

Université de Toulon

U.F.R Sciences et techniques

Master Sciences et Technologies 2^{ème} Année
Mention « Physique et Sciences de l'ingénieur »
Parcours « Surveillance de l'Environnement

Année 2015-2016

Mémoire présenté par
Aurélien GEORGES

Titre du mémoire :
***Reconstruction du courant à partir d'une station radar (CODAR
SeaSonde) unique et comparaisons avec des observations in situ
et satellitales***

Maîtres de stage Bruno ZAKARDJIAN et Céline QUENTIN

Résumé

Ce rapport présente une étude de courantologie du courant Nord Méditerranéen avec la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle (MCRV) du courant employée lorsqu'un seul radar est disponible. Cette étude permet de caractériser le courant Nord et les tourbillons présents dans la zone du radar du cap Ferrat lors de la campagne océanographique OSCAHR. Le radar de Dramont (devant compléter celui du cap Ferrat) étant hors service, les données recueillies du 29/10/2015 au 06/12/2015 sont quand même traitées pour ensuite être comparées aux données ADCP, SST et flotteurs de la campagne OSCAHR et aussi appuyer les résultats des modèles Symphonie et Mars3dEco3m utilisés lors de cette campagne. Les données radar sont analysées de façon à caractériser les vitesses radiales, le nombre de mesures disponibles, ainsi que l'écart type sur ces mesures de vitesses et la MCRV permet ensuite d'obtenir des résultats sur la direction et la vitesse du courant reconstruit. La condition de non divergence du courant pour appliquer la MCRV et le manque de données à disposition loin du radar ont un peu limité l'éventail radar par rapport à une portée attendue de 60 kilomètres mais les résultats semblent cohérents avec les données de la campagne OSCAHR. Ceci étant les données ADCP de la campagne océanographique comparées aux données radar donnent des résultats encourageants tant en direction qu'en vitesse du courant sachant que les tourbillons présents dans cette zone ont été localisés. Les flotteurs de cette campagne ont des trajectoires et des vitesses en accord avec les données radar. Les données SST permettent de commenter la forme du courant Nord et la présence de tourbillons côtiers. Les modèles Symphonie et Mars3dEco3m peuvent être validés pour la localisation du courant Nord mais aussi pour la présence du tourbillon côtier qui a aussi été observé *in situ*. Le radar de Dramont étant inutilisable, le radar du cap Ferrat seul a quand même fourni des résultats intéressants grâce à la MCRV qui, appliquée sur plus d'un mois de données radar, semble être une méthode pertinente une fois comparée aux données de la campagne OSCAHR. Donc dans le cas d'un radar avec un système compact « mono-antenne » il est possible d'utiliser les données de vitesses radiales couplées à la MCRV pour obtenir le champ du courant sans obligatoirement passer par une configuration comportant plusieurs radars ce qui peut être une conclusion intéressante si un ou plusieurs radars d'une configuration sont inutilisables et que les données d'un seul radar restant doivent quand même être traitées pour dresser une carte du courant.

Table des matières

1. Introduction	3
2. Matériels et méthodes	5
2.1 La station CODAR du cap Ferrat	5
2.1.1 Zone d'étude du CODAR	5
2.1.2 Théorie sur le CODAR SeaSonde	6
2.1.3 Traitement des données à disposition	9
2.2 Campagne océanographique OSCAHR	12
2.3 Utilisation de la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle	14
2.3.1 Principe de la méthode	14
2.3.2 Applications de cette méthode	15
3. Résultats	24
3.1 Comparaison avec les données de Sea Surface Temperature	24
3.2 Comparaison avec les données Acoustic Doppler Current Profiler	27
3.3 Comparaison avec les données des flotteurs	32
4. Discussion et conclusion	39
 Bibliographie	 43
Table des acronymes	43

1. Introduction

La courantologie par radar (en Anglais radio detection and ranging) est une des activités de l'équipe océanologique du MIO (Institut Méditerranéen d'Océanologie). Ce domaine d'étude a été hérité du LSEET (Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre) qui depuis janvier 2012 est devenu partie intégrante du MIO.

Dans le cadre du programme MOOSE (en Anglais Mediterranean Ocean Observing System on Environment www.mio.univ-amu.fr/?-Circulation-cotiere-) deux sites radars hf (hautes fréquences) ont été implantés pour caractériser la variabilité du courant Nord. Le projet MOOSE permet, avec l'utilisation de radars hf, d'étudier les activités anthropiques comme la pollution ou bien le réchauffement climatique sur le milieu marin. Les avantages du radar hf étant une vue synoptique avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Les échanges côte-large peuvent être mieux décrits ainsi que la dispersion et la rétention des polluants, des espèces planctoniques et larvaires en caractérisant la circulation côtière. En terme environnemental l'outil radar peut même servir pour le suivi de la pullulation et l'échouage des méduses. Les dégazages sauvages et les divers échouages de certains navires sont un problème pour l'écologie marine. Aussi la dérive d'éventuelles nappes d'huile ou de pétrole peut être plus facilement traitée lorsqu'il y a des données de vitesses et de directions du courant. Le projet TOSCA (en Anglais network for a better response to maritime accidents www.tosca-med.eu) décrit l'intérêt du radar hf en tant qu'outil puissant capable de fournir des estimations de transport satisfaisantes et d'améliorer la réponse aux pollutions maritimes et aux urgences de recherche et sauvetage en mer. De plus les modèles numériques actuels ont besoin de données, notamment radar, pour améliorer les conditions initiales des modèles océanographiques. Les radars hf disposant d'une grande résolution spatiale permettent de compléter les données satellites de jour comme de nuit.

Le courant Nord constitue la branche Nord de la circulation générale du bassin Méditerranéen qui est due à un échange au niveau du détroit de Gibraltar d'eaux denses et salées Méditerranéennes et d'eaux plus légères et moins salées de l'océan Atlantique. La force de Coriolis dévie par la droite l'écoulement de ces eaux après qu'elles soient rentrées par le détroit de Gibraltar vers les côtes Algériennes puis ces eaux suivent le bassin Méditerranéen pour enfin sortir par les côtes Espagnoles du détroit de Gibraltar [1]. La morphologie du Courant Nord est marquée par une forte variabilité saisonnière et un hiver sa largeur fait 25 kilomètres et sa vitesse peut aller de 0,5 à 1 m/s [2]. En hiver lorsque le débit du courant Nord est maximum l'écoulement peut devenir instable et des tourbillons peuvent se former [3].

Le site de Toulon Antares est opérationnel depuis 2011 tandis que seul le radar du Cap Ferrat est

en service depuis 2013 sur le site de Nice Dyfamed (voir figure 1). Pour les weras (en Anglais wave radar) placés sur le site Antares l'acquisition des données se fait en quasi temps réel c'est à dire avec deux heures de décalage pour que les données soient validées (<http://hfradar.univ-tln.fr/HFRADAR>). Ces radars permettent d'obtenir des cartes de courant directement disponibles par les utilisateurs sur internet. Le but étant pour les deux sites d'obtenir une surveillance environnementale de la côte Varoise et des Alpes-Maritimes opérationnelle et de faire l'acquisition des données en temps réel.

