



Identification des zones de convergence par le calcul de métriques Lagrangiennes à partir de champs de courant de surface issus de modèles tridimensionnels et radar HF : Application à l'étude du transport des déchets marins dans le golfe de Gascogne

**Sloane BERTIN¹, Anna RUBIO², Ismael HERNANDEZ-CARRASCO³,
Lohitzune SOLABARRIETA², Irene RUIZ², Alejandro ORFILA³,
Alexei SENTCHEV¹**

1. Laboratoire d'Océanologie et Géosciences, LOG – UMR 8187, 32 Avenue Foch, 62030 Wimereux, France.
sloane.bertin@univ-littoral.fr ; alexei.sentchev@univ-littoral.fr
2. AZTI BRTA, Pasaia, Gipuzkoa, Espagne.
arubio@azti.es ; lsolabarrieta@azti.es ; iruiz@azti.es
3. Institut Mediterrani d'Estudis Avançat (IMEDEA), Esporles, Illes Balears, Espagne.
ihernandez@imedea.uib-csic.es ; alejandro.orfila@csic.es

Résumé :

Dans le sud-est du golfe de Gascogne, il est fréquent d'observer des débris flottants regroupés à la surface de la mer, souvent alignés en lignes parallèles de plus d'un kilomètre de long. Des zones de convergence des courants, à l'origine d'accumulation des déchets, peuvent être créées par divers processus physiques tels que les upwellings, les panaches fluviaux ou encore les fronts estuariens. Mieux comprendre la formation des zones de convergence et le transport des déchets marins par les courants océaniques est essentiel. Notre compréhension des courants permet de faciliter la lutte contre la pollution côtière. Adoptant un point de vue Lagrangien, plusieurs métriques telles que les exposants de Lyapunov de taille finie ainsi que la divergence Lagrangienne, ont été calculées afin d'identifier les structures de convergence où une plus grande concentration de déchets marins est susceptible de se produire. Néanmoins, la détection des zones d'accumulation par les méthodes Lagrangiennes dépend fortement des champs Eulériens sur lesquels elles sont calculées. Dans cette étude, différents champs de courants de surface disponibles dans la zone d'étude sont analysés : sorties de modèle tri-dimensionnel et champs provenant de mesures de vitesse de surface issues d'un réseau radar HF situés dans la zone d'étude (euskoos.eus). Aussi, une méthode d'optimisation est proposée et appliquée aux champs des courants de surface démontrant les meilleurs résultats en termes d'erreur quadratique moyenne et d'erreur Lagrangienne, ici provenant des vitesses radar. Cette méthode se base sur la fusion de données issues de télédétection et de mesures

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Lagrangiennes des vitesses des courants de surface in-situ, issues de deux campagnes de déploiement de bouées dérivantes de 3 jours, menées en avril et octobre 2022.

La fusion des données fournies par des bouées dérivantes avec les champs de vitesses radar réduit en moyenne l'erreur Lagrangienne de 50 % et diminue l'erreur quadratique moyenne de 30 %. La comparaison qualitative entre les métriques Lagrangiennes, calculées à partir des champs initiaux et optimisés, avec les images satellite de concentration de Chlorophylle-a montre que la méthode d'optimisation améliore significativement la reconstruction de la vitesse en surface. De plus, elle offre une identification plus précise des positions des zones de convergence dans la zone d'étude par rapport aux autres champs de courant disponibles. Cette approche a aussi été testée en Manche avec des résultats satisfaisants. Le travail futur inclut de nouvelles campagnes de déploiement de bouées et de mesures de concentration de déchets dans le sud-est du golfe de Gascogne et en Méditerranée (<https://lamarca-project.eu/>) ainsi que l'application de la méthode à d'autres zones d'étude.

Mots-clés :

Sud-est du golfe de Gascogne, Bouées Lagrangiennes, Radar HF, Vitesse des courants de surface, Interpolation optimale, Exposants de Lyapunov de taille finie, Divergence Lagrangienne.

1. Introduction

Sur des distances inférieures à dix kilomètres, dans la gamme de sous-mésoéchelle, l'étude du transport et de la distribution spatiale des particules fait l'objet d'une attention croissante. Les processus sous-mésoéchelle sont très importants car ils jouent un rôle crucial dans le transport et la dispersion des particules. Des simulations numériques et études observationnelles (HAZA *et al.*, 2008 ; MCWILLIAMS, 2016) ont démontré que les échanges verticaux à sous-mésoéchelle sont particulièrement intenses près des fronts, des jets et des tourbillons. Divers mécanismes tels que les marées, les upwellings, ainsi que les panaches fluviaux contribuent à la formation de zones frontales (MANN & LAZIER, 2006 ; AYOUCHE *et al.*, 2020). Ces fronts sont associés à la convergence horizontale des courants, concentrant diverses matières particulaires (voir figure 1b), y compris des déchets marins (CÓZAR *et al.*, 2021), des larves, des algues et des matières organiques telles que le phytoplancton (HERNÁNDEZ-CARRASCO *et al.*, 2018). Pour mieux comprendre les processus sous-jacents à la formation des Structures de Convergence des Courants (SCC), il est nécessaire d'améliorer la capacité de détection de ces phénomènes. Pour atteindre cet objectif, nous proposons ici d'adopter un point de vue Lagrangien basé sur le calcul d'exposants de Lyapunov de taille finie (FSLE) et de la divergence Lagrangienne (FDLD) (HALLER & YUAN, 2000 ; HERNÁNDEZ-CARRASCO *et al.*, 2011). Ces métriques sont calculées à partir de différents champs de courant de surface disponibles dans la zone d'étude : données de modèle et données

provenant de mesures radar HF pour comparaison (tableau 1). Une approche de fusion de données du champ de courant de surface avec les vitesses des bouées Lagrangiennes, est présentée.

