntry entry = imageTable.getEntry ()
```

Cette méthode est souvent utilisée en couple avec `setTimeRange` et spécifie une courte plage de temps (correspondant par exemple à une pêche), demande la meilleure image correspondante, change la plage de temps, redemande une nouvelle image, etc. Les autres paramètres de `ImageTable` n'ont pas besoin d'être respécifiés à chaque fois s'ils ne changent pas.

`ImageEntry` n'est qu'une référence vers une image. Elle permet de connaître quelques propriétés de l'image (dates exactes, nom de fichier, format, etc.) sans procéder immédiatement à sa lecture. Le chargement des données, s'il est nécessaire, n'est effectué qu'au stade suivant (code ci-dessous). En outre, un système de caches permet à `ImageEntry` d'éviter de faire des lectures redondantes si l'image se trouve déjà en mémoire. Le programmeur n'a donc pas besoin de maintenir un bilan des images qu'il a déjà lues ; c'est fait automatiquement.

```
GridCoverage coverage = entry.getGridCoverage (1)
```

L'argument (`null` dans cet exemple) permet à ceux qui le désirent, de suivre les progrès d'une éventuelle lecture. Si la lecture a réussi, l'utilisateur peut maintenant extraire les données en utilisant la méthode `evaluate` plus haut. L'exemple ci-dessous utilise une boucle pour afficher les valeurs de la première bande (numérotée 0) à différentes longitudes le long de la latitude 22° 30' S. Le même tableau est réutilisé à chaque passage dans la boucle pour plus d'efficacité, écrasant les anciennes valeurs. Par défaut, les valeurs sont interpolées en utilisant une interpolation bi-cubique¹².

```
float[] values = null
Point2D coord = new Point2D.Double ()13
for (double x=55.0 ; x<=60.0; x+=0.5)
{
    coord.setLocation (x, -22.5)
    values = coverage.evaluate (coord, values)
    System.out.println (values[0])
}
```

INTERPOLATIONS DES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES DANS LE TEMPS

La méthode décrite dans la section précédente permettait d'obtenir les données environnementales correspondant à une image. Une interpolation était faite dans l'espace, mais pas dans le temps. Cette section introduit une deuxième méthode plus simple qui ajoutera en plus cette interpolation dans le temps.

¹². Si l'interpolation bi-cubique échoue parce qu'un nuage masquait des pixels environnants, la méthode se rabat sur une interpolation bi-linéaire. Si cette dernière échoue aussi, alors cette méthode retourne la valeur du plus proche voisin.

¹³. Dans cet exemple, nous ignorons la troisième dimension (le temps) puisque nous travaillons sur une seule image. Nous pouvons utiliser dans ce cas-ci un objet `Point2D` plutôt qu'un objet `CoordinatePoint` plus général.

Le début de la procédure est le même, il faut configurer un objet `ImageTable` avec le paramètre, l'opération et les coordonnées spatio-temporelles désirés. Par la suite, au lieu d'extraire des images individuelles avec les méthodes `getEntry` ou `getEntries`, on peut confier plutôt cette tâche à un objet `Coverage3D`, qui nous donnera une vue à trois dimensions des données.

```
Coverage3D coverage3D = new Coverage3D (imageTable)
```

`Coverage3D` est une extension de la classe `Coverage` d'`OpenGIS`, adaptée à l'API décrit plus haut. À partir du moment où il est construit, on peut oublier la table et fermer complètement la connexion avec la base de données. L'extraction des valeurs se fait en spécifiant les coordonnées spatio-temporelles désirées, sans se soucier de savoir sur quelles images elles se trouvent. Les valeurs sont interpolées à la fois dans l'espace et dans le temps, toujours à la condition qu'il n'y ait pas de trous dans les données. L'exemple ci-dessous interpole la donnée du 27 août 1998 à la coordonnée 55° E, 20° S. Nous réutilisons les mêmes objets `parser` et `values` que dans les exemples précédents.

```
Date time = parser.parse(27 08/19)
```

```
Point2D point = new Point2D.Double (55,20)
```

```
values = coverage3D.evaluate (point, time, values)
```

OBTENTIONS DES DONNÉES DE PÊCHES (PAQUET `fr.ird.sql.fishery`)

Les données de pêches s'obtiennent d'une façon tout à fait similaire aux trois premières étapes de l'obtention des données environnementales. Il faut d'abord obtenir une connexion avec la base de données des captures (indépendamment de la base de données d'images), une table des captures et enfin les données des captures. Les classes impliquées s'enchaînent comme suit :

`CatchDataBase` ⇒ `CatchTable` ⇒ `CatchEntry`

Comme pour les images, la première étape est d'obtenir une connexion avec la base de données. Cette étape n'a besoin d'être faite qu'une fois pour toutes au début d'une session de travail.

```
CatchDataBase database = new CatchDataBase ()
```

D'autres constructeurs sont disponibles si l'on souhaite spécifier un nom d'utilisateur et un mot de passe. L'étape suivante est d'utiliser cette connexion pour obtenir une vue de la table **Captures**.

```
CatchTable catchTable = database.getCatchTable (Captures)
```

Le texte spécifié en argument donne le nom de la table à examiner. Pour le projet Palangre, il n'y a qu'une seule table des captures. D'autres projets pourraient toutefois utiliser plusieurs tables distinctes, par exemple une table pour les captures à la palangre et une autre pour les captures à la senne. Par défaut, ces tables couvrent toute la plage de coordonnées spatio-temporelles disponibles. Il est possible de se restreindre à une région d'intérêt plus réduite en procédant exactement de la même façon que pour les images. L'exemple suivant sélectionne une plage de temps allant du 24 au 29 août 1998.

```
DateFormat parser = DateFormat.getDateInstance (Locale.FRANCE) ;  
Date startTime = parser.parse (24/ 08/19)  
Date endTime = parser.parse (29 08/19)  
catchTable.setTimeRange (startTime, endTime)
```

Une fois la table configurée, on peut demander les captures qui interceptent les coordonnées spatio-temporelles spécifiées. La méthode `getEntries` retourne la liste de toutes les captures qui répondent aux conditions, comme dans l'exemple suivant :

```
List catches = catchTable.getEntries ()
```

La liste ne contient que des objets `CatchEntry`. Ces derniers représentent des captures à une certaine date dans une région géographique. Dans le cas des données palangrières, chaque objet `CatchEntry` correspond à une ligne de palangre mise à l'eau et récupérée. Ces objets contiennent entre autres les fonctions suivantes :

getCoordinate ()

Retourne une coordonnée géographique représentative de la capture. Pour les palangres, c'est généralement la coordonnée du milieu de la ligne.

getShape ()

Retourne une forme géométrique représentative de la zone de pêche. Pour les palangres, c'est généralement un objet `Line2D` représentant une ligne droite reliant la position de début à la position de fin de la ligne. Cette forme n'est qu'approximative et peut être plus complexe qu'une simple ligne si davantage d'informations sont disponibles.

getTime ()

Retourne une date représentative de la capture. Dans le cas des données du projet Palangre, l'heure de l'objet `Date` retourné n'est pas significative.

getCatch (Species)

Retourne les captures pour une espèce donnée (spécifiée en argument). La méthode `getUnit ()` doit être interrogée pour connaître les unités. Il pourrait s'agir du nombre d'individus, du tonnage ou de n'importe quelles autres unités valides. Les données du projet Palangre utilisent toujours le nombre d'individus par 1 000 hameçons.

CROISEMENT ENTRE LES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES ET HALIEUTIQUES

Les API décrites dans les sections précédentes offrent déjà les fonctionnalités nécessaires au croisement des données. À partir d'une donnée de pêche, on peut facilement obtenir les données environnementales à la position correspondante. Le croisement des données étant un aspect essentiel du projet Palangre, quelques classes supplémentaires sont tout de même dédiées exclusivement à cette tâche. Ces classes supplémentaires sont regroupées dans le paquet `fr.ird.sql.coupling`. Ce dernier combine les usages des deux paquets indépendants introduits dans les sections précédentes (`fr.ird.sql.image` et `fr.ird.sql.fishery`)

CatchCoverage

La classe `CatchCoverage` hérite de la classe `Coverage3D` introduite plus haut. Elle y ajoute une méthode `evaluate` qui reçoit en argument une donnée de capture `CatchEntry`. Cette méthode détermine elle-même la date et les coordonnées géographiques des données environnementales à rechercher, en fonction de la donnée de capture spécifiée. Contrairement aux autres méthodes `evaluate`, celle de `CatchCoverage` est capable d'évaluer les paramètres environnementaux dans une région géographique autour de la capture plutôt qu'en un seul point. Elle peut calculer par exemple la température moyenne ou le gradient maximal trouvé dans un rayon de 10 milles nautiques autour de la capture. La forme de la région géographique peut dépendre de la capture. Par exemple, dans le cas d'une ligne de palangre, la région géographique pourrait être une ellipse dont les foyers coïncident avec le début et la fin de la ligne de pêche. Une telle ellipse peut être un compromis tenant compte du fait que l'on ne connaît pas exactement la trajectoire de la ligne entre ces deux points.

CatchTableFiller

La classe `CatchTableFiller` examine les coordonnées de début et de fin des lignes de palangres pour calculer la distance orthodromique entre ces deux points, la distance minimale d'avec les autres lignes du même jour et la distance minimale de la côte. Ces informations sont enregistrées dans les colonnes correspondantes de la table **Captures** de la base de données des pêches.

EnvironmentTableFiller

La classe `EnvironmentTableFiller` extrait les données environnementales aux positions de pêches 15, 10 et 5 jours avant le jour de la pêche et 5 jours après. Les informations trouvées sont enregistrées dans les colonnes correspondantes de la table **Environnements** de la base de données des pêches.

Les classes `CatchTableFiller` et `EnvironmentTableFiller` sont toutes deux des applications. C'est-à-dire qu'elles sont tout en haut d'une chaîne de traitement et qu'elles ont une méthode `main` qui permet de les lancer à partir d'une ligne de commande. Ces deux classes sont relativement simples, puisque la complexité du travail est distribuée dans toutes les autres classes décrites depuis le début. En conséquence, les développeurs qui souhaiteraient effectuer des calculs différents sont invités à modifier le code de ces deux classes `TableFiller`. Cette approche laisse une liberté considérablement plus grande que tout ce que permettraient des boîtes de dialogues.

Enregistrements des activités dans un journal

Les méthodes décrites plus haut génèrent des événements qui peuvent être enregistrés dans un journal. Ce journal remplit deux fonctions. Il sert d'abord d'accusé de réception pendant le calcul, vous confirmant que chacune des instructions décrites dans les chapitres précédents a bien été exécutée. Il sert aussi d'archive *après* le calcul, au cas où l'on voudrait vérifier les opérations qui ont été effectuées. Les journaux sont gérés et documentés par le Java standard.

Les événements se déclinent en plusieurs niveaux. En allant du plus « sévère » (et rare) au plus détaillé (et abondant), on compte les niveaux SEVERE, WARNING, INFO, CONFIG, FINE, FINER et FINEST. Les méthodes qui modifient l'état d'une table (par exemple, pour spécifier des coordonnées spatio-temporelles) génèrent des événements de niveau CONFIG. Les méthodes qui extraient des données d'une table génèrent des événements de niveau FINE (ces événements étant généralement plus abondants que la configuration d'une table, ils doivent être d'un niveau inférieur).

Par défaut, le Java enregistre les événements dans un fichier XML et en filtre une partie qu'il envoie à l'écran. Seuls les événements de niveau INFO ou supérieur apparaissent à l'écran. Cette configuration par défaut peut être modifiée en éditant le fichier `jdk1.4/jre/lib/logging.properties` (le chemin exact dépend du système). Pour autoriser l'affichage des événements décrits dans les sections précédentes, il faut ajouter ou modifier les lignes sur- et soulignées ci-dessous.

```
-  
# Handler specific properties.  
# Describes specific configuration info for Handlers.  
-  
# Limit the messages that are printed on the console to FINE and above.  
java.util.logging.ConsoleHandler.level = FINE  
java.util.logging.ConsoleHandler.formatter = java.util.logging.SimpleFormatter  
  
-      -  
# Facility specific properties.  
# Provides extra control for each logger.  
-  
fr.ird.level = FINE
```

Affichages graphiques des données

Certains objets peuvent être représentés graphiquement à l'écran. Les capacités d'interactions avec l'utilisateur sont limitées, puisqu'il ne s'agit pas de dupliquer ici les fonctionnalités des logiciels commerciaux.

AFFICHER GRAPHIQUEMENT LA LISTE DES IMAGES ET SÉRIES DISPONIBLES

On peut afficher le contenu d'une table `ImageTable` en l'enveloppant dans une composante graphique `Swing`. L'exemple ci-dessous configure une composante `Swing JTable` à partir des données de la table d'images utilisée dans les exemples précédents. Cette vue de la table représentera en bleu les images qui ont déjà été lues et en rouge les images qui n'ont pas été trouvées. Cette coloration est dynamique dans le sens que si une des images est lue (même à travers un réseau), la ligne correspondante de la table prendra automatiquement la couleur bleue sans que le programmeur n'ait à s'en soucier.

```
TableCellRenderer renderer = new ImageTableModel.CellRenderer ()  
JTable tableView = new JTable (new ImageTableModel (imageTable))  
tableView.setDefaultRenderer (String.class, renderer)  
tableView.setDefaultRenderer (Date.class, renderer)
```

Nous ne détaillons pas l'API utilisé, car il n'est pas de notre ressort d'expliquer l'architecture de *Swing*. Il existe déjà de nombreux ouvrages à cette fin. Le prochain exemple construit l'arborescence des séries disponibles dans une composante *Swing JTree*.

```
SeriesTable seriesTable = database.getSeriesTable ()
TreeModel tree = seriesTable.getTree (SeriesTable.SERIES_LEAF)
JTree treeView = new Jtree (tree)
```

AFFICHER GRAPHIQUEMENT UNE IMAGE ET LES PÊCHES CORRESPONDANTES

Le principe utilisé est le même que celui des logiciels commerciaux : on commence avec une fenêtre vide, qui agit comme un réceptacle sur lequel on superpose une ou plusieurs couches. La fenêtre vide est une composante *Swing* que nous avons créée : *MapPanel*. Cette composante prend en charge la gestion des zooms et connaît le système de coordonnées de l'affichage, qui n'est pas nécessairement le même que celui des données.

Les couches sont de plusieurs types. Elles sont toutes des classes dérivées de *Layer*, mais la classe exacte dépendra du type d'information à faire apparaître. Il peut s'agir de points ou de lignes indiquant les positions des pêches, des flèches de courant, des ellipses de marée, des images satellitaires, des courbes de pression, l'échelle de la carte, des frontières géopolitiques, des villes, etc. Comme cette bibliothèque ne peut pas embrasser toutes les étendues des possibilités, les quelques classes qu'elle propose sont conçues de façon à faciliter autant que possible la tâche du programmeur qui voudrait les étendre.