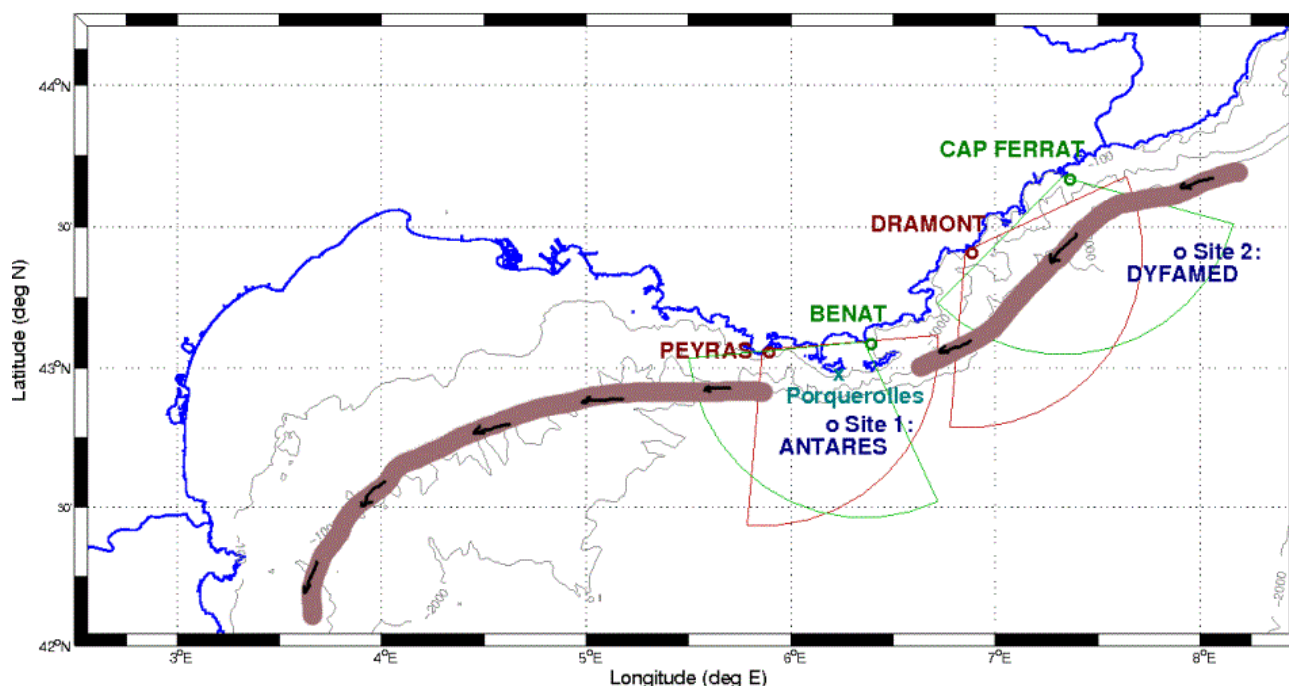


Figure 1 : carte des deux sites radar hf ANTARES et DYFAMED avec la dynamique du courant Nord au Nord-Ouest de la Méditerranée (en marron). Sur le site ANTARES il y a un radar monostatique au cap Sicié (Peyras), plus un transmetteur sur les îles de Porquerolles et un récepteur au cap Bénat (à 18 kilomètres). Sur le site DYFAMED il y a deux radars SeaSonde, un au cap Ferrat et un à Dramont. Les arcs de cercles représentent les portées radar.

Comme le CODAR (en Anglais coastal dynamics applications radar) de Dramont n'est pas utilisable l'étude menée vise à caractériser le courant Nord à l'aide du CODAR placé au Cap Ferrat uniquement. Ce rapport de stage apporte donc une méthodologie particulière de traitement des données dans le cas d'une unique station radar. Les données de la campagne OSCAHR (en Anglais Observing Submesoscale Coupling At High Resolution <http://mio.pytheas.univ-amu.fr/OSCAHR/>) sont alors comparées aux données du radar hf du cap Ferrat. Cette campagne océanographique devant à la base s'effectuer proche du site Antares a été déplacée sur le site Dyfamed pour des

raisons d'autorisations. L'objectif de ce travail est donc d'évaluer les performances du radar du cap Ferrat et de tester la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle (MCRV) des vecteurs courant proposée par Julien Marmain en 2010 lors de son étude sur la reconstruction de courant à partir d'une station radar unique. Les résultats de la MCRV comparés aux données de la campagne OSCAHR peuvent servir à évaluer la validité de la méthode et des modèles Symphonie et Mars3dEco3m utilisés lors de la campagne avec une station radar unique. Sachant que le montage classique pour étudier les courants comporte au moins deux radars pour reconstruire l'espace du champ des vitesses (www.moose-network.fr/).

Le rapport porte premièrement sur la zone d'étude, le fonctionnement et l'exploitation des données du radar du cap Ferrat. Suit un aperçut des données de la campagne océanologique OSCAHR. Le principe de la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle est introduit puis suivent des applications de cette méthode. Les résultats sont ensuite comparés aux données ADCP, SST et flotteurs de la campagne OSCAHR. Un bilan traite des avancées faites sur le sujet et des possibles améliorations à lui apporter puis une discussion relate de la validation des modèles numériques avec l'utilisation d'une station radar unique.

2. Matériels et méthodes

Cette partie présente la zone d'étude du CODAR SeaSonde du cap Ferrat (<http://www.CODAR.com/SeaSonde.shtml>) ainsi qu'un bref exposé de son utilisation. L'étude menée portant plus sur le traitement des données, afin d'appuyer les résultats de la campagne OSCAHR, cette partie est traitée de façon à donner un aperçu sur l'utilisation des données CODAR sur les vitesses radiales mesurées sans rentrer dans les détails du fonctionnement du CODAR en lui-même. Les données de la campagne OSCAHR sont présentées et sont comparés aux résultats de la MCRV dans la partie sur les résultats.

2.1 La station Codar du cap Ferrat

2.1.1 Zone d'étude du CODAR

Le CODAR du cap Ferrat balaye une zone circulaire de 60 kilomètres de rayon près de la côte des Alpes-Maritimes. Les vitesses radiales mesurées peuvent servir à définir un courant ou des tourbillons et méandres qui peuvent se former dans cette partie de la Méditerranée.

Deux CODARs seasonde sur le site Nice Dyfamed sont bien sûr prévus pour obtenir plus précisément le champ des vitesses (voir la figure 2) comme il a été fait sur le site Antares proche de

Toulon avec les weras. Le CODAR étudié est celui qui correspond à CFER c'est à dire cap Ferrat, l'autre CODAR DRAM est situé au cap Dramont à Saint Raphael. Le CODAR de Dramont a été mis en service en mai 2014 mais il a été frappé par la foudre en juin ce qui fait que seul le CODAR du cap Ferrat est en service. Les données du CODAR du cap Ferrat sont prises dans une zone de 6° à 9° Est et de 42° à 45° Nord.

