

Summary

I used TOPEX/Poseidon (T/P) altimeter data from 1992 to 2002 to investigate the Labrador Current variability over the Newfoundland Slope. Cross-track geostrophic surface current anomalies were derived from along-track sea surface slopes. Absolute surface currents were approximated by the sum of altimetric current anomalies and annual mean model currents. The T/P results revealed strong variability at various temporal and spatial scales. Near the Tail of the Grand Bank, the along-isobath flow can reach 70 cm s^{-1} equatorward but features frequent reversals (poleward). Typical RMS variability of the cross-track current anomalies is $10\text{-}20 \text{ cm s}^{-1}$ over the SW and NE slopes and $20\text{-}30 \text{ cm s}^{-1}$ over the SE Slope. The transport index calculated between the 200 to 3000 m isobaths and for the top 200 m was stronger in fall and weaker in spring. The seasonal range amounts to $10\text{-}20 \text{ cm s}^{-1}$. On the interannual scale, the Labrador Current seemed to be strongest in 1996-97. The study demonstrates the ability of satellite altimetry to monitor the seasonal and interannual variability of the Labrador Current. The present work is being expanded to include heat and chlorophyll indices of the Labrador Current by combining satellite altimetry with satellite-derived sea-surface temperature and ocean colour.

Acknowledgements

I thank J. Li for assistance in data analysis. The project was funded through the Government Research Initiative Program by the Canadian Space Agency. T/P data were obtained from NASA's Jet Propulsion Lab and Pathfinder Project.

References

Benada, R. 1997. Merged GDR (TOPEX/Poseidon) User Handbook, JPL D-11007. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.

- DeTracey, B.M., Tang, C.L., and Smith, P.C.** 1996. Low-frequency currents at the northern shelf edge of the Grand Banks. *J. Geophys. Res.* 101(C6): 14,223-14,236.
- Han, G.**, 2002. Interannual sea level variations in the Scotia-Maine region in the 1990s. *Can. J. Remote Sensing*, 28(4): 581-587.
- Han, G.** 2003. Circulation over the Newfoundland and Labrador Shelf: a modelling study. In Program and Abstracts, 37th CMOS Congress, Ottawa, p. 164.
- Han, G., and Tang, C.L.** 1999. Velocity and transport of the Labrador Current determined from altimetric, hydrographic, and wind data. *J. Geophys. Res.* 104: 18,047-18,057.
- Han G., and Tang, C.L.** 2001. Interannual variation of volume transport in the western Labrador Sea based on TOPEX/Poseidon and WOCE data. *J. Phys. Oceanogr.* 31: 199-211.
- Hannah, C.G., Greenberg, D.A., Loder, J.W., and Xu, Z.** 1995. Seasonal baroclinic circulation in the Scotia-Maine and Grand Banks regions. In PERD Workshop on coastal current models for continental shelves. *Edited by* W.R. Foreman and M.G.G. Foreman. Kelowna, B.C., June 12, 1995. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* No. 169, pp. 81-85.
- Loder, J.W., Petrie, B.D., and Gawarkiewicz, G.** 1998. The coastal ocean off northeastern North America: a large-scale view. In *The global coastal ocean: Regional studies and synthesis. The Sea, Vol. 11, Chap. 5. Edited by* K.H. Brink and A.R. Robinson. John Wiley & Sons Inc., N.Y. pp. 105-133.
- Petrie, B., and Anderson, C.** 1983. Circulation on the Newfoundland continental shelf. *Atmos.-Ocean*, 21: 207-226.