2. Zone d'étude et conditions hydrodynamiques

Dans le sud-est du golfe de Gascogne (figure 1a), les courants côtiers suivent des schémas complexes. Le Courant Ibérique Polaire, une composante régionale du Système du Courant Frontal Est de l'Atlantique Nord, circule vers l'est le long de la côte espagnole et vers le nord au large de la côte française. Il montre une variabilité saisonnière importante impactant le transport particulaire, avec un flux vers le nord relativement intense (vitesse de 0.4-0.7 m/s en surface) en fin d'automne et en hiver provoquant l'évacuation des particules vers le nord. Au printemps et en été, le flux s'affaiblit et devient plus variable, se déplaçant principalement vers l'est, conduisant à la rétention des particules (DECLERCK *et al.*, 2019). Des tourbillons mésoéchelle persistants sont récurrents et sont déclenchés par l'interaction du Courant Ibérique Polaire avec la bathymétrie abrupte (PINGREE & LE CANN, 1992).

Le golfe de Gascogne est confronté à des problèmes urgents tels que la pollution près des zones urbaines et industrielles, les blooms algales toxiques, la perte de biodiversité et la prolifération d'espèces envahissantes. (BORJA *et al.*, 2018). La région a été identifiée par des modèles mondiaux et régionaux comme une zone d'accumulation de déchets marins (PEREIRO *et al.*, 2018).

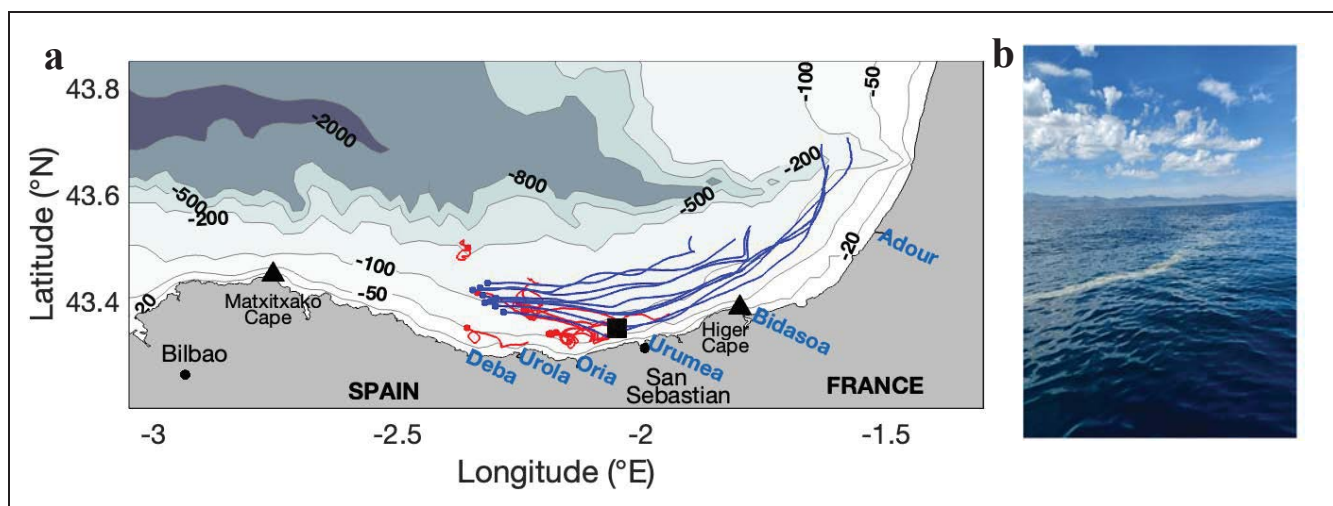


Figure 1. (a) La zone d'étude – Sud-est du golfe de Gascogne. La bathymétrie est représentée en bleu. Les triangles noirs indiquent la position des deux radars HF du réseau EuskoOS. La localisation des principales rivières est indiquée en bleu. Les trajectoires rouges et bleues correspondent aux dérives des bouées des campagnes S1 (26/04/22 11:45 UTC – 28/04/22 07:00 UTC) et S2 (24/10/22 14:00 UTC – 28/10/22 03:00 UTC). (b) Zone d'accumulation de déchets observée durant S1.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

3. Matériel et méthodes

3.1. Données utilisées

Tableau 1. Caractéristiques des différents données utilisées dans l'étude et présentées dans les différentes figures de résultats. $\Delta_{x,y}$ et Δ_t font respectivement référence à la résolution spatiale et temporelle.