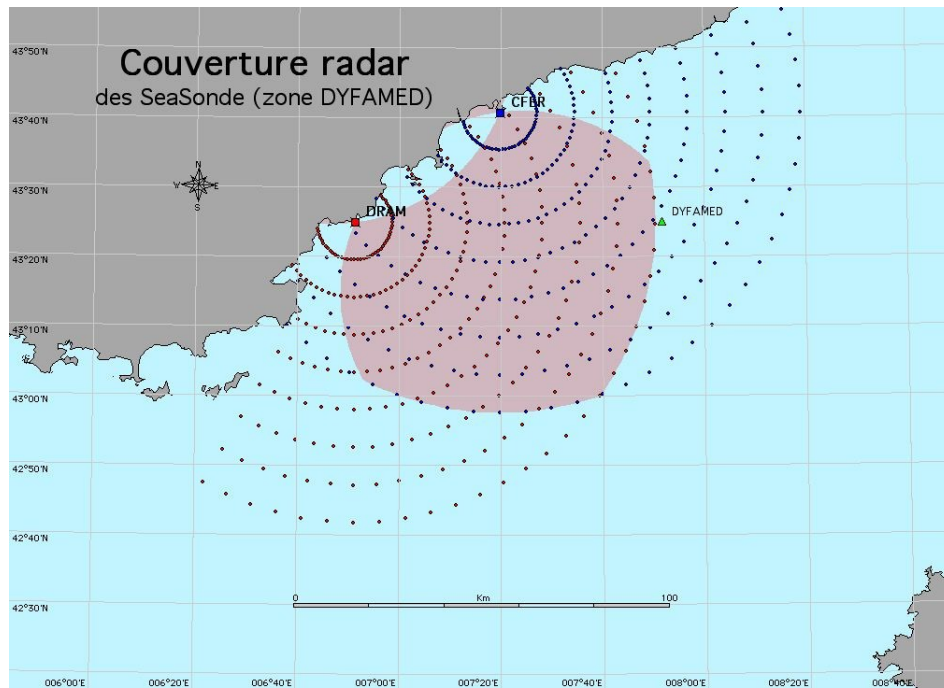


Figure 2 : couvertures des deux CODARs SeaSondes de la zone Dyfamed. CFER représente l’emplacement du CODAR du cap Ferrat et DRAM celui de Dramont. La zone en rouge représente la couverture des radars une fois le courant reconstruit en croisant les vitesses radiales des deux stations.

2.1.2 Théorie sur le Codar SeaSonde

Le CODAR SeaSonde du cap Ferrat émet des hautes fréquences d'ondes électromagnétiques, sa fréquence centrale est de 13,5 MHz avec une bande de fréquence de 50 kHz, pour des longueurs d'ondes dites décamétriques, de 22,2 mètres. Le bref résumé sur le fonctionnement du CODAR qui suit est tiré du site http://www.CODAR.com/intro_hf_radar.shtml.

Le signal hf à polarisation verticale émis par le CODAR se propage à la surface de l'eau de mer électriquement conducteur. Le CODAR utilise le principe de rétrodiffusion c'est à dire qu'au lieu d'être réfléchi spéculairement par la cible l'onde électromagnétique est diffusée par les irrégularités de la surface cible à savoir les vagues [4].

La mesure proprement dite du CODAR provient du phénomène de diffusion de Bragg cohérente. La vague océanique qui construit la cohérence du signal électromagnétique rétrodiffusé

est appelée vague de Bragg. Sa longueur d'onde est égale à la moitié de la longueur d'onde électromagnétique émise, soit des vagues vues d'une longueur d'onde de 11,1 mètres. La vague de Bragg dont la longueur d'onde est λ_B est décrite par Crombie [5] avec la formule ;

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{2} \text{ avec } \lambda_0 \text{ longueur d'onde du radar.}$$

Elle se déplace à la vitesse v_φ qui selon la relation de dispersion en eau profonde est :

$$v_\varphi = \sqrt{\frac{g * \lambda_B}{2 * \pi}}$$

Une onde monochromatique est définie par :

-Sa longueur d'onde λ_B , qui est reliée au nombre d'onde par la relation $K_B = \frac{2 * \pi}{\lambda_B}$.

-Son amplitude.

-Sa fréquence $f_B = \frac{1}{T}$ ou pulsation $\omega_B = \frac{2 * \pi}{T} = 2 * \pi * f_B$.

En eau profonde, longueur d'onde et fréquence sont liées, comme le décrit Barrick [6], par la relation de dispersion $\omega_B = \sqrt{g * k_B}$.

$$\text{Soit pour la fréquence de Bragg } f_B = \sqrt{\frac{g}{2 * \pi * \lambda_B}}.$$

La fréquence de Bragg correspond à la fréquence Doppler du décalage entre les mouvements des vagues. Si la vague se déplace vers le radar la fréquence de Bragg est positive et si la vague s'en éloigne cette fréquence est négative, sachant que pour le CODAR étudié la fréquence de Bragg vaut plus ou moins 0,3748Hz.

Le CODAR utilise le principe de l'effet Doppler pour déterminer les vitesses radiales. Si l'on observe un spectre Doppler (voir figure 3) il est possible de voir deux raies de Bragg symétriques avec une intensité différente dépendant du sens du courant. La mesure CODAR voit un décalage entre la fréquence théorique sans le courant et la fréquence avec le courant ce qui donne accès à la vitesse.

Cette mesure s'effectue sur une couche d'eau h de 88cm dépendant de la fréquence centrale à 13,5MHz avec comme formule énoncée par Stewart et Joy [7] :

