

Des archives climatiques rendues accessibles

Claude Roy

océanographe

Marie-Hélène Durand

économiste

L'océanographie physique a longtemps été le champ de l'observation et de la mesure, elle s'est ensuite orientée vers la compréhension et la description de la dynamique des océans. Aujourd'hui, l'océanographie prend une part importante dans les recherches menées sur le climat et se tourne vers la compréhension de la dynamique couplée du système océan-atmosphère. Depuis le début du siècle, des échanges ont été entretenus avec la biologie marine dans le but de mieux appréhender l'impact des fluctuations de l'environnement marin sur la variabilité des populations marines. Plus récemment, la perception d'un changement climatique global et l'urgence de produire quelques résultats fiables en ce domaine ont posé, de façon nouvelle et cruciale, la question de la disponibilité et de la qualité des données historiques. De longues séries de données sont nécessaires pour que l'évaluation scientifique puisse se faire convenablement et soutenir les décisions à prendre en cette matière (HOUGHTON *et al.*, 1990). Dans ce contexte, la constitution de bases de données historiques a pris une importance grandissante. Le coût élevé de collecte et de traitement et le caractère universel et fondamental de ces données ont conduit à la mise en place de projets de grande envergure, rassemblant de nombreux laboratoires et s'appuyant sur des collaborations internationales. La base de données Coads (Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset ; WOODRUFF *et al.*, 1987) est un exemple, parmi d'autres, des produits issus de ces projets.

Ceos (Climate and Eastern Ocean Systems), qui s'est déroulé de 1991 à 1995, est un programme de recherche international sur le thème des changements climatiques et de leurs impacts sur les ressources marines côtières et leur exploitation par la pêche (BAKUN *et al.*, 1993, DURAND *et al.*,

1998). L'objectif était de mener des études comparatives, entre les écosystèmes côtiers de bord est des océans (upwellings côtiers), de la variabilité climatique et de la dynamique des ressources marines. Ceos devait disposer pour cela d'une base de données environnementales permettant de bâtir des chronologies sur chacune des zones pour les cinquante dernières années. Le fonctionnement en réseau de Ceos a conduit à développer, à partir de Coads, un produit facilement diffusable et accessible à des laboratoires ne disposant pas de moyens informatiques lourds. Une réflexion sur la nature et la caractérisation des changements climatiques à partir de séries temporelles a parallèlement été menée par Ceos.



IRD/A. Ganachaud

Mise à l'eau de la bouée de surface dans le cadre du programme Toga (Tropical Ocean and Global Atmosphere). Campagne Subtropac 15.

Un bref historique

Au temps de la marine à voile et jusqu'à l'avènement des outils modernes de navigation (Decca, radar, Loran, Toran et maintenant GPS), les observations météorologiques réalisées à bord des bateaux étaient d'une importance cruciale pour entretenir l'estime (c'est-à-dire connaître sa position) et donc arriver à bon port. Ces observations étaient scrupuleusement consignées sur les livres de bord. La direction et la vitesse du vent, la pression atmosphérique, la température de l'eau et de l'air, l'état de la mer, la nébulosité, la visibilité, etc. étaient les paramètres les plus couramment archivés. D'autres informations, comme la vitesse et la direction du courant, étaient non pas mesurées mais évaluées à partir de la différence entre les positions estimées et celles obtenues par la navigation astronomique (sextant). Rapidement, il est apparu que la compilation de ces informations était d'un intérêt considérable pour améliorer notre connaissance des océans, qui représentent près de 70 % de la surface totale du globe terrestre. Les principales étapes de la mise en place, sur le plan international, d'un système homogène de collecte de ces données sont résumées dans le tableau VIII.

La conférence de Bruxelles, en 1853, a jeté les bases de l'organisme qui supervise aujourd'hui la collecte, le traitement et la distribution des données météorologiques : l'Organisation météorologique mondiale (OMM), dont le siège est à Genève (Suisse). Réunie à l'initiative de M. F. Maury, du service hydrographique de la Marine américaine, cette conférence avait pour objectif de débattre de la mise en place d'un système uniforme de collecte de données météorologiques et océanographiques sur les océans et de l'utilisation de ces données comme aide à la navigation. La conférence ayant approuvé les idées avancées par M. F. Maury, différents

TABL. VIII — Chronologie des principales étapes ayant conduit à la mise en place d'un système mondial d'observation des océans.

1626	Le capitaine J. Smith publie le premier document pour la codification du vent dans les livres de bord.
1775	B. Franklin utilise un thermomètre comme aide à la navigation et pour la cartographie du Gulf Stream.
1805	F. Beaufort définit un code pour quantifier la vitesse du vent. Des versions révisées de ce code sont toujours employées aujourd'hui.
1831	W. Marsden définit un système universel de codification des positions (« <i>Marsden square</i> ») afin de faciliter l'archivage et l'analyse des observations réalisées par les bateaux.
1841	M.F. Maury publie une série de cartes de vent et de courant basées sur une première analyse des livres de bord qu'il distribue en échange d'informations météorologiques.
1853	Conférence maritime de Bruxelles dont l'objectif est de mettre en place un système international de collecte et d'échange de données météorologiques sur les océans. Cette conférence est le premier pas vers l'établissement de l'Organisation météorologique mondiale.

centres nationaux ont pris en charge la collecte et l'archivage des informations contenues dans les livres de bord.