	$\Delta_{x,y}$ (km)	Δ_t (h)	Type	Source	Méthode
Drifters	-	0.25	Courant surface	Observation in-situ	40h de mesure durant deux campagnes S1, S2
OMA	5	1	Carte courant surface	Radar HF	Interpolation OMA (KAPLAN & LEKIEN, 2007)
2dVar	2.5	1	Carte courant surface	Radar HF	Interpolation 2dVar (YAREMCHUK & SENTCHEV, 2009)
2dVar-opt	2.5	1	Carte courant surface	Radar HF	Interpolation 2dVar puis interpolation optimale
IBI	3	0.25	Carte courant surface	Modèle (CMEMS)	-
Concentration Chl-a	0.3	24	Image satellite	Téledétection (OC4Me - CMEMS)	-

3.2. Optimisation des champs de courant

L'Interpolation Optimale des observations est utilisée pour modifier un champ de courant afin de fournir une meilleure estimation de l'état de la dynamique côtière. Cela engendre une correction d'un champ de vitesse en effectuant une combinaison linéaire des différences pondérées entre la vitesse initiale d'arrière-plan \mathbf{u}_r , et les vitesses des bouées dérivantes (tableau 1) observées \mathbf{u}_i^* au point i (SENTCHEV & YAREMCHUK, 2015). Les vitesses optimisées \mathbf{u}_{opt} sont calculées comme suit :

$$\mathbf{u}_{opt} = \mathbf{u}_r + \sum_{ij} \mathbf{B} \mathbf{H}_j^T (\mathbf{H}_i \mathbf{B} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{R}_{ij})^{-1} (\mathbf{H}_i \mathbf{u}_r - \mathbf{u}_i^*), \quad (1)$$

où \mathbf{H}_i correspond à un opérateur linéaire projetant les valeurs de vitesse de la grille sur l'emplacement du $i^{\text{ème}}$ point d'observation. \mathbf{B} et \mathbf{R} correspondent respectivement aux covariances des données radar HF et des observations.

3.3. Calcul des métriques Lagrangiennes

En utilisant le logiciel de transport Lagrangien OpenDrift (<https://opendrift.github.io/>) et les différents champs de courant de surface (tableau 1), des particules fictives sont lâchées à chaque pas de temps t le long d'une trajectoire réelle de dérive de bouée. L'erreur Lagrangienne moyenne les distances de séparation entre trajectoires réelles et simulées à chaque pas de temps en suivant l'expression :

$$\varepsilon_L(t) = \left\langle \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{N-(t+1)} \frac{d_{tk}}{N-(t+1)} \right\rangle, \quad (2)$$

avec N correspondant au nombre maximal de pas de temps, correspondant également au nombre de trajectoires simulées, et d_{tk} correspondant à la distance de séparation entre la trajectoire réelle et la trajectoire simulée k au pas de temps t . Pour faciliter les comparaisons, l'erreur Lagrangienne est normalisée par la distance moyenne de dérive des bouées réelles, donnant lieu à l'indice L_i sans dimension.

Les exposants de Lyapunov de taille finie (FSLE) et la divergence Lagrangienne de taille finie (FDLD) sont utilisés pour analyser le transport et le mélange océaniques (LACASCE, 2008 ; HERNÁNDEZ-CARRASCO *et al.*, 2011). Les valeurs élevées de ces quantités se concentrent le long des lignes caractéristiques, identifiant les régions d'étirement maximal correspondant aux fronts et aux limites des tourbillons, mettant en évidence les SCC. Les valeurs FSLE sont estimées comme l'inverse du temps $\tau(x)$ requis pour que deux particules de fluide en écoulement se séparent d'une distance initiale δ_0 à une distance finale δ_f , et s'expriment comme suit :

$$FSLE(x, t, \delta_0, \delta_f) = \frac{1}{\tau(x)} \ln \frac{\delta_f}{\delta_0}. \quad (3)$$

En supposant que le champ de vitesse est divergent, la divergence horizontale ($\nabla_H \cdot \mathbf{v}$) s'accumule le long d'une trajectoire $s(x_0, y_0, t_0)$ dans le domaine fini. Les valeurs de FDLD sont calculées en intégrant et en moyennant la divergence horizontale dans le temps comme suit :

$$FDLD(x_0, y_0, t_0, t_f) = \frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} \nabla_H \cdot \mathbf{v}(x(t), y(t), t) dt. \quad (4)$$

4. Résultats

Dans un premier temps, le calcul de l'indice d'erreur Lagrangienne permet de comparer dans quelles mesures les différents champs de courants sont réalistes (Figure 2). Durant S1, l'indice L_i de tous les champs atteint son maximum autour de 5h, instant durant lequel les courants de surface sont faibles et où les bouées sont soumises aux oscillations de marée et d'inertie donnant lieu à des trajectoires circulaires difficilement reproduites avec une résolution de 2.5 km ou plus. Durant S2, aucun pic de ce type n'a été observé dans les séries temporelles de l'indice L_i , les bouées étant entraînées par un fort jet côtier.

