

Océanographie (Géologie marine)

L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998

Ahmed Makaoui^{a,*}, Abdelattif Orbi^a, Karim Hilmi^a, Soukaina Zizah^a,
Jamila Larissi^a, Mohammed Talbi^b

^a Institut national de recherche halieutique, 2, rue Tiznit, Casablanca, Maroc

^b Faculté des sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc

Reçu le 26 février 2004 ; accepté après révision le 29 août 2005

Disponible sur Internet le 24 octobre 2005

Présenté par Xavier Le Pichon

Résumé

L'écosystème pélagique de la côte atlantique marocaine est influencé par la variabilité spatio-temporelle de l'upwelling. L'évolution des paramètres physico-chimiques et biologiques ainsi que leur corrélation et leur regroupement par l'analyse en composante principale nous ont permis de subdiviser le littoral atlantique en quatre zones de remontées : deux zones situées au nord de Cap Juby (28°N), caractérisées par une activité estivale et deux zones situées au sud, actives en permanence avec une intensité variable.

Pour citer cet article : A. Makaoui et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Upwelling of the Moroccan Atlantic coast between 1994 and 1998. The pelagic ecosystem of the Moroccan Atlantic coast is influenced by the spatiotemporal variability of upwelling. The changes in the physicochemical and biological parameters as well as their interrelationship and regrouping by the principal components analysis allowed us to subdivide the Atlantic coast in four active areas: two areas located at the north of Cape Juby (28°N), characterised by a summery activity and two areas located at the south, active permanently, with a variable intensity. *To cite this article: A. Makaoui et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Hydrologie ; Upwelling ; Écosystème pélagique ; Centres actifs ; ACP ; ECNA/ECSA

Keywords : Hydrology; Upwelling; Pelagic ecosystem; Active centres; PCA; SACW/NACW

Abridged English version

The Moroccan Atlantic coast is among the richest coasts in exploitable biological resources. Its shelf is characterised by upwelling of the deep waters that as-

sure a contribution in nutrients that encourage photosynthesis in the superficial waters and so on for the production of the whole trophic food chain. Indeed, the Moroccan coast has the privilege to be among the five known zones in the world that are influenced by the upwelling phenomenon. Thus, in order to maintain productivity, such a system needs a dynamic factor that brings deep rich waters to the surface. A sequence of physical, chemical and biological processes encour-

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : makaouireda@yahoo.fr (A. Makaoui).

ages primary production, and increases the biomass of pelagic resources.

In the framework of cooperation between the Russian Institute AtlantNIRO and the Moroccan Institute INRH, a concerning scientific research program has been undertaken along the Moroccan Atlantic coast since January 1994. During these cruises, oceanographically prospecting consisted in a network of stations distributed in several perpendicular transects to the coast. The physical parameters (temperature, salinity, and density) are collected with a probe (Neil Brown) connected directly to a PC that allows us to collect and record data simultaneously. The Neil Brown probe is bound to 24 bottles, allowing the collection of water samples that are analysed in different laboratories onboard. The phosphates are analysed by spectrophotometry and dissolved oxygen by the Winkler method [2]. Chlorophyll *a* and primary production are analysed by fluorometry [9,12,18] and by the ^{14}C method, respectively [14].

Upon their arrival to the surface thanks to upwelling, waters features depend on two phenomena: not only on the nature of the waters sources, but also the intensity of the biological processes within the surface layer. In winter, the evolution of superficial isotherms and phosphates along the coast show three patches that are cold and nutrient-rich. The surface temperature is about 15 °C between Cape Cantin–Cape Ghir (zone 1) and between Cape Boujdor–Dakhla (zone 3). The last zone presents a thermal front in 26°N. The first one is characterised by the existence of a permanent filament at 31°N latitude [8] and the origin of the ascendant water has a 200-m-deep immersion neighbouring. This situation also appears in Cape Boujdor by the divergence of upwelled water to the Dakhla offshore. The upwelling activity reaches its maximum during the winter (1994), while the origin of ascendance reaches 250 m in depth. The third cold stain is situated between Cape Draa and Cape Juby (zone 2), but is not visible clearly in surface because in this area the continental shelf is larger, not very deep and its slope is less than in zone 1. The temperature is about 15.5 °C. The resurgence in the three zones has an impact on the phosphates concentrations (0.8 and 0.7 $\mu\text{g}/\text{l}$). However, strong concentrations over 1 $\mu\text{g}/\text{l}^{-1}$ have been recorded between Cape Blanc and Cape Barbas (zone 4), caused probably by an advection of South Atlantic Central Waters (SACW), known by their high nutrient concentration.