À partir de 1940, afin de fournir des informations à la flottille américaine opérant dans le Pacifique ouest et pour préparer le débarquement des Alliés en Normandie, des collections de données ont été rassemblées. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, de gros efforts ont été déployés pour combiner ces jeux de données sous un format unique. Ce travail était justifié par la nécessité de mieux connaître le climat à l'échelle mondiale, par les besoins de plus en plus importants exprimés par les services météorologiques afin d'affiner les prévisions météorologiques et le développement des premiers modèles. Dans les années soixante, aux États-Unis, quinze jeux différents de données ont été rassemblés par le National Climate Data Centre (NCDC) sous un format unique : Tape Data Family 11, plus connu sous l'abréviation TDF-11 (NCDC, 1968).

La mise au point et la diffusion de ce premier jeu de données uniformisées, associées à la croissance exponentielle des moyens de traitement informatique, ont montré l'intérêt que pouvait représenter la mise en valeur de ces bases de données historiques pour la recherche océanographique et pour la prévision météorologique. Cela a donné une impulsion considérable aux tâches de sauvetage et d'archivage des données historiques. Au cours des années soixante-dix, de nombreux projets ont vu le jour afin de compléter ces jeux de données avec des archives encore inexploitées et d'évaluer la validité des informations ainsi obtenues. De nombreux biais et inconsistances ont été mis en évidence. Parmi ceux-ci, on peut citer le biais introduit dans les séries temporelles de température de surface de la mer (TSM) suite aux modifications intervenues dans le mode de collecte des données au cours des années quarante. Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, la mesure de la TSM était réalisée à partir d'un échantillon d'eau de mer prélevé à l'aide d'un seau en toile ou en bois. Une fois sur le pont du navire, l'évaporation peut entraîner un refroidissement de l'échantillon et ainsi fausser la mesure. Dans l'Atlantique nord, des études ont montré qu'en hiver la correction à apporter aux séries de TSM peut atteindre 1 °C (FOLLAND et HSIUNG, 1987 ; FOLLAND et PARKER, 1990 ; JONES et WIGLEY, 1992). À la fin des années quarante, l'apparition de seaux isolés et la mise en place progressive de thermomètres sur la prise d'eau des machines a supprimé ces problèmes, mais d'autres sont apparus !

Le projet de création de Coads a vu le jour en 1981, à l'initiative conjointe de plusieurs laboratoires américains (CIRES, ERL, NCAR, NCDC). La base de données devait être d'utilisation facile et relater l'histoire de la

variabilité climatique des océans de 1854 à 1979. Plus de 100 millions d'observations météorologiques couvrant l'ensemble des océans et provenant de sources diverses ont ainsi été rassemblées. Diverses procédures visant à trier les enregistrements, éliminer les doubles, corriger et valider ce jeu de données ont été appliquées. L'ensemble des procédures de validation mises en œuvre constitue indéniablement le point fort et l'originalité de Coads. Ces procédures consistent à associer à chaque enregistrement différents indicateurs de la « qualité » de la mesure (mode de prélèvement, position par rapport à la moyenne climatique, etc.). Avec une telle structure, chaque utilisateur peut lui-même définir ses propres critères de qualité pour sélectionner ses données, ce qui est un atout majeur par rapport à d'autres bases de données. La première version de Coads, dénommée « Coads release 1 », a été diffusée en 1985, après plus de quatre années de travail. Les principaux paramètres accessibles sont les suivants : température de l'air, de la mer, vitesse des composantes nord-sud et est-ouest du vent, pression atmosphérique, humidité, couverture nuageuse (WOODRUFF *et al.*, 1987).

« Coads release 1 » propose quatorze produits différents couvrant la période 1854-1979 : enregistrements originaux qui ont permis de constituer la base de données, enregistrements traités selon la procédure Coads sous différents formats (ASCII : LMR5, Binaire compressé : CMR 5), moyennes des différents paramètres calculées avec différents pas de temps incluant l'ensemble des données (*untrimmed records*) ou une sélection basée sur des tests statistiques (*trimmed records*) (SLUTZ *et al.*, 1985). Les principaux produits sont présentés dans le tableau IX. Pour la période 1981-1990, un jeu de données temporaire, dont la validation est partielle, a été diffusé en 1991. Seuls les formats LMR et CMR permettent l'accès à la donnée individuelle, les autres produits étant constitués de moyennes mensuelles ou de climatologies par carré 2° x 2°. Ces derniers sont les plus couramment utilisés du fait de leur maniement aisé et de leur volume relativement compact.

Depuis la diffusion de Coads, plusieurs groupes de travail ont été organisés afin de débattre des problèmes rencontrés et des améliorations à apporter (WOODRUFF, 1986; DIAZ *et al.*, 1992; DIAZ et ISEMER, 1995). En 1993, une mise à jour de la période 1980-1992 (Release 1 a) a été diffusée, avec des améliorations notables qui ont entraîné une modification du format CMR. Une mise à jour partielle de la période 1950-1995 a été diffusée en 1997 (Release 1 b). Le traitement de l'ensemble des données sous ce nouveau format, avec l'ajout de nombreuses données et de nouvelles procédures de contrôle, a été effectué en 1998 (Release 2).