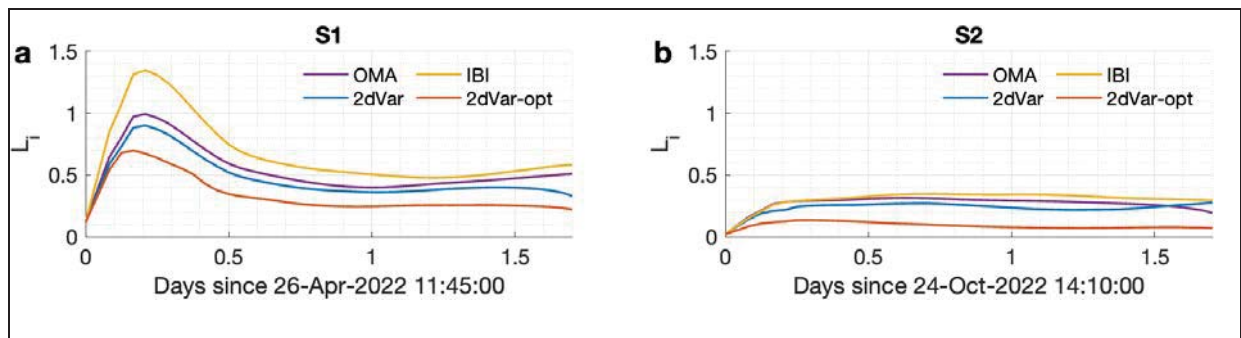


Figure 2. Indice L (a, b) calculés pour les champs disponibles durant S1 et S2.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Néanmoins, durant les deux campagnes, le champ 2dVar-opt issu de l'interpolation optimale démontre les meilleurs résultats (L_i 41% inférieur à OMA, 52% inférieur à IBI et 31% inférieur à 2dVar durant S1, 65% inférieur à OMA, 70% inférieur à IBI et 62% inférieur à 2dVar durant S2 en moyenne).

Afin de caractériser la distribution spatiale des SCC, des cartes de FSLE (figure 3) et FDL (figure 4) ont été générées à partir des différents champs de courant durant S1 et S2 et comparées qualitativement aux images satellites des dates environnantes (figure 5). Les zones de concentrations élevées de Chlorophylle-a sont précisément limitées par des lignes de valeurs élevées de FSLE qui marquent la présence de structures Lagrangiennes cohérentes attractives. Les régions de forte concentration en Chlorophylle-a correspondent également à des zones présentant des extrema positifs et négatifs de FDL. Cependant, seulement les extrema négatifs de FDL coïncident avec les structures Lagrangiennes cohérentes attractives. Les contours des hautes concentrations de Chlorophylle-a ont été tracés manuellement sur les images satellites (traits rouges) et reproduits sur les cartes FSLE et FDL afin d'évaluer la performance des champs.

Les cartes FDL mettent en évidence la surestimation des vitesses des courants de surface par IBI et OMA. En effet, lorsque les particules fictives utilisées dans le calcul des FDL s'échouent, il devient impossible de calculer cette grandeur, se traduisant par des zones blanches près des côtes.

Au cours de S1, seules les cartes FSLE et FDL provenant des champs 2dVar et 2dVar-opt présentent des extrema en accord avec la distribution spatiale des hautes concentrations en Chlorophylle-a. Les structures cohérentes Lagrangiennes attractives sont alignées le long des côtes françaises et espagnoles, et se situent à courte distance du rivage. Le champ OMA semble sous-estimer la convergence, ne présentant que de fines lignes de crêtes près de la côte. Le champ IBI omet la dynamique proche côtière et surestime les structures de convergence dans le centre du domaine. De plus, durant S1, une structure de convergence a été repérée à l'œil nu et correspond à une zone où trois bouées initialement séparées de 16 et 8 km se sont retrouvées à moins de 2 km (figure 1, trajectoires rouges et carré noir), mettant en évidence l'existence d'une SCC. Cette dernière est visible dans les cartes FSLE et FDL provenant des champs 2dVar, 2dVar-opt et IBI (seulement pour la FSLE). Durant S1, l'optimisation ne semble pas avoir d'impact significatif sur les positions des SCC, les figures 3a et 3c étant relativement similaires.

Durant S2, les concentrations de Chlorophylle-a sont moins importantes que durant S1, excepté dans le panache de l'Adour (-1.6°E, 43.5°N), en concordance avec les périodes de campagne. De façon similaire S1, les cartes FSLE et FDL issues des champs 2dVar et 2dVar-opt présentent la meilleure concordance avec la distribution spatiale des concentrations élevées en Chlorophylle-a. Le champ OMA sous-estime encore une fois la divergence. La carte FSLE provenant d'IBI concorde mieux avec la distribution spatiale de la Chlorophylle-a, mais surestime significativement le jet côtier. La méthode

d'optimisation, dans le cas de S2, permet de repositionner le jet côtier et ainsi la structure Lagrangienne cohérente attractive, proche du rivage, en accord avec les observations de vitesse par bouées dérivantes (voir figures 3b et 3d).

