Télédétection, 2004, vol. 4, n° 2, p. 175–195
© 2004 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

CARTOGRAPHIE ET ORIGINE DES PANACHES CHLOROPHYLLIENS CÔTIERS EN MÉDITERRANÉE ORIENTALE À PARTIR DES IMAGES DE SeaWiFS ET d'ETM+ DE LANDSAT-7

BARBARA WEBER[a,1], JEAN-MICHEL JAQUET[*b,2] et GHALEB FAOUR[c,3]

[a] *Unité de Télédétection et SIG, Sciences de la Terre,*
Université de Genève, 13, rue des Maraîchers, CH - 1205 Genève, Suisse.
Téléphone : 41 22 37 68 97 ; télécopieur : 41 22 379 32 10

[b] *Earth Observation Section, UNEP/DEWA//GRID Geneva,*
11, chemin des Anémones, CH - 1219 Châtelaine, Suisse.
Téléphone : 41 22 917 82 89 ; télécopieur : 41 22 320 57 32

[c] *Centre National de Télédétection, Centre National de Télédétection,*
CNRS, B.P. 11 - 8281, Beyrouth, Liban.

Courriel[(1,2,3)] : barbara.weber@terre.unige.ch ; jean-michel.jaquet@grid.unep.ch ; gfaour@cnrs.edu.lb

(soumis : 10 mai 2004 ; révisé : 10 août 2004 ; accepté : 24 août 2004)

Il existe maintenant d'abondantes archives d'images SeaWiFS qui permettent d'estimer la concentration en chlorophylle des eaux de la Méditerranée. D'une fréquence nominale journalière, ces cartes de chlorophylle ont une résolution spatiale de 1,1 km, malheureusement insuffisante pour les applications côtières. En outre, les algorithmes de calcul de la chlorophylle appliqués en routine ont été conçus pour les eaux de type I et ne sont pas donc pas adaptés aux eaux côtières. À l'inverse, les données de l'ETM+ de Landsat-7 sont moins fréquentes et spectralement moins riches, mais leur résolution spatiale est beaucoup plus fine. Nous avons donc combiné ces deux sources d'information pour cartographier les patrons de couleur de l'eau près de la côte, dans le but d'évaluer leur origine en termes d'autochtonie ou d'allochtonie (pollution terrigène).

Nous avons travaillé sur des cartes de chlorophylle dérivées de l'imagerie SeaWiFS et des cartes d'un indice de verdeur calculé à partir des données du capteur ETM+. Quatre dates sont considérées dans la région côtière entre Israël et le Liban (printemps 2000 et 2001). Les motifs de couleur obtenus sur la base des deux sources de données se sont avérés comparables. Une typologie est proposée pour distinguer les panaches de baies des filaments de grande amplitude perpendiculaires à la côte. Par rapport aux sources d'eau et de nutriments allochtones provenant du Liban et d'Israël, la taille de ces filaments est trop grande et il faut donc invoquer des sources marines autochtones (remontées d'eaux froides riches en nutriments, sédiments) ou indirectes (transport côtier en provenance du Nil) pour les expliquer. Seules ces dernières semblent entrer en ligne de compte pour la période considérée. L'étirement des panaches vers le large est attribué à l'action de tourbillons prenant naissance sur le flanc oriental de la circulation cyclonique dans le bassin Levantin, par interaction de celle-ci avec la topographie du fond. La combinaison des deux types d'imagerie permet ainsi d'obtenir, d'une manière peu coûteuse et robuste, la signature côtière d'apports potentiellement eutrophisants ou pollutifs.

Mots-clefs : télédétection ; couleur de l'eau ; SeaWiFS ; ETM+ de Landsat ; Méditerranée ; pollution.

MAPPING AND ORIGIN OF THE COASTAL CHLOROPHYLL PATTERNS IN EASTERN MEDITERRANEAN AS SEEN ON SeaWiFS AND LANDSAT-7 ETM+ IMAGERY

An extensive archive of SeaWiFS imagery is available to map the chlorophyll concentration in the Mediterranean. At a daily nominal frequency, these maps have a spatial resolution of 1,1 km, which is relatively coarse for coastal applications. Moreover, the algorithms used for the computation of chlorophyll were designed for case-I waters, and are not wholly suitable for near-shore waters. Inversely, Landsat ETM+ data are less frequent and spectrally coarser, but they include a thermal channel and their spatial resolution is finer. We have combined these sources of information to map water colour patterns near the coast, in order to identify their origins in terms of autochtonous or allochtonous processes (land-derived pollution or eutrophication).