Produits	Type	Nombre de bandes magnétiques
Long Marine Reports (LMR 5)	R	48
Decadal summaries, trimmed or untrimmed	D	2
Compressed Marine Reports (CMR 5)	R	18
Monthly summaries untrimmed	M	9
Monthly summaries trimmed	M	18
NCDC TD-1129	R	115

Identification du type de produit : R = enregistrements individuels ; M = moyennes mensuelles par carré 2° x 2° de 1854 à 1979 ; D = climatologie décennale par mois et par carré 2° x 2°. Le nombre de bandes magnétiques est basé sur une densité de 6250 bpi. LMR correspond à l'ensemble des observations individuelles enregistrées en ASCII de 1800 à 1979 (volume = 39,5 Gb). CMR est une sélection des 28 éléments les plus couramment utilisés, de 1854 à 1979, enregistrements individuels compressés en binaire comportant chacun des indicateurs de qualité (volume = 13,7 Gb). TD 1129 est le jeu de données initial à partir duquel Coads a été élaboré (volume = 84,6 Gb).

TABLE IX — Liste des différents produits de la base de données Coads (Release 1).

L'utilisation de Coads dans le programme Ceos

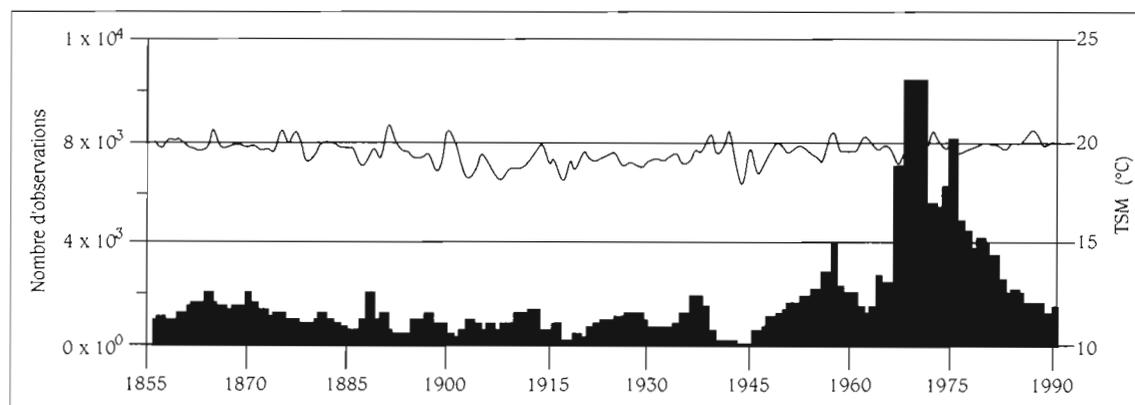
Un des objectifs du programme Ceos était de rassembler et d'analyser, selon une approche comparative, les données concernant les quatre grands écosystèmes d'upwelling au cours des quarante dernières années (BAKUN *et al.*, 1993). Pour les aspects climatiques, il existe peu de bases de données ayant une telle couverture spatiale et temporelle. L'étendue échantillonnée par les bateaux marchands couvre la majeure partie des océans ; dès la fin du XIX^e siècle, il était en effet possible de construire des chroniques de la variabilité climatique le long des rails de navigation qui sillonnent l'Atlantique sud en direction du cap Horn et du cap de Bonne-Espérance (fig. 33). Par ailleurs, il fallait disposer d'un jeu de données homogènes, spatialement et temporellement, afin de réaliser les analyses rétrospectives et comparatives envisagées par Ceos. Rapidement, il est apparu que seul Coads permettait de répondre à ces besoins. Certes, Coads ne rassemble que des données de surface, mais la densité des données océanographiques de subsurface disponibles est encore faible et il est illusoire de vouloir fonder des analyses rétrospectives sur de telles données, notamment dans les zones tropicales.

La relative uniformité des plates-formes d'observation et des méthodes de mesure (observations réalisées à partir de la passerelle des bateaux) permet de comparer, d'une région ou d'un océan à l'autre, des séries temporelles obtenues à partir des observations rassemblées dans Coads. De telles com-

paraisons sont difficiles à réaliser avec d'autres types de données. Avec des stations côtières, par exemple, les principales difficultés résident dans les modes de prélèvement et le pas d'échantillonnage qui diffèrent d'une station à l'autre ; souvent, ces données ne reflètent que des conditions très locales qu'il est difficile d'étendre à l'ensemble d'une zone (influence du relief sur le vent, prélèvements réalisés dans les ports situés en général dans des zones abritées). Les données satellitaires offrent une couverture mondiale mais qui ne remonte guère au-delà des années quatre-vingt. Pour ces données, les problèmes liés à la calibration et à la dérive des capteurs sont encore loin d'être entièrement résolus ; dans de nombreuses régions (zone équatoriale par exemple), la trop forte couverture nuageuse ne permet pas de disposer d'observations de manière continue.

Les données Coads ne sont pas exemptes de biais et d'erreurs, mais les principales limitations sont connues et documentées du fait du travail de recherche réalisé par un grand nombre d'organismes et des échanges constamment entretenus entre les concepteurs et les utilisateurs de la base. Pour les zones tropicales, Coads possède un atout majeur : ce sont très souvent les seules données disponibles ! Un autre élément essentiel est la présence de rails de navigation près des côtes, avec une forte densité de données permettant un échantillonnage fin et régulier (fig. 33). En Afrique de l'Ouest, du Maroc au Sénégal, la densité des données avec un maillage de $2^\circ \times 2^\circ$ est en général supérieure à une centaine d'observations par mois, permettant ainsi de bâtir des séries temporelles continues et relativement fiables depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale.

