

Une approche statistique pour la caractérisation et le suivi des dynamiques superficielles des océans à partir d'images satellitaires

Pierre TANDEO¹, Bertrand CHAPRON², Sileye BA¹, Emmanuelle AUTRET², Ronan FABLET¹

¹Laboratoire Signal & Communications
Telecom Bretagne
Technopôle Brest-Iroise, 29238 Brest, France

²Laboratoire d'Océanographie Spatiale
IFREMER
Technopôle Brest-Iroise, 29280 Plouzané, France

pierre.tandeo@telecom-bretagne.eu, bertrand.chapron@ifremer.fr,
sileye.ba@telecom-bretagne.eu, emmanuelle.autret@ifremer.fr,
ronan.fablet@telecom-bretagne.eu

Thème – Depuis une vingtaine d'années, les mesures satellitaires, qu'elles soient altimétriques pour les courants de surface (composante zonale U et méridionale V) ou radiométriques pour la température de l'eau de surface (Sea Surface Temperature ou SST), fournissent une source importante d'informations sur les dynamiques superficielles de l'océan et les interactions atmosphère/océan. Récemment, certaines études (cf. [4] et [3]) ont montré que les champs de température SST peuvent être considérés, dans certaines situations, comme des traceurs actifs de la dynamique de surface. Dans ce cas, de fortes corrélations existent entre les champs de température SST et de vecteurs vitesse (U, V) ; les courants de surface peuvent alors être prédits à partir des variations locales de température de surface par une fonction de transfert linéaire paramétrique (cf. [2]).

Problème traité – Existe-t-il différentes relations entre la température SST et les courants de surface (U, V) ? Parmi ces relations, celle mise en évidence dans [2] est-elle prédominante? Quand et où la SST peut-elle être considérée comme un traceur actif ou passif de la dynamique de surface? Toutes ces questions restent ouvertes et d'éventuelles réponses permettraient de mieux comprendre et caractériser la circulation océanique.

Originalité – Afin de traiter ce genre de questions, l'approche habituelle des océanographes est de se baser sur des théories physiques de la dynamique des fluides. Dans cette étude, nous développons une méthode permettant d'explorer de manière statistique des historiques de données d'observation satellitaire pour identifier et suivre des modes dynamiques caractéristiques.

Résultats – Notre méthodologie basée sur un apprentissage des relations entre la SST et (U, V) à partir d'observations satellitaires permet de mettre en évidence l'existence de différents modes dynamiques à la surface de l'océan, qui sont discriminés à la fois par leur domaine spatio-temporel et leurs propriétés intrinsèques.

1 Méthodologie

Formellement, le problème est formulé comme l'identification de K différentes dynamiques cachées entre des données jointes de température SST et des courants de surface (U, V) comme illustré en figure 2(a). Or, la théorie qui consiste à dire que la température est un traceur actif de la dynamique suppose qu'il existe un lien entre les variations locales de SST et les courants (U, V) . Nous construisons alors des couples d'imagettes ou patches de SST (vecteur \mathbf{X} de dimension p) avec au centre leurs courants zonaux et méridionaux (vecteur \mathbf{Y} de dimension 2) comme illustré en figure 1. Nous supposons ensuite que la distribution conditionnelle de \mathbf{Y} sachant \mathbf{X} est donnée par un mélange de distributions Normales telles que

$$p(\mathbf{Y}|\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^K \lambda_k \mathcal{N}_k(\mathbf{Y}; \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) \quad (1)$$

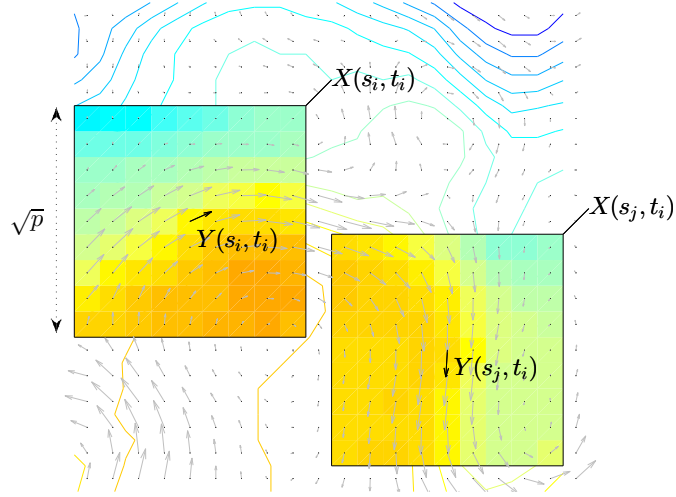


FIGURE 1 – Schéma de patches de température SST (couleurs) notés \mathbf{X} et les courants (U,V) associés (flèches) notés \mathbf{Y} .