We have worked on two series of maps, one of chlorophyll derived from SeaWiFS and another one of a colour index computed as the ratio ETM+2 / ETM+1. Four dates are considered in the coastal region between Lebanon and Israel (Spring 2000 and 2001). Colour patterns derived from these two sources show strong analogies. Considering only estimated land-derived water and nutrients inputs, the size of chlorophyll patterns is too large, calling for other possible sources, either autochtonous (upwelling, sediments) or indirect

* Correspondant principal

(along shore transport from Nile plume). For the period considered, only the latter seems to be operating. The stretching of chlorophyll jets away from the coast is ascribed to the action of gyres of various scales. They develop on the eastern rim of the general cyclonic circulation at play in the Eastern Levantine basin through interaction with the bottom topography. The signature of polluting, terrigenous inputs can thus be discriminated from coastal water colour patterns by the combined use of both image types.

Keywords : remote sensing ; ocean colour ; SeaWiFS ; Landsat ETM+ ; Mediterranean ; pollution.

1. INTRODUCTION

De nombreuses données sur la répartition spatio-temporelle des concentrations en divers composants de l'eau (pigments chlorophylliens surtout), dérivées des capteurs satellitaires CZCS (Barale *et al.*, 1999), MERIS (Fell *et al.*, 2002) et SeaWiFS (Karabashev *et al.*, 2002), sont maintenant disponibles pour la Méditerranée. En particulier, les cartes basées sur les images SeaWiFS fournissent une bonne information sur les processus physico-biologiques du système marin, avant tout dans sa zone pélagique. En revanche, la résolution de l'ordre du kilomètre et la suppression des effets de la bathymétrie et de la turbidité (grâce aux « *flags* » dans le logiciel *SEADAS* (NASA, 2004) ne permettent pas une couverture détaillée des zones côtières, à quoi s'ajoute l'inadéquation des algorithmes implémentés dans *SEADAS*, qui sont conçus pour des eaux de type I (Liew *et al.*, 2001 ; Froidefond *et al.*, 2002).

Bien que moins fréquentes et non prévues pour les applications aquatiques (pas de bande bleue *stricto sensu*, canaux larges), les images ETM+ de Landsat-7 ont l'avantage d'une haute résolution spatiale et de la présence d'un canal thermique. Les tentatives d'exploiter cette imagerie dans les eaux intérieures ou sur les zones côtières ont été relativement peu nombreuses (Bukata *et al.*, 1995). Elles ont porté sur la cartographie de la chlorophylle et de la matière en suspension (MES) (Tassan and Ribera d'Alcalá, 1993 ; Tassan, 1993 ; Brivio *et al.*, 2001), ainsi que sur celle du carbone organique dissout (COD) (Ferrari and Tassan, 1992).

On peut donc postuler *a priori* une certaine complémentarité entre ces deux sources de données sur la couleur de l'eau : l'imagerie SeaWiFS fournirait le cadre régional et celle de ETM+ permettrait, en quelque sorte, de mettre l'accent sur l'effet des processus côtiers.

Dans cet article, nous combinons ainsi ces deux sources d'information avec les objectifs suivants :

– cartographier jusqu'à une échelle hectométrique les patrons de couleur de l'eau qui paraissent « enracinés » à la côte libano-israélienne ;

– contribuer à évaluer leur origine en termes d'autochtonie (sources sédimentaires, remontées d'eaux profondes) ou d'allochtonie (pollution terrigène) dans une problématique d'eutrophisation côtière.

À cette fin, nous examinons, pour quatre dates en 2000-2001, les motifs de couleur de l'eau obtenus par l'analyse d'images quasi-simultanées de SeaWiFS (concentration en chlorophylle) et de l'ETM+ (indice de verdeur). Ces investigations ont été entreprises conjointement au Centre National de Télédétection / Conseil National de la Recherche Scientifique (Beyrouth) et au Global Resource Information Database/Programme des Nations Unies pour l'Environnement (Genève), pour tenter d'établir et de tester une méthodologie robuste et économique de cartographie satellitaire de la pollution côtière, dans des situations où les données de terrain sont difficiles à obtenir.