FIG. 33 — Évolution annuelle du nombre d'observations et de la température de surface de la mer (TSM) dans l'Atlantique sud, de 1854 à 1990 (zone : $20\text{-}30^\circ \text{ S}$, $0\text{-}10^\circ \text{ E}$).



L'intérêt de ces données pour les recherches halieutiques a été démontré dans le cadre d'un programme de recherche sur la variabilité et l'instabilité des ressources pélagiques côtières d'Afrique de l'Ouest, réalisé par l'Orstom et les partenaires régionaux (Maroc, Mauritanie, Sénégal, Côte d'Ivoire et Ghana) à partir du Centre de recherche océanographique de Dakar-Thiaroye (CRODT) à la fin des années quatre-vingt (Cury et Roy, 1991). Un sous-ensemble du fichier TDF-11 (Atlantique 30° N-20° S, 1964-1984) a été utilisé pour quantifier la variabilité de l'environnement en Afrique de l'Ouest. Profitant des moyens informatiques disponibles au CRODT, un certain nombre de programmes d'interrogation et de traitement ont été développés, tout d'abord sur le calculateur central du centre, puis en transférant les données et les programmes sur des micro-ordinateurs de type PC. Ce produit, diffusé auprès des partenaires régionaux, leur a donné accès pour la première fois aux données collectées devant leurs côtes; une dynamique de recherche sur les interactions entre l'environnement, les ressources et leur exploitation par la pêche a pu s'amorcer. Le projet Ceos qui inclut l'ensemble des zones d'upwelling mondiales est le prolongement logique de cette expérience régionale.

Conception et développement de Coads

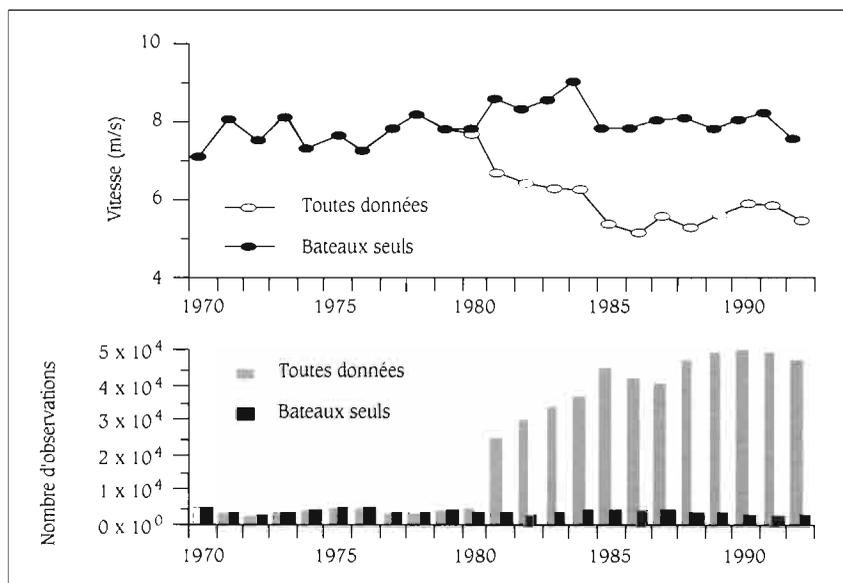
Le réseau scientifique Ceos, qui associe des pays en développement aux trois instituts leaders (NOAA, Iclarm, Orstom) du programme Ceos, étant une composante majeure du projet Coads, il est apparu indispensable d'assurer la diffusion de la base de données auprès d'une communauté scientifique ne disposant pas de moyens informatiques lourds. La décision fut prise de développer l'ensemble de la base et les outils d'interrogation sur micro-ordinateur. Parmi les nombreux produits disponibles au NCAR, le choix s'est porté sur les jeux de données prétraités (moyennes mensuelles des paramètres les plus usuels par carré 2° x 2°). Le volume relativement faible de ces fichiers (80 Mb), comparé à celui du jeu de données originales (3,2 Gb sous le format CMR 5), et la facilité de mise en œuvre ont constitué les éléments déterminants de ce choix.

Un prototype a été développé (sur PC et Macintosh) et les premières analyses ont commencé, ainsi que les premières difficultés... Le maillage spatial rigide (grille 2° x 2°) ne permettait pas en effet de prendre en compte la topographie de la côte. Les rails de navigation sur lesquels la densité des observations est maximale se trouvaient parfois distribués sur deux éléments de la grille. Le problème majeur résidait cependant dans le calcul des moyennes mensuelles réalisé par le NCAR, qui intègre sans discernement l'ensemble des données disponibles.

Deux exemples illustreront les difficultés rencontrées. Le premier a trait aux données provenant de plates-formes différentes et qui sont intégrées dans une même base de données. À partir des années quatre-vingt, des données provenant de bouées météorologiques sont incluses dans le calcul de la moyenne au même titre que des données provenant des bateaux marchands. Or la fréquence d'échantillonnage et la localisation de ces bouées dans des zones très côtières entraînent des biais qui affectent de manière significative les séries temporelles ainsi obtenues (fig. 34).