In summer, the rates of surface chlorophyll *a* and primary production are higher than those during the cold season. Their distribution along the coast is distinguished by high rates in active centres of upwelling

for every zone. However, in zones 3 and 4, rates are higher all year round relatively due to permanent upwelling activity. The results of Principal Component Analysis (PCA) of the data of the two studied years (1995 and 1998) are also very satisfactory concerning the interrelationship between parameters. A first group gathers chlorophyll *a* and phosphates, which are correlated negatively with temperature; salinity and maximal depth constitute the second group. The dissolved oxygen is the only parameter that remained unexplained, because it is the one that is more influenced by physical and biological processes. Also, PCA analysis allowed us to identify, from the matrices of interrelationship, three groups of stations: group I (gathers the upwelling stations); group II (intermediate group); group III (stations characterised by oligotrophic waters). The difference between seasons is the reduction in the number of stations of the intermediate group, which explains the activity of the inshore upwelling and the offshore/coast gradient of several parameters during summer. In winter, the same groups of stations have been identified from the trends of the different parameters.

1. Introduction

La côte atlantique marocaine est considérée comme une des régions les plus riches en ressources biologiques exploitables, classées, selon leurs caractéristiques bio-écologiques et leur importance socio-économique, en trois catégories : ressources pélagiques, démersales et grands migrateurs [10]. Selon la FAO [5], cette richesse se manifeste aussi au niveau des petits pélagiques. Elle est caractérisée par la résurgence des eaux profondes, qui assure un apport en éléments minéraux favorisant la photosynthèse dans les eaux superficielles et, par suite, la production de l'ensemble du réseau trophique [15]. La situation géographique de la côte du Maroc par rapport au courant des Canaries lui donne le privilège d'être influencée par l'un des cinq courants mondiaux générateurs d'*upwelling* [13] : le courant de Californie, le courant du Pérou, le courant des Canaries, le courant de Benguela et le courant de Somalie.

2. Matériel et méthodes

Dans le cadre de la coopération scientifique entre l'institut russe AtlantNIRO et l'Institut national de recherche halieutique (INRH) du Maroc, un programme conjoint a été initié en 1994, à raison de deux campagnes (hiver et été) par an. La prospection océanographique consistait à exploiter un réseau de stations réparties en plusieurs radiales. Les paramètres physiques

(température, salinité et densité) ont été mesurés à l'aide d'une multi-sonde (Neil Brown). Les phosphates ont été analysés par spectrophotométrie et l'oxygène dissous par la méthode de Winkler [2]. Les paramètres biologiques chlorophylle *a* et production primaire ont été analysés respectivement par fluorométrie [9,12,18] et par la méthode du ^{14}C [14].

Sur la côte atlantique du Maroc règnent les conditions nécessaires aux mouvements ascendants : (1) une orientation convenable par rapport à la côte et la stabilité des vents dominants, (2) une localisation en dehors des latitudes équatoriales (car la force de Coriolis ne doit pas être négligeable pour assurer la dérive vers le large [16]). La résurgence est détectée par l'apparition de taches d'eau froide, plaquées sur la côte. Les isothermes forment, à partir du centre de remontée, un panache caractéristique, dont l'axe suit la dérive des eaux de surface [17].