$$h = \frac{\lambda}{8 * \pi}$$

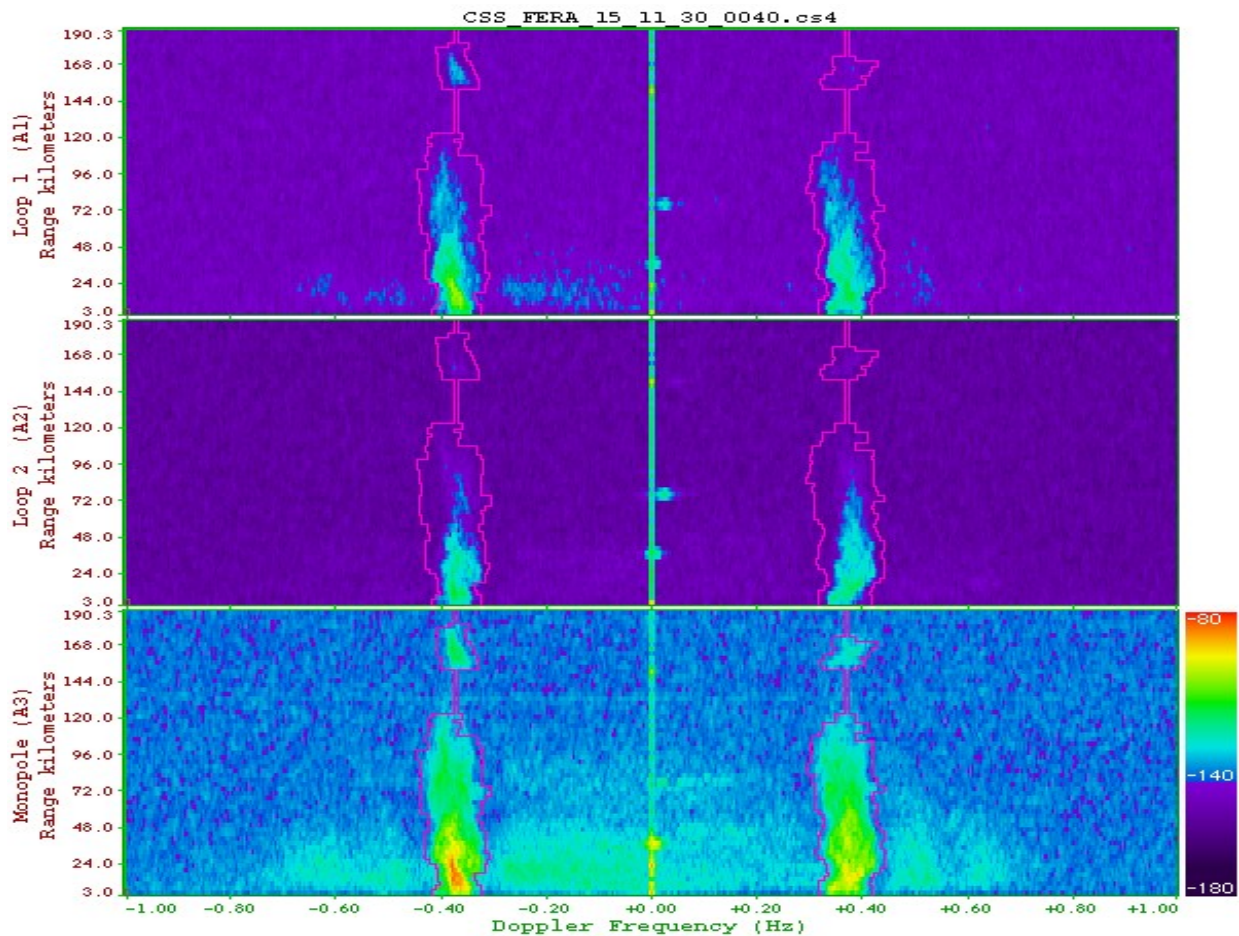


Figure 3 : exemple de spectres Doppler. Les 2 panneaux supérieurs correspondent aux spectres doppler mesures sur les 2 antennes magnétiques qui sont moins sensibles que le monopole électrique dont le spectre est dans le panneau inférieur. On a en ordonnées les distances au radar, et en abscisse les fréquences doppler. Les deux raies de Bragg pour la fréquence de travail de 13,475 MHz sont situées en + et - 0,37 Hz. Au-delà de 130 km on retrouve la signature d'une seconde rampe radar qu'on ne prendra pas en compte.

Le CODAR du cap Ferrat est un HFSWR (en Anglais High Frequency Surface Wave Radars) avec un système compact « mono-antenne » qui peut assurer à la fois l'émission et la réception des ondes servant à obtenir les valeurs des vitesses radiales du courant. Pour cartographier les courants le CODAR détermine trois types d'informations : sa distance à la source de diffusion, la direction d'arrivée et sa vitesse. La première chose à déterminer est la distance de la cible. Elle dépend du retard temporel du signal diffusé après la transmission. Ce retard temporel est converti en décalage de fréquence dans le signal d'écho par une modulation du signal émis avec un signal de balayage de fréquence qui est démodulé par le récepteur. La première analyse spectrale du signal extrait la

distance de diffusion des eaux de surfaces rangées dans des cellules. La deuxième chose à mesurer est l'angle de la cible. C'est fait en chaque point spectral (de distance et de vitesse) en utilisant simultanément les données collectées par l'antenne de réception. Le CODAR utilise le système de recherche en direction avec l'algorithme MUSIC [8] pour déterminer l'angle des radiales de mesures. La troisième chose à déterminer est la vitesse Doppler de la cible. L'information sur la vitesse des ondes de diffusion de la mer (contributions des vagues et du courant) est obtenue par un second traitement du signal des cellules de distances. Les décalages de fréquences Doppler sont déduits de ces mouvements. La longueur de la série temporelle utilisée pour ce traitement spectral détermine la résolution en vitesse qui est de l'ordre de quelques cm/s. Il n'y a que la composante radiale de la vitesse qui peut être mesurée. A la fin de ces trois phases de traitement du signal les cartes de vitesses radiales du courant de surface sont disponibles en coordonnées polaires.

Les vitesses radiales peuvent être estimées toutes les dix minutes sur une intégration du signal d'une heure et trente minutes pour créer une carte de vitesses radiales à la station CODAR. Le courant est à la base reconstruit lorsqu'au moins deux stations radar sont à disposition le but étant de croiser les vitesses radiales pour obtenir le champ vectoriel [9]. Dans le cas présent n'ayant que les données d'une seule station CODAR la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle [10] permet de reconstruire le champ vectoriel des vitesses à partir d'une fonction de courant calculée par intégration des vitesses radiales mesurées par le CODAR du cap Ferrat, méthode qui est mieux décrite dans la partie portant sur son utilisation.

2.1.3 Traitement des données à disposition

La période de traitement des données va du 29/10/2015 au 06/12/2015 pour couvrir entièrement la période de la campagne OSCAHR, qui sera décrite dans la partie suivante. Des statistiques sur les données CODAR ont été établies sur cette période, à savoir sur les 936 heures pour avoir une visualisation globale des données CODAR et en faire une première analyse critique. Les données de résolution 5° ont été tournées de 20° (4 radiales) suite à un problème d'angle lors de la paramétrisation (voir figure 4). Le dipôle rouge (vitesses venant vers le CODAR) est bleu (vitesses s'éloignant du CODAR) est la signature du courant Nord. Nous disposons pour cette étude d'un jeu de données originales de résolution 5° et d'un jeu ayant subi un retraitement avec pour résolution 1° .

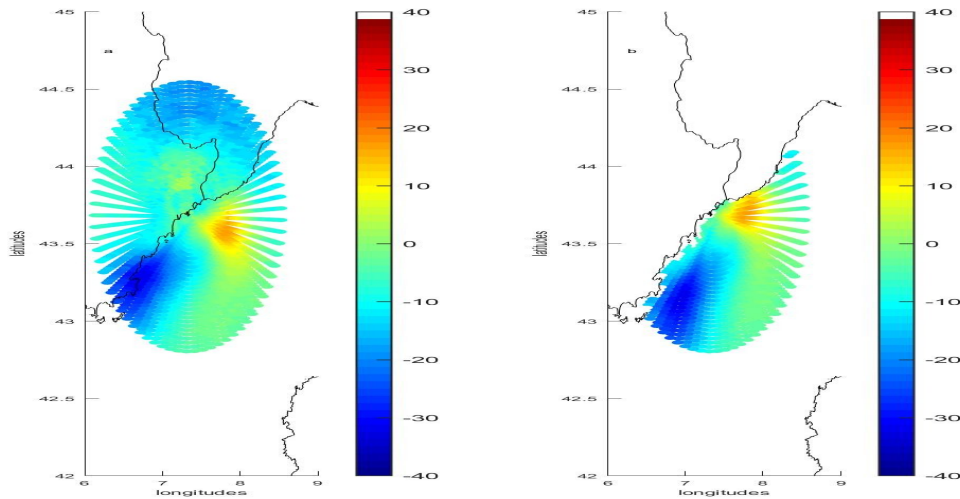


Figure 4 : En a figure les données de vitesses radiales brutes non tournées. Les vitesses sont moyennées sur les 936 heures et vont de 40cm/s sur la partie rouge du dipôle à -40cm/s sur la partie bleue du dipôle. En b les vitesses obtenues après avoir tournées les données. Le jeu de données utilisé à une résolution de 5°.