2. SITUATION RÉGIONALE

La zone côtière du bassin Levantin (figure 1), comprise entre Tel Aviv (Israël) et la frontière syro-libanaise, est caractérisée par un climat aride, des apports fluviatiles réduits et un plateau continental étroit (10-15 km), peu propice au recyclage benthopélagique des nutriments (Fell *et al.*, 2002).

En ce qui concerne la circulation marine, les résultats de POEM Group (1992) mettent en évidence, dans la partie pélagique méridionale du bassin, un complexe de tourbillons anticycloniques. À l'est, la circulation sur le plateau continental israélo-libanais est dominée par des courants géostrophiques de direction dominante vers le nord, augmentant en intensité sur la pente continentale (jusqu'à 40 $cm \cdot s^{-1}$, Herut *et al.*, 2000). Des tourbillons méso-échelle et des méandres sont particulièrement présents en été. Une simulation au moyen du modèle MED16, effectuée par Alhammoud *et al.* (2003), confirme ce phénomène et révèle en outre, pour une situation estivale, d'autres caractéristiques (figure 2). En particulier, la redistribution des apports d'eau douce provenant des deux bras du Nil donne naissance à une bande côtière de salinité égale à 39 ‰, plus basse que dans la masse d'eau levantine de surface (39,1 à 39,2 ; Herut *et al.*, 2000). Cette bande s'étend de manière distincte jusqu'à la latitude de Sour (figure 1). Elle est caractérisée par des eaux de température de surface plus élevée qu'au large, lesquelles peuvent donner lieu à des motifs en forme de panaches chauds faisant intrusion dans le domaine pélagique.

De juin à octobre, la colonne d'eau du domaine érudié est stratifiée, avec une couche de surface bien mélangée de 20 à 50 m d'épaisseur, isolée des eaux plus profondes. La plupart du temps, un front thermique et de chlorophylle sépare les eaux côtières et pélagiques, coïncidant avec le bord du plateau continental (Azov, 1986 ; Berman *et al.*, 1984 et 1986).