Le second exemple concerne les biais pouvant intervenir dans une série temporelle à la suite de modifications des méthodes de collecte des données. Jusqu'au début des années cinquante, la vitesse du vent était déterminée visuellement et codée suivant l'échelle de Beaufort (de 1 à 12 degrés). Par la suite, un nombre croissant de bateaux fut équipé d'anémomètres, permettant une lecture directe de la vitesse et de la direction du vent. Pour coder ces données sous un format unique, une table de conversion échelle de Beaufort-noeuds (ou m/s) est utilisée. Malheureusement, cette table de conversion, élaborée au début du siècle, sous-estime les vents faibles et modérés. Comme le nombre de données de vent mesurées à l'aide d'un anémomètre s'accroît régulièrement depuis les années cinquante, le vent moyen calculé à partir de l'ensemble des données disponibles (estimées à partir de l'échelle de Beaufort et mesurées avec un anémomètre) présente un biais systématique se traduisant par une tendance positive, totalement fictive (fig. 35).

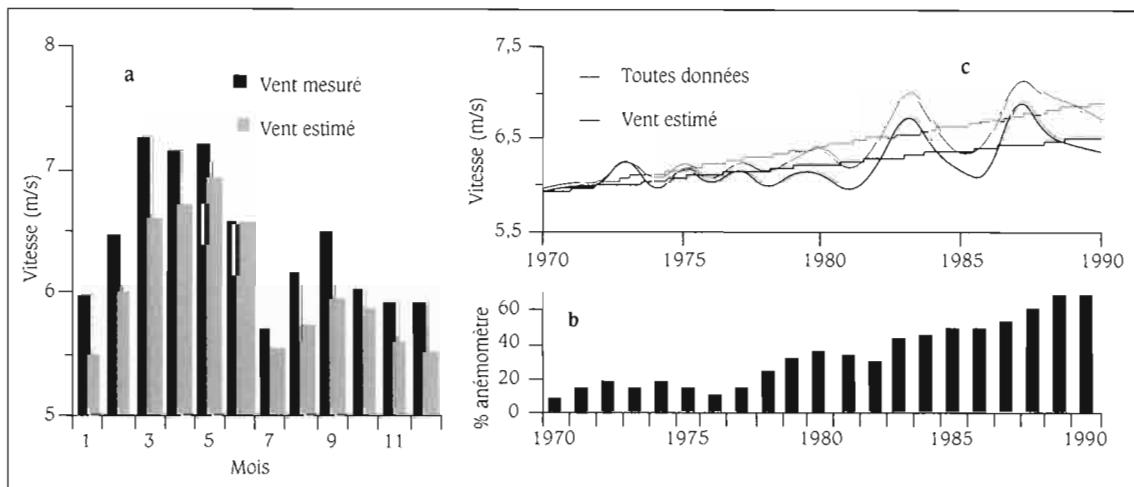
FIG. 34 — Vitesse moyenne du vent, par année, de 1970 à 1992, calculée en utilisant toutes les données disponibles (bateaux et bouées) et en ne sélectionnant que les données provenant des bateaux.



Utiliser les données prétraitées par le NCAR sous forme de moyennes mensuelles présentait de nombreux attraits, mais ce type de produit ne convenait pour des études climatiques du fait des nombreux biais existants. Seul l'accès aux données individuelles permet de contourner certaines de ces difficultés. La décision fut prise de développer la base de données à partir des fichiers au format CMR5, lesquels permettent de conserver l'accès aux enregistrements individuels. Le volume important de ces fichiers (3,2 Gb) a pu être traité grâce à de nouveaux périphériques de stockage de grande capacité (disque optique). Pour la diffusion à travers le réseau, la solution adoptée fut le transfert des fichiers sur cinq CD-Rom dont une centaine d'exemplaires fut produite.

Un module d'interrogation a par ailleurs été développé (MENDELSSOHN et ROY, 1996), dont les tâches ont volontairement été limitées à la sélection, l'extraction et le calcul de séries temporelles selon différents pas d'espace et de temps. On privilégie ainsi la rapidité d'accès aux données mais surtout on laisse à l'utilisateur le libre choix des outils pour la visualisation et le traitement des séries. D'autre part, il aurait été inutile de se lancer dans une telle voie alors qu'il existe sur le marché de nombreux logiciels scienti-

FIG. 35 — a. Climatologie mensuelle de la vitesse du vent devant les côtes californiennes calculée à partir des données de vent mesurées (anémomètre) et estimées (échelle de Beaufort)
b. Évolution entre 1970 et 1990 du pourcentage de données de vent récoltées en utilisant un anémomètre



c. Comparaison de l'évolution interannuelle et de la tendance (ajustement linéaire) de la vitesse du vent entre 1970 et 1990 calculées à partir des données mesurées (anémomètre) puis estimées (échelle de Beaufort).

fiques extrêmement performants pour réaliser ces tâches. La sélection des données s'opère selon différents critères : critères géographiques (latitude-longitude) et temporels (année-mois); critères relatifs à l'origine (bateaux, bouées), et le type de données (données de vent estimées ou mesurées); critères statistiques.