Les mesures de vitesses radiales sont moyennées sur 936 heures et l'écart type sur ces mesures est fourni ainsi que le nombre de mesures disponibles, le pourcentage de mesures par heure donne également un aspect qualitatif sur ces mesures. Un masque est appliqué sur ces graphiques pour suivre le trait de côte. Les statistiques sur ces mesures sont données pour une résolution de 5° (voir figure 5) et pour une résolution de 1° (voir figure 6).

Le dipôle rouge (vitesses radiales arrivant vers le CODAR) et bleu (vitesses radiales s'éloignant du CODAR) visible est caractéristique du courant Nord longeant les côtes des Alpes-Maritimes sur les deux graphiques 5 a et 6 a. Avec une meilleure résolution pour des radiales espacées de 1° (résolution la plus fine possible) ce dipôle est plus marqué que pour des radiales espacées de 5°. Les vitesses radiales caractérisant le courant Nord sont de l'ordre d'une trentaine à une quarantaine de cm/s. On remarque que la partie du dipôle bleu (au Sud-Ouest) est beaucoup plus présente que la partie du dipôle rouge (au Nord Est). Ceci étant dû à l'orientation du CODAR du cap Ferrat qui est à la base prévue pour s'orienter vers le CODAR de Dramont donc vers le Sud-Ouest (voir figure 2) mais aussi à un problème d'interférences dans ce quadrant.

Les deux graphiques 5 b et 6 b présentant l'écart type sur les mesures montrent des variabilités sur ces vitesses de l'ordre d'une dizaine à une quinzaine de cm/s pour la résolution à 5° (figure 5 b) et d'une quinzaine à plus d'une vingtaine de cm/s pour la résolution à 1°. La partie Nord Est de l'éventail CODAR voit un écart type encore plus important sur ces mesures de l'ordre d'une trentaine de cm/s car comme il a déjà été expliqué cette zone manque de couverture CODAR et subi des interférences.

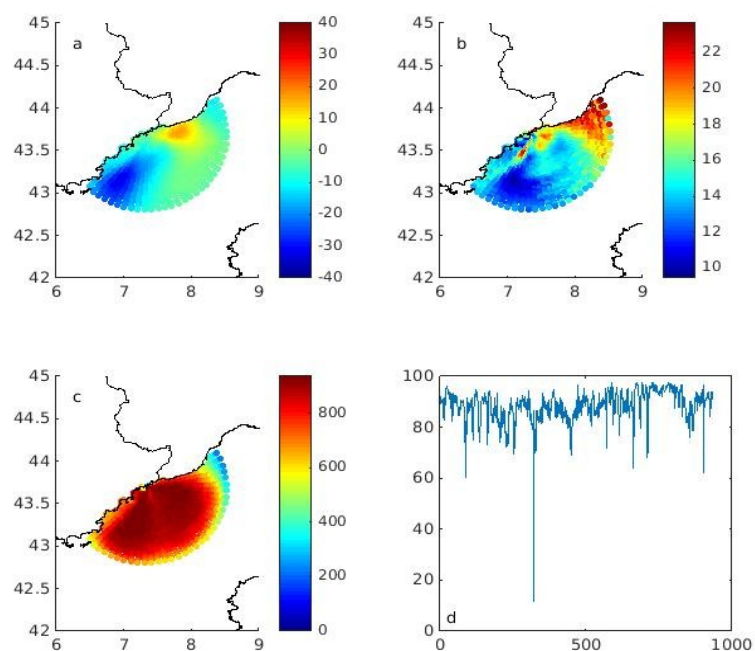


Figure 5 : Les vitesses radiales de -40cm/s à 40cm/s moyennées sur les 936 heures sont représentées en a, en b on peut voir l'écart type sur ces mesures en cm/s, en c la couverture des mesures allant de 0 à 936 et en d le pourcentage de mesures disponibles par rapport aux mesures possibles sur la zone CODAR ceci heure après heure. Ces graphiques ont été réalisés pour des données avec des radiales espacées de 5°.

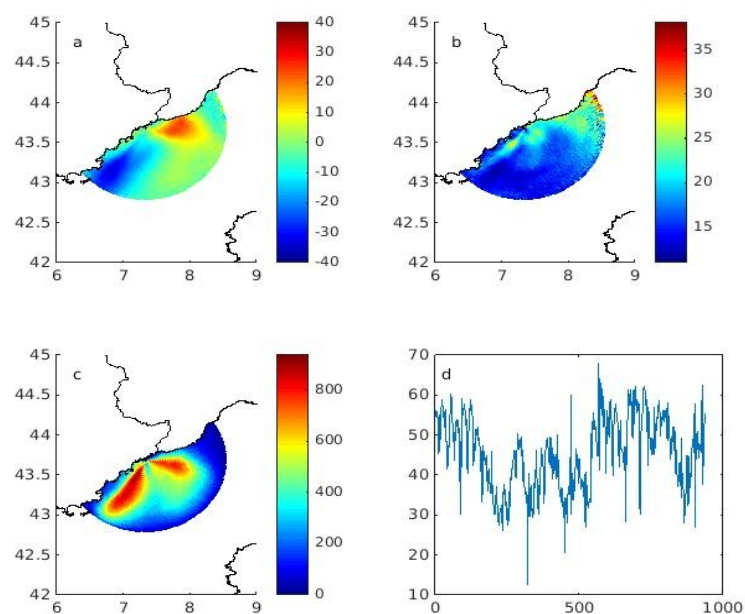


Figure 6 : Les vitesses radiales de -40cm/s à 40cm/s moyennées sur les 936 heures sont représentées en a, en b on peut voir l'écart type sur ces mesures en cm/s, en c la couverture des mesures allant de 0 à 936 et en d le pourcentage de mesures disponibles par rapport aux mesures possibles sur la zone CODAR ceci heure après heure. Ces graphiques ont été réalisés pour des données avec des radiales espacées de 1°.

Les graphiques 5 c et 6 c montrent, pour chaque cellule en coordonnées polaires, le nombre de mesures disponibles sur les 936 mesures possibles de la période du 29/10/2015 au 06/12/2015. Sur le graphique 5 c avec une résolution de 5° on s'aperçoit que la couverture en mesures disponibles est bonne du moment que l'on ne se situe pas sur les bords de l'éventail CODAR ou bien sûr au Nord Est, pour des raisons évidentes de portée maximale atteinte et aussi du manque de couverture CODAR au Nord Est. Il est à prendre en compte pour la portée maximale que chaque radiale (qu'elles soient espacées de 5° ou de 1°) possède 32 cellules et que ces cellules font précisément 3,0203 kilomètres de distance soit sur ces graphiques une portée maximale d'un peu plus de 96 kilomètres. Ceci explique pourquoi certaines mesures viennent à manquer sur les bords de l'éventail CODAR sachant qu'il est prévu pour une portée de 60 kilomètres. Ce qui se remarque encore plus sur le graphique 6 c lorsque la résolution est passée à 1° et que les points viennent à manquer passé une certaine distance et aussi au Nord Est car le CODAR dépasse sa portée effective et qu'il manque de couverture en mesures. D'ailleurs il est aussi à noter par rapport au graphique 6 c que le CODAR effectue plus de mesures sur la zone du dipôle qu'en dehors en raison de vitesses mesurables plus fortes dans le dipôle car pour des vitesses plus faibles (hors du dipôle) la limite de résolution de quelques cm/s peut empêcher la mesure. On notera pour cela des vitesses quasi nulles sur le graphique 6 a lorsque les mesures viennent à être moindre sur le graphique 6 c.