Utilisation de la télédétection spatiale pour distinguer les diatomées dans une population phytoplanctonique en milieu océanique

Emmanuel Devred, Shubha Sathyendranath and Trevor Platt
Bedford Institute of Oceanography, Box 1006, Dartmouth, NS, B2Y 4A2
devrede@mar.dfo-mpo.gc.ca

Abstract

Different species of phytoplankton bloom during different periods of the year in the northwest Atlantic. Diatoms in particular are responsible for strong spring blooms on the continental shelf off Nova Scotia. These blooms then move toward the north. Many studies have shown that the optical absorption properties of diatoms are different from those of other phytoplankton populations and that these differences in the absorption characteristics of the oceanic environment can induce a bias in the estimation of chlorophyll *a* as measured by spaceborne remote sensing. These differences in optical properties have been exploited to allow the spaceborne remote sensing identification of diatom populations in the marine environment. In this paper we present the algorithm that was developed and applied to the SeaWiFS data and we show how the results obtained compare with data from in situ HPLC analyses performed on samples taken during missions of the Atlantic Zone Monitoring Program.

Introduction

La multiplication des capteurs satellitaires de la couleur de l'eau permet l'observation des océans d'une manière globale et quotidienne. Actuellement, la NASA fournit à la communauté scientifique les données du capteur SeaWiFS ainsi qu'un logiciel de traitement et d'interprétation des données (SeaDAS). Après avoir effectué les corrections atmosphériques afin d'obtenir les luminances marines ascendantes, l'algorithme OC4 de la NASA (O'Reilly et al. 1998) permet d'estimer les concentrations en chlorophylle *a* et de

produire des cartes de répartition à l'échelle globale des océans. La chlorophylle *a* peut alors être utilisée pour estimer la production primaire qui peut ensuite être incluse dans des modèles biogéochimiques du cycle du carbone, ou encore être utilisée à des fins de prévision pour les pêches. Toutefois, il a été démontré que l'algorithme OC4 de la NASA a des performances limitées lorsqu'il est appliqué à une échelle locale (Reynolds et al. 2001, Gohin et al. 2002, Sathyendranath et al. 2004) et dans ce cas précis, un algorithme régional lui sera préféré.

Un tel algorithme régional, basé sur la théorie du transfert radiatif, a été développé à l'institut océanographique de Bedford (Sathyendranath et Platt 1997, 1998). Cet algorithme est particulièrement adapté à la partie nord-ouest de l'océan Atlantique car il utilise les propriétés bio-optiques des populations de phytoplancton que l'on retrouve dans cette région échantillonnée depuis plusieurs années lors des campagnes de mesures du Programme de Monitoring de la Zone Atlantique (PMZA). Plusieurs travaux ont montré que les coefficients d'absorption spécifique du phytoplancton (coefficient d'absorption normalisé à la concentration en chlorophylle) varient avec la taille des cellules (effet d'enveloppe), mais aussi avec leur composition en pigments accessoires (Hoepffner and Sathyendranath 1991, Fujiki et Tagushi 2002, Lohrenz et al. 2003). Ainsi, les cellules de plus grandes tailles ont une absorption spécifique inférieure aux cellules de plus petites tailles. Les diatomées ont, en général, une taille supérieure à 20 µm et sont donc répertoriées comme cellules de grandes tailles. Ce groupe de cellules phytoplanctoniques peut également être identifié grâce à son contenu en pigments auxiliaires puisque qu'il est le seul à contenir le pigment fucoxanthine en quantité suffisante pour en permettre la mesure par chromatographie haute performance en phase liquide (CHPL). Ces caractéristiques ont été utilisées pour développer un algorithme d'identification des diatomées. Celui-ci a été appliqué aux données SeaWiFS et les résultats obtenus ont été comparés avec succès avec des mesures in situ.