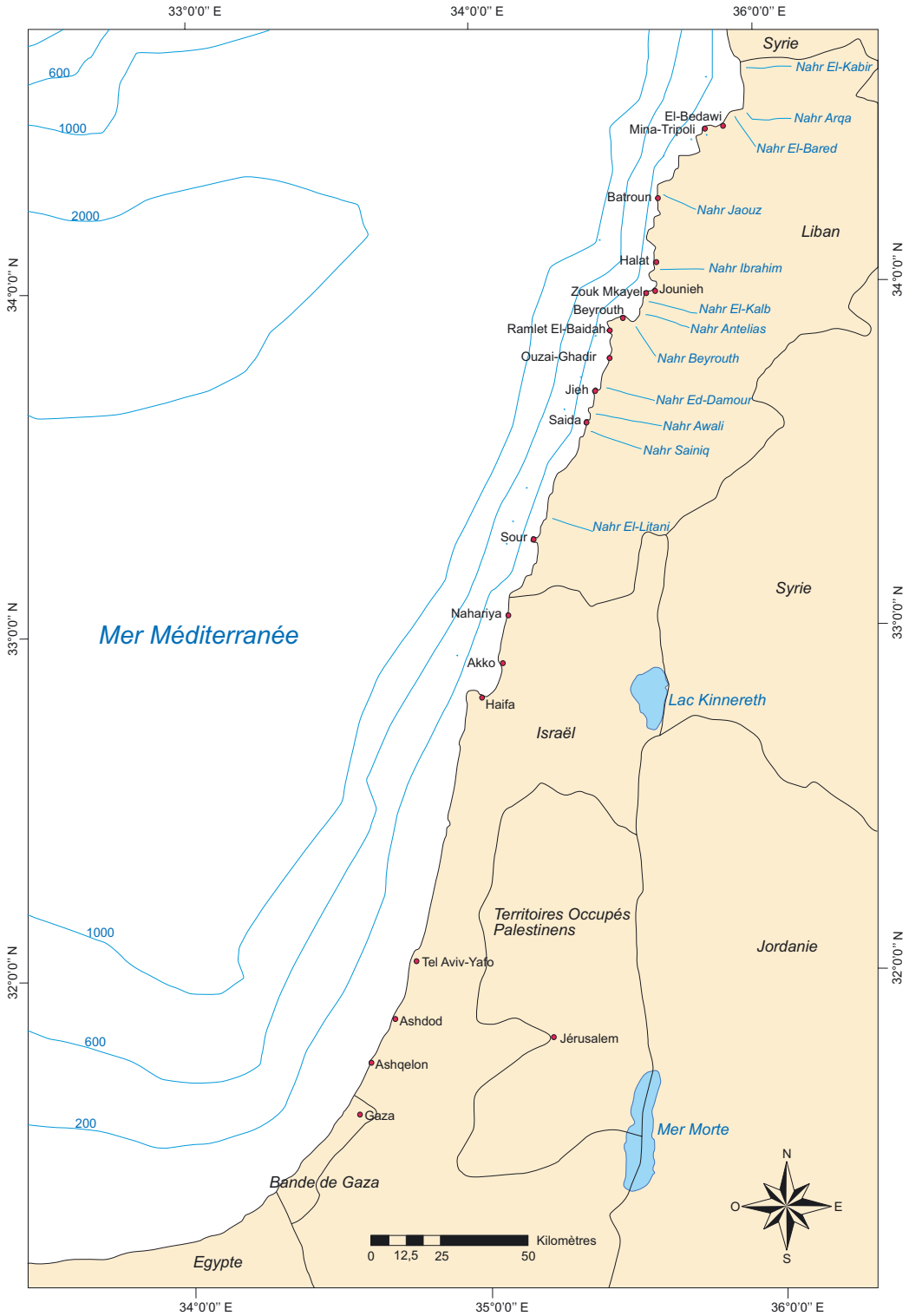
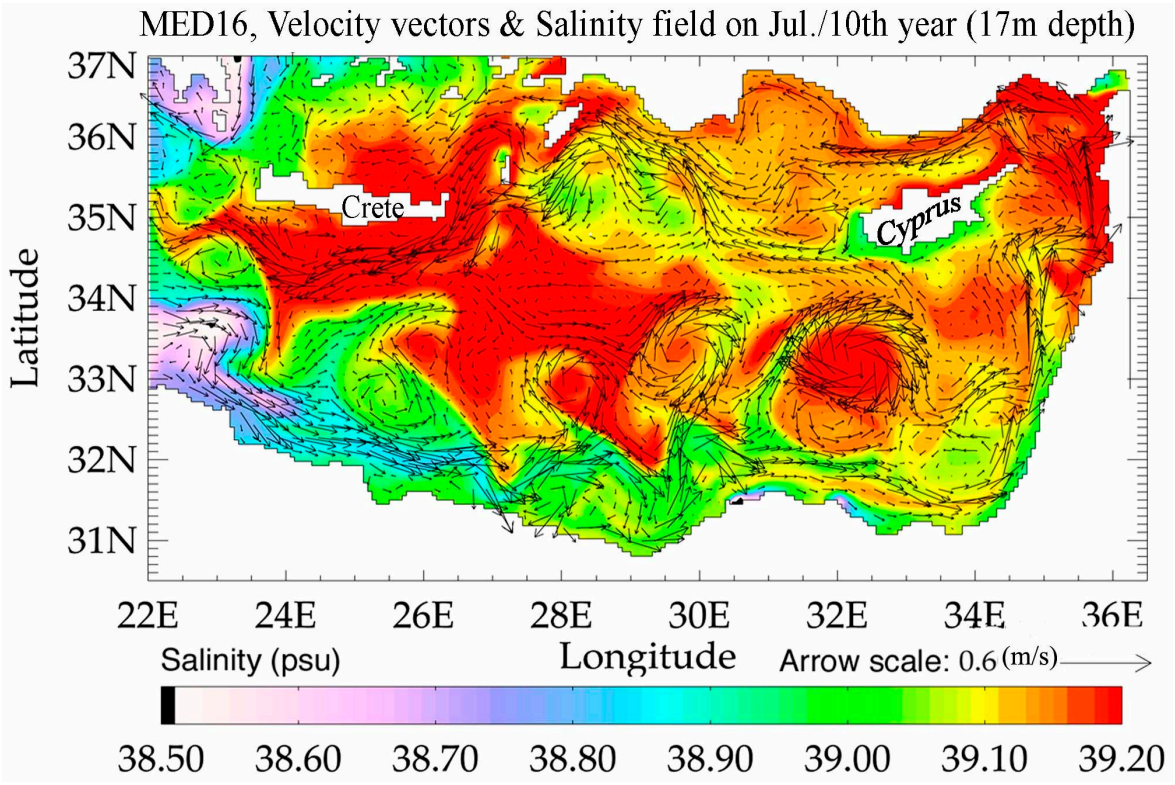
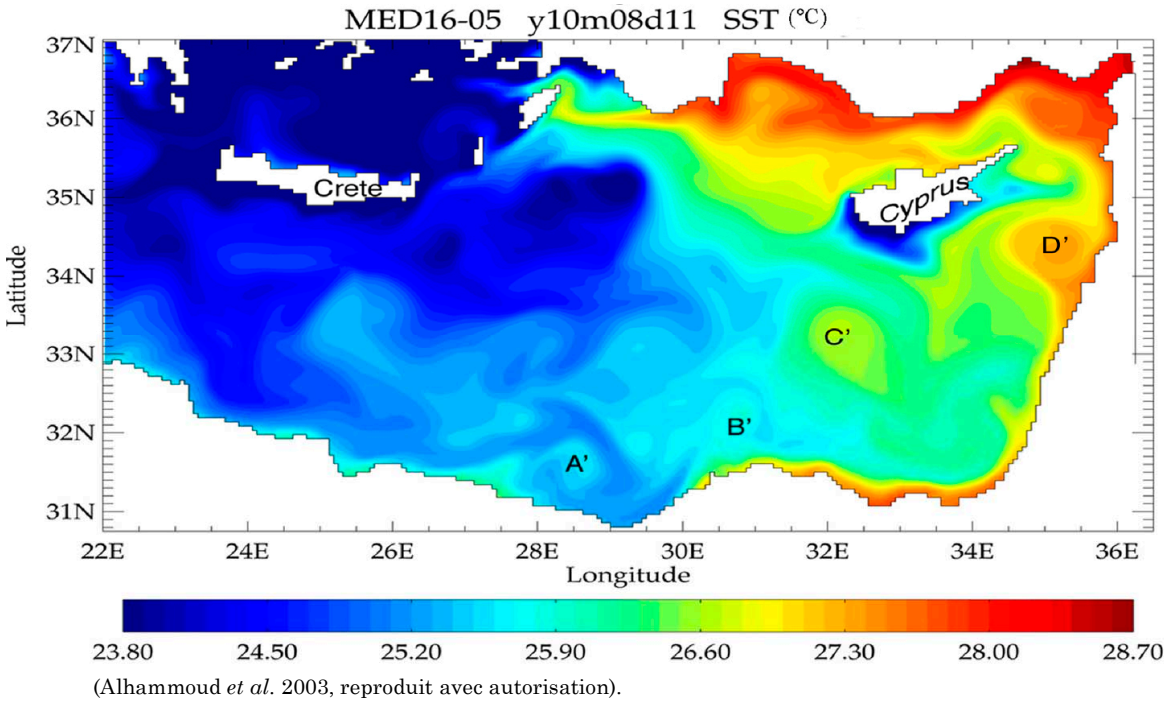