3. Résultats et discussions

3.1. Variabilité saisonnière de la résurgence

3.1.1. Conditions hivernales

L'évolution des isothermes superficielles met en évidence trois taches d'eau froide (Fig. 1a), comprises entre le cap Cantin et le cap Ghir (zone 1), entre le cap Draa et le cap Juby (zone 2) et entre le cap Boujdor et Dakhla (zone 3). La zone 1 se caractérise par l'existence d'un filament permanent au niveau de la radiale 31°N [8]. L'étendue de la zone froide correspond à celle du plateau continental, variant de 15 à 25 milles [4]. Cette situation a été observée durant tous les hivers, avec une légère variabilité spatiale. Les distributions verticales des paramètres aux zones 1 et 2 montrent que l'origine de la résurgence se situe respectivement à 200 et 75 m. La remontée se signale par des eaux froides (15 à $15,5^\circ\text{C}$) et riches en phosphates (Fig. 2). L'activité exceptionnelle des résurgences de l'année 1995 au niveau du cap Ghir s'est répercutée aussi sur la production primaire, qui a dépassé $1\text{ gC m}^{-2}\text{ j}^{-1}$. Les centres actifs de la résurgence coïncident avec les maximums des phosphates, qui atteignent $0,8$ et $0,7\ \mu\text{g}\text{at l}^{-1}$, respectivement, au niveau du cap Cantin et du cap Boujdor (Fig. 1b), mais qui peuvent dépasser $1\ \mu\text{g}\text{at l}^{-1}$ entre le cap Blanc et le cap Barbas, en liaison avec l'apport des eaux centrales sud-atlantiques (ECSA). Au niveau de cap Boujdor (zone 3), la remontée d'eau a son origine à 250 m (Fig. 2). En 1997 et 1998, son activité montre une régression, indiquée par l'augmentation de la température à 19°C et un épuisement très net des phosphates. Cette régression apparaît aussi sur les zones 2 et 4. Ces

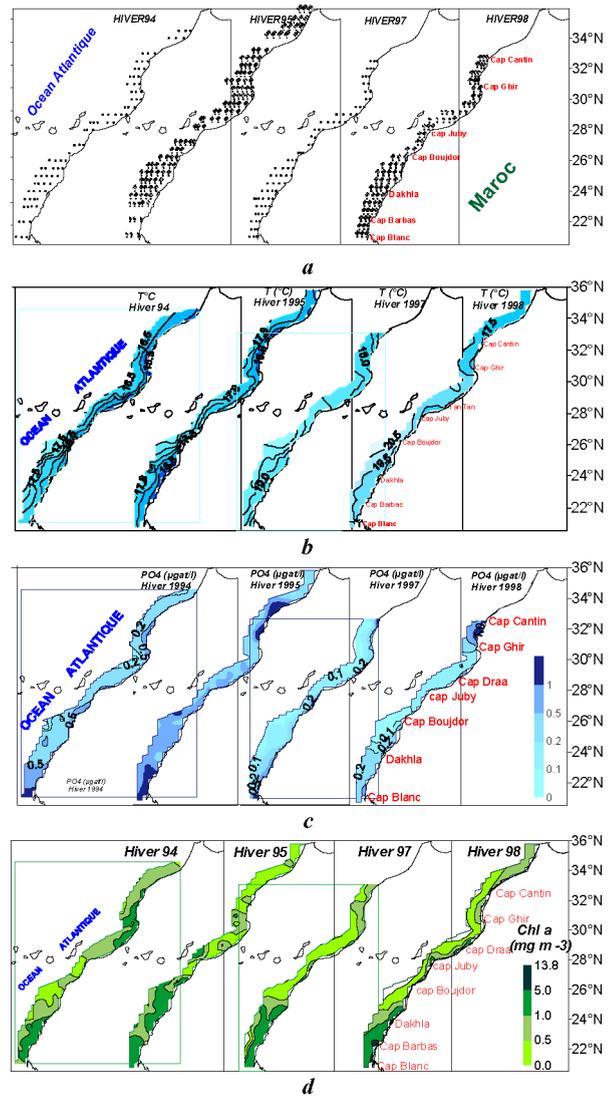


Fig. 1. Distribution en surface pendant l'hiver : (a) numéro de station ; (b) T ($^\circ\text{C}$) ; (c) PO_4 ($\mu\text{g}\text{at l}^{-1}$) ; (d) chlorophylle *a* (mg m^{-3}).