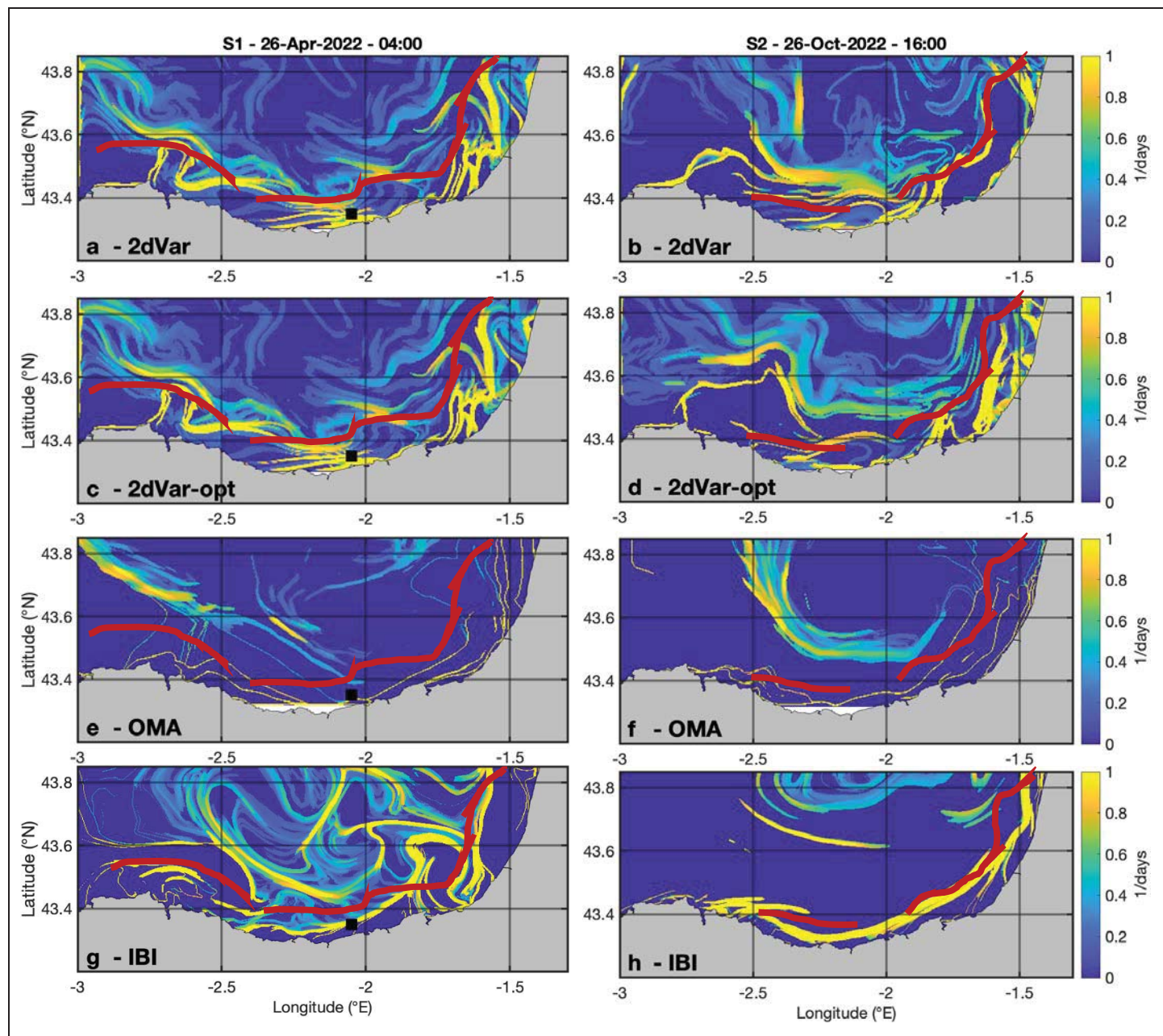


Figure 3. Cartes FSLE calculées à partir des différents champs de courant, à rebours durant 15 jours d'intégration avec $\delta_0 = 0.4$ km, $\delta_f = 3.2$ km, $\alpha = 8$.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