Les pourcentages de mesures disponibles sur les graphiques 5 d et 6 d dressent heure par heure le pourcentage de mesures acquises par rapport aux mesures possibles. Pour une résolution plus fine de 1° la couverture globale est d'environ 50 % tandis que la résolution à 5° offre une couverture en mesures disponibles d'environ 90 %. Ces graphiques montrent que la couverture en mesures peut varier d'une heure à l'autre du aux interférences et que cette couverture oscille fortement. Suivant les heures il se peut que la couverture soit bonne ou mauvaise sachant qu'il a été constaté que l'après-midi et en début de soirée il y a toujours moins de points disponibles que le soir ou le matin.

Ces graphiques ont donc présenté globalement les données CODAR du 29/10/2015 au 06/12/2015 et les performances du CODAR du cap Ferrat sont vues de façon générale. Pour mener une étude plus approfondie ces données vont être comparées aux données de la campagne océanographique OSCAHR qui est présentée dans la partie suivante.

2.2 Campagne océanographique OSCAHR

La campagne océanographique OSCAHR a eu lieu pendant le mois de novembre 2015 et les données CODAR ont été analysées du 29/10/2015 au 06/12/2015 pour couvrir entièrement la période d'étude. L'objectif scientifique de cette campagne est de caractériser la dynamique de la structure à submesoéchelle pour étudier son influence sur la distribution des éléments biogéniques et la place

qu'ils occupent dans le réseau trophique. La campagne OSCAHR porte donc à la fois sur la physique, la chimie et la biologie des cycles biogéochimiques phytoplanctoniques sur l'écosystème marin. Pour cela le navire océanographique Thétys 2 a été déployé au large de Toulon et de Nice (voir figure 7) pour effectuer de nombreuses mesures, notamment dans la zone correspondant à la couverture CODAR du cap Ferrat pour y effectuer des mesures ADCP et suivre des flotteurs dérivants. Le site radar de Toulon Antares aurait été plus intéressant car opérationnel mais la campagne OSCAHR a été faite sur le site Nice Dyfamed pour des raisons de ZONEX. Ceci a permis de tester les performances du CODAR du cap Ferrat et d'évaluer la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle par comparaison avec données ADCP et flotteurs recueillis par le Thétys 2. En plus des données du Thétys 2 (en autres des capteurs CTD et fluorescence) des modèles numériques ont été utilisés (notamment Mars3dEco3m pour des SST et Symphonie pour des SSS, SST et des mesures de vitesses et de vent) ainsi que des mesures satellites (notamment des données altimétriques AVISO et de brillance AVHRR). Les données SST peuvent servir, une fois les cartes de courant obtenues par MCRV, à être comparées pour analyser la forme du courant Nord et la présence des tourbillons côtiers.

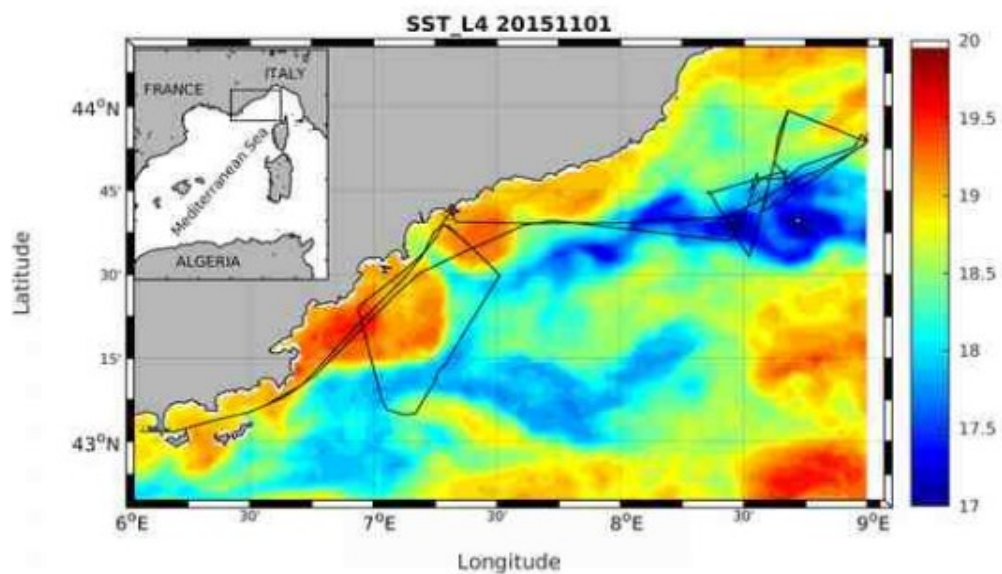


Figure 7 : Trajet de la campagne océanographique OSCAHR en noir et SST du premier Novembre 2015. Dans le coin en haut à gauche il est possible de voir la partie de la Méditerranée qui a été étudiée. L'emplacement du CODAR du cap Ferrat est marqué par le point noir au centre du graphique.

Les données issues des modèles numériques peuvent être analysées comparativement pour être validées. Les flotteurs (équipés de capteurs de température) suivent sur plusieurs jours des

trajectoires qui sont dans l'éventail CODAR. Les données ADCP pourront être comparées sur trois jours, les trois autres jours de mesures étant trop loin de la portée CODAR. La campagne OSCAHR a été très utile pour ses données *in situ*, satellites et de modèles numériques afin d'évaluer les performances du CODAR du cap Ferrat et de la MCRV qui n'avait pas été mise en situation comparativement à des données océanographiques.

2.3 Utilisation de la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle

2.3.1 Principe de la méthode

La méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle a fait l'objet d'une publication par Julien Marmain [11] qui décrit comment à partir d'une station radar unique il est quand même possible d'obtenir le champ des vecteurs courant reconstruit avec une équation aux dérivées partielles intégrée selon les angles des radiales à rayon constant.