Fig. 1. Superficial distribution during winter: (a) Station number; (b) T ($^\circ\text{C}$); (c) PO_4 ($\mu\text{g}\text{at l}^{-1}$); (d) chlorophyll *a* (mg m^{-3}).

résultats coïncident avec les anomalies de hauteur d'eau de plus de 5 cm par rapport au cycle saisonnier moyen détecté par Topex/Poséidon dans le golfe de Guinée et la côte atlantique marocaine depuis le début de l'année 1995 [11], qui masquent l'habituel développement de l'*upwelling*. La diminution de l'activité de l'*upwelling* pendant cette période a eu un impact sur la production primaire inférieure à $1\text{ gC m}^{-2}\text{ j}^{-1}$ et sur les teneurs en chlorophylle *a* des zones 1 et 2 (Fig. 1c). En revanche, les zones 3 et 4 se caractérisent par une richesse chlorophyllienne et un taux de production primaire relativement importants. Le maximum en chlorophylle *a*

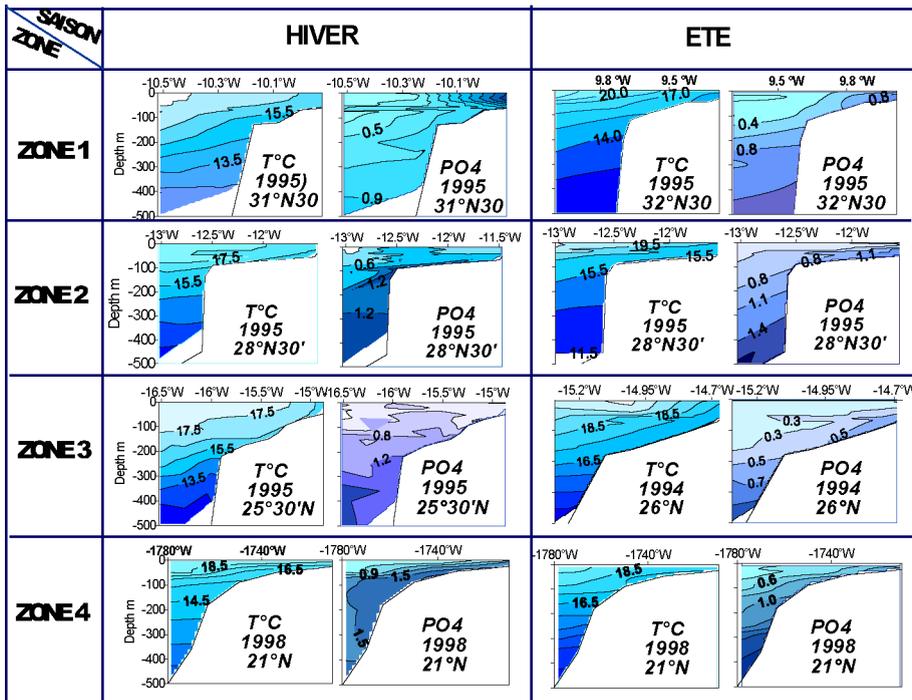


Fig. 2. Distribution verticale de la température (°C) et des phosphates ($\mu\text{gat l}^{-1}$) au niveau des quatre zones de résurgence.
 Fig. 2. Vertical distribution of temperature (°C) and of phosphates ($\mu\text{gat l}^{-1}$) for the four resurgency zones.