FIGURE 1 Carte de situation de la zone d'étude (Liban-Israël), avec les sources potentielles de pollution terrigène (agglomérations, rivières). *Location map of the study area (Lebanon-Israel), with potential sources of land-derived pollution (cities, rivers).*





(Alhammoud *et al.* 2003, reproduit avec autorisation).

FIGURE 2 Résultats de la simulation n° 05 (11 ans) par le modèle MED16. Panneau du haut : vecteurs de vitesse des courants ($m \cdot s^{-1}$) et champ de salinité (psu = pour mille). Panneau du bas : température de surface (°C). *Results of the simulation n° 05 (11 years) by the MED16 model.*

Le bassin Levantin est connu comme le domaine le plus oligotrophe de la Méditerranée, avec des concentrations pélagiques moyennes de chlorophylle variant entre 0,003 $mg \cdot m^{-3}$ et 0,4 $mg \cdot m^{-3}$ (Yacobi *et al.*, 1995 ; Herut *et al.*, 2000). D'après des travaux récents (Krom *et al.*, 2003 ; CYCLOPS, 2004), la production primaire de ce bassin est clairement limitée par le phosphore. En ce qui concerne la répartition spatio-temporelle des concentrations en chlorophylle dans notre zone d'étude, les travaux d'Antoine *et al.* (1995) et de van Dijken et Arrigo (1996) ont montré, déjà au début des années 1980, des gradients de concentration en chlorophylle entre le centre du bassin et la côte moyenne-orientale. Gitelson *et al.* (1996b) signalent l'existence, en été, de masses d'eau côtières caractérisées par des concentrations relativement élevées en chlorophylle et nettement séparées des eaux oligotrophes du large.