Cette méthode emploie une technique d'intégration donnant la fonction de courant qui permet d'accéder au champ des vitesses du courant. La première étape pour reconstruire les vecteurs vitesses à partir des vitesses radiales est de calculer la fonction de courant Ψ . Pour cela il faut faire une hypothèse de non divergence sur le fluide. Celui-ci doit être incompressible ce qui se traduit par le fait que le champ de courant est non divergent en surface à savoir qu'il n'y a pas de mouvement sur la verticale dans la couche de surface. Cette hypothèse qui pourra être discutée s'écrit avec l'équation de continuité en coordonnées polaires :

$$\frac{\partial(r V_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = 0$$

Ce qui introduit la vitesse orthoradiale V_θ que nous n'avons pas à notre disposition. Il est possible d'écrire le champ de courant suivant la fonction de courant $\psi(r, \theta)$:

$$V_r = -\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right)_r$$

Soit pour r constant la différentielle de la fonction de courant est donnée par :

$$d\Psi = -r V_r d\theta$$

D'où une intégration possible sur chaque rayon constant avec θ variant.

$$\Psi(r, \theta) = -r \int_{\theta_2}^{\theta_1} V_{radiale} * d\theta$$

Cette intégration doit être faite avec des conditions aux bords constantes, ici $\Psi=0$ sur les frontières aux côtes. Les données à l'Ouest sont plus complètes que celles à l'Est donc l'intégration

est faite de la côte à l'Ouest du CODAR à la côte à l'Est du CODAR. Une fois incrémentée cette relation s'écrit sous la forme :

$$\Psi(r, \theta+1) - \Psi(r, \theta) = \text{distance}(r) * V_{radiale} * d\theta$$

Il est possible d'avoir des zones de divergence dans l'éventail CODAR étant donné que les up et downwelling y sont fréquent. Il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence des résultats lorsque ceux-ci présentent des divergences qui peuvent notamment se remarquer par un élargissement du dipôle caractérisant le courant Nord pour des portées élevées. Ainsi l'hypothèse de non divergence sur la couche de surface peut être remise en question mais peut aussi être acceptée du moment que les résultats sont pris dans une zone proche du CODAR, hypothèse qui va être mise en condition dans la partie suivante sur les applications de la MCRV. Il peut quand même y avoir une composante de vent inertielle et une composante de dérive d'Eckman qui modifient cette condition de non divergence du fluide

2.3.2 Applications de la méthode

La première application de la MCRV porte sur le premier Novembre car le courant Nord est visible sur une grande couverture CODAR. Les données sont moyennées sur un jour entier pour enlever la composante inertielle du courant d'une part et d'autre part pour ensuite être plus facilement comparées aux données de la campagne OSCAHR qui sont représentées par jours. Il est expliqué pourquoi les données sont lissées puis pourquoi la fonction de courant se voit retrancher l'erreur qui se trouve sur la dernière radiale due à la propagation des erreurs lors de l'intégration. Les données du premier novembre sont traitées pour une résolution de 5° pour expliquer ces deux modifications puis sur les données avec une résolution à 1° pour donner les premiers résultats de cette étude sur la courantologie du courant Nord le long de la côte des Alpes Maritimes. Les données du premier Décembre sont ensuite traitées pour préciser la raison de l'utilisation d'un masque limitant la portée qui doit être appliqué.

Pour représenter correctement les données utiles aux résultats finaux que sont les cartes de courant il est nécessaire d'étudier les vitesses radiales dans un premier temps puis le résultat de la MCRV donnant la fonction de courant mais aussi le courant, en déduction des vitesses cartésiennes découlant de la fonction de courant en elle-même. Les arcs de la fonction de courant sont représentés pour les rayons de 5, 10, 15, 20, 25, 30 cellules sur les 32 de la portée maximale pour analyser les résultats qui deviennent incohérent spatialement lorsqu'on s'éloigne trop du CODAR. Il est ainsi expliqué pourquoi un masque limitant la portée doit nécessairement être appliqué. Les données sont montrées brutes (voir figure 8) puis sont lissées (voir figure 9) puis le résultat est enfin

obtenu en redressant l'erreur de fin d'intégration sur la côte Est du CODAR (voir figure 10). L'intégration se faisant de la côte Ouest du CODAR à sa côte Est avec comme condition aux limites $\psi=0$ obligatoirement aux frontières. Julien Marmain avait proposé comme amélioration à cette MCRV de lisser les données pour obtenir de meilleurs résultats et il est proposé ici d'aussi redresser les erreurs obtenues en fin d'intégration sur la frontière quand elles restent « raisonnables ».

La MCRV connaît en plus de sa condition initiale de non divergence du champ des vecteurs deux limitations à son application : les vitesses radiales nulles ou proches de zéro sont difficilement représentables et lorsque le courant est perpendiculaire à la vision CODAR il est possible d'avoir des problèmes d'intégration dues à des vitesses radiales étant vues comme nulles par le CODAR (voir figure 5 a et 6 a). Ce fait se remarque par une zone de vitesses nulles entre le dipôle rouge et bleu caractérisant le courant ou celui-ci est moins bien représenté, notamment des arcs de cercles de vecteurs qui se forment sans représenter la réelle structure de ce courant. Il est à préciser que les données sont splinées, à savoir remplies par interpolation, en fin de chargement des données afin de combler le plus possible les trous dans les données lorsqu'on s'éloigne du CODAR (voir sur les figures 5 c et 6 c).

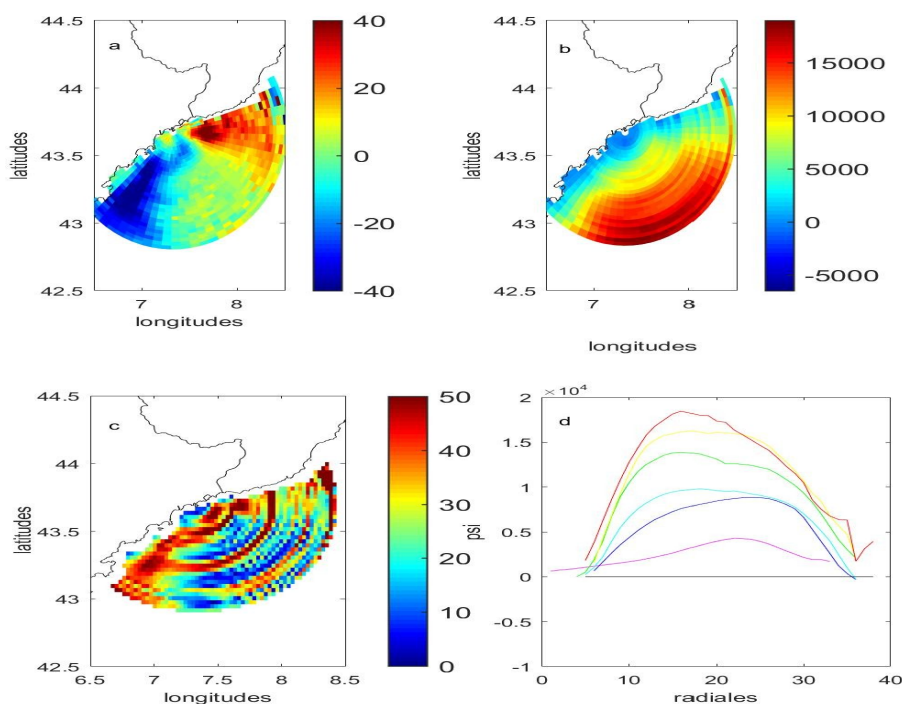


Figure 8 : en a vitesses radiales moyennée du 01/11/2015 pouvant aller de -40 à 40 cm/s. En b la fonction de courant de la MCRV. En c courant pouvant aller jusqu'à 50cm/s obtenu à partir des vitesses cartésiennes. En d les valeurs de la fonction de courant suivant les radiales des rayons 5 à 30 par pas de 5 (rose 5, bleu foncé 10, bleu clair 15, vert 20, jaune 25, rouge 30). Ces graphiques sont obtenus avec les données brutes et une résolution de 5°.