Les grandes bases de données climatiques, avec des variables mesurées et des méthodes de collecte homogènes à l'échelle planétaire, sont fondamentales pour l'étude des changements environnementaux. La variabilité du climat océanique fait l'objet d'un très grand nombre de recherches dans le monde, à la fois pour son rôle dans la circulation atmosphérique et l'évolution climatique générale et pour son impact sur les écosystèmes marins. Caractériser les changements qui surviennent réellement dans le climat et l'environnement est devenu un problème crucial. C'est une question difficile qui nécessite de considérer avec attention ce que l'on entend très exactement par le mot changement, et la manière dont les changements apparaissent dans les données. Il importe notamment d'être très prudent quant à l'utilisation et à l'interprétation des méthodes statistiques utilisées pour les mettre en évidence.

Depuis les premières recherches menées sur la dynamique des espèces pélagiques de l'upwelling ouest-africain et les études du programme Ceos, l'impact des fluctuations climatiques sur la dynamique des espèces pélagiques est maintenant bien établi. La relation qui a été mise en évidence entre l'environnement et les ressources pélagiques a pu être quantifiée sur l'ensemble des écosystèmes d'upwelling, et il apparaît qu'elle pourrait même être étendue à d'autres espèces marines. Par ailleurs, il est possible que le réchauffement global ait un effet positif sur la tension des vents parallèles à la côte et produise donc une intensification des upwellings côtiers (BAKUN, 1990). Les séries temporelles de tension de vent le long du bord est des océans semblent en effet avoir une tendance positive depuis le début des années cinquante. Cette tendance est un trait partagé par les différentes séries couvrant l'Atlantique et le Pacifique, toutes autres manifestations de « changement » paraissant plus locales ou transitoires. Si ce phénomène s'avère effectivement généralisé, on devra y voir l'effet d'un changement climatique global. L'avenir à long terme de certaines pêcheries en serait dès lors irrémédiablement affecté.

L'analyse des changements climatiques des upwellings côtiers s'articule autour d'un certain nombre de questions :

Changements climatiques et dynamique des espèces

- Y a-t-il des modifications du cycle saisonnier ?
- Observe-t-on réellement des tendances de long terme ?
- Les changements sont-ils permanents ou transitoires ?
- Existe-t-il des ruptures de tendance, à partir de quel seuil ?

Ces phénomènes sont difficiles à mettre en évidence. La variabilité climatique étant naturelle, à partir de quel degré de mouvement peut-on parler de changement ? Si les chercheurs sont généralement prudents dans leurs conclusions, c'est parce que les résultats dépendent fortement de la longueur des séries analysées. Par exemple, s'il existe un cycle naturel long d'une quarantaine d'années et si on examine une série de vingt ans de données seulement, on conclura de façon erronée à l'existence d'un « changement climatique ».

Les océanographes cherchent également à savoir si des chocs autonomes, tels ceux produits par les phénomènes de type Enso¹, ont des effets permanents ou transitoires sur la dynamique des océans, si les changements saisonniers ou les tendances convergent d'une quelconque façon pour différentes variables océanographiques. Ou encore, en analysant les évolutions communes d'une variable sur un large ensemble géographique, il s'agit de savoir à partir de quel niveau de glissement il est possible de parler de zone de rupture ou de transition, cela pouvant correspondre, par exemple, à un seuil écologique et aboutir à un barrage écologique aux migrations de poissons.

Pour comprendre le comportement d'une variable et formuler quelques hypothèses, il est habituel de distinguer, dans l'évolution générale d'une série, différents mouvements caractéristiques : tendanciel, cyclique, saisonnier et résiduel. Cela suppose que l'on soit capable d'identifier correctement et d'extraire ces diverses composantes d'une donnée observée et synthétique par nature. Détecter des « tendances » et statuer sur l'existence d'un « changement saisonnier » est loin d'être facile. En dépit d'une longue histoire de l'étude des tendances, cycles et saisonnalité, la littérature offre une grande variété de définitions. Il est maintenant usuel, lorsqu'on analyse une série temporelle tendancielle, de s'interroger au préalable sur le caractère stochastique ou déterministe de la tendance. Dans les échantillons finis, ces deux types de tendance ont la même apparence. Une batterie de tests a été mise au point pour distinguer ces deux cas préalablement à toute représentation. En effet, les propriétés statistiques de ces séries et les modèles à utiliser sont radicalement différents. Sur les séries réelles, l'existence conjointe des deux types de tendance, ou encore, plus fréquemment, l'existence

¹ El Niño Southern Oscillation : événement climatique à grande échelle intervenant à intervalles réguliers.

Sa manifestation la plus connue est le phénomène « El Niño » qui se traduit par une anomalie chaude de l'océan dans la partie est du Pacifique, pouvant atteindre 5 à 7 °C pendant plusieurs mois.

d'un retournement ou d'une rupture de tendance, complique sérieusement la mise en œuvre de ces tests et la fiabilité de leurs résultats. Identifier les propriétés statistiques d'une série observée permet donc de caractériser les changements qui surviennent dans l'environnement océanographique.