Matériel et méthode

À une profondeur et une longueur d'onde donnée, la réflectance se définit comme suit :

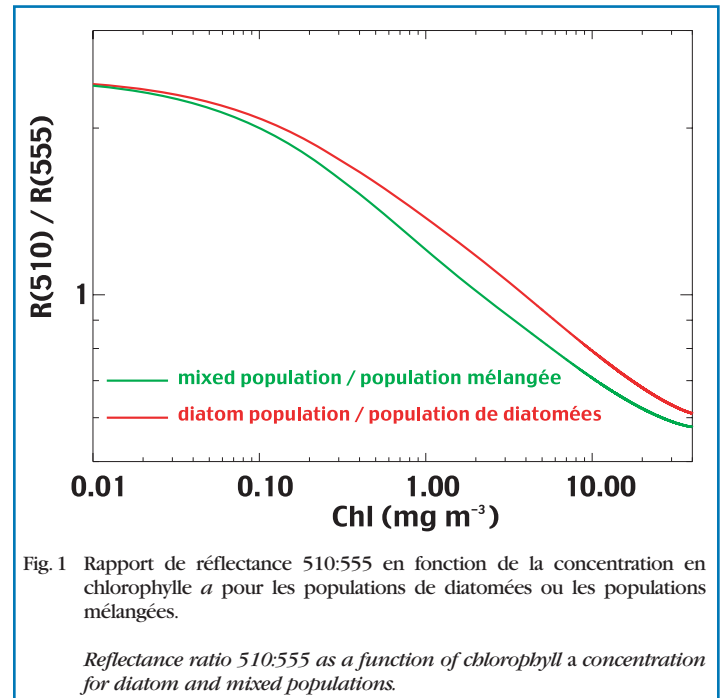
$$R(\lambda, z) = \frac{E_u(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z)}$$

où $R(\lambda, z)$ représente la réflectance à la longueur d'onde λ et la profondeur z , et E_u et E_d représentent respectivement les éclaircissements ascendants et descendant aux mêmes longueur d'onde et profondeur. Sathyendranath et Platt (1997, 1998) ont développé un modèle pour exprimer la réflectance ascendante au niveau de la surface de l'eau. Ce modèle, modifié par la suite par Sathyendranath et al. (2001), relie la réflectance à la surface de l'eau aux propriétés optiques d'absorption et rétrodiffusion des composantes océaniques (eau de mer pure, phytoplancton et produits dégradés associés). Il se définit comme suit :

$$R(\lambda) = r \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$$

où $R(\lambda)$ représente la réflectance à la longueur d'onde λ , $a(\lambda)$ et $b_b(\lambda)$ représentent respectivement l'absorption et la rétrodiffusion à la longueur d'onde λ , et r est un facteur de proportionnalité. Pour une concentration donnée en phytoplancton, la réflectance océanique est calculée aux longueurs d'onde du capteur SeaWiFS dans la partie visible du spectre soit à 412,

443, 490, 510, 555 et 670 nm. Des tables de correspondance ont été créées pour chacune des concentrations en phytoplancton variant entre 0.01 et 40 mg m⁻³ ainsi que pour les réflectances associées.



L'absorption du phytoplancton varie d'une manière non uniforme avec la concentration en phytoplancton. Le modèle utilisé pour modéliser l'absorption est celui de Sathyendranath et al. (2001). Pour cette étude, 222 échantillons ont été prélevés dans le nord-ouest de l'Atlantique durant les campagnes de mesures du PMZA entre 1996 et 1998 pour le développement du modèle, et entre 1999 et 2000 pour sa validation. Les échantillons furent analysés par CPHL et séparés en deux groupes selon leur composition pigmentaire soit un groupe dominé par des populations de diatomées et un autre groupe dominé par des populations mélangées. Les valeurs pour les propriétés optiques des autres composantes océaniques, principalement l'eau de mer et la rétrodiffusion du phytoplancton, proviennent de la littérature.