où λ_k est la probabilité *a priori* d'appartenir à la dynamique cachée k et \mathcal{N}_k représente une fonction densité Gaussienne multivariée évaluée en \mathbf{Y} de moyenne $\mathbf{X}\beta_k$ et de covariance Σ_k . Dans la littérature, ce modèle est appelé “latent class regression” ou “clusterwise regression” (cf. [1]). Pour simplifier les notations, nous notons $\theta = (\lambda_1, \dots, \lambda_K, \beta_1, \dots, \beta_K, \Sigma_1, \dots, \Sigma_K)$ tous les paramètres du modèle (1) et nous les estimons via l’algorithme Expectation-Maximization (EM). Ensuite, nous exploitons les paramètres estimés $\hat{\theta}$ pour en déduire une segmentation spatio-temporelle des dynamiques cachées à la surface des océans. Plus précisément, pour un lieu s et un temps t , on utilise le théorème de Bayes pour calculer la probabilité *a posteriori* de se trouver dans la dynamique cachée k telle que

$$\hat{\pi}_k(s, t) = \frac{\hat{\lambda}_k \mathcal{N}_k(\mathbf{Y}(s, t); \mathbf{X}(s, t)\hat{\beta}_k, \hat{\Sigma}_k)}{p(\mathbf{Y}(s, t) | \mathbf{X}(s, t), \hat{\theta})}, \forall k. \quad (2)$$

2 Données

Comme données de courants de surface (U,V), nous utilisons les produits journaliers MADT (Maps of Absolute Dynamic Topography) produits par le centre CLS (Collecte Localisation Satellites) disponibles sur <http://www.avisioceanobs.com/>. Cette source d’informations combine le signal de plusieurs altimètres sur une grille Mercator au 1/3 de degrés. Nous utilisons les données de l’année 2004 étant donné la bonne couverture des capteurs altimétriques. Pour ce qui est des données de températures de surface (SST), on utilise des résultats d’interpolations optimales de données micro-ondes données par RSS (Remote Sensing System) et disponibles sur <http://www.ssmi.com/>. Cette information combine le signal de trois radiomètres qui ont la particularité d’être robustes face à la présence de nuages. La résolution spatiale est de $1/4 \times 1/4$ de degrés et la résolution temporelle est la même que celle des données MADT, c’est-à-dire journalière. On interpole bilinéairement les données MADT sur la grille de la SST. On se focalise sur la région fortement dynamique du courant des Aiguilles au large de l’Afrique du Sud.

3 Résultats

3.1 Segmentation des dynamiques de surface

Dans cette étude, nous considérons $K = 4$ dynamiques de surface latentes, c’est-à-dire quatre différentes distributions Normales dans l’équation (1). Cette valeur est un bon compromis entre la vraisemblance et la complexité du modèle. Ensuite, étant donné les paramètres estimés $\hat{\theta}$ via l’algorithme EM, nous calculons d’après l’équation (2) les probabilités *a posteriori* $\hat{\pi}_k$ d’appartenir à la dynamique cachée k . Ces probabilités sont calculées en tous points s de la région des Aiguilles et en tous temps t de l’année 2004. Ensuite, on affecte chaque pixel à la classe ayant la plus forte probabilité. Les résultats indiquent une segmentation spatio-temporelle marquée des dynamiques cachées comme l’illustre la figure 2(b). L’animation sur toute l’année 2004 des cartes de probabilités d’appartenance aux quatre dynamiques cachées est disponible sur <http://tandeo.wordpress.com/communications/articles/>.