Une étape clé pour la compréhension de la dynamique des upwellings est d'appréhender les liens qui existent entre des évolutions ou des tendances communes qui affectent de la même manière une large zone géographique (changement global) et les mouvements cycliques, stationnaires ou non, propres à une zone particulière (dynamique et changement locaux). Dans d'autres disciplines, des recherches portent également sur l'analyse de séries temporelles. Plusieurs modèles d'analyse des séries chronologiques développés récemment en économétrie peuvent utilement être adaptés à l'étude des données environnementales (STERN et KAUFMANN, 1999). Notamment certains modèles multivariés (modèles de cointégration), considérés dans un contexte spatial, permettent d'analyser la variabilité des données environnementales à différentes échelles spatiales et temporelles et de distinguer la part des changements qui relève d'une tendance globale de celle qui reste particulière à une zone géographique donnée (DURAND et MENDELSSOHN, 1998). Les modèles dits d'« espace-état » et le filtre de Kalman permettent de décomposer les séries en s'affranchissant d'*a priori* sur les caractéristiques des tendances et de la saisonnalité. Ces méthodes sont encore peu utilisées; elles peuvent pourtant être d'un grand intérêt dans de multiples domaines, spécialement en ce qui concerne l'évaluation des changements environnementaux, mais elles nécessitent l'existence de bases de données avec des séries de taille suffisamment longue pour les mettre en œuvre. Un tel travail a été fait dans le programme Ceos où ces méthodes ont été appliquées aux données Coads pour distinguer les diverses composantes présentes dans les données ainsi que les changements permanents de changements plus transitoires (SCHWING et MENDELSSOHN, 1998).

La base de données Coads a été sollicitée dans de nombreux domaines : études sur la climatologie des upwellings, sur la variabilité du recrutement en Californie et au Chili, sur les stratégies de reproduction dans les zones d'upwelling, sur les bouleversements écologiques dans le golfe de Guinée.

Quelques résultats

La première étape fut d'évaluer la qualité des informations contenues dans Coads et de cerner le degré de confiance qu'on pouvait accorder aux séries temporelles obtenues à partir des extractions réalisées. La mise en évidence des biais introduits par la prise en compte de données issues des bouées devant les côtes californiennes (fig. 34) et les tendances artificielles dues à l'augmentation des données de vent collectées à l'aide d'un anémomètre (fig. 35) sont quelques exemples, parmi d'autres, du travail réalisé dans ce domaine (ROY et MENDELSSOHN, 1998).

Des études comparatives de la variabilité climatique des upwellings ont été réalisées (SCHWING *et al.*, 1998 ; SCHWING et MENDELSSOHN, 1998). Pour ce type d'étude, l'atout majeur de Coads est d'offrir une base de données homogènes sur l'ensemble des océans, permettant des études comparatives inter-écosystèmes. Le type d'analyses et de comparaisons qu'il a été possible de réaliser est illustré par les figures 36 et 37 : comparaison sur 40 ans des caractéristiques thermiques dans quatre régions sujettes aux upwellings (fig. 36) ; synthèse des relations entre des paramètres de l'environnement et les stratégies de reproduction des poissons pélagiques sur l'ensemble des écosystèmes d'upwelling (fig. 37).

Plusieurs travaux portant sur la variabilité du recrutement des espèces pélagiques dans différentes régions ont pu être réalisés à l'aide de Coads, permettant une généralisation du concept de la fenêtre optimale (CURY *et al.*, 1995 ; ROY *et al.*, 1992, 1995). Concernant les bouleversements écologiques apparus au cours des années quatre-vingt en Côte d'Ivoire, l'hypothèse de l'intensification de l'upwelling ivoirien au cours du premier trimestre, émise par PEZENNEC et BARD (1992), a pu être confirmée (ROY, 1995).

Conclusion

La collecte et l'archivage de données climatiques sont aujourd'hui pris en charge par un grand nombre de pays regroupés au sein d'institutions internationales, chargées d'homogénéiser les mesures et les procédures de collecte à l'échelle mondiale. De nombreuses bases de données à vocation climatique sont utilisées par les services météorologiques ou ceux chargés des recherches sur le climat. Malheureusement, ces millions de données ne sont pas toujours facilement utilisables ou accessibles pour des besoins de recherche plus particuliers. Nombre de laboratoires de recherche, notamment dans le domaine de l'agronomie ou la pêche, n'ont pas un accès aisé à ces grandes bases de données conçues en premier lieu pour être exploitées par des physiciens et des