Peu discernables en hiver, ces patrons de chlorophylle vernaux-estivaux ont souvent la forme de vastes panaches ou filaments, perpendiculaires à la côte et plus ou moins permanents. Karabashev *et al.* (2002) en ont proposé une intéressante typologie, basée sur les spectres de luminance normalisée. Ces auteurs font l'hypothèse que les filaments sont la signature du transport vers le large d'eaux chaudes, riches en matière en suspension et en COD. Comme ces panaches semblent se positionner au droit de villes, comme Haifa ou Beyrouth, leur composition serait d'origine terrigène (égouts). Townsend *et al.* (1988) penchent plutôt pour une origine marine des nutriments (remontées d'eau froide occasionnelles et régénération sédimentaire). Nous examinerons plus loin ces hypothèses sur la base de nos propres résultats.

3. DONNÉES

Les données-images utilisées sont de deux types (tableau 1). Nous avons tout d'abord à disposition quatre images ETM+ datées des 21 mai 2000, 22 juin 2000, 21 mars 2001 et 24 mai 2001. Une image supplémentaire du 14 janvier 2000 a été utilisée pour caractériser les panaches thermiques des rivières. Ces données ont été obtenues par l'intermédiaire du GRID/Sioux Falls dans le cadre du projet *Coastal Zone Information System for Lebanon* (UNEP/GRID 2004).

En second lieu, quatre images SeaWiFS ont été extraites d'un ensemble couvrant les années 2000-2001 obtenu auprès du centre de distribution d'archives de la NASA (2003) et traité par Weber (2002). Si ces images ont été trouvées pour les 21 mai et 22 juin 2000, la couverture nuageuse et la trajectoire de la plate-forme de SeaWiFS n'ont pas permis d'obtenir des images pour les 21 mars et 24 mai 2001. Celles employées dans ce travail datent donc, respectivement, des 17 mars et 23 mai 2001.

TABLEAU 1 Caractéristiques spectrales des capteurs Sea WiFS et ETM+ de Landsat-7. *Spectral characteristics of SeaWiFS and Landsat-7 ETM+ sensors.*

Bande	λ_{inf}	λ_{centre}	λ_{sup}	Couleur
SeaWiFS (nm)				
1	402	412	422	Violet
2	433	443	453	Bleu
3	480	490	500	Bleu-vert
4	500	510	520	Vert-bleu
5	545	555	565	Vert
6	660	670	680	Rouge
7	745	765	785	Proche infrarouge 1
8	845	865	885	Proche infrarouge 2
ETM+ de Landsat-7 (nm)				
1	450	485	520	Bleu-vert
2	520	560	600	Vert
3	630	660	690	Rouge
4	760	830	900	Proche infrarouge 1
5	1550	1650	1750	Proche infrarouge 2
6	10400	11450	12500	Infrarouge thermique
7	2080	2215	2350	Infrarouge moyen
8	500	700	900	Panchromatique

En vue de l'interprétation, des données sur la bathymétrie dans la région de Beyrouth et la localisation des égouts ont été mises à notre disposition par le Centre National de Télédétection libanais (Faour *et al.*, 2004). Une autre carte bathymétrique détaillée couvrant le bassin Levantin se trouve dans Hall *et al.* (1994).

Les conditions météorologiques aux stations de Tripoli, de Beyrouth, d'Haifa et de Tel Aviv, pour les périodes étudiées, ont été obtenues sur un serveur d'archives météorologiques (Russia's Weather Server, 2004). Nous avons trouvé quelques données hydrologiques dans American University (2004) et Treyer (2004). Finalement, les apports en eaux usées ont été compilés à partir de PNUE (2000), Government of Lebanon (1997) et Lebanese Ministry of Environment (2004).

4. MÉTHODOLOGIE

Le traitement des images SeaWiFS a été effectué à l'aide du logiciel *SEADAS*, version 4.0. Le module MSL12 a été utilisé pour transformer les images SeaWiFS de niveau 1A en des produits de niveau 2. Les paramètres d'entrée par défaut ont été utilisés (voir leur liste dans Franz, 2002), ainsi que les

fichiers météorologiques accompagnant chacune des images pour les corrections atmosphériques. Les cartes de concentration en chlorophylle *a* ($Chla_{SeaWiFS}$) ont été produites au moyen de l'algorithme *OC4* (Aiken *et al.*, 1995). On a également calculé les « *flags* », paramètres permettant de masquer les zones où OC4 n'est pas applicable (telles que les eaux côtières turbides ou de bathymétrie inférieure à 30 m).