Le fonctionnement de ce paquet présente quelques similitudes avec les composantes *AWT* du *Java* standard, qui servent à construire une interface utilisateur. Pour mieux comprendre le fonctionnement de ce paquet, il est utile de faire un parallèle entre celui-ci et *AWT*. Cette documentation suppose donc que le lecteur est familiarisé avec le paquet *java.awt*. Une attention toute particulière devrait être apportée aux systèmes de coordonnées des objets *Graphics2D*.

Rappel de quelques notions de AWT

Une application fenêtrée contient une liste de composantes formant l'interface utilisateur. Chaque type de composante (bouton, barre de défilement, etc.) est représenté par une classe spécialisée (*Button*, *Scrollbar*, etc.) qui dérive obligatoirement de la classe *Component*. Quand le système a déterminé qu'il faut redessiner une composante, il appelle automatiquement la méthode *paint(...)* de celle-ci. Lors de l'appel, il transmet à chaque méthode *paint(...)* un même objet *Graphics2D* temporaire qu'il aura préalablement créé et configuré selon le tableau 25 :

▽ Tableau 25
Configuration de *Graphics2D* lors du traçage des composantes *AWT*.

Origine (0,0) des axes	Coin supérieur gauche de l'écran ou du papier d'imprimante
Direction des axes	Les x croissent vers la droite et les y vers le bas
Unités des axes	Les pixels (sorties à l'écran) ou environ 1/72 de pouce (sorties à l'imprimante)
Épaisseur des lignes	Un pixel (sorties à l'écran) ou environ 1/72 de pouce (sorties à l'imprimante)

Cette configuration convient très bien à l'écriture de texte. Ainsi, un texte de 12 unités de haut aura une hauteur de 12 pixels à l'écran ou de 12/72 de pouces à l'impression. Les méthodes `paint(...)` peuvent changer temporairement la configuration de `Graphics2D` lors d'un traçage, mais doivent le remettre dans son état initial lorsqu'elles se terminent.

Notions de `net.seas.map.layer` calquées sur celles de AWT

Un objet `MapPanel` peut contenir une liste de couches représentant les informations que l'on place sur une carte. Chaque type de couche (stations, échelle de la carte, etc.) est représentée par une classe spécialisée (`MarkLayer`, `MapScaleLayer`, etc.) qui dérive obligatoirement de la classe `Layer`. Quand le système a déterminé qu'il faut redessiner une couche, il appelle automatiquement la méthode `paint(...)` en transmettant à chacun un même objet `Graphics2D` temporaire qu'il aura préalablement créé et configuré selon le tableau 26 :

▽ Tableau 26
Configuration de `Graphics2D` lors du traçage des couches d'une carte.

Origine (0,0) des axes	Dépend de la projection cartographique en cours Souvent en dehors de la région visible de la carte
Direction des axes	Les x croissent vers la droite et les y vers le haut, comme en géométrie
Unités des axes	Toujours en mètres sur le terrain (et non en mètres sur l'écran !)
Épaisseur des lignes	Dépend de la résolution de la carte Peut être de l'ordre de 50 mètres

Cette configuration convient très bien au traçage de couches cartographiques. Elle permet de travailler avec les dimensions réelles des constructions sans se soucier du facteur d'échelle. Toutefois, elle ne convient pas du tout à l'écriture de texte. Par exemple, un texte de 12 unités de haut sera interprété comme ayant une hauteur de 12 mètres. Pour une carte à l'échelle 1/50 000, des lettres de 12 mètres apparaîtront à l'écran comme de minuscules points. Le programmeur peut régler le problème en changeant temporairement la configuration de `Graphics2D`, mais doivent le remettre dans son état initial lorsqu'il aura terminé.

Rappel de quelques notions sur les transformations affines

Pour convertir en pixels des coordonnées exprimées selon un autre système, `java2D` utilise une transformation affine représentée par la classe `AffineTransform`. En résumé, une transformation affine est une matrice 3 x 3. En plaçant dans cette matrice les bons coefficients, on peut obtenir n'importe quelle combinaison d'échelles, translations, rotations et cisaillements. Dans notre cas particulier, nous utilisons cette matrice de transformation affine pour convertir en pixels des coordonnées exprimées en mètres :

$$\begin{bmatrix} x_{\text{pixels}} \\ y_{\text{pixels}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{mètres}} \\ y_{\text{mètres}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

La classe `AffineTransform` fournit un ensemble de méthodes permettant d'appliquer des transformations sur cette matrice sans nécessairement connaître les mathématiques sous-jacentes. Par exemple, la méthode `rotate(...)` modifiera les termes de la matrice 3 x 3 pour y ajouter l'effet d'une rotation d'un angle quelconque. Notons au passage une identité qui se révèle parfois pratique :

$$\sqrt{(m_{00})^2 + (m_{01})^2} \quad \text{et} \quad \sqrt{(m_{10})^2 + (m_{11})^2}$$

sont invariants sous rotations

En l'absence de rotation ou de cisaillement, les termes m_{01} et m_{10} sont nuls. Restent alors les termes m_{00} et m_{11} , qui nous indiquent l'échelle de la carte telle qu'appliquée par la transformation affine. Dans cette situation simplifiée on obtient donc les relations suivantes :

$$\sqrt{(m_{00})^2 + (m_{01})^2} \quad m_{00} = \text{AffineTransform.getScaleX} ()$$

$$\sqrt{(m_{10})^2 + (m_{11})^2} \quad m_{11} = \text{AffineTransform.getScaleY} ()$$

Utilisation par interface graphique de SEASview pour le non-développeur

Principe du logiciel

Le logiciel de visualisation vise à faciliter les accès à une base de données comprenant l'ensemble des données satellitaires fournies par l'IRD et des données d'abondance fournies par l'Ifremer. Les cartes sont le fruit de mesures satellitaires et de calculs expliqués dans les chapitres précédents. Elles contiennent de plus une information géographique. Le déplacement du curseur fournit à l'utilisateur une position géographique dans un référentiel déterminé. Le référentiel choisi est l'ellipsoïde WGS 84. Ce référentiel déforme non seulement moins que d'autres référentiels une zone aussi étendue que l'océan Indien, mais il est aussi très largement utilisé en particulier par le système de localisation GPS¹⁴. Grâce à cette information géographique, les prises des pêcheurs fournies par l'Ifremer pourront être positionnées.

L'utilisateur pourra en conséquence observer le paysage sur quatre cartes indiquant quatre paramètres océaniques différents lors des prises des pêcheurs, et ce à une date et sur une zone choisie.

Pour utiliser le logiciel, le contenu de tous les cédéroms peut être copié sur le disque dur du logiciel, mais alors la place requise sera importante. Sinon, et cette option sera recommandée, il suffit de procéder à l'installation du cédérom #1 contenant les applications, comme indiqué ci-après ; le logiciel SEASview précisera les cédéroms à insérer pour chaque visualisation.

¹⁴. *Global Positioning System*.

Installation du logiciel

La programmation a été réalisée en langage Java. Ce langage a la particularité de pouvoir être utilisé quel que soit le système d'exploitation (Unix,VAX-VMS, Linux,Windows...). Néanmoins, il demande l'installation d'une interface pour que chaque système puisse exécuter les programmes. Plusieurs utilitaires conditionnent l'installation de SEASview. Chaque étape doit être suivie rigoureusement pour une exécution correcte du logiciel.

JAVA RUN-TIME ENVIRONMENT (JRE 1.3.0)

SEASview nécessite la version 1.3.0 ou ultérieure de l'environnement d'exécution Java. Si vous disposez d'une connexion rapide à Internet, nous vous recommandons de télécharger la version la plus récente directement du site de Sun Microsystems :

<http://java.sun.com/j2se/1.3/jre/>

Si vous ne souhaitez pas effectuer ce téléchargement, vous pouvez utiliser le programme d'installation fourni sur le cédérom #1. L'installation s'effectue en exécutant le programme suivant (pour les utilisateurs de Windows) :

Install/Windows/j2re-1_3_0_01-win-i.exe

Il existe aussi des répertoires Linux et Solaris pour les utilisateurs de ces systèmes d'exploitation.

Comment vérifier si le Java est déjà installé sur mon système ?

Tapez l'instruction suivante sur la ligne de commande :

java-version

Vous devriez obtenir un affichage ressemblant à :

java version 1.3.0

Java (TM) 2 Runtime Environment, Standard Edition (build 1.3.0-C)

Java HotSpot (TM) Client VM (build 1.3.0-C, mixed mode)

L'affichage peut varier. L'exemple vaut pour le Java de SUN Microsystems. Le Java d'IBM donnerait un affichage légèrement différent, mais qui serait tout aussi bon, s'il indique le bon numéro de version (sur la première ligne). Si les lignes qui apparaissent indiquent la version 1.3.0 de Java (ou une version plus récente), il est inutile de réaliser l'installation décrite dans cette section. Sauter directement à l'étape 3.2.2.

JAVA ADVANCED IMAGING (JAI 1.1)

En plus de l'environnement standard, SEASview nécessite aussi une bibliothèque de traitement d'images. Vous pouvez l'installer à partir du cédérom #1 en exécutant le programme suivant :

Install/Windows/jai-1_1-beta-lib-win-jre.exe

INSTALLATION DE DIVERSES EXTENSIONS

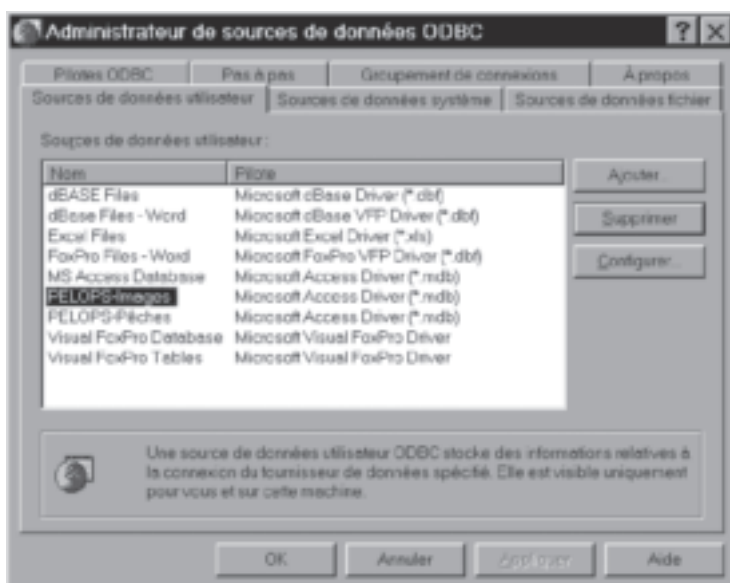
Copiez les quatre fichiers du dossier Install/Windows/ext dans Program Files/Javasoftware/JRE/1.3.0_01/lib/ext.

LES BASES DE DONNÉES

Les bases de données sont au nombre de deux : la BD/Images et la BD/Pêche. Elles ont été construites sous Access, mais l'installation du logiciel Access n'est pas indispensable pour l'exploitation de la base avec le logiciel de visualisation.

1) Copiez les bases de données d'images et de pêches sur votre disque dur. Elles peuvent être placées dans n'importe quel répertoire (par exemple, dans un dossier //Palangre/Seasview)

2) Déclarez les bases de données au système, en procédant comme suit : allez dans le panneau de configuration (bouton Démarrer/Paramètres/Panneau de configuration) et ouvrez l'icône **Source de données ODBC 32-bits**. Une fenêtre similaire à la fenêtre I devrait apparaître.



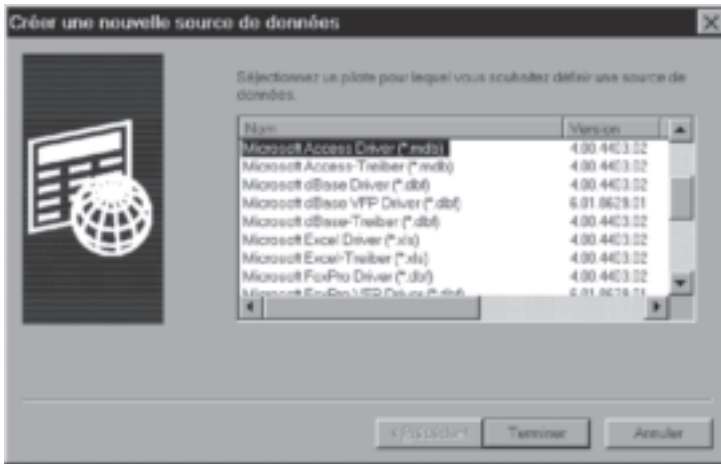
▽ Fenêtre I.

Appuyez sur **Ajouter**. Une fenêtre similaire à la fenêtre 2 devrait apparaître.

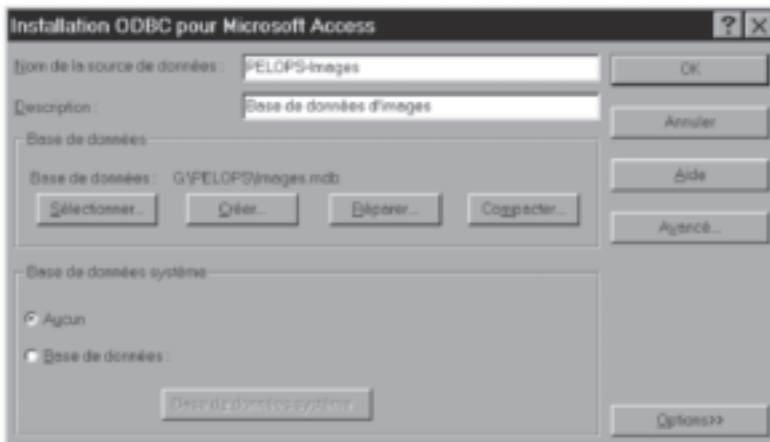
Sélectionnez **Microsoft Access Driver** et cliquez sur **Terminer**. La fenêtre 3 devrait alors apparaître.

Dans le champ **Nom de la source de données**, il faut entrer **SEAS-Images** (en respectant les majuscules et les minuscules). Le contenu du champ Description est laissé libre, vous pouvez y entrer les commentaires de votre choix. Cliquez ensuite sur Sélectionner et sélectionnez le fichier **Images.mdb** (sa position sur le disque dur dépend de l'endroit où vous l'avez mis). Cliquez ensuite sur Ok et fermez l'autre fenêtre en cliquant aussi sur Ok.

Pour la deuxième base de données, refaites les mêmes opérations que précédemment,. Le nom de la source de données est **SEAS-Pêches**, toujours en respectant la typographie, le fichier correspondant **Pêches.mdb**.