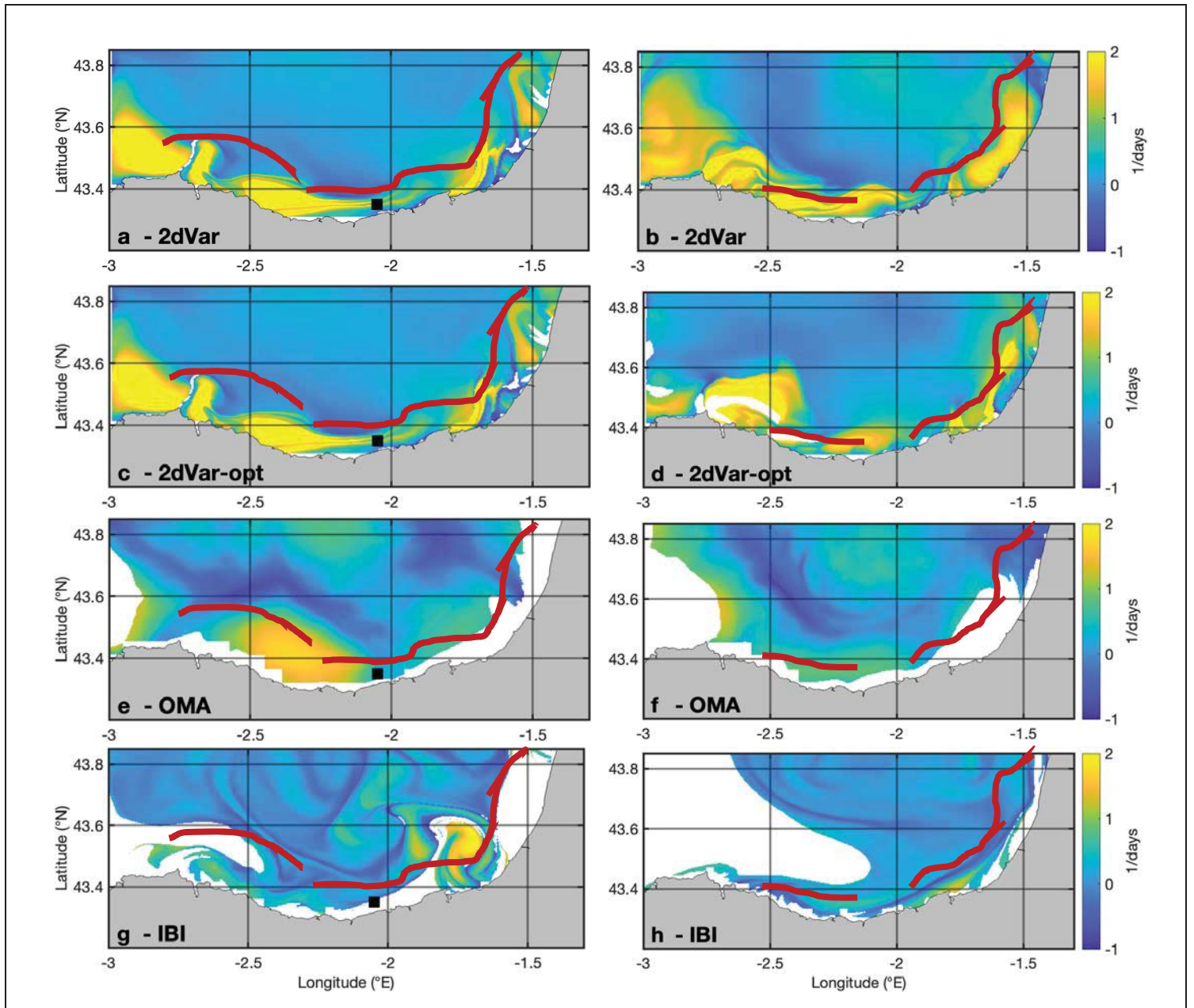


Figure 4. Cartes FLDL calculées à partir des différents champs de courant durant 2 jours d'intégration à rebours.

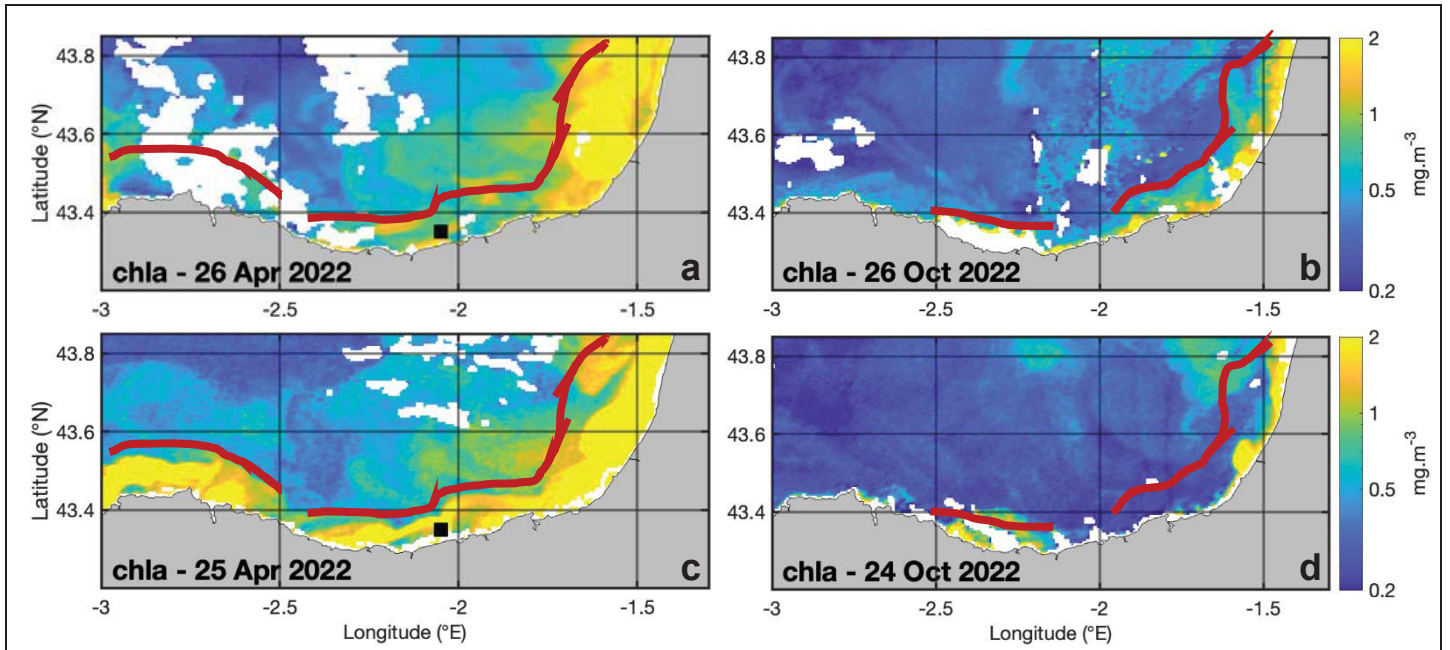


Figure 5. Carte de concentrations de Chlorophylle-a disponibles aux dates de campagnes (a, b) et aux dates précédentes avec une meilleure couverture (c, d). Les concentrations sont données en échelle logarithmique. Les traits rouges délimitent les zones de haute concentration en Chlorophylle-a.