Le jour du 01/11/2015 a été choisi en premier lieu car l'intégration n'a pas du mal à se faire, à savoir que la fonction de courant rejoint les frontières plutôt naturellement vers la condition $\psi=0$ (voir figure 8 b et d). De plus même sans lisser les données et redresser l'erreur à la frontière Est appliqués comme correction le courant se forme aux abords du CODAR (voir figure 8 c) malgré un arc parasite plus loin dû à des vitesses radiales perpendiculaires au courant. Pour mieux apprécier la nature des corrections apportées avec le lissage dans un premier temps puis après avoir redresser la fonction de courant il faut se référer aux figure 9 et 10 qui montrent qu'avec le lissage le courant est moins parasité et qu'après avoir redresser la fonction de courant celui-ci est bien mieux visible, l'arc de cercle parasite ayant disparu. Ces deux corrections semblent naturelles à appliquer aux données pour obtenir des cartes de courant cohérentes sans problèmes loin du CODAR (voir figure 8 c) car les données y faisant défaut et peut être un problème de divergence en contradiction avec l'hypothèse forte de non divergence du champ de vecteurs de cette méthode font que le courant a du mal à se former ou devient incohérent spatialement.

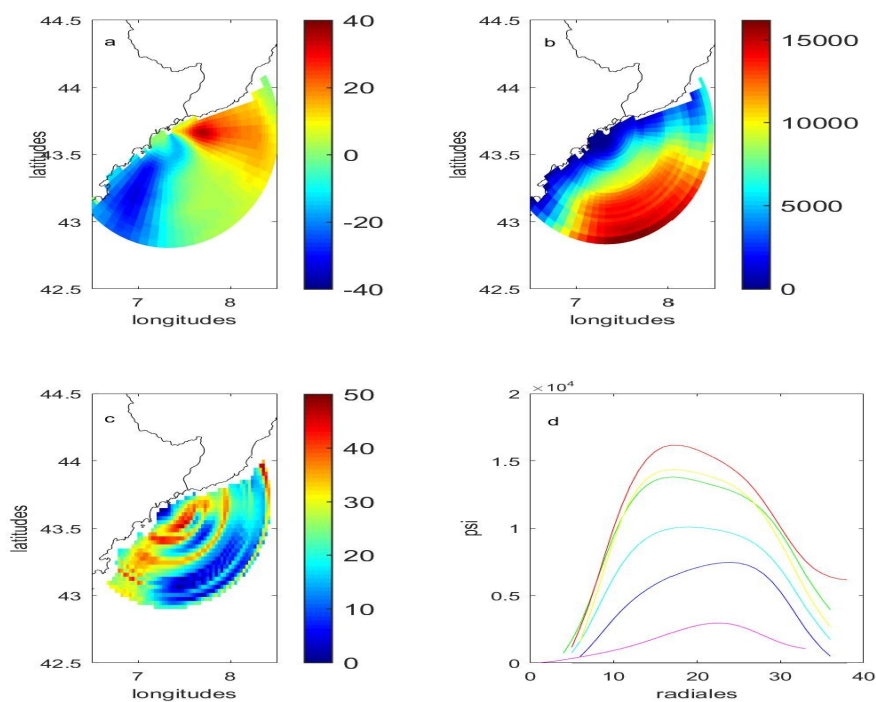


Figure 9 : en a vitesses radiales du 01/11/2015 pouvant aller de -40 à 40 cm/s. En b la fonction de courant de la MCRV. En c courant obtenu à partir des vitesses cartésiennes après avoir appliqué la MCRV. En d les valeurs de la fonction de courant suivant les radiales des rayons 5 à 30 par pas de 5 (rose 5, bleu foncé 10, bleu clair 15, vert 20, jaune 25, rouge 30). Ces graphiques sont obtenus une fois les données lissées avec une résolution de 5°.

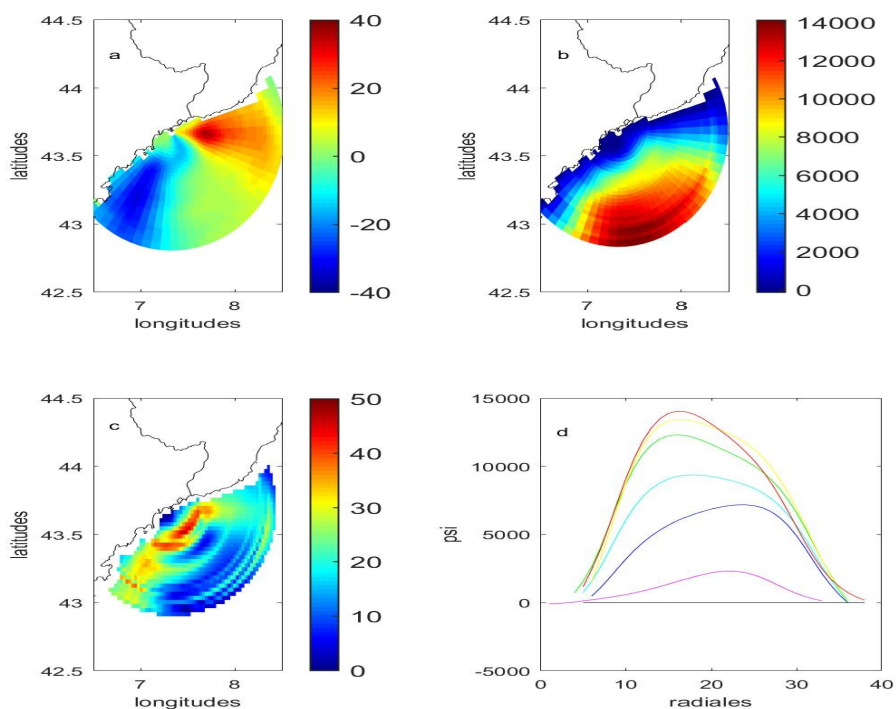


Figure 10 : en a vitesses radiales du 01/11/2015 pouvant aller de -40 à 40 cm/s. En b la fonction de courant de la MCRV. En c courant obtenu à partir des vitesses cartésiennes après avoir appliqué la MCRV. En d les valeurs de la fonction de courant suivants les radiales des rayons 5 à 30 par pas de 5 (rose 5, bleu foncé 10, bleu clair 15, vert 20, jaune 25, rouge 30). Ces graphiques sont obtenus avec une fois les données lissées puis ensuite après avoir redressé l'erreur d'intégration ceci avec une résolution de 5°.

Comme il a été dit le premier Novembre a été choisi car après avoir lissé les données et redressé la fonction de courant celui-ci apparaît nettement (voir figure 10 c). Le courant n'a pas de mal à se former car la fonction de courant réalise quasi parfaitement la condition $\psi=0$ aux frontières (voir 10 b et d). Il est possible de voir qu'avant d'avoir redressé la fonction de courant celle-ci avait beaucoup de mal à réaliser la condition aux frontières (voir figure 9 d). Après avoir lissé les données les courbes de la fonction de courant sont plus arrondies (voir figure 9 d) et après avoir redressé la fonction de courant les courbes de cette fonction de courant redescendent bien à zéro (voir figure 10 d), condition nécessaire au bon cheminement de la MCRV.

Pour obtenir un