▽ Fenêtre 2.



▽ Fenêtre 3.

INSTALLATION DU LOGICIEL

Copiez le fichier SEAS.jar (Install/Windows) sur le disque dur, pourquoi pas dans //Palangre/Seasview avec les bases de données d'images et de données de pêche.

Il ne reste plus qu'à l'exécuter en double-cliquant sur SEAS.jar.

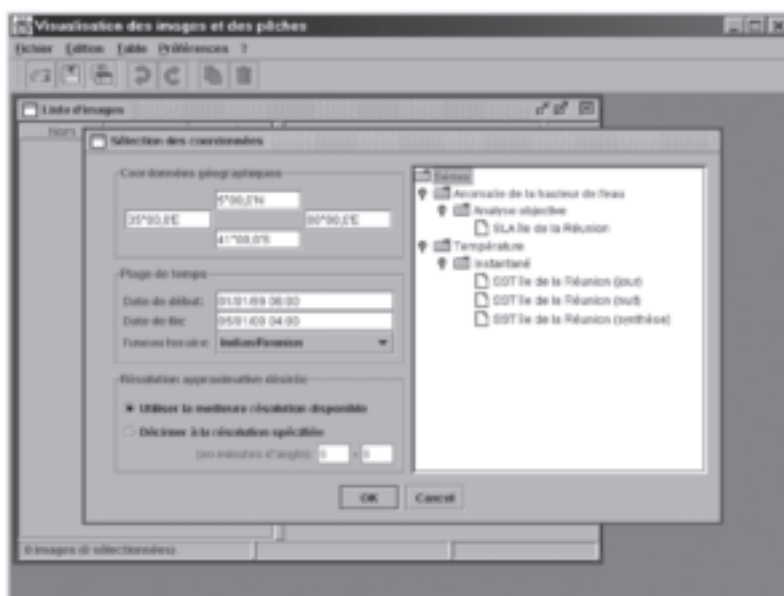
Pour finaliser l'installation du logiciel, il convient de préciser l'emplacement des images. Dans la barre d'outils de l'application, choisissez **Préférences/Base de données** et indiquez, dans le champ **Répertoire racine**, la localisation du répertoire sur le disque dur. Si l'option proposée au début du chapitre a été retenue, il suffit d'indiquer la lettre du lecteur de disque compact du PC. Pour que cette information soit enregistrée, il est impératif de créer un répertoire /ApplicationData dans le même répertoire que **SEAS.jar**.

Utilisation du logiciel

Deux modes de visualisation peuvent être utilisés ici : un mode simple et un mode synchronisé. Le mode simple permet de sélectionner un type de données (SST, SLA, Chl-a, vorticité) et de voir l'évolution dans le temps du même paramètre. Le mode synchronisé permet de visualiser les paramètres disponibles en un même lieu et à une même date.

LE MODE SIMPLE

La première étape consiste à sélectionner les références des images sur une zone et pour une période donnée. Dans la barre des menus, sélectionnez **Table/Nouvelle table d'images**. La fenêtre 4 apparaît.



▽ Fenêtre 4.

Les paramètres d'entrée sont :

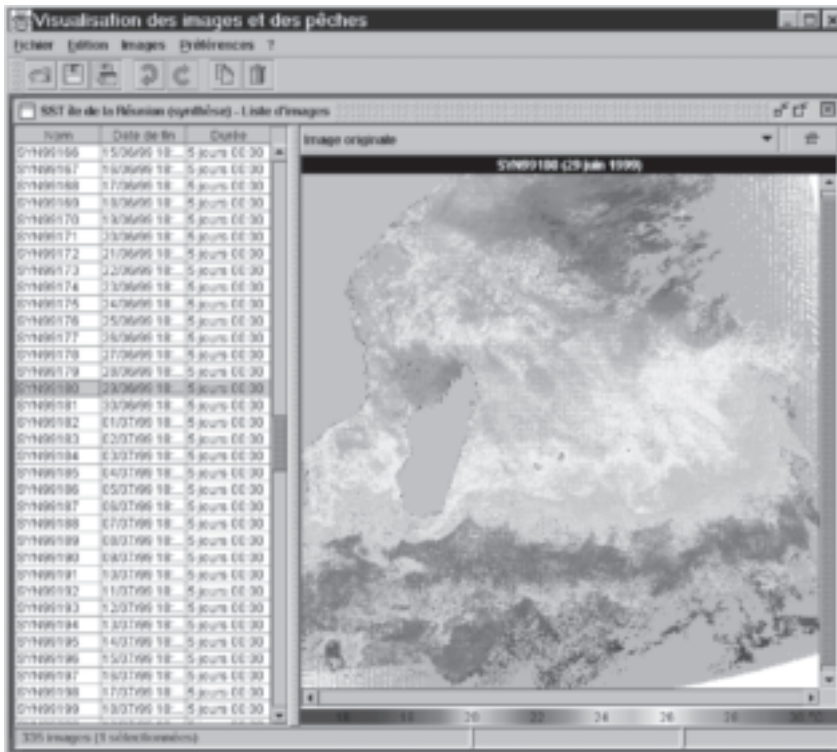
- la zone géographique,
 - la plage de temps,
 - le fuseau horaire,
 - une résolution approximative des images (optionnel),
 - les types de données. Les séries sont sélectionnées en cliquant sur l'intitulé.
- Puis cliquez sur Ok .

Une résolution approximative peut être spécifiée en minutes d'angle. Les fichiers de synthèse des températures de surface sont assez volumineux (au moins 3 Mo), et donc cette option est utile afin de limiter le temps d'affichage lors de premières observations.

Si la résolution choisie est inférieure à 6 minutes d'angle, le logiciel prendra l'image de départ et sous-échantillonnera l'image en prenant un pixel sur 3 (horizontalement et verticalement) si la résolution choisie est 3 minutes d'angle, par exemple.

Si la résolution choisie est supérieure à 6 minutes d'angle, elle s'arrondira au multiple de 6 le plus proche. Le même processus de décimation sera choisi, mais à partir d'images déjà calculées avec une résolution de 6 minutes d'angle et accessibles dans la base de données.

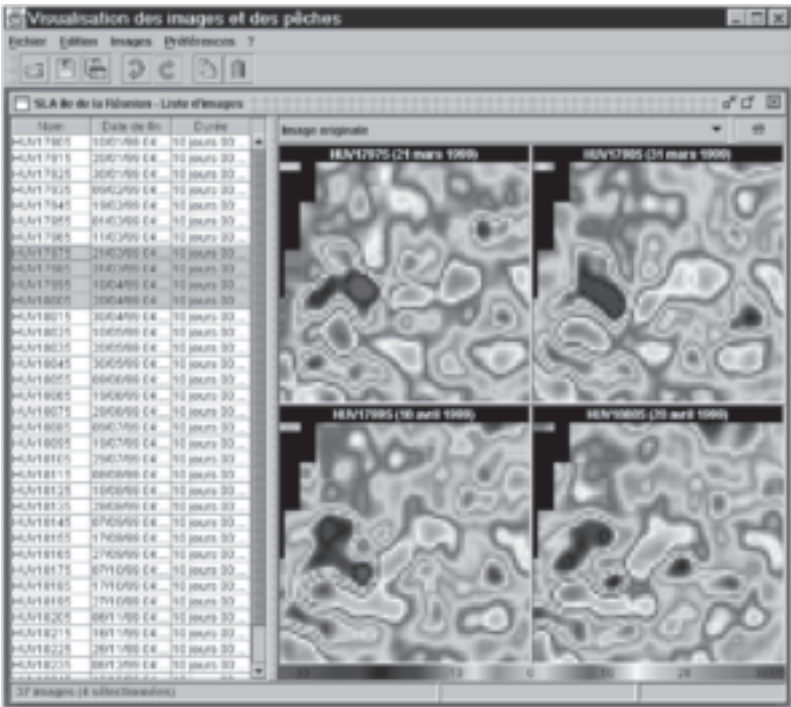
Le choix de la table d'images étant fait, une fenêtre apparaît. À gauche, les noms des images sont affichés et si l'utilisateur clique dessus, l'image apparaît (fig. 129).



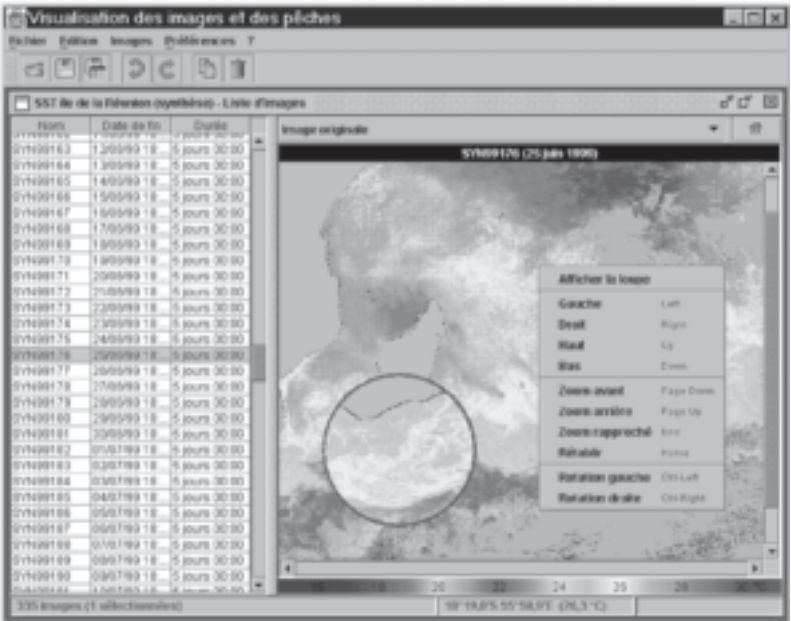
▽ Fig. 129
Visualisation d'une image de synthèse SST.

En bas de l'image apparaît la légende de la carte. En déplaçant le curseur, les coordonnées géographiques du point changent ainsi que la valeur du paramètre.

L'utilisateur peut aussi sélectionner plusieurs images en même temps : en faisant glisser la souris dans la table d'images ou bien en utilisant la touche Ctrl (fig. 130).



▽ Fig. 130
Visualisation d'une série d'images de SLA.



▽ Fig. 131
Loupe et menu contextuel de navigation.

Un certain nombre d'outils sont accessibles par le bouton droit de la souris sur les images (fig. 131) : pour déplacer l'image dans la fenêtre (haut, bas, rotation...), pour faire un agrandissement de l'image (zoom avant, zoom arrière).

Le bouton juste au-dessus de l'image à droite permet d'ajuster l'image à la fenêtre. Enfin, la barre en haut de l'image permet d'accéder à des options pour l'affichage de l'image (image originale avec la légende élaborée, gradient de couleurs).

Dans **Table/Couches**, il est possible de superposer des informations aux cartes : les données de courants géostrophiques, les données de pêche par exemple.

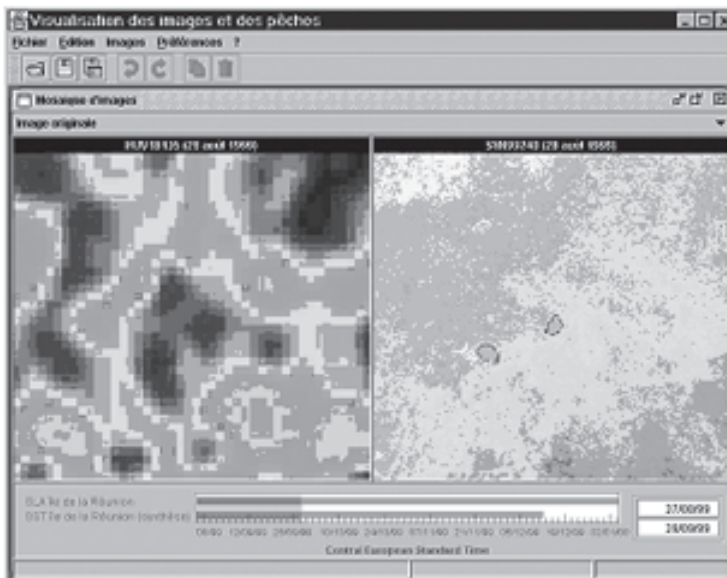
Opérations concernant les tables d'images

La table d'images est un extrait de l'ensemble de la base de données, choisi selon les critères de l'utilisateur. Ce dernier peut ensuite réaliser un certain nombre d'opérations sur cette sélection, par exemple :

- agrandir la table d'images en ajoutant d'autres entrées (nouvelle zone géographique, nouvelle période...). Les images sélectionnées seront ajoutées à la suite des précédentes et concerneront toujours le même paramètre ;
- l'utilisateur a aussi la possibilité d'exporter les images qu'il a sélectionnées grâce à la base de données.

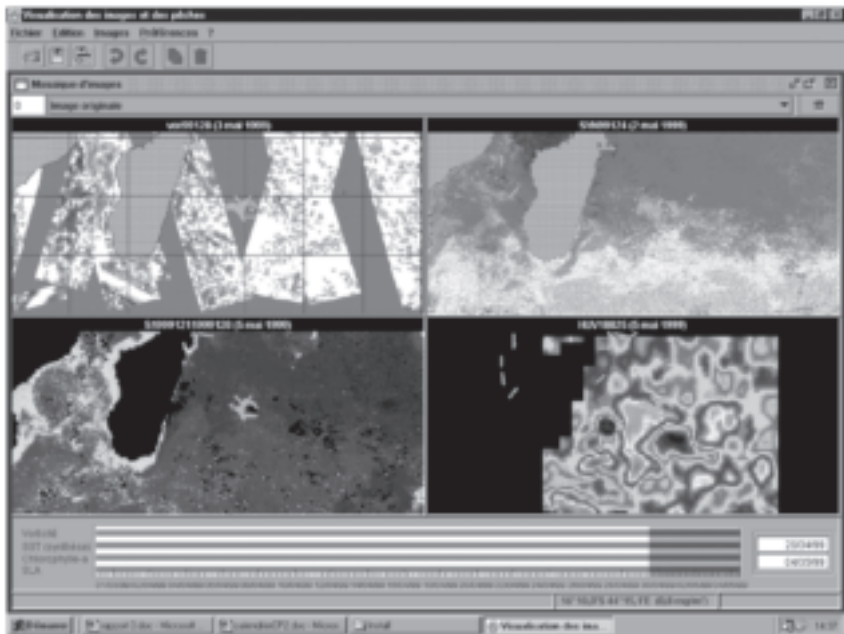
LE MODE SYNCHRONISÉ

Dans la barre des menus, sélectionnez **Image/Nouvelle mosaïque d'images**. La même fenêtre que précédemment apparaît. On peut choisir l'ensemble des options du mode simple (aire géographique, plage de temps, résolution). En revanche, en tenant la touche Ctrl enfoncée, on peut sélectionner différents paramètres. La fenêtre 5 apparaît. En utilisant la réglette ou en écrivant la date en bas à droite, il est possible de charger de nouvelles données.