Les nombres digitaux des images ETM+ ont été transformés en valeurs de réflectance au satellite. Malheureusement, aucune correction atmosphérique n'a pu être calculée à cause de l'absence de cibles sombres dans les images. Par la suite, celles-ci ont été exportées sous *ArcView* où un filtre passe-bas 3 × 3 à noyau de pondération unitaire (Forster *et al.*, 1993) leur a été appliqué avant le calcul des indices de couleur.

Nous avons calculé un certain nombre d'indices, basés sur les bandes 1 à 3 d'ETM+ : l'indice de verdeur simple (*IV*) obtenu par la division des réflectances de la bande ETM+2 par la bande ETM+1 (*IV* = R2/R1) ; les rapports R1/R3, R2/R3 et l'indice de bleu corrigé selon Brivio *et al.* (2001), égal à (R1 – R3)/R2. Les indices impliquant ETM+3 sont affectés d'artéfacts et de niveaux de bruit élevés, rendant leur interprétation cartographique difficile. Nous avons donc choisi d'utiliser l'*IV* qui est, par ailleurs, un analogue du rapport des radiances normalisées L490/L555 utilisé dans les algorithmes de SeaWiFS. Cette combinaison est considérée par Aiken *et al.* (1995, p. 30) comme fournissant les estimations les plus robustes de la chlorophylle sur plusieurs décades.

Pour assurer une interprétation cohérente des motifs de couleur de l'eau cartographiés par les deux capteurs, nous les avons comparés visuellement et au moyen d'une analyse de corrélation entre les des valeurs $Chla_{SeaWiFS}$ et de l'*IV*.

Un indice de température diurne (*IT*) équivalent aux nombres digitaux de la bande ETM+62 a également été calculé.

5. RÉSULTATS

Après un examen des patrons régionaux de la chlorophylle dans le bassin Levantin, nous analysons plus en détails les informations visibles sur les images de la côte israélo-libanaise en termes de $Chla_{SeaWiFS}$ et d'*IV*. Les données disponibles sur les apports hydriques et les vents sont également présentées.

5.1. Patrons généraux de variation de la concentration en $Chla_{SeaWiFS}$

Pour les années 2000 et 2001, la dynamique spatio-temporelle des concentrations en chlorophylle dans l'ensemble du bassin Levantin est représentée par une série de cartes journalières (figure 3). Il est probable que les valeurs absolues des concentrations représentées sur cette figure soient légèrement surestimées, comme le signalent Bricaud *et al.* (2002). En termes relatifs, il en ressort les grands traits suivants :

– dans le domaine pélagique, les concentrations en $Chla_{SeaWiFS}$ sont maximales en hiver (images du 11-02-2001 et du 04-03-2001) et atteignent un minimum en août-septembre (0,02 $mg \cdot m^{-3}$), les différences étant moins fortes dans le domaine côtier ;

– les fortes concentrations côtières forment un ensemble relativement continu du delta du Nil à la côte sud de la Turquie, en passant par la façade israélo-libanaise (figure 3) ; dans ce dernier domaine, des panaches contrastés ($chla \geq 1{,}6$ $mg \cdot m^{-3}$) perpendiculaires au rivage, se développent principalement d'avril à septembre, bien qu'ils existent en février déjà ; leur longueur peut atteindre 80 km ;

– la forme générale des panaches est variable : en langue (19-05-2001, 13-06-2001) ; en langue recourbée vers le sud (02-09-2000) ou vers le nord (04-08-2000), ou encore terminée par un vortex (04-08-2000) ou en « champignon » (29-08-2000) ;

– sur la base des données disponibles (Weber, 2002), la durée de vie d'un panache individuel peut atteindre une dizaine de jours, en accord avec les estimations de Karabashev *et al.* (2002) ;

– au vue des images de la figure 3, la question d'un enracinement *permanent* des panaches en certains points du littoral reste ouverte.

Afin de pouvoir estimer leur surface, nous avons considéré comme panaches les zones à $Chla_{SeaWiFS} \geq$ 2-0,5 $mg \cdot m^{-3}$, équivalent à un $IV \geq 0{,}6$. Ce seuil, plus bas que celui utilisé par Barale *et al.* (1986) en Méditerranée occidentale, se justifie par la nature plus oligotrophe des eaux du bassin Levantin.