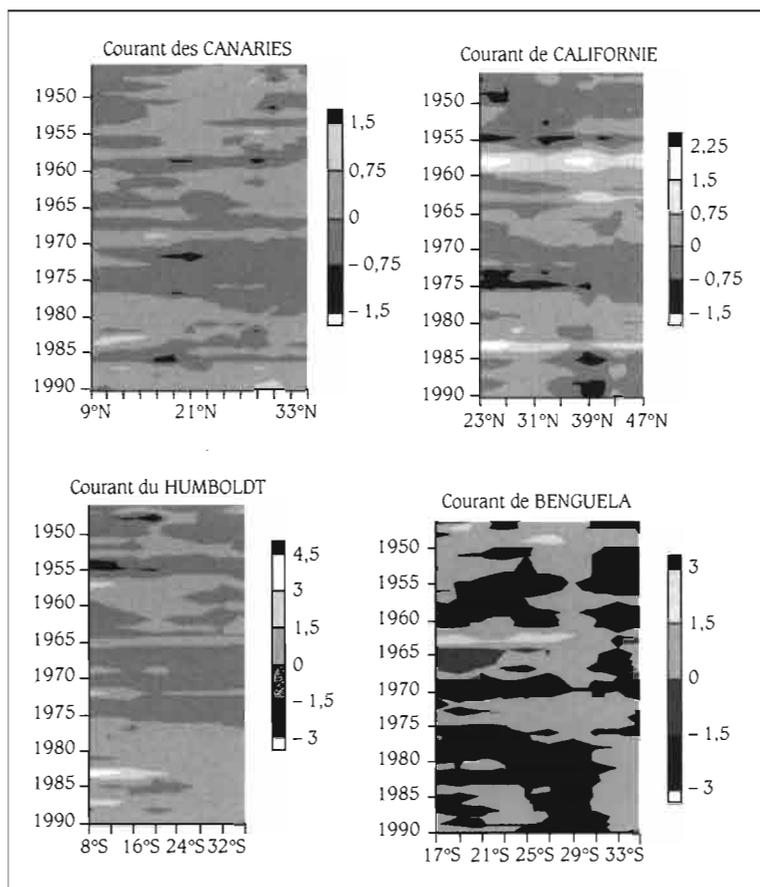


FIG. 36 — Évolution spatio-temporelle des anomalies de température de surface dans les quatre grandes zones d'upwelling déterminées d'après les données Coads (d'après LAURENT, 1996).

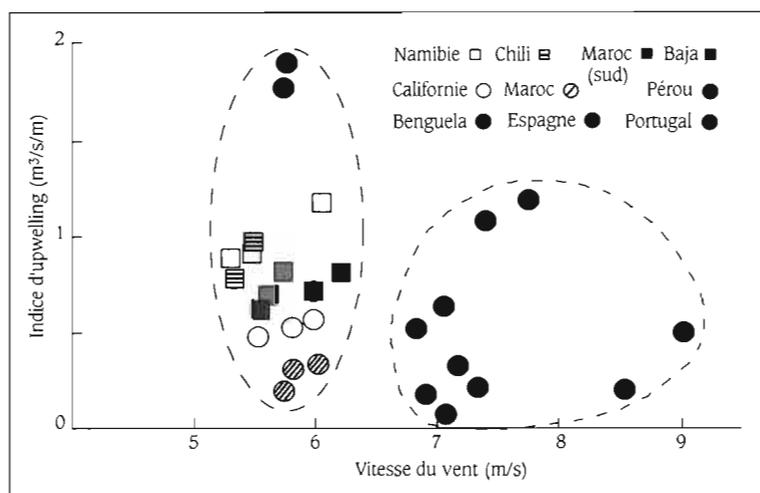


FIG. 37 — Vitesse du vent et indice d'upwelling observés au cours des saisons de ponte de la sardine dans différents écosystèmes côtiers (d'après SHIN *et al.*, 1998).

climatologues. Le traitement et la diffusion des informations vers des utilisateurs ne disposant pas de moyens techniques lourds reste encore très limités malgré l'importance que ces données ont pour des domaines de recherche appliquée tels que celui des interactions ressources-environnement. On cherche, par exemple, à analyser l'impact des changements climatiques sur les ressources naturelles ou à évaluer la part des effets anthropiques et climatiques dans la dynamique des ressources naturelles.

² La nouvelle version de Coads pour la période 1950-1995 est disponible à la NOAA (PFEG-Monterey) et au centre Orstom de Brest. Le programme d'interrogation a été également modifié pour s'adapter au nouveau format des données. La NOAA et le NCAR ont décidé, en 1997, de prendre en charge la mise à jour des produits développés par Ceos ; un nouveau jeu de CD-Rom et une nouvelle interface ont été distribués en 1998.

Le programme Ceos, en éditant la base de données Coads sur CD-Rom² et en développant un logiciel sur micro-ordinateur, a permis de diffuser largement les données Coads auprès des centres de recherche océanographique et halieutique des pays du Nord et du Sud. Il s'agit d'une des avancées majeures accomplies par le programme Ceos. Des CD-Rom ont été produits, leur distribution parmi la communauté scientifique étant assurée par la NOAA pour le Pacifique et par l'Orstom pour l'Atlantique et l'océan Indien. De nombreuses demandes pour cet outil ont été reçues, émanant de chercheurs individuels, de laboratoires de recherche ou d'organismes internationaux.

Nous avons relaté les motivations, les difficultés et l'intérêt de la construction d'une base de données de séries longues et homogènes à une vaste échelle spatiale dans le cadre très particulier d'une recherche en halieutique. Cette expérience est significative des nécessités de l'ensemble des recherches menées sur l'environnement et ses relations avec l'exploitation humaine. On assiste depuis quelques années, et dans divers domaines, à une intense activité de construction de bases de données : collection, archivage, fusion de données déjà existantes mais éparpillées, peu accessibles et donc peu utilisées pour des études comparatives. On peut citer, en biologie, le projet « Species 2000 », issu d'une vaste coopération internationale ; il s'agit d'une sorte de conservatoire des collections du monde entier désormais accessibles à tous sur Internet, offrant un nouvel outil comparatif aux études sur la biodiversité. En effet, certaines problématiques nouvelles, visant à dégager une certaine généralité, ne sont abordables que dans un cadre comparatif et seulement si on dispose de vastes ensembles de données longues et homogènes, lesquelles doivent être accessibles à l'ensemble de la communauté scientifique internationale.