▽ Fenêtre 5.

SEASview permet la visualisation des données de pêche sur les différentes cartes thématiques () et pourra extraire les mesures croisées avec les données de pêche des différents paramètres. Cette matrice pourra ensuite être analysée par des outils de statistiques classiques (fig. 132).



▽ Fig. 132
Visualisation des données de pêche sur SEASview.

Bibliographie

**ANNEVILLE O., CURY P.,
LE PAGE C., TREUIL J.P.**

1998 – Modelling fish spatial dynamics and local density-dependance relationships : detection of patterns at a global scale. *Aquatic Living Resources*, 11 (5) : 305-314.

AOKI I.

1982 – A Simulation Study of the Schooling Mechanism in Fish. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 48 (8) : 1081-1088.

BAKUN A.

1996 – *Patterns in the ocean*. California, USA, California Sea Grant College System, NOAA, 323 p.

**BAUDRY N., PETIT M.,
DAGORN L.**

1994 – Halieutique et inventaire satellitaire des hauts-fonds, océan Indien occidental. Association Thonière/COI, Apropeche, Orstom-SEAS, SEAFLOOR IMAGING INC., Rapport scientifique du Projet thonier régional, Phase II, la Réunion, 171 p.

BENHAMOU S.

1992 – Efficiency of Area-concentrated Searching Behaviour in a Continuous Patchy Environment. *Journal of Theoretical Biology*, 159 : 67-81.

BENHAMOU S., BOVET P.

1989 – How animals use their environment : a new look at kinesis. *Animal Behaviour*, 38 : 37-383.

BENHAMOU S., BOVET P.

1991 – Biological functions of sinuosity regulation : a reply to Budenberg. *Animal Behaviour*, 42 : 159-60.

BENHAMOU S., BOVET P.

1992 – Distinguishing between elementary orientation mechanisms by means of path analysis. *Animal Behaviour*, 43 : 37-37

BERKELEY S.A., HOUDE E.D.

1983 – Age Determination of Broadbill Swordfish, *Xiphias Gladius*, from the Straits of Florida, Using Anal Fin Spine Sections. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS 8.

BEVERTON R.J.H., HOLT S.J.

1957 – On the dynamics of exploited fish populations. Fish. Invest. Ser. 2, Mar. Fish. G.B. Minist. Agric., Fish. Food No. 19.

BIGELOW K.A., BOGGS C.H., HE X.

1999 – « Influence of environmental factors on swordfish and blue shark catch rates in the U.S. North Pacific longline fishery. » In DiNardo G.T. : *Proceedings of the Second international pacific swordfish symposium*, Honolulu, Hawaii, NOAA, NOAA Technical Memorandum NMFS, 240 p.

BLOCK B.A., BOOTH D.T., CAREY F.G.

1992 – Depth and temperature of the blue marlin, *Makaira nigricans*, observed by acoustic telemetry. *Marine Biology*, 114 : 173-183.

BLOCK B.A., DEWAR H., FARWELL C., PRINCE E.D.

1998 – « A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna ». In : *Proc. Nati. Acad. Sci., USA*, 95 : 9384-9389.

BLOCK B.A., DEWAR H., WILLIAMS T., PRINCE E.D., FARWELL C., FUDGE D.

1997 – Archival Tagging of Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus thynnus*) *MTS Journal*, 32 (1) : 3746.

BOEHLERT G.W.

1987 – A review of the effects of seamounts on biological processes. *Geophysical Monogr.*, 43 : 319-334.

BOGGS C.H.

1992 – Depth, capture time and hooked longevity of longline-caught pelagic fish : timing bites of fish with chips. *Fishery Bulletin*, 90 : 642-658.

BOUSQUET F.

1994 – *Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents ; le cas de la pêche dans le delta central du Niger*. Lyon-I, thèse de doctorat, univ. Claude-Bernard, 175 p.

CAREY F.G.

1990 – « Further Acoustic Telemetry Observations of Swordfish ». In Stroud R.H. (Ed.) : *Proceedings of the 2nd International Billfish Symposium, Planning the Future of Billfishes*,

Research and Management in the 90s, Beyond, 1 Aug. 1988-5 Aug. 1988, Kalia-Kona, Hawaii, Savannah, Georgia, USA, National Coalition for Marine Conservation, Inc., Marine Recreational Fisheries : 103-122.

CAREY F.G., ROBISON B.H.

1981 – Daily patterns in the activities of swordfish *Xiphias gladius* observed by acoustic telemetry. *Fishery Bulletin*, 79 (2) : 272-279.

CAYRÉ P.

1990 – Les migrations, un comportement déclenché et guidé par l'environnement. ICCAT, Col. Vol. Sci. Pap., vol. XXXII.

COLLIGNON J.

1991 – *Écologie et biologie marines, introduction à l'halieutique*. Paris, Masson, Coll. Bibliothèque de l'Institut français d'aide à la formation professionnelle maritime, 298 p.

CONAND F.

1997 – *Marquages acoustiques de thons au voisinage des DCP à la Réunion*. La Réunion, Rapport, Orstom/PTRII/CAN Réunion.

COQUILLARD P., HILL D. R. C.

1997 – *Modélisation et simulation d'écosystèmes, des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Paris, Masson, Coll. Recherche en écologie, 273 p.

CURY P.

1994 – Obstinate nature : an ecology of individuals. Thoughts on reproductive behavior and biodiversity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51 (7) : 1664-1673.

CUSHING D.

1995 – *Population production and regulation in the sea, a fisheries perspective*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 354 p.

DAGORN L.

1994 – *Le comportement des thons tropicaux modélisé selon les principes de la vie artificielle*. Rennes, Ensar, thèse de doctorat en halieutique, 227 p.

DAGORN L., JOSSE E., BACH P.

2000 a - Individual differences

in horizontal movements of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in nearshores areas in French Polynesia, determined using ultrasonic telemetry.

Aquatic Living Resources, 13 : 19-202.

DAGORN L., JOSSE E., BACH P., BERTRAND A.
2000 b – Modelling tuna behaviour near floating objects : from individuals to aggregations.

Aquatic Living Resources, 13 : 203-211.

DAGORN L., MENCZER F., BACH P., OLSON R.J.
2000 c – Co-evolution of movement behaviours by tropical pelagic predatory fishes in response to prey environment : a simulation model.

Ecological Modelling, 134 : 325-341.

DAUPHINÉ A., VOIRON-CANICIO C.
1988 – *Variogrammes et structures spatiales*. Montpellier, GIP Reclus, coll. Reclus Modes d'Emploi, n° 12, 56 p.

DE ANGELIS D.L., YEH G.T.
1984 – « An Introduction to Modeling Migratory Behavior of Fishes ». In McCleave J.D., Arnold G.P., Dodson J.J., Neill W.H. (Eds.) : *Mechanisms of Migration in Fishes*, New-York, London, Plenum Press : 446-469

DE MARTINI E.E.
1999 – « Stock structure ». In DiNardo G.T. (Ed.), *Proceedings of the Second International Pacific Swordfish Symposium*, Honolulu, Hawaii, NOAA, NOAA Technical Memorandum NMFS.

DE ROSA A.-L.
1997 – *Analyse spatio-temporelle des relations thon-environnement (utilisation de SIG et de GAM)*. Ensar, Laboratoire halieutique, mémoire de fin d'études.

DICKSON K.A.
1995 – Unique adaptations of the metabolic biochemistry of tunas and billfishes for life in the pelagic environment. *Environmental Biology of Fishes*, 42 : 65-9

DIGGLE P.J.
1983 – *Statistical analysis of spatial point patterns*. Academic Press, Coll. Mathematics in Biology, 148 p.

DOLÉDEC, S., CHESSEL D.
1994 – Co-inertia analysis : an alternative method for studying species-environment relationships. *Freshwater Biology* 31 : 272-9.

DRAGANIK B., CHOLYST J.
1986 – Temperature and moonlight as stimulators for feeding activity by swordfish. *Reports of the Sea Fisheries Institute*, 22 : 7-84.

DROGOUL A.
1993 – *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes, une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Paris, thèse de doctorat en informatique, univ. Paris-VI, 358 p.

DROGOUL A.
2000 – *Systèmes multi-agents situés*. LIP6, Paris, thèse d'habilitation à diriger des recherches de l'univ. Pierre-et-Marie-Curie, spécialité informatique, 117 p.

ECOTAP
1995-1997 – Programme « Distribution et comportement des thons exploitables en subsurface dans la Zone économique exclusive de Polynésie française : aide à l'aménagement de l'espace halieutique, à la mise en œuvre des stratégies de pêche et au développement durable de l'exploitation ». Programme conjoint EVAAP/lframer/Orstom, rapports de campagne 01 à 18.

FARBER M.I., CONSER R.J.
1983 – Swordfish indices of abundance from the Japanese longline fishery data for various areas of the Atlantic ocean. ICCAT, Meeting of the ICCAT Standing Committee on Research and Statistics, Madeira (Portugal), Nov. 1982, *Col. Vol. Sci. Pap.*, vol. XVIII : 629-644.

FERBER J.
1997 – *Les Systèmes Multi-Agents, vers une intelligence collective*. Paris, InterÉditions, 522 p.

FIEDLER P.C., BERNARD H.J.
1987 – Tuna aggregation and feeding near fronts observed in satellite imagery. *Continental Shelf Research*, 7 (8) : 87-881.

FONTENEAU A.

1991 – Monts sous-marins et thons dans l'Atlantique tropical oriental. *Aquatic Living Resources*, 4 : 13-25.

FORMAN R. T. T., GODRON M.

1986 – *Landscape Ecology*. New-York, John Wiley & Sons, 619 p.

FRÉON P., MISUND O. A.

1999 – *Dynamics of Pelagic Fish Distribution and Behaviour : Effects on Fisheries and Stock Assessment*. Blackwell Science Ltd, Coll. Fishing News Books, 348 p.

FRISTSHES K., WARRANT E.

2001 – New Discoveries in Visual Performance of Pelagic Fishes. *Pelagic Fisheries Research Program*, Honolulu, Hawaii, USA, Joint Institute for Marine and Atmospheric Research, vol. 6 (3) : 1-3.

GASCUEL D.

1995 – « Efforts et puissances de pêche : redéfinition des concepts et exemple d'application. » In Gascuel D, D rand J.-L., Fonteneau A. (Éd.) : *Les recherches françaises en évaluation quantitative et modélisation des ressources et des systèmes halieutiques*, actes du premier forum de l'AFH, Rennes, Paris, Orstom éditions, Colloques et séminaires : 159-181.

GAUTHIEZ F.

1997 – *Structuration spatiale des populations de poissons marins démersaux. Caractérisation, conséquences biométriques et halieutiques*. Lyon-I, univ. Claude-Bernard, thèse de doctorat en biométrie, 251 p.

GINOT V. (COORD.)

1997 – *Applications aux grands lacs alpins et aux upwellings côtiers par la technique multi-agents*. Thonon-les-Bains, Inra, programme « Modélisation des peuplements de poissons », Rapport final, rapport interne, 58 p.

GONG Y., KIM Y. S., AN D. H.

1983 – « Abundance of Neon Flying Squid in Relation to Oceanographic Conditions in the North Pacific ». In Ito J. et al. (Eds.) : *INPFC Symposium on biology, distribution, and stock assessment of species caught*

in the high seas driftnet fisheries in the North Pacific Ocean, International North Pacific Commission, Vancouver, *Bulletin of the North Pacific Commission* : 19-204.

HERNADEZ-GARCIA V.

1995 – The diet of the swordfish *Xiphias gladius* Linnaeus, 1758, in the central east Atlantic, with emphasis on the role of cephalopods. *Fishery Bulletin*, 9 (2) : 403-411.

HERRON R. C., LEMING T. D., LI J.

1989 – Satellite-detected fronts and butterfish aggregations in the northeast Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 9 (6) : 565-588.

HERTZ J., KROGH A., PALMER R. G.

1991 – *Introduction to the theory of neural computation*. Reading, Addison-Wesley, ISBN: 0-201-5039-6.

HEUDIN J.-C.

1994 – *La Vie Artificielle*. Paris, Hermès, Coll. Systèmes Complexes, 267 p.

HILBORN R., WALTERS C. J.

1992 – *Quantitative Fisheries Stock Assessment : Choice, Dynamics and Uncertainty*. New-York, Chapman & Hall, 570 p.

HINTON M. G., TAYLOR R. G., MURPHY M. D.

1997 – Use of Gonad Indices to Estimate the Status of Reproductive Activity of Female Swordfish, *Xiphias Gladius* : A Validated Classification Method. *Fishery Bulletin* 9 : 80-84.

HOOKE S. B., MIED R. P., BROWN J. W., KIRWAN A. D. JR.

1997 – Remote sensing of dipole rings. *EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 (6) : 139.

HUTH A., WISSEL C.

1994 – The simulation of fish schools in comparison with experimental data. *Ecological Modelling*, 71/ 72 : 135-145.

ITANO D. G., HOLLAND K. N.

2000 – Movements and vulnerability

of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in relations to FADs and natural aggregation points. *Aquatic Living Resources*, 13 : 213-223.

JOSSE E., BACH P., DAGORN L.

1998 – Simultaneous observations of tuna movements and their prey by sonic tracking and acoustic surveys. *Hydrobiologia*, 371/ 372 : 61-69

KALUZNY S.P., VEGA S.C., CARDOSO T.P., SHELLY A.A.

2000 – *Analyzing Spatial Point Patterns, S + Spatial Stats. User's Manual for Windows and Unix* : 145-168.

KANEKO J., BARTRAM P., MILLER M., MARKS J.

2001 – « The Importance of Local Knowledge in Fisheries Management ». In : *Pelagic Fisheries Research Program*, Honolulu, Hawaii, USA, Joint Institute for Marine and Atmospheric Research, vol 6 ()

KUME S., JOSEPH J.

1969 – Size Composition and Sexual Maturity of Billfish Caught by Japanese Longline Fishery in the Pacific Ocean Est of 130° W. *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.*, 2 : 115-162.

LAMBERT P., ROCHARD E., MASSE J.

1998 – « Environnement des poissons migrateurs dans les modèles individus-centrés ». In : Colloque Smaget, 4-8 oct. 1998, Clermont-Ferrand, France, 1998.

LAUREC A., LE GUEN J.C.

1981 – Dynamique des populations marines exploitées. CNEXO, *Rapp. Sci. et Techn.*, 45, 117 p.