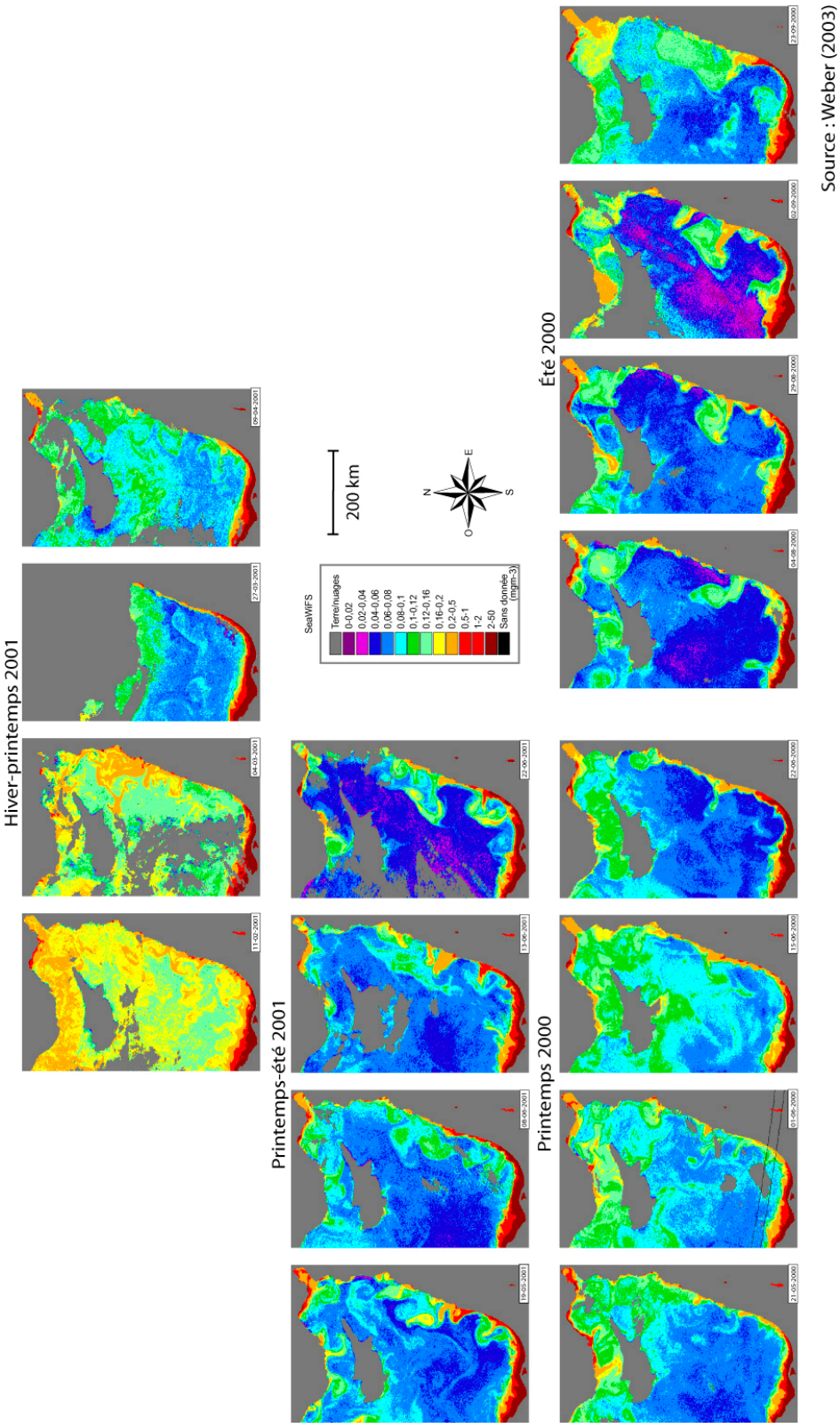


FIGURE 3 Variation de $Chla_{SeaWiFS}$ dans le bassin Levantin en 2000-2001. Concentrations calculées par l'algorithme *OC4* de *SEADAS* (NASA, 2004). *General* $Chla_{SeaWiFS}$ *patterns in the Levantine Basin in 2000-2001. Concentrations computed by the SEADAS algorithm OC4.*