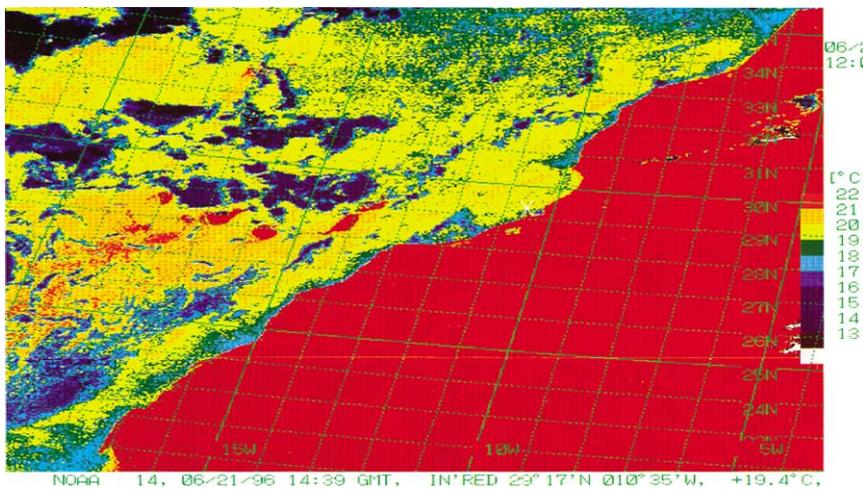


Fig. 3. Distribution de la température de surface (SST) sur une image NOAA (22/06/1996) prise à bord du N/R AtlantNIRO.
 Fig. 3. Distribution of surface temperature (SST) on a NOAA image (22/06/1996) taken on board of N/R AtlantNIRO.

est enregistré généralement au niveau de Dakhla, du cap Barbas et du cap Blanc (7 mg m^{-3} en 1998).

3.1.2. Conditions estivales

Selon l'image satellitaire prise en juin 1996 (Fig. 3), les températures de surface ont tendance à être plus fraîches en été qu'en hiver, formant un gradient ther-

mique côte/large marqué au niveau des quatre zones citées en saison d'hiver. Le filament du cap Ghir et l'*upwelling* du large de Dakhla sont nettement visibles. L'augmentation de température de 1994 à 1997 au niveau des zones de remontées et le rétrécissement de leur surface, surtout pendant l'année 1998 (Fig. 4a), ont caractérisé cette saison. L'activité des résurgences des

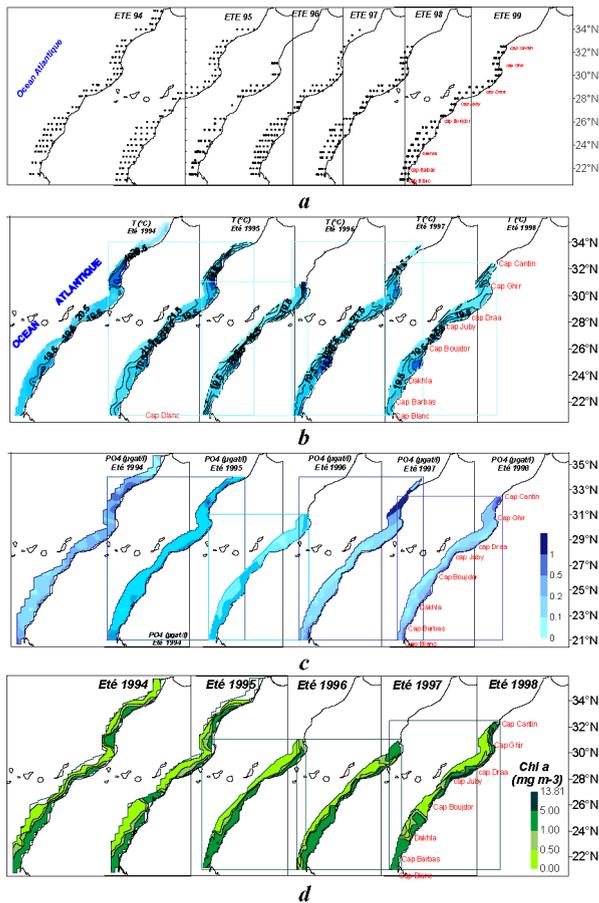


Fig. 4. Distribution en surface pendant l'été : (a) T ($^{\circ}\text{C}$); (b) PO_4 (μgatl^{-1}); (c) chlorophylle a (mg m^{-3}).