Le modèle d'absorption fut appliqué à chacun des deux groupes et les résultats furent inclus dans le modèle de réflectance pour ainsi créer deux tables de correspondance reliant la concentration du phytoplancton à la réflectance océanique ascendante aux longueurs d'onde mentionnées plus haut. Plusieurs rapports de réflectance océanique furent examinés afin d'optimiser la relation entre la concentration en phytoplancton et les rapports de réflectance. Il est apparu que les courtes longueurs d'ondes (412 et 443 nm) n'étaient pas exploitables dû à l'impossibilité d'effectuer des corrections atmosphériques lors du calcul du signal océanique à partir du signal au sommet de l'atmosphère. Finalement, les rapports de réflectance sélectionnés furent 510/555 et 490/670. La figure 1 illustre les variations de la réflectance avec la concentration en chlorophylle *a* pour chacun des deux groupes.

L'application aux images satellitaires s'est effectuée pixel par pixel. Pour chaque pixel d'une image, la concentration en

chlorophylle *a* est calculée à partir de chaque table de correspondance (510/555 et 490/670) et chaque groupe (populations de diatomées et populations mélangées). Ensuite, pour chacun des groupes, la différence, *e*, entre les deux concentrations en chlorophylle *a* obtenue en utilisant les deux tables de correspondance est calculée. On retient alors le groupe qui obtient la plus petite différence (le plus petit *e*) correspondant au modèle adapté. Cette procédure fut répétée pour chaque image de la première quinzaine des mois d'avril et d'août 2000, et des images composites furent construites.

Des mesures in situ correspondant aux images satellites (lieu et date) furent utilisées pour valider le modèle. Un total de 44 stations fut trouvé pour les années 1998, 1999 et 2000. Pour chacune des ces stations, les mesures CHPL furent utilisées pour déterminer la composition pigmentaire des échantillons recueillis, la présence de fucoxantine permettant alors d'identifier les échantillons dominés par des populations de diatomées.

Résultats et discussion

Lorsque l'on compare la classification des échantillons CHPL avec la classification obtenue en utilisant l'algorithme couplé aux données satellitaires pour la période du début avril 2000, on obtient une correspondance de 72 % pour l'identification des échantillons dominés par les populations de diatomées, et de 70 % pour les populations mélangées. Durant les deux premières semaines du mois d'août, l'analyse des données CHPL fournit seulement des populations mélangées (9 échantillons), ce qui est cohérent avec l'identification satellitaire puisque le succès des comparaisons atteint 89 %. Il est intéressant de remarquer que seules les données en absorption de 1996 à 1998 furent utilisées pour développer le modèle de réflectance et qu'aucune dégradation n'est observée lorsque l'on applique ce modèle de réflectance à des données satellitaires de l'année 2000. Ces résultats sont très encourageants compte tenu que l'on compare ici une mesure in situ