5. Discussion et conclusions

Une méthode d'identification efficace des Structures de Convergence des Courants côtiers est proposée dans cette étude. Les résultats ont démontré en premier lieu que le champ de courant de surface obtenu à partir de l'interpolation 2dVar des vitesses radiales du radar HF offrait les meilleures performances en termes d'erreur Lagrangienne et d'identification des SCC. Cette performance surpasse celle des autres champs Eulériens couramment utilisés dans la communauté, tels que le produit OMA, ou encore les champs modélisés IBI. Ensuite, la fusion des champs de courants de surface de 2dVar et des mesures de vitesse des bouées via l'Interpolation Optimale a encore réduit l'indice d'erreur Lagrangienne de 50 %. Notamment, le champ 2dVar optimisé s'est avéré fournir la localisation la plus réaliste des structures de convergence. Nous avons démontré la présence d'un étirement parallèle aux côtes espagnoles et françaises, conduisant à la formation de SCC côtières. En utilisant l'approche Lagrangienne, et plus spécifiquement l'estimation et la cartographie FSLE et FDL, il est possible de détecter les structures qui délimitent les régions dynamiquement distinctes d'un flux, souvent séparées par des SCC (D'OVIDIO *et al.*, 2009). Ainsi, nous avons pu déterminer plus précisément l'emplacement des SCC et nous avons démontré que les valeurs maximales de FSLE et minimales de FDL délimitent la distribution spatiale Chlorophylle-a, et notamment la limite offshore des panaches fluviaux. Dans la littérature, il est connu que les traceurs tels

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

que la salinité, la température, les matières en suspension ou encore la Chlorophylle-a se dispersent avec les structures Lagrangiennes cohérentes qui les attirent, créant ainsi leur structures typiques en filaments (HERNÁNDEZ-CARRASCO *et al.*, 2018 ; DE MELLO *et al.*, 2023). Ces structures de convergence suppriment l'expansion et renforcent le piégeage de matières particulaires telles que les déchets marins, donnant lieu à des zones d'accumulations. Elles apparaissent périodiquement aux mêmes endroits et se déplacent généralement de la côte estuarienne vers le large. Elles sont généralement parallèles aux isobathes (RUIZ *et al.*, 2020 ; ALIANI *et al.*, 2022), et donc généralement aux côtes, et parfois observables à l'œil nu. Cette étude montre le potentiel de l'approche Lagrangienne pour estimer la localisation des SCC à la surface de l'océan, ainsi que la capacité de la méthode 2dVar à reconstruire avec précision et haute résolution les champs de vitesse à partir de radar HF. Cependant, la télédétection de la vitesse des courants de surface par radar HF présente certaines limites. La qualité des données peut être affectée par différents problèmes liés à des pannes matérielles ou logicielles et à des conditions environnementales défavorables, comme des conditions de mer agitées, des interférences de signaux ou des modifications des diagrammes d'antenne directionnelle (MANTOVANI *et al.*, 2020). Cela peut compromettre la disponibilité des données, entraînant une portée réduite, une couverture spatiale incomplète ou même des périodes sans données. De plus, la ligne de base des radars HF, zone située entre deux sites radar dans laquelle les courants totaux ne peuvent pas être reconstruits de manière précise, est une région permanente de grande incertitude. La présence de lacunes spatio-temporelles empêche l'utilisation des données de vitesse pour l'analyse Lagrangienne. Ainsi, l'utilisation de méthodes de gap-filling est essentielle pour l'étude des processus de transport et de dispersion en milieu côtier marin. Même après application de méthodes de comblement des lacunes, les champs de vitesse résultants dérivés des mesures radar HF ne sont pas exempts d'erreurs (HERNÁNDEZ-CARRASCO *et al.*, 2018). Ainsi, lorsqu'une description précise de la circulation côtière est requise, l'utilisation d'une méthode d'optimisation pour réduire l'impact de ces erreurs est essentielle.

Nos résultats représentent une avancée significative dans les méthodes d'identification et de localisation des SCC à partir des courants de surface télédéteçtés, et ont des applications directes pour l'étude du transport et de l'agrégation de déchets marins flottants à la surface de l'océan. Ces connaissances sont essentielles en océanographie physique, car la matière particulaire peut servir de traceurs pour comprendre la circulation océanique sous-mésoséchelle. À l'inverse, notre compréhension des courants océaniques joue un rôle important dans la détermination des trajectoires des déchets marins flottants, des hydrocarbures, ou encore des algues. Cela facilite également la détection et la réduction de la pollution, ce qui revêt une importance particulière dans une société fortement tributaire de ses zones côtières.