LAURS M.R., FIEDLER P.C., MONTGOMERY D.R.

1984 – Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep-Sea Research*, 31 Pt 2 : 1085-109

LE PAGE C.

1996 – *Biologie des populations et simulations individus-centrées*. Paris, univ.

Paris-VI, thèse de doctorat en biomathématiques, 154 p.

LEBLANC J.-L.

2001 – *Web Page*, 19 (Available at <http://indianocean.free.fr>)

LEHODEY P., ANDRÉ J.-M., BERTIGNAC M., HAMPTON J., STOENS A., MENKES C., MEMERY L., GRIMA N.

1998 – Predicting skipjack tuna forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical bio-geochemical model. *Fisheries Oceanography*, 7 (4) : 317-325.

LEHODEY P., BERTIGNAC M., HAMPTON J., LEWIS A., PICAUT J.

1997 – El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature* 389 10/16/97 : 75-78.

LEVY M.

1999 – *Réponses biologiques à la dynamique océanique de petite échelle : vers une caractérisation objective*. Appel d'offres ACI Blanche MENRT 1999, non publié, communication personnelle, 10 p.

LOHMANN K.J., HESTER J.T., LOHMANN C.M.F.

1999 – Long-distance navigation in sea turtles. *Ethology Ecology & Evolution* (1) : 1-23.

LOMNICKI A.

1999 – Individual-based models and the individual-based approach to population ecology. *Ecological Modelling*, 115 : 19-18.

LONGHURST A.

1998 – *Ecological Geography of the Sea*. USA, San Diego, Academic Press, 398 p.

LORENZ K.

1984 – *Les fondements de l'éthologie*. Flammarion, Coll. Champs, 426 p.

LUTJEHARMS J.R.E., BANG N.D., DUNCAN C.P.

1981 – Characteristics of the currents east and south of Madagascar. *Deep-Sea Research*, 28A Pt 2 : 899

MARSAC F., LE BLANC J.-L.

1998 – « Interannual and ENSO-associated

variability of the coupled ocean-atmosphere system with possible impacts on the yellowfin tuna fisheries of the Indian and Atlantic oceans ». In Beckett J.S. (Ed.) : ICCAT Tuna Symposium, Col.Vol. Sci. Pap., L (1) : 345-37

MARSAC F., POTIER M.

2002 – « On-Going Research Activities on the Trophic Ecology of Swordfish (*Xiphias gladius*) in the Western Indian Ocean ». In : IOTC, Report of the 2nd Session of the IOTC Working Party on Billfish, Saint-Gilles, la Réunion.

MATURANA H. R., VARELA F. J.

1994 – *L'Arbre de la connaissance, racines biologiques de la compréhension humaine*. Paris, Addison-Wesley France, Coll. Vie artificielle, éd. française, 256 p.

MAURY O.

1998 – *Modélisation spatiale en halieutique. Approche par simulateur sous SIG. Application à la modélisation hiérarchique de la population de thons albacore (Thunnus albacares) de l'Atlantique tropical*. Rennes, thèse de doctorat en halieutique, 354 p.

MEJUTO J.

1994 – Standardized indices of abundance at age for swordfish (*Xiphias gladius*) from the Spanish longline fleet in the Atlantic, 1983-92. ICCAT, Col.Vol. Sci. Pap., vol XLI : 328-334.

METZ J.A.J., DE ROOS A.M.

1992 – « The Role of Physiologically Structured Population Models Within a General Individual-Based Modeling Perspective ». In De Angelis D.L., Gross L.J. (Eds.) : *Individual-based models and approaches in ecology-populations, communities and ecosystems*, Workshop proceedings, 16-19 May 1990, Knoxville, Tennessee, USA, New-York, Chapman & Hall, 525 : 88-111.

MEYER J.-A.

1990 – « Simulation of adaptive behavior in animats : Review and prospect ». In MIT Press, Meyer J.-A.,

Wilson S.W. (Eds.) : *Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior : From Animals To Animats* : 2-14.

MILLISCHER L.

2000 – *Modélisation individu centrée des comportements de recherche des navires de pêche. Approche générique spatialement explicite par systèmes multi-agents. Intérêts pour l'analyse des stratégies et des puissances de pêche*. Ensar, Rennes, thèse de doctorat en halieutique, 245 p.

MINSKY M., PAPERT, S.

1969 – *Perceptrons : An Introduction to Computational Geometry*. Cambridge, Mass, MIT Press, 3rd Edition published in 1988.

MONTEIRO L.R., LOPES H.D.

1990 – Mercury Content of Swordfish, *Xiphias gladius*, in Relation to Length, Weight, Age and Sex. *Marine Pollution Bulletin*, 21 (6) : 29-28.

MOREAU R.

1995 – *L'approche objets, concepts et techniques*. Paris, Masson, Coll. MIPS (Méthodes informatiques et pratiques des systèmes), 302 p.

MOYLE P.B., CECHE J. J. JR.

1996 – *Fishes : an introduction to Ichthyology*. 3rd ed., New Jersey, Upper Saddle River, Prentice Hall, 590 p.

MURATA M., HAYASE S.

1983 – « Life history and biological information on flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the North Pacific Ocean ». In Ito J. et al. (Eds.) : *INPFC Symposium on biology, distribution, and stock assessment of species caught in the high seas driftnet fisheries in the North Pacific Ocean*, International North Pacific Commission, Vancouver, *Bulletin of the North Pacific Commission* : 147182.

NAKANO H.

1994 – An update of Japanese longline standardized CPUE for the Atlantic swordfish. ICCAT, Col.Vol. Sci. Pap., vol XLI : 281-284.

OLSON D.B., POLOVINA J.J.

1999 – « Local-scale swordfish fisheries oceanography ». In DiNardo G.T. (Ed.) : *Proceedings of the Second international pacific swordfish symposium*, Honolulu, Hawaii, USA, NOAA, NOAA Technical Memorandum NMFS, 240 p. : 173-178.

**OLSON D.B., HITCHCOCK G.L.,
MARIANO A.J., ASHJIAN C.J., PENG G.,
NERO R.W., PODESTA G.P.**

1994 – Life on the edge :
Marine life and fronts.
Oceanography, 7 (2) : 52-60.

PADFIELD J., COWARD A., THE MASCARENE
2000 – *Plateau as described by the OCCAM
Global Ocean Model*. Southampton
Oceanography Centre, Shoals of
Capricorn programme, 62 p.

PALKO B.J., BEARDSLEY G.L., RICHARDS W.J.

1981 – Synopsis of the biology of
swordfish, *Xiphias gladius* Linnaeus.
Seattle, NMFS/S, NOAA Tech. Rep., 127

PELLETIER D., PARMA A.M.

1994 – Spatial Distribution of Pacific Halibut
(*Hippoglossus stenolepis*) : An Application
of Geostatistics to Longline Survey Data.
*Canadian Journal of Fisher
and Aquatic Sciences*, 51 : 1506-1518.

PETIT M.

1991 – *Contribution de la télédétection
aérospatiale à l'élaboration des bases
de l'halieutique opérationnelle :*
*l'exemple des pêcheries thonières tropicales
de surface (aspect évaluatif).*
Paris-VI, univ. Pierre-et-Marie-Curie,
thèse de doctorat en océanologie
biologique, 130 p. plus 5 annexes.

**PETIT M., L. DAGORN, P. LENA, M. SLEPOUKHA,
A.G. RAMOS, STRETTA J.-M.**

1994 – « Oceanic landscape concept and
operational fisheries oceanography ». In
Doumenge F, Toulemon A. (Éd.) :
*Les nouvelles frontières de la télédétection
océanique. Mémoires de l'Institut
océanographique de Monaco*, n°18 : 85-9

PETIT M., STRETTA J.-M. (Éd.)

1990 – *Halieutique, Océanographie,*

*Télédétection. Actes du deuxième
Symposium de la Société franco-japonaise
d'océanographie*, Shimizu (Japon),
4-6 oct. 1988, *Bulletin de l'Institut
océanographique Monaco*,
numéro spécial 6, 229 p.

**PETIT M., STRETTA J.-M., SIMIER M.,
WADSWORTH A.**

1989 – Anomalies de surface et pêche
thonière. Un potentiel inattendu de SPOT
pour la détection des zones de pêche
par l'inventaire des hauts-fonds.
Mappemonde, 89 (3) : 13-16.

PETITGAS P.

1996 – « Geostatistics and their
applications to fisheries survey data ». In
Megrey A.B., Moksness E. (Eds.) :
Computers in Fisheries Research, London,
Chapman & Hall : 113-142.

PITON B., MAGNIER Y.

1975 – « Les conditions favorables
à la présence de thons de surface
dans les parages de Madagascar ». In :
*Biologie marine et exploitation des
ressources de l'océan Indien occidental*, Paris,
Orstom, Travaux et documents n° 47.

PODESTA G.P., BROWDER J.A., HOEY J.J.

1993 – Exploring the association
between swordfish catch rates
and thermal fronts on U.S. longline grounds
in the western North Atlantic.
Continental Shelf Research, 13 (2/3) :
253-27

POISSON F., BARGAIN R.M., TAQUET M.

*Premiers essais de marquages d'espadon
(Xiphias gladius) à l'aide de marques
intelligentes archives de type « pop up ».*
Mahé, Seychelles, IOTC, Working party
on Tagging, not published, 15 p.

POISSON F., REYNAUD J.-F.

2001 – « Étude du comportement
des principales espèces pélagiques
capturées par la pêche réunionnaise. »
In Poisson F, Taquet M. (Éd.) : 79-105.

POISSON F., TAQUET M. (Éd.)

2001 – *L'espadon : de la recherche
à l'exploitation durable.*

Programme Palangre réunionnais (PPR),
F. emer, 8/ 12128/ F, 247 p.

POLOVINA J.J., SEKI M.P., KOBAYASHI D.R.
1998 – « The physical and biological basis
for the fishing grounds for swordfish North
of Hawaii ». In Boggs C.H. (Ed.) :
*Proceedings of the 49th annual Tuna
Conference*, Lake Arrowhead, California,
NOAA, NMFS, 76 p.

PORTER J.M.
1993 – « Review of Swordfish Age
and Growth Data and Methodologies ». In :
Department of fisheries and oceans,
Rapport de l'ICAT : 100-103.

PORTER J.M., SMITH S.C.
1990 – Litterature Review of Ageing
in Atlantic Swordfish, *Xiphias Gladius*.
SCRS 37.

POSTEL E.
1969 – « Répartition et abondance
des thons dans l'Atlantique tropical ». In :
*Premier Symposium océanographique
sur les ressources halieutiques
de l'Atlantique tropical*, Orstom, Abidjan :
109138.

POTIER M., ELGUERO E., PETIT D.
2000 – Vessel concentrations
in the Javanese purse seine fishery :
structuration through spatial approach.
Aquatic Living Resources, 13 (2) : 5763.

REEB C., ARCANGELI L., BLOCK B.A.
1998 – « Microsatellites, mitochondrial
DNA and population subdivision
in Pacific swordfish ». In Boggs C.H. (Ed.) :
Proceedings of the 49th annual Tuna Conference,
Lake Arrowhead, California,
NOAA, NMFS.

REEB, C.A., ARCANGELI L., BLOCK B.A.
2000 – Structure and Migration Corridors
in Pacific Populations of the Swordfish,
Xiphias gladius, as Inferred through
Analysis of Mitochondrial DNA.
Marine Biology, 136 : 1123-1131.

REESE E.S.
1989 – Orientation behavior

of butterflyfishes (family Chaetodontidae)
on coral reefs : spatial learning of route
specific landmarks and cognitive maps.
Environmental Biology of Fishes, 25 (1-3) :
986.

**REY. H., CATANZANO J., MESNIL B.,
BIAIS G.**
1997 – *Système halieutique. Un regard
différent sur les pêches*.
Paris, Institut océanographique/Ifremer,
Coll. Propos, 277 p.

ROGERS A.D.
1994 – The biology of seamounts.
Advances in Marine Biology, 30 :
305-350.

ROPER C. F. E., SWEENEY M. J.
1984 – FAO Species catalogue, Vol. 3.
Cephalopods of the world.
FAO Species Synopsis 125 (8)

ROUET O.
1998 – *Art informatique et sciences cognitives,
vers une auto-organisation créatrice*.
Univ. Paris-I-Panthéon-Sorbonne,
mémoire de maîtrise.

SAITO S.
1975 – On the depth of capture
of bigeye tuna by further improved vertical
longline in the tropical Pacific.
*Bulletin of the Japanese Society of Scientific
Fisheries*, 41 : 831-841.

**SCHAEFFER M., BAVECO J.M., DE ANGELIS D.L.,
ROSE K.A., VAN NES E.H.**
1995 – Super-individuals a simple solution
for modelling large populations on an
individual basis. *Ecological Modelling*, 80 :
161-170.

**SCHOTT F., DENGLER M.,
SCHOENEFELDT R.**
2002 – The shallow overturning circulation
of the Indian Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 53 :
57-103.

SCOTT G.P., BERTOLINO A.R.
1994 – Standardized catch rates for
swordfish (*Xiphias gladius*) from the U.S.
longline fleet through 1992.
ICCAT, Col. Vol. Sci. Pap., vol. XLI : 303-307

SEDBERRY G.R., LOEFER J.K.

2001 – Satellite telemetry tracking of swordfish, *Xiphias gladius*, off the eastern United States. *Marine Biology*, 139 : 355-360.

SEKI M.P.

1999 – Basin-scale swordfish habitat assessment and fishery dynamics session. In DiNardo G.T. (Ed.) : *Proceedings of the Second international pacific swordfish symposium*, Honolulu, Hawaii, USA, NOAA, NOAA, Technical Memorandum NMFS, 240 p. : 179-183.

SHIN Y.-J.

2000 – *Interactions trophiques et dynamiques des populations dans les écosystèmes marins exploités. Approche par modélisation individus-centrée*. Univ. Paris VII-Denis-Diderot, thèse de doctorat en biomathématiques, 245 p.

SINCLAIR M.

1987 – *Marine Populations, an essay on population regulation and speciation*. Seattle, London, Coll. Books in Recruitment Fishery Oceanography, Washington Sea Grant Program, distributed by University of Washington Press, 252 p.

SMITH, W. H. F., SANDWELL D.T.

1997 – Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, vol. 27 : 1971-1972. <http://ibis.grdl.noaa.gov/cgi-bin/bathy/bathD.pl>

SORIA M.

1994 – « Le banc de poissons : expression d'une motivation sociale ou comportement collectif d'un groupe auto-organisé ? ». In Theraulaz G., Spitz F. (coord.), *Auto-organisation et comportement*, Paris, Hermès : 141-155.