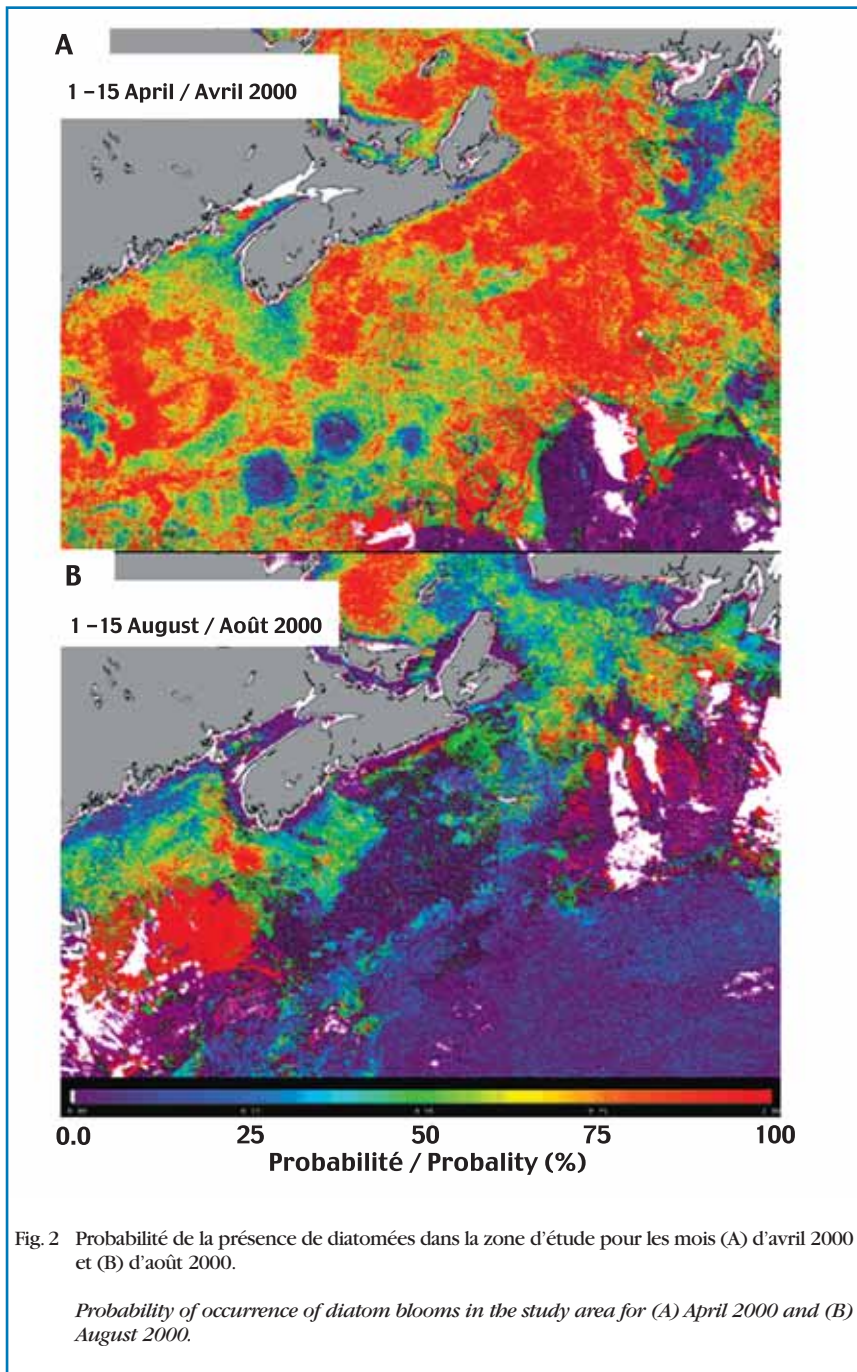


Fig. 2 Probabilité de la présence de diatomées dans la zone d'étude pour les mois (A) d'avril 2000 et (B) d'août 2000.

Probability of occurrence of diatom blooms in the study area for (A) April 2000 and (B) August 2000.

ponctuelle avec un pixel de résolution spatiale de 1 km².

Il semble donc possible d'examiner l'évolution spatiale (horizontale) des floraisons de diatomées au cours de l'année en utilisant la télédétection. Les images satellitaires de la zone nord-ouest de l'Atlantique illustrent bien d'ailleurs la dominance des diatomées tôt dans l'année (1-15 avril 2000) en comparaison avec le milieu de l'été (1-15 août 2000) (Fig. 2). La présence de diatomées sur le banc Georges aux deux différentes périodes de l'année est également en accord avec les observations déjà rapportées dans la littérature (Hoepfner et Sathyendranath 1992, 1993).

L'identification des populations de diatomées permet aussi l'utilisation de l'algorithme adéquat lors du calcul de la concentration en chlorophylle *a* (Fig. 3). L'utilisation de l'algorithme OC4 de la NASA fournit une erreur quadratique moyenne de 51 % alors que l'utilisation de notre modèle semi-analytique avec identification de populations de diatomées four-

nit une erreur quadratique moyenne de 31 %. La figure 4 illustre les concentrations en chlorophylle *a* dans la région d'étude, calculées en utilisant l'algorithme « discriminatoire ». Celui-ci présente l'avantage de tenir compte des caractéristiques optiques saisonnières et régionales des propriétés optiques des constituants océaniques. En outre, il permet d'éviter des discontinuités dans l'image telle que celles observées lorsque des algorithmes « sélectifs » sont choisis.