6. Références bibliographiques

- ALIANI S., BASURKO O.C., ARIAS M., ISOBE A., RUBIO A., TOPOUZELIS K., CÓZAR A. (2022). *Editorial: Marine litter windrows*. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.827907>
- AYOUCHE A., CARTON X., CHARRIA G., THEETTENS S., AYOUB N. (2020). *Instabilities and vertical mixing in river plumes: application to the Bay of Biscay*. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, Vol. 114, n°4-5, pp. 650-689 <https://dx.doi.org/10.1080/03091929.2020.1814275>
- BORJA A., AMOUROUX D., ANSCHUTZ P., GÓMEZ-GESTEIRA M., UYARRA M.C., VALDÉS L. (2018). *The Bay of Biscay in world seas: An environmental evaluation, Chapter 6, 2nd Edition*, Editor J.-F. Hamel, eBook ISBN: 9780128052020
- CÓZAR A., ALIANI S., BASURKO O.C., ARIAS M., ISOBE A., TOPOUZELIS K., RUBIO A., MORALES-CASELLES C. (2021). *Marine Litter Windrows: A strategic target to understand and manage the ocean plastic pollution*. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.571796>
- DECLERCK A., DELPEY M., RUBIO A., FERRER L., BASURKO O.C., MADER J., LOUZAO M. (2019). *Transport of floating marine litter in the coastal area of the south-eastern Bay of Biscay: A Lagrangian approach using modelling and observations*. *Journal of Operational Oceanography*, Vol. 12, n°sup2, pp. S111-S125, <https://dx.doi.org/10.1080/1755876X.2019.1611708>
- DE MELLO C., BARREIRO M., HERNANDEZ-GARCIA E., TRINCHIN R., MANTA G. (2023). *A Lagrangian study of summer upwelling along the Uruguayan coast*. *Continental Shelf Research*, Vol. 258, pp. 104987, <https://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2023.104987>
- D'OIDIO F., ISERN-FONTANET J., LÓPEZ C., HERNÁNDEZ-GARCÍA E., GARCÍA-LADONA E. (2009). *Comparison between Eulerian diagnostics and finite-size Lyapunov exponents computed from altimetry in the Algerian basin*. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 56, n°1, pp. 15-31, <https://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2008.07.014>
- HALLER G., YUAN G. (2000). *Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence*. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 147, n°3, pp. 352-370 [https://dx.doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00142-1](https://dx.doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00142-1)
- HAZA A. C., POJE A. C., ÖZGÖKMEN T.M., MARTIN P. (2008). *Relative dispersion from a high-resolution coastal model of the Adriatic Sea*. *Ocean Modelling*, Vol. 22, n°1, pp. 48-65, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.01.006>
- HERNÁNDEZ-CARRASCO I., LÓPEZ C., HERNÁNDEZ-GARCÍA E., TURIEL A. (2011). *How reliable are finite-size Lyapunov exponents for the assessment of ocean dynamics?* *Ocean Modelling*, Vol. 36, n°3, pp. 208-218, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.12.006>
- HERNÁNDEZ-CARRASCO I., ORFILA A., ROSSI V., GARÇON V. (2018). *Effect of small-scale transport processes on phytoplankton distribution in coastal seas*. *Scientific*

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

- Reports, Vol. 8, n°1, pp. 8613, <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-26857-9>
- KAPLAN D. M., LEKIEN F. (2007) *Spatial interpolation and filtering of surface current data based on open-boundary modal analysis*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 112, n°C12, <https://dx.doi.org/10.1029/2006JC003984>
- LACASCE J.H. (2008). *Statistics from Lagrangian observations*. Prog. Oceanogr., Vol. 77, pp. 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.02.002>
- MANN K., LAZIER J. (2006). *Dynamics of marine ecosystems: Biological–physical interactions in the oceans*. 3rd Edition, Blackwell publishing, 520p., ISBN-13: 978-1-4051-1118-8
- MANTOVANI C., CORGNATI L., HORSTMANN J., RUBIO A., REYES E., QUENTIN C., COSOLI S., ASENSIO J. L., MADER J., GRIFFA A. (2020). *Best practices on high frequency radar deployment and operation for ocean current measurement*. Frontiers in Marine Science, Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00210>
- MCWILLIAMS J. C. (2016). *Submesoscale currents in the ocean*. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 472, n°2189, pp 20160117, <https://dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0117>
- PEREIRO D., SOUTO C., GAGO J. (2018). *Calibration of a marine floating litter transport model*. Journal of Operational Oceanography, Vol. 11, n°2, pp. 125-133 <https://dx.doi.org/10.1080/1755876X.2018.1470892>
- PINGREE R.D., LE CANN B. (1992). *Three anticyclonic slope water oceanic eDDIES (SWODDIES) in the southern Bay of Biscay in 1990*. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, Vol. 39, n°7, pp. 1147-1175 [https://dx.doi.org/10.1016/0198-0149\(92\)90062-X](https://dx.doi.org/10.1016/0198-0149(92)90062-X)
- RUIZ I., BASURKO O.C., RUBIO A., DELPEY M., GRANADO I., DECLERCK A., MADER J., CÓZAR A. (2020). *Litter Windrows in the South-East Coast of the Bay of Biscay: An ocean process enabling effective active fishing for litter*. Frontiers in Marine Science, Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00308>
- SENTCHEV A., YAREMCHUK M. (2015). *Monitoring tidal currents with a towed ADCP system*. Ocean Dynamics, Vol. 66, <https://dx.doi.org/10.1007/s10236-015-0913-z>
- YAREMCHUK M., SENTCHEV A. (2009). *Mapping radar-derived sea surface currents with a variational method*. Continental Shelf Research, Vol. 29, n°14, pp 1711-1722. <https://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.05.016>