SOULIÉ J.-C.

2001 – *Vers une approche multi-environnements pour les agents*. Univ. de la Réunion, thèse de doctorat en informatique, 157 p.

SOULIÉ J.-C., GUYOMARD D., DESRUISSEAU M.

2001 – « A Multiagent Toolkit For Simulating Pelagic Fish Behavior In Distributed

Multiple Environments ». In Giambasi N., Frydman C. (Eds.) : *Proceedings of the 13th European Simulation Symposium*, Marseille, France, Society for Computer Simulation En op Bvb : 885-89.

STRETTA J.-M.

1990 – « La télédétection infrarouge thermique peut-elle aider à la prévision des zones de pêche ? La réponse praxéologique ». In Petit M., Stretta J.-M. (Éd.) : *Halieutique, océanographie et télédétection*, contributions françaises au colloque franco-japonais sur la télédétection, Tokyo-Shimizu, Japon, Institut océanographique de Monaco, *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco* : 17-18.

STRETTA J.-M.

1991 – *Contribution de la télédétection aérospatiale à l'élaboration des bases de l'halieutique opérationnelle : l'exemple des pêcheries thonières tropicales de surface (aspect prédictif)*. Univ. Paris-VI, thèse de doctorat en sciences naturelles, 143 p.

SUND P.N., BLACKBURN M., WILLIAMS F.

1981 – Tunas and their environment in the Pacific ocean : a review. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 19 : 443-512.

SWARTZMAN G., SILVERMAN E., WILLIAMSON N.

1995 – Relating trends in walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) abundance in the Bering Sea to environmental factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52 : 369-380.

TAKAHASHI MIO, OKAZAKI M., OKAMURA H., YOKAMA K.

2001 – « Preliminary analysis of swimming behavior of a swordfish using an archival tag ». In : *The Billfish Foundation, Third International Billfish Symposium, 1923 Ag* . 2001, Cairns, Australia.

TCHERNIA P.

1988 – *Océanographie générale, description physique des océans et des mers*. École nationale des techniques avancées, 257 p.

THERAULAZ G., SPITZ F. (Coord.)

1994 – *Auto-organisation et comportement*.

Paris, Hermès, Coll. Systèmes complexes,
29 p.

TURNER M. G., GARDNER R. H. (Eds.)
1991 – *Quantitative Methods in Landscape Ecology, the Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity*.
New-York, Springer-Verlag,
Coll. Ecological Studies, 536 p.

TURNER S.J., O'NEILL R.V., CONLEY W., CONLEY M.R., HUMPHRIES H.C.
1991 – « Pattern and Scale : Statistics for Landscape Ecology ».
In Turner M.G., Gardner R.H. (Eds.) :
Quantitative Methods in Landscape Ecology, the Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity, New-York, Springer-Verlag : 1749

TUTORIAL MOBIDYC
1998 – « Une plate-forme multi-agents pour la création et l'utilisation de modèles dédiés à la dynamique des peuplements piscicoles ». In Colloque Smaget, 4-8 oct. 1998, Clermont-Ferrand, France.

TYLER J.A., ROSE K.A.
1994 – Individual variability and spatial heterogeneity in fish population models. Reviews. *Fish Biology and Fisheries*, 4 : 91-123.

UDA M., ISHINO M.
1958 – Enrichment pattern resulting from eddy systems in relation to fishing grounds. *Journal of the Tokyo University of Fisheries*, 44 (1-2) : 105-129

UOSAKI K., TAKEUCHI Y.
1998 – « CPUE Standardization of Pacific swordfish using the Japanese Longline data based on new format logbook ».

In Boggs C.H. (Ed.) : *Proceedings of the 49th annual Tuna Conference*, 18-21 May 1998, Lake Arrowhead, California, NOAA, NMFS, USA.

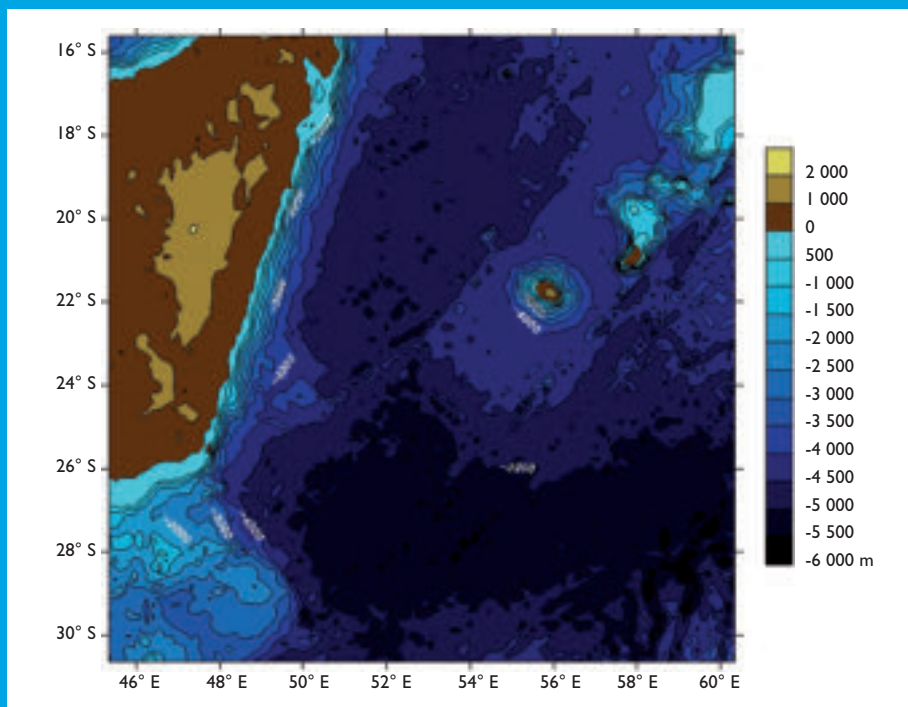
VALIELA I.
1995 – *Marine Ecological Processes*.
2nd ed., New-York, Springer-Verlag, 686 p.

WARD P., ELSHOT S.
2000 – *Broadbill Swordfish : Status of world fisheries*. Canberra, Bureau of Rural Sciences, 208 p.

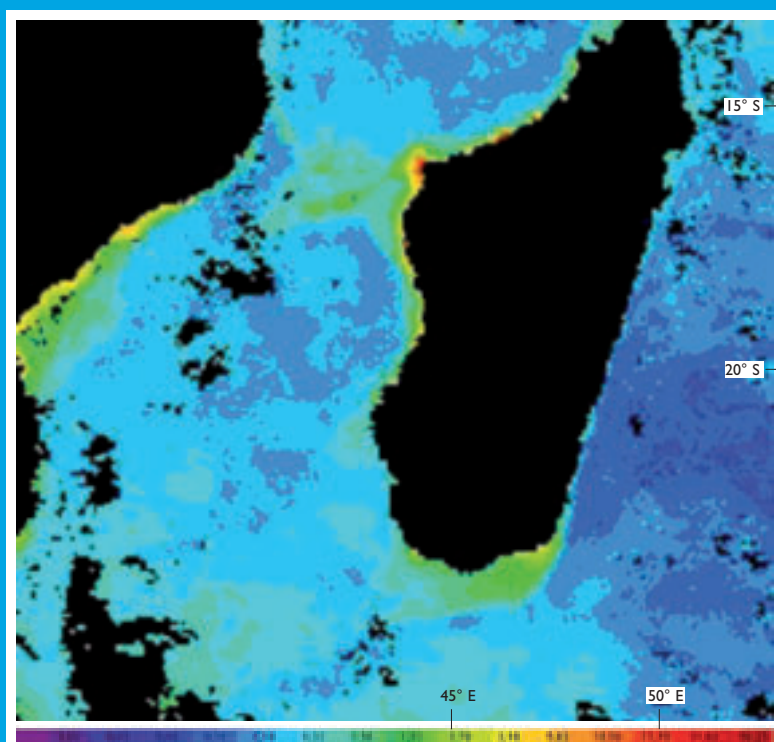
WESTERBERG H.
1984 – « The orientation of fish and the vertical stratification at fine-and micro-structure scales ». In McCleave J.D., Arnold G.P., Dodson J.J., Neill W.H. (Eds.) : *Mechanisms of Migration in Fishes*, New-York, London, Plenum Press : 179-203.

WIDROW B., STEARNS S. D.
1985 – *Adaptive signal processing*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.

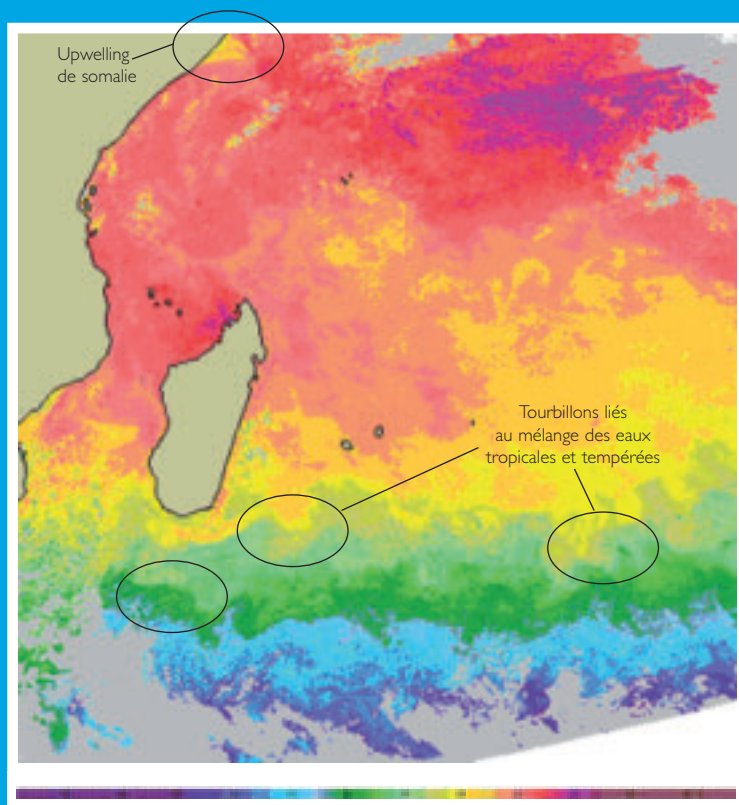
YOUNG J., COWLING A., STANLEY C.
2000 – « A two boat study of the relationship between swordfish catch rates and fine- and -broad scale physical and environmental variables off eastern Australia ». In : SCTB, 13th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, Noumea, New Caledonia, CSIRO Marine Research, Hobart Tasmania, Australia, SCTB 13 Working Paper.



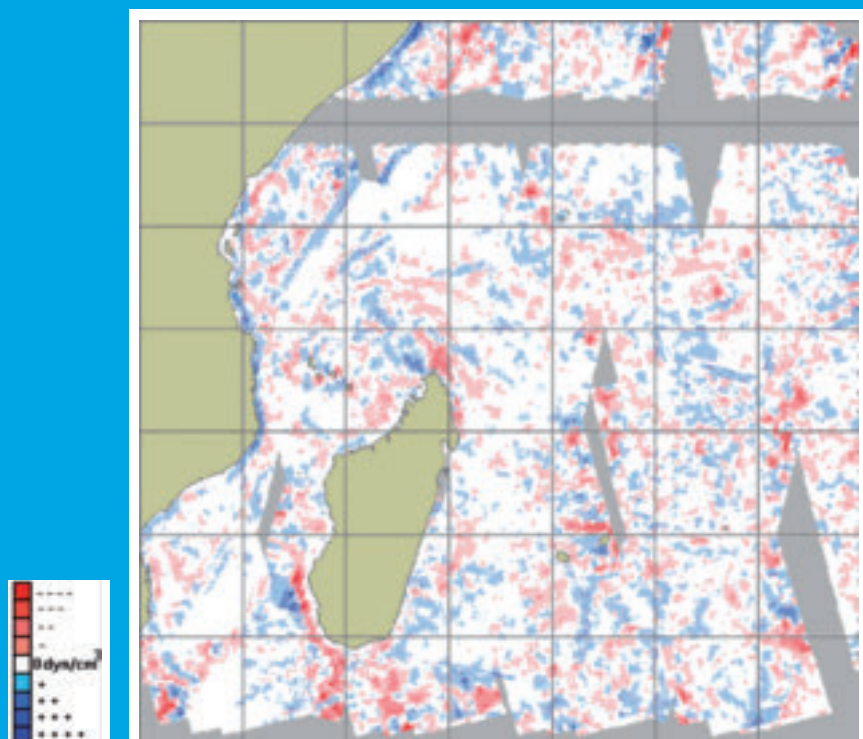
▲ Fig. 21 - Bathymétrie de la zone de pêche issue du jeu de données de SMITH, SANDWELL, 1997.

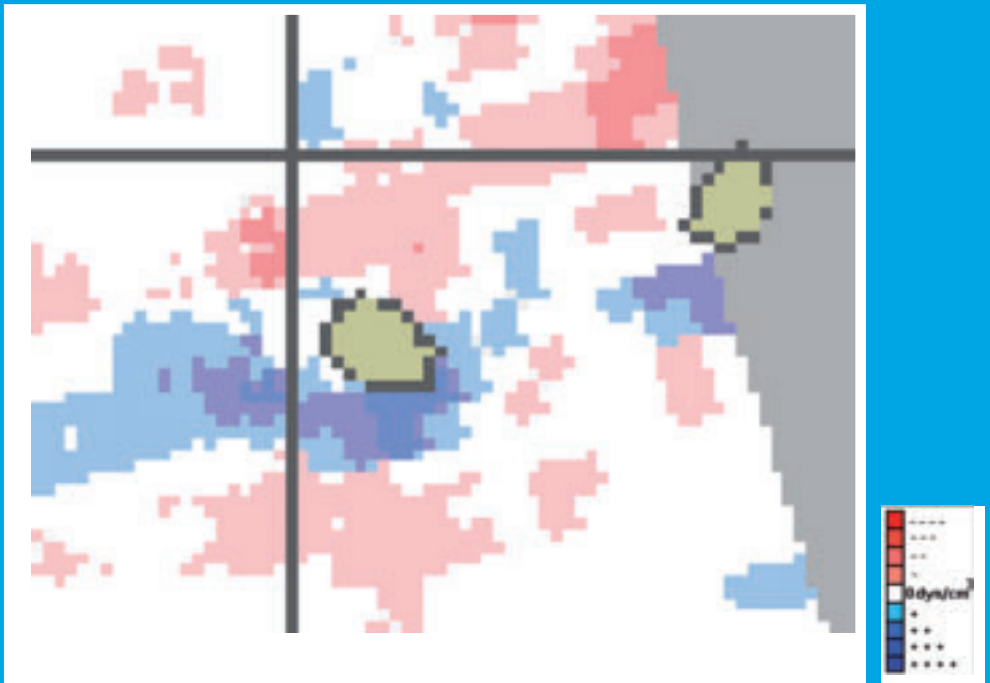


▲ Fig. 35 - Upwellings vus par SeaWiFS, 16-21 septembre 1999 (au large de Fort Dauphin au sud de Madagascar), Chl-a en mg.m^{-3} .