Conclusion

L'utilisation d'algorithmes « intelligents » permettant d'identifier des populations de phytoplancton représente un grand pas dans l'interprétation des données couleur de l'eau, notamment en permettant une meilleure quantification de la biomasse phytoplanctonique. L'amélioration de la prochaine génération de capteurs de la couleur de l'eau (réduction rapport bruit/signal, meilleure résolution spatiale, augmentation

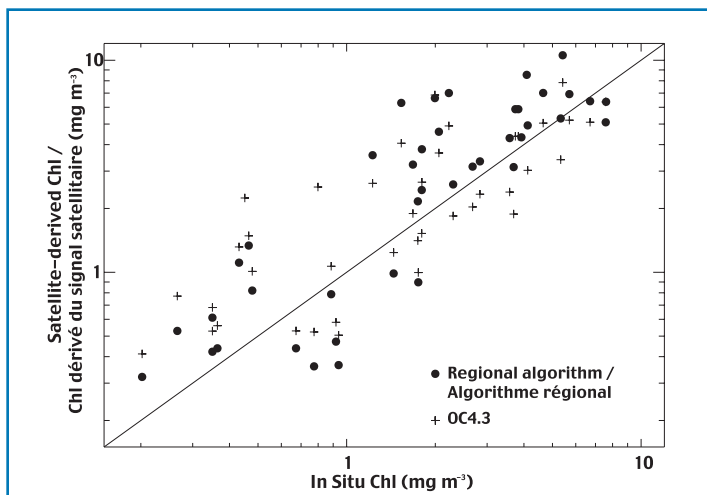


Fig. 3 Comparaison entre la concentration en chlorophylle *a* mesurée par satellite et la concentration en chlorophylle *a* mesurée in situ en utilisant l'algorithme OC4 (+) et l'algorithme régional (•).

*Comparison between satellite-derived chlorophyll *a* concentrations and in situ chlorophyll *a* concentrations using the OC4 algorithm (+) and the regional algorithm (•).*

du nombre de canaux d'observation) est le présage d'un avenir important pour ce nouveau type d'algorithmes. L'élaboration d'algorithmes permettant la discrimination des populations de diatomées a été rendue possible grâce aux connaissances acquises depuis plusieurs années dans la région du nord-ouest de l'Atlantique et ce, grâce aux mesures in situ effectuées dans le cadre du PMZA. De tels outils sont possiblement exportables à d'autres régions du globe pourvu que les caractéristiques bio-optiques de ces régions aient été définies rigoureusement.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre de projet SOLAS-Canadien. Ce travail a été financé par l'Agence Spatiale Canadienne et le Département des Pêches et des Océans, Canada.

Références

- Fujiki, T., et Tagushi, S. 2002. Variability in chlorophyll *a* specific absorption coefficient in marine phytoplankton as a function of cell size and irradiance. *J. Plankton Res.*, 24(9): 859-874.
- Gohin, F., Druon, J.N., et Lampert L. 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *Int. J. Remote Sensing*, 23: 1639-1661.
- Hoepffner, N., et Sathyendranath, S. 1991. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 73: 11-23.
- Hoepffner N., et Sathyendranath, S. 1992. Bio-optical characteristics of coastal waters: absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the western North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 37: 1660-1679.
- Hoepffner N., et Sathyendranath, S. 1993. Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter. *J. Geophys. Res.*, 98:22,789-22,803.