Fig. 4. Surface distribution during summer: (a) T ($^{\circ}\text{C}$); (b) PO_4 (μgatl^{-1}); (c) chlorophylle a (mg m^{-3}).

zones 1 et 2 se manifeste en été par l'apport important de la matière minérale au niveau du plateau continental (Fig. 2). Leur origine est respectivement voisine de 200 et 100 m [6,7] et la température du centre de la remontée est de 15°C seulement. La zone 2 est une zone de piégeage des sels nutritifs, caractérisée par un plateau continental plus large, peu profond et à pente faible. Comme en hiver, depuis l'année 1995, l'activité de la résurgence de la zone 3 a connu une régression marquée par un niveau moins profond (150 m) de l'origine (1996). La zone 4 (cap Barbas–cap Blanc) a été marquée par un gradient thermique côte/large supérieur à 2°C (Fig. 4a) et une richesse plus importante en phosphates (Fig. 4b). L'origine de la remontée se situe à une immersion dépassant 100 m. Elle ramène, en surface et à la limite du plateau continental, des eaux relativement fraîches, de température, voisines de 17°C (Fig. 2). Les concentrations en chlorophylle a et la production pri-

maire de surface sont relativement plus élevées (Fig. 4c) sur toute la côte. C'est en 1998 qu'ont été enregistrées les plus fortes teneurs en chlorophylle a (8 mg m^{-3}) au niveau du cap Sim (31°N), du cap Draa et du cap Juby. Les maximums en production primaire se situent au nord et au sud et peuvent dépasser $6 \text{ gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ (cap Ghir en 1998).

3.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composante principale (ACP) montre que les paramètres physiques (T ($^{\circ}\text{C}$), S (‰) et profondeur maximum) sont en hiver significativement corrélés au premier axe factoriel (axe F1) dans les zones 1, 2 et 3. Dans la zone 4, en revanche, la température et la salinité ne sont pas corrélées significativement, alors qu'elles sont négativement corrélées avec les phosphates et la chlorophylle a (Fig. 5a et b). Trois groupes de stations ont été identifiés : (1) le groupe I rassemble les stations caractéristiques des résurgences, (2) le groupe II occupe une position intermédiaire, tandis que le groupe III caractérise les eaux oligotrophes. Au niveau de la zone 3, au cours de la saison hivernale de l'année 1995, apparaît un sous-groupe (groupe IV), qui se caractérise par des eaux chaudes et riches en phosphates (Fig. 5a).

En été, les corrélations mises en évidence par l'ACP entre les paramètres sont restées presque semblables à celles obtenues lors de la saison hivernale. La différence se manifeste par la réduction du nombre de stations du groupe II, qui explique l'activité importante de l'*upwelling* côtier et le gradient important côte/large pendant cette saison.

4. Discussion générale et conclusion

Sur la base des données collectées durant la période 1994–1998, nous avons pu localiser les différentes zones alimentées par la résurgence côtière (Fig. 3).

4.1. Zones 1 (cap Cantin–cap Ghir) et 2 (cap Draa–cap Juby)

L'activité de la résurgence est plus importante en été qu'en hiver. Les immersions de l'origine de la remontée se situent respectivement à 200 et 75 m. Les eaux profondes atteignent la surface seulement au niveau de la zone 1, selon un type de remontée assimilé à un modèle simple à une cellule [1]. La zone 2 est une zone de rétention, qui peut être expliquée par un modèle de remontée à deux cellules [1]. Pendant la saison d'hiver, la résurgence de ces deux zones a été la plus active pendant les années 1994 et 1995.