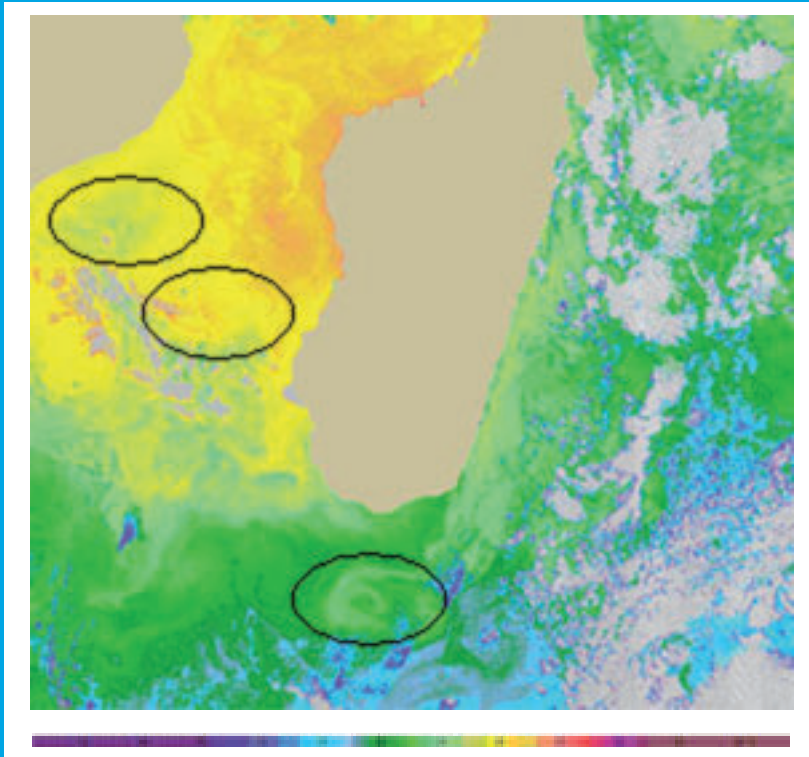


▲ Fig. 34 - Illustration de l'upwelling de Somalie, synthèse des SST (figure du haut en °C) et vorticité (figure du bas) du 12 avril 1999 (jour julien 142).

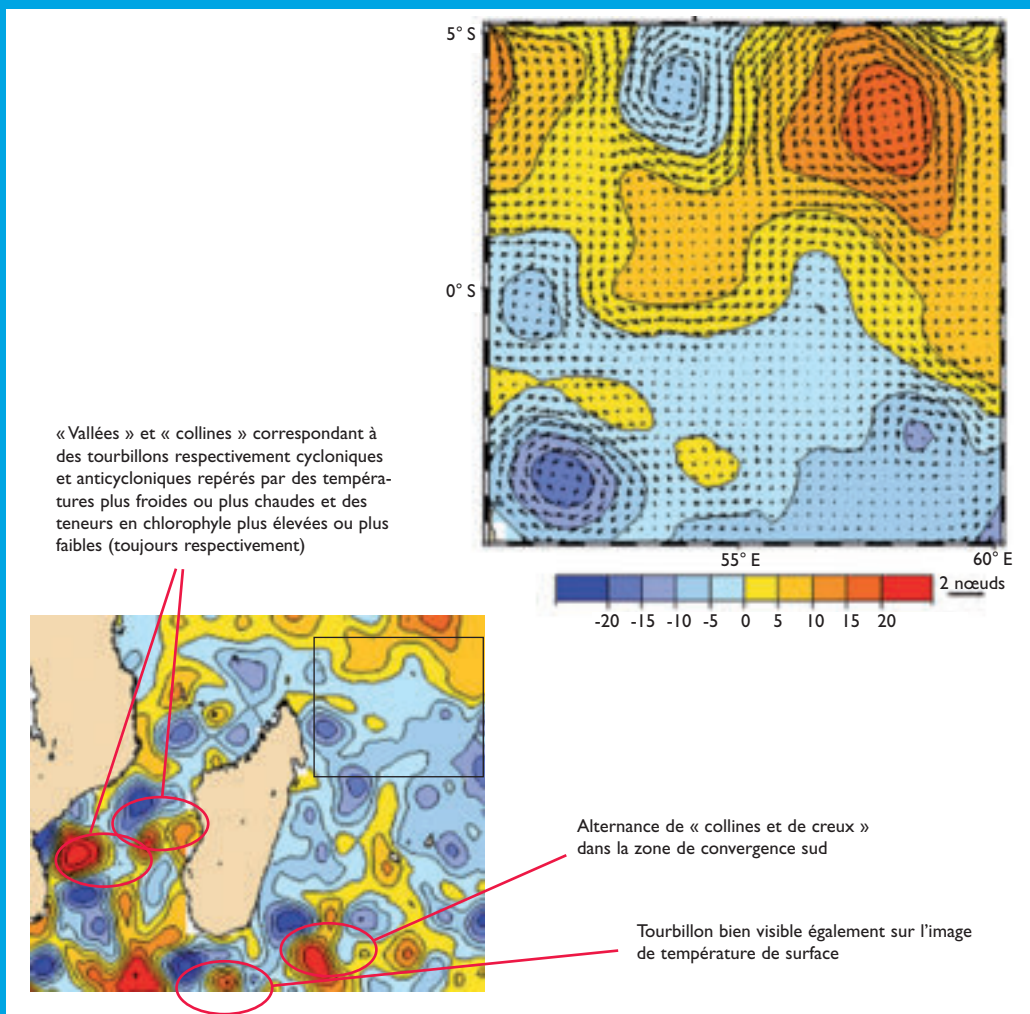




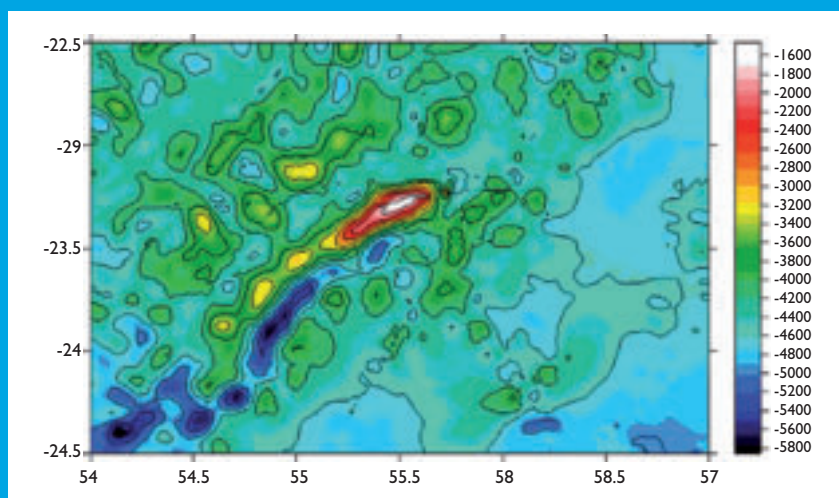
▲ Fig. 36 - Effet d'île sur une carte de vorticité du 20 janvier 1999.



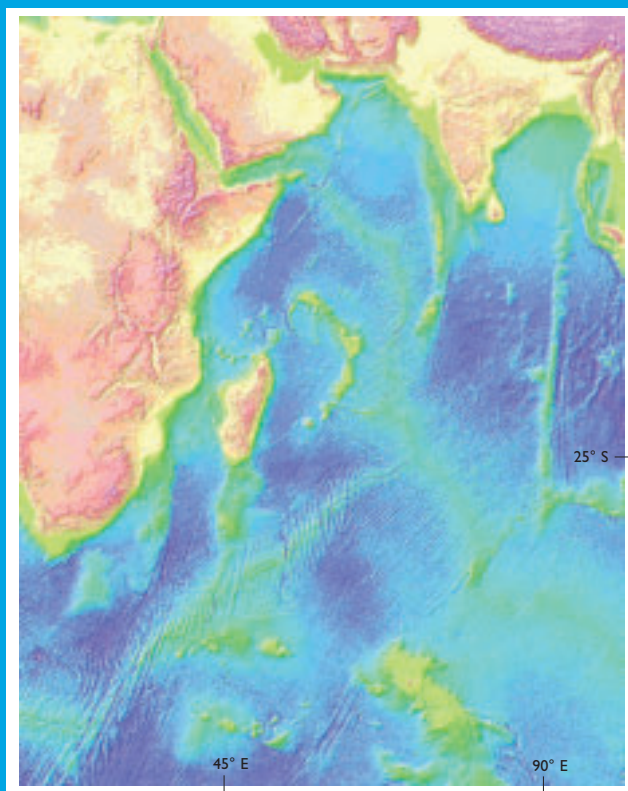
▲ Fig. 37 - Visualisation relative de vortex par les images de température de surface, °C. Image de nuit du 16-09-1999.



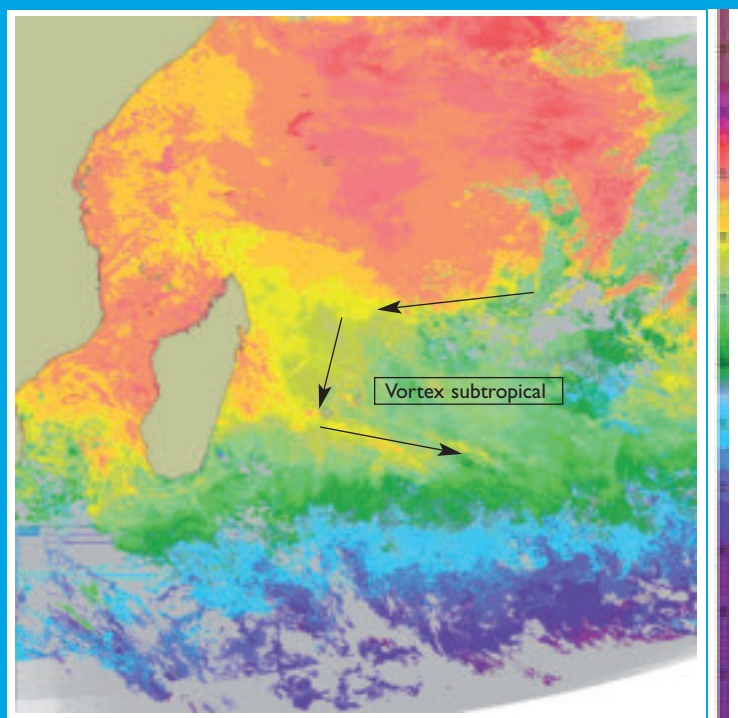
▲ Fig. 39 - Tourbillons et anomalies du niveau de la mer, semaine du 15 septembre 1999.



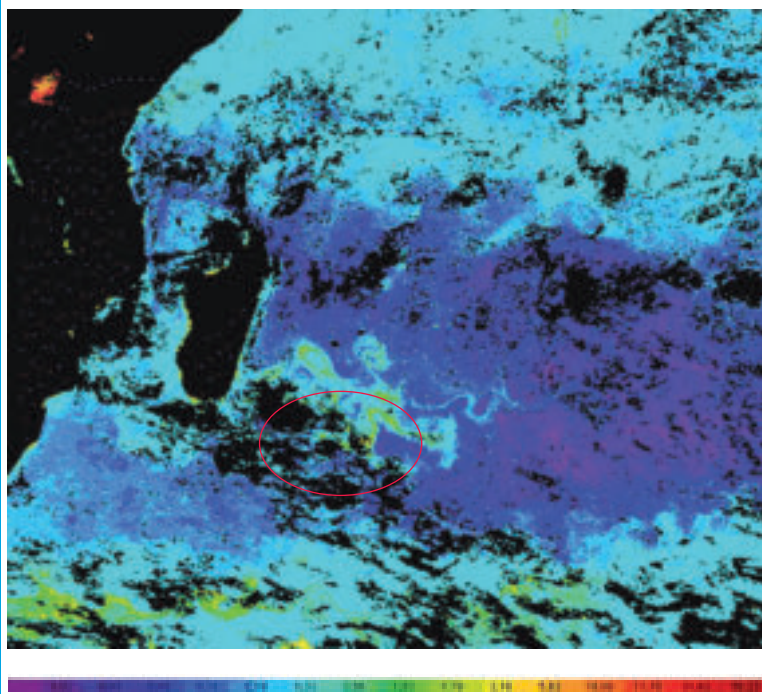
▲ Fig. 40 - Bathymétrie du mont sous-marin au sud de La Réunion, d'après BAUDRY et al. (1994, 1998).



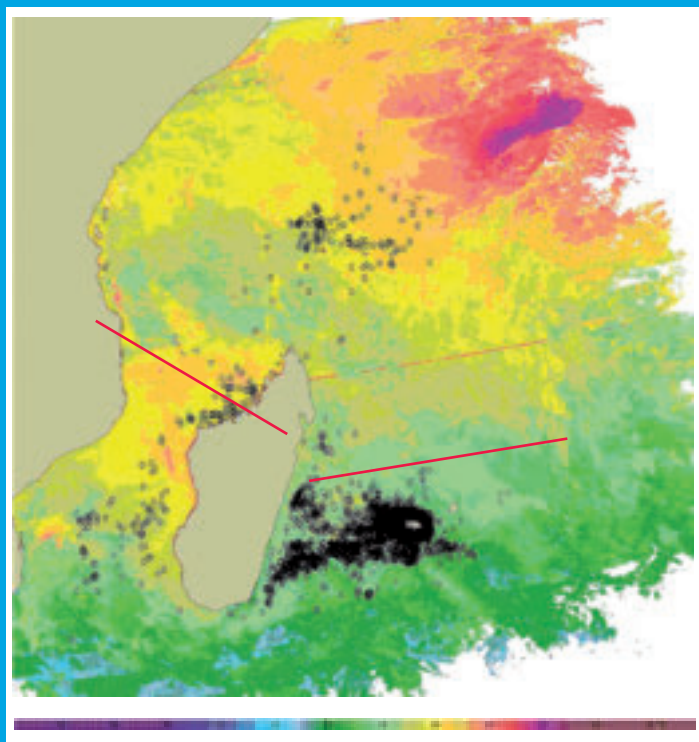
▲ Fig.41 - Bathymétrie de l'océan Indien (SMITH et SANDWELL, 1997).