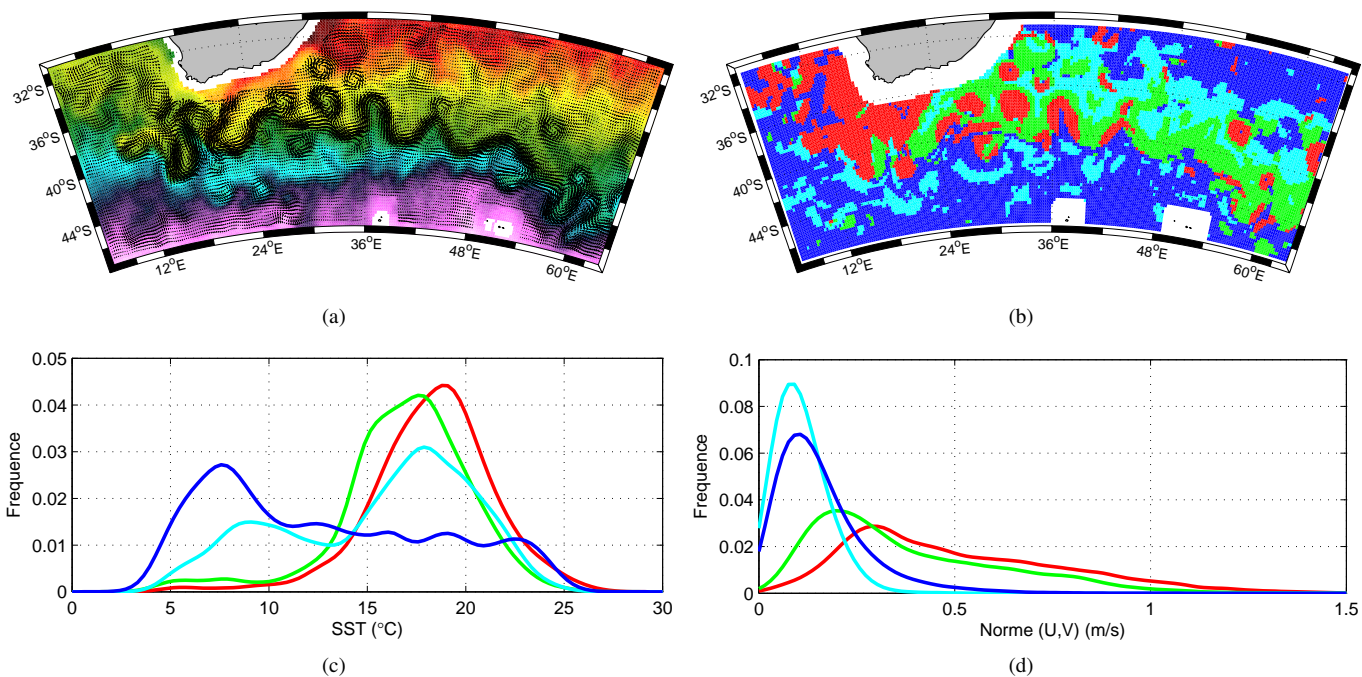


FIGURE 2 – (a) Observations satellitaires de températures SST et de courants de surface (U,V) dans la région des Aiguilles. (b) Résultat de la segmentation en quatre dynamiques superficielles cachées. Nous utilisons les couleurs rouge, verte, cyan et bleu pour respectivement différencier les premières, secondes, troisièmes et quatrièmes dynamiques cachées. Distributions des (c) températures SST et des (d) normes des vecteurs vitesses (U,V) pour les quatre dynamiques superficielles cachées.

3.2 Caractérisation des dynamiques de surface

Les cartes d'affectation des pixels aux différentes dynamiques cachées de surface peuvent être interprétées de façon géophysique. Pour cela, nous traçons les distributions des températures SST et des normes des vecteurs vitesse (U,V) en figures 2(c) et 2(d). La première dynamique (rouge) est caractérisée par des courants et des températures fortes. Elle est principalement associée au courant principal des Aiguilles passant au large de la côte Est de l'Afrique du Sud pour se jeter dans l'océan Atlantique. Cette dynamique est également associée à des tourbillons méso-échelles (comme celui détecté au point 37°S, 32°E) dont les courants sont forts et les gradients de température faibles. La seconde dynamique (vert) correspond au courant retour des Aiguilles circulant d'Ouest en Est dans la bande de latitude 36°S à 44°S de l'océan Indien, avec des gradients de température modérés et des courants forts. Les troisièmes (cyan) et quatrièmes (bleu) dynamiques cachées sont quant à elles moins prononcées. La troisième est caractérisée par des températures moyennes et des courants d'Est en Ouest alors que la quatrième montre des températures froides et des courants inversés. Notons cependant que la troisième dynamique est associée à de très forts gradients de température n'engendrant pas de courants forts. Finalement, nous montrons que dans les zones 2 (vert) et 4 (bleu), la température peut être considérée comme un traceur actif de la dynamique contrairement aux zones 1 (rouge) et 3 (cyan).

Références

- [1] W. S. DeSarbo and W. L. Cron, "A maximum likelihood methodology for clusterwise linear regression," *Journal of Classification*, vol. 5, pp. 249–282, 1988.
- [2] J. Isern-Fontanet, B. Chapron, G. Lapeyre and P. Klein, "Potential use of microwave sea surface temperatures for the estimation of ocean currents," *Geophysical Research Letters*, vol. 33, pp. L24608, 2006.
- [3] J. Isern-Fontanet, G. Lapeyre, P. Klein, B. Chapron and M. W. Hecht, "Three-dimensional reconstruction of oceanic mesoscale currents from surface information," *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, pp. C09005, 2008.
- [4] G. Lapeyre and P. Klein, "Dynamics of the upper oceanic layers in terms of surface quasigeostrophy theory," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 36, pp. 165–176, 2006.