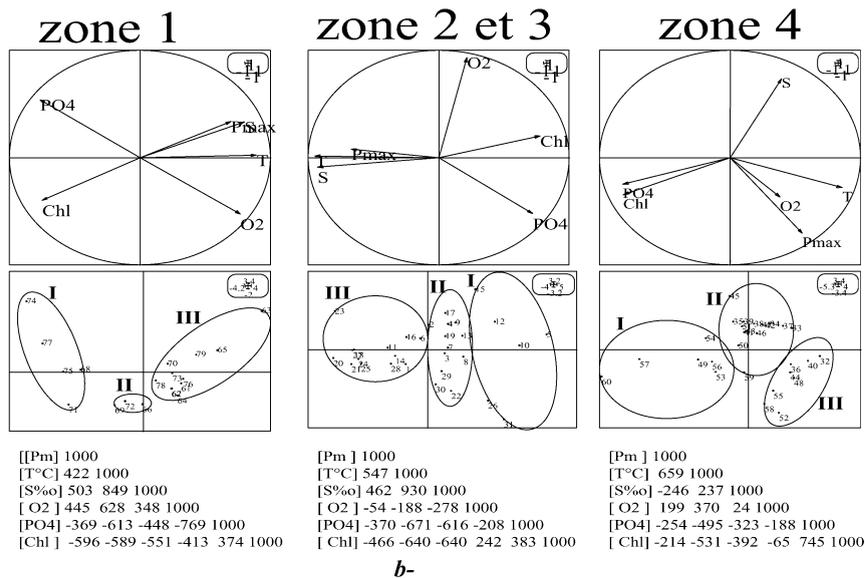
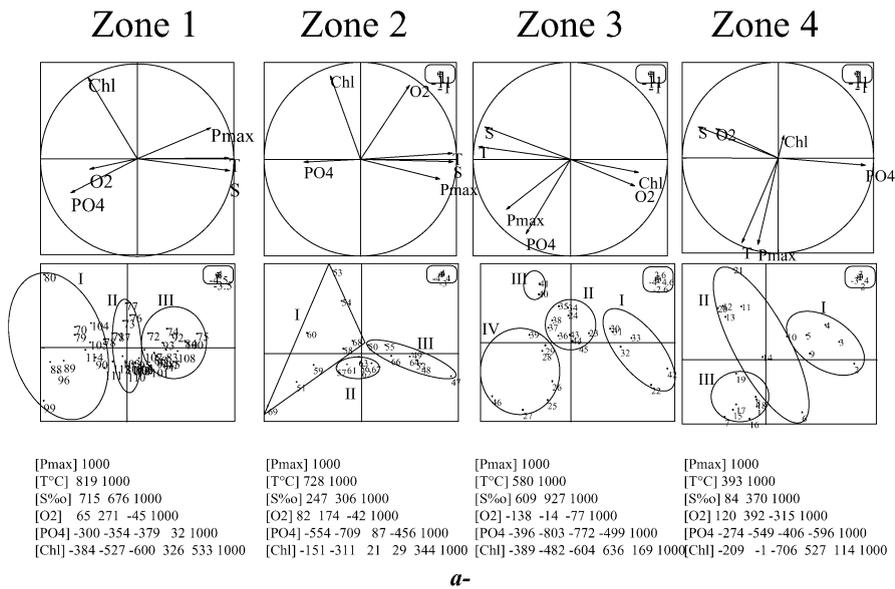


Fig. 5. Cercles des corrélations (en haut), regroupement des stations (au milieu) et matrice de corrélation (en bas) au niveau des quatre zones de remontée (hiver) : (a) 1995; (b) 1998.

Fig. 5. Correlation circles (top), station gathering (middle) and correlation matrix (bottom) for the four upwelling zones (winter): (a) 1995; (b) 1998.

4.2. Zone 3 (cap Boujdor–Dakhla)

Une diminution de l'activité de l'*upwelling* a été observée à l'hiver 1997 dans cette zone; elle se caractérise par l'existence de deux types de remontée: une remontée côtière dont l'origine se situe à 250 m, localisée au niveau du cap Boujdor, et une remontée située à la limite du talus continental de part et d'autre de Dakhla. C'est probablement pour cela que cette zone est très productive.

Soumise à l'action du courant des Canaries, la côte atlantique du Maroc peut être assimilée à un modèle dans lequel la théorie de la triade de Bakun [3] peut s'appliquer. Cette théorie correspond à trois classes de processus combinés qui conduisent à un habitat favorable à la reproduction côtière des téléostéens pélagique: (1) processus d'enrichissement, (2) processus de concentration, (3) processus favorisant la rétention. Elle peut être applicable à la côte atlantique du Maroc dans:

- la zone 1 est une région où le processus d'enrichissement est très actif. La zone 2, caractérisée par la rétention et la stabilité de la colonne d'eau, bénéficie de la richesse de la première zone ;
- la partie sud de la zone 3, caractérisée par un plateau large et peu profond est enrichie par l'*upwelling* du cap Boujdor.