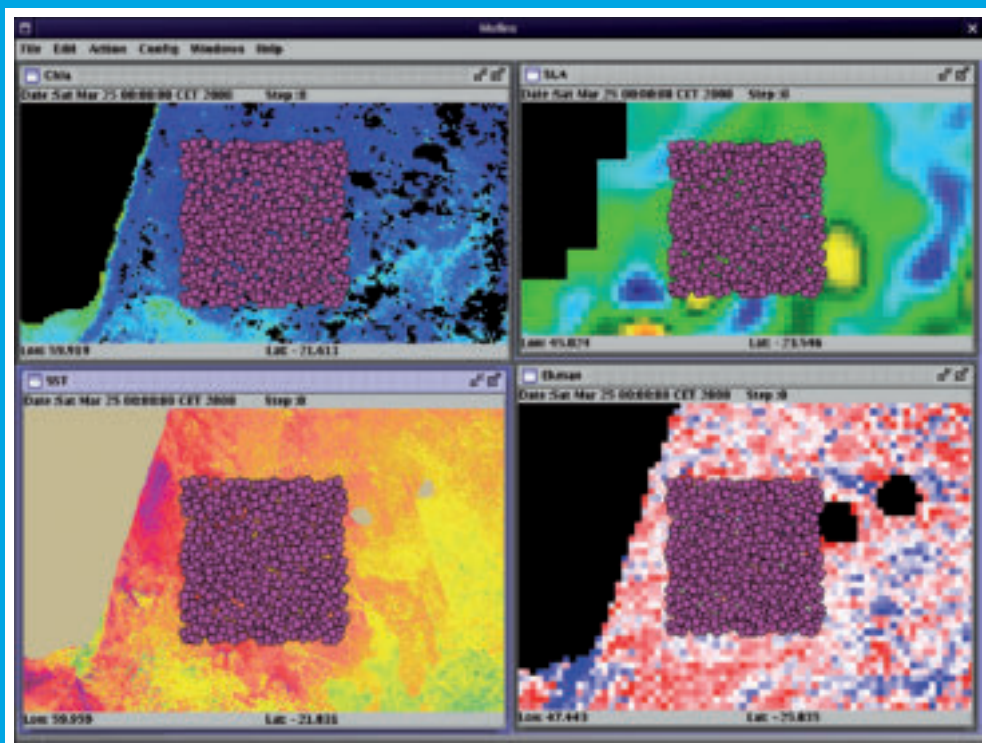
▲ Fig. 42 - Illustration de l'effet du vortex subtropical sur la circulation de surface (image de la température de surface (synthèse en °C) du 28 octobre 1999) ; les courants de surface au sud de La Réunion ramènent de l'eau plus chaude dans la circulation vers l'est (vers 22-25° S).



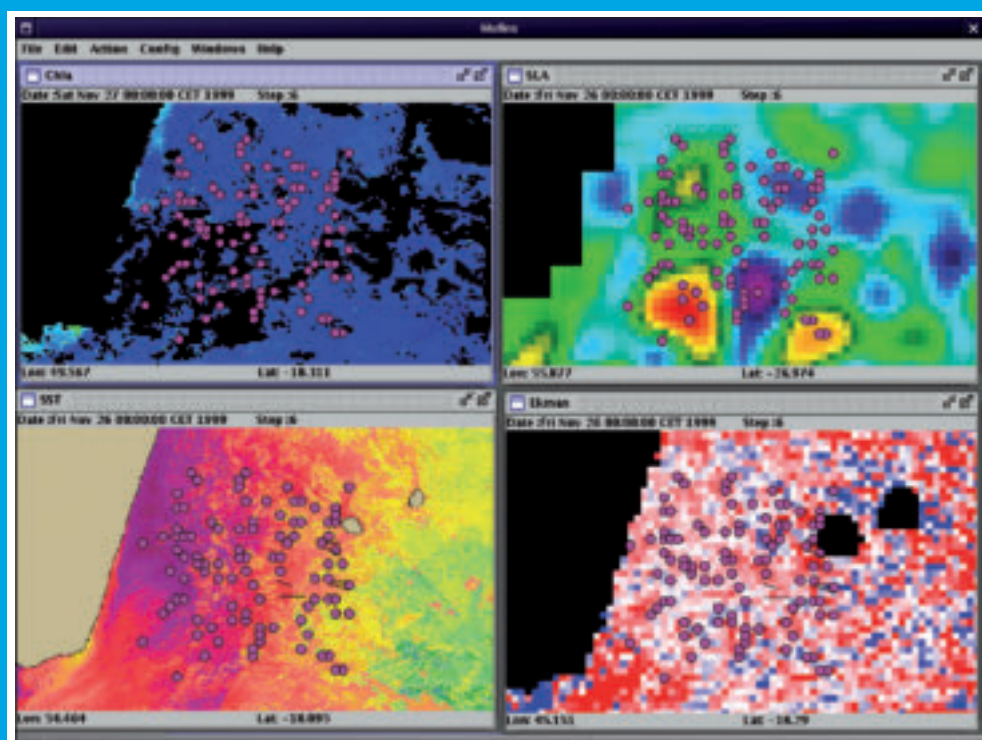
▲ Fig. 43 - Mise en évidence sur une image du contenu chlorophyllien de zones d'enrichissement ponctuelles, à la latitude des méandres de la rétroflexion sud-malgache, provoquant des phénomènes de divergence en surface (carte de contenu chlorophyllien, en mg.m^{-3}), du 25 mai 1999).



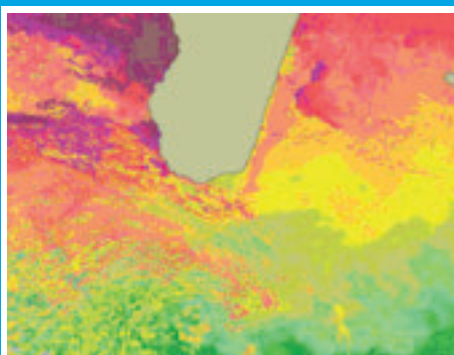
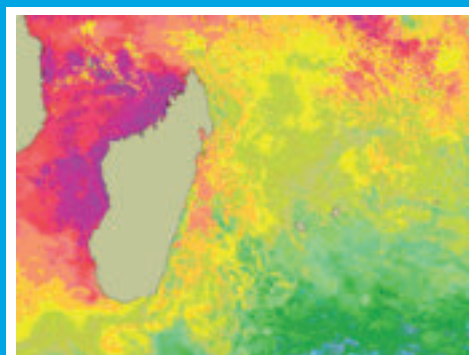
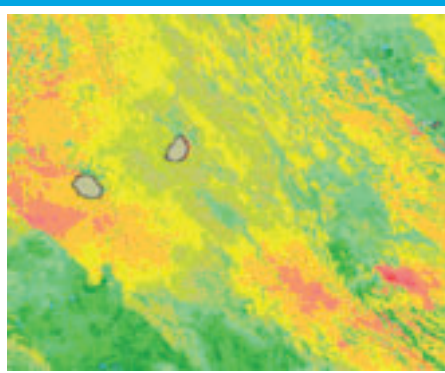
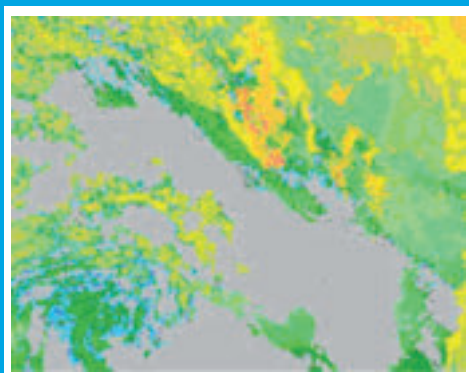
▲ Fig. 63 - Distribution des pêches à la palangre sur la période 1998/2000.



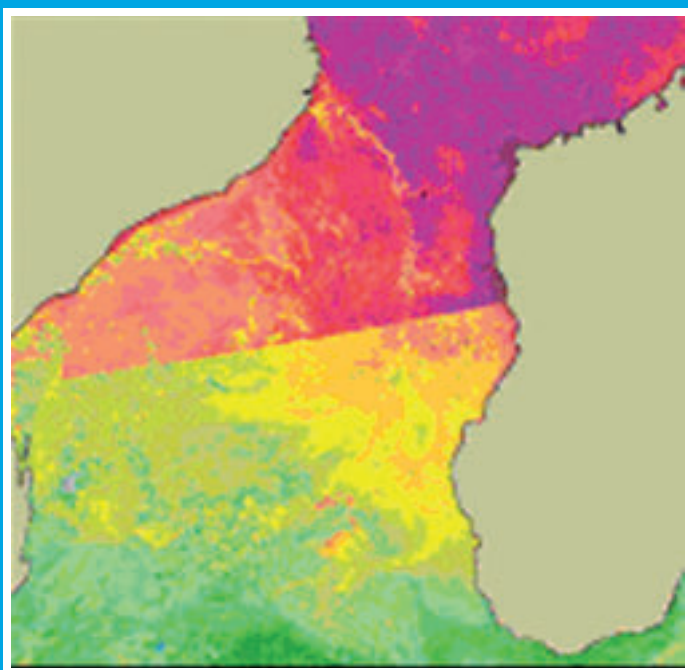
▲ Fig. 110 - Interface graphique de MUFINS : à l'initialisation, en attente du départ de la simulation.



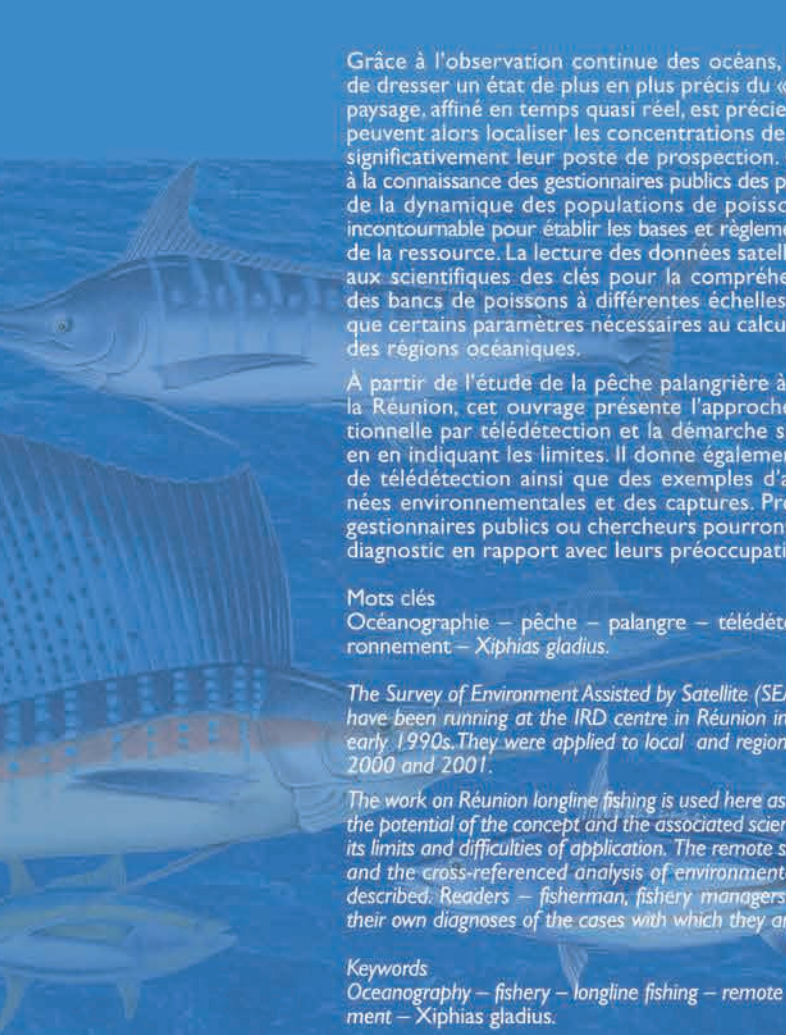
▲ Fig. 111 - Interface graphique de MUFINS : en cours de simulation (les traits fins représentent les lignes de pêche).



▲ Fig. 119 - Exemples d'images contaminées par les nuages.



▲ Fig. 120 - Exemple d'une image avec un changement irréaliste de température.



Grâce à l'observation continue des océans, les satellites permettent de dresser un état de plus en plus précis du « paysage océanique ». Ce paysage, affiné en temps quasi réel, est précieux pour les pêcheurs qui peuvent alors localiser les concentrations de poissons et ainsi réduire significativement leur poste de prospection. Ce même paysage, porté à la connaissance des gestionnaires publics des pêcheries et des spécialistes de la dynamique des populations de poissons, est une information incontournable pour établir les bases et règlements d'une gestion durable de la ressource. La lecture des données satellitaires donne par ailleurs aux scientifiques des clés pour la compréhension des déplacements des bancs de poissons à différentes échelles spatio-temporelles ainsi que certains paramètres nécessaires au calcul du potentiel halieutique des régions océaniques.

À partir de l'étude de la pêche palangrière à l'espadon depuis l'île de la Réunion, cet ouvrage présente l'approche de l'halieutique opérationnelle par télédétection et la démarche scientifique associée, tout en indiquant les limites. Il donne également les outils et méthodes de télédétection ainsi que des exemples d'analyse croisée des données environnementales et des captures. Professionnels de la pêche, gestionnaires publics ou chercheurs pourront ainsi établir leur propre diagnostic en rapport avec leurs préoccupations.

Mots clés

Océanographie – pêche – palangre – télédétection – satellites – environnement – *Xiphias gladius*.

The Survey of Environment Assisted by Satellite (SEAS) programme and concept have been running at the IRD centre in Réunion in the Indian Ocean since the early 1990s. They were applied to local and regional longline fishing grounds in 2000 and 2001.

The work on Réunion longline fishing is used here as a case study to demonstrate the potential of the concept and the associated scientific work without concealing its limits and difficulties of application. The remote sensing tool and methodology and the cross-referenced analysis of environmental and fishing data are also described. Readers – fisherman, fishery managers and scientists – can make their own diagnoses of the cases with which they are concerned.

Keywords

Oceanography – fishery – longline fishing – remote sensing – satellite – environment – *Xiphias gladius*.

Michel Petit, directeur de recherche à l'IRD, spécialiste de l'océanographie spatiale des pêches, actuellement responsable des projets « Observation de la Terre » au sein de l'unité Espace, a créé le laboratoire SEAS de l'IRD à la Réunion qu'il a dirigé de 1991 à 1996.

Frédéric Huynh, ingénieur de recherche à l'IRD, spécialiste des approches intégrées au service du développement, est actuellement directeur de l'unité d'Expertise et spatialisation des connaissances en environnement (Espace, 5140).

IRD

213, rue La Fayette
75480 Paris cedex 10
editions@paris.ird.fr
www.ird.fr

Diffusion

IRD, 32, avenue Henri-Varagnat
93143 Bondy cedex
fax : 01 48 02 79 09
diffusion@bondy.ird.fr
www.editions.ird.fr



34 €

ISBN 2-7099-1583-9