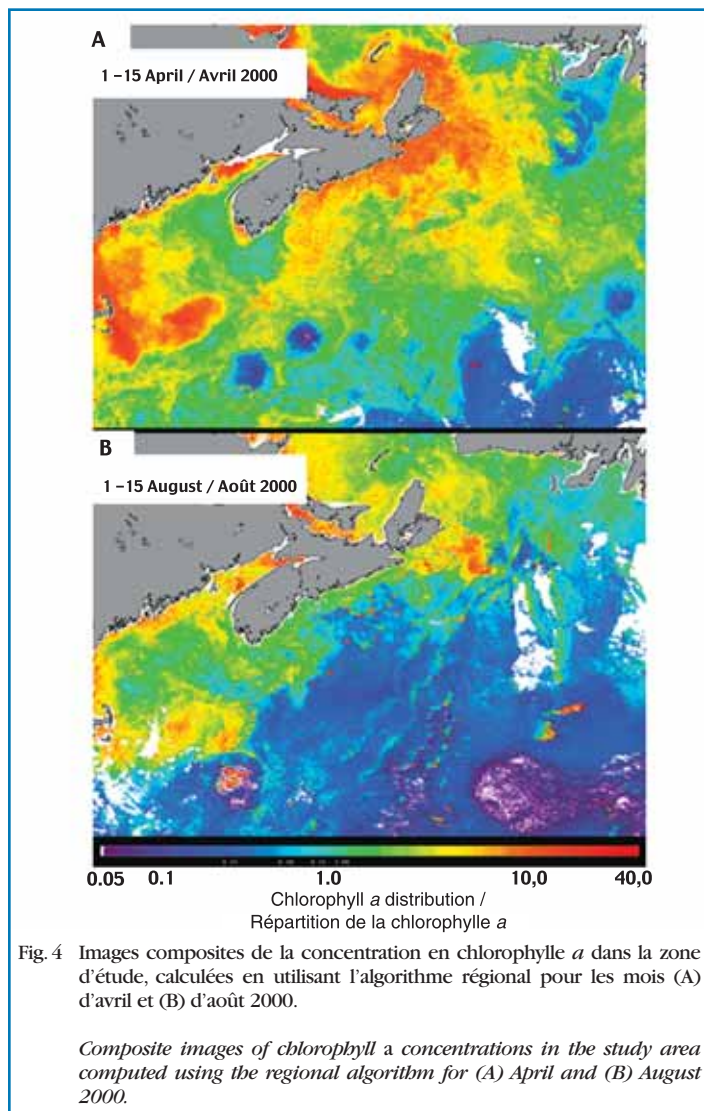


Fig. 4 Images composites de la concentration en chlorophylle *a* dans la zone d'étude, calculées en utilisant l'algorithme régional pour les mois (A) d'avril et (B) d'août 2000.

*Composite images of chlorophyll *a* concentrations in the study area computed using the regional algorithm for (A) April and (B) August 2000.*

- Lohrenz, S. E., Weidemann, A. D., et Tuel, M. 2003. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community structure and pigment composition. *J. Plankton Res.*, 25(1): 35-61.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., Kahru, M., et McClain, C. 1998. Ocean color chlorophyll algorithm for SeaWiFS. *J. Geophys. Res.*, 103: 24,937-24,953.
- Reynolds, R. A., Stramski, D., et Mitchell, B. G. 2001. A chlorophyll-dependent semi-analytical reflectance model derived from field measurements of absorption and backscattering coefficients within the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, 106: 7125-7138.
- Sathyendranath, S., et Platt, T. 1997. Analytic model of ocean color. *Appl. Opt.*, 36(12): 2620-2629.
- Sathyendranath, S., et Platt, T. 1998. Ocean-color model incorporating transpectral processes. *Appl. Opt.*, 37(12): 2216-2226.
- Sathyendranath, S., Cota, G., Stuart, V., Maass, H., et Platt, T. 2001. Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches. *Int. J. Remote Sensing*, 22(2&3): 249-273.
- Sathyendranath, S., Watts, L., Devred, E., Platt, T., Caverhill, C., et Maass, H. 2004. Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 272: 59-68.