4.3. La zone 4 (cap Barbas–cap Blanc)

C'est la partie la plus perturbée de la côte. Elle est influencée, d'une part, par l'apport des ECSA, très marqué en hiver par sa richesse en phosphates et, d'autre part, par l'existence quasi-permanente de la résurgence. C'est pour cela que cette zone se caractérise par l'hétérogénéité de la colonne d'eau et des concentrations très élevées en pigments chlorophylliens et par une forte production primaire.

L'ACP met en évidence une bonne répartition des stations en quatre zones bien identifiées et l'existence d'une corrélation négative de la chlorophylle *a* et des phosphates avec la température, la salinité et la profondeur maximale de la résurgence.

Références

- [1] Anonyme, Modèles types d'*upwellings* côtiers, SCOR WORKING, Groupe 36, 1975.
- [2] A. Aminot, M. Chaussepied, Manuel des analyses chimiques en milieu marin, 1983, 19 p.
- [3] A. Bakun, A. Orbi, New concepts for understanding variability in small pelagic fisheries, Atelier sur les ressources pélagiques côtières de l'*upwelling* du Nord-Ouest africain : suivi et prédiction, Casablanca, Maroc, 15–17 avril 1996.
- [4] R. Bernikov, Synthèse des travaux de recherches océanographiques réalisés le long de la côte atlantique marocaine par « Atlantiro », 1991, p. 24.
- [5] FAO, Groupe de travail de la FAO sur l'évaluation des petits pélagiques au large de l'Afrique nord-occidentale, FAO, Rapport sur les pêches n° 657, Nouadhibou, Mauritanie, 24–31 mars 2001.
- [6] J. Furnestin, Hydrologie du Maroc atlantique, Rev. Trav. Inst. Pêches Mar. 23 (1959) 5–78.
- [7] Groupes Medipro, Résultats de la campagne CINECA 5-J-Charcot II (15 mars–29 avril 1971), Publ. CNEXO, ser. Res. Camp. Mer, 7, 1974, 138 p.
- [8] E. Hagen, C. Züllicke, R. Feistel, Near-surface structures in the Cape Ghir filament off Morocco, Oceanol. Acta 19 (6) (1996) 577–598.
- [9] O. Holm-Hansen, C.J. Lorenzen, R.W. Holmes, J.D.H. Strickland, Fluorimetric determination of chlorophyll, J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer 30 (1965) 3–15.
- [10] INRH, Ressources halieutiques : situation et niveau d'exploitation, rapport technique, INRH, 2002, 170 p.
- [11] Lodyc, Paris, France, 1995; <http://www.lodyc.jussieu.fr/>.
- [12] C.J. Lorenzen, A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration, Deep-Sea Res. 13 (1966) 223–227.
- [13] K.H. Mann, J.R.N. Lazier, Dynamics of Marine Ecosystem: Biological-Physical Interactions in the Oceans, Blackwell Scientific Publications, 1988, 459 p.
- [14] J.-A. O'Reilly, J.-P. Thomas, A manual for the measurement of total daily primary productivity on MARMAP and OCEAN PULSE cruises using ¹⁴C-simulated in situ sunlight incubation, Ocean Pulse Technical Manual No. 1, Report No. SHL 79-06, 1979, 104 p.
- [15] C. Roy, Les *upwellings* : le cadre physique des pêcheries côtières ouest-africaines, in: Pêcheries ouest-africaines, Éditions Orstom, 1991, pp. 38–66.
- [16] S.L. Smith, Biological indications of active upwelling in the northwestern Indian Ocean in 1964 and 1979 and a comparison with Perou and northwest Africa, in: Marine Science of the NW Indian Ocean and Adjacent Waters, Deep-Sea Res. 31 (1984) 951–967.
- [17] J.J. Walsh, J.C. Kelley, R.C. Dugdale, B.W. Frost, Gross features of the Peruvian upwelling system with special reference to possible diel variation, Inv. Pesq. 35 (1971) 25–42.
- [18] C.S. Yentsch, D.W. Menzel, A method for determination of phytoplankton chlorophyll and pheophytin by fluorescence, Deep-Sea Res. 10 (1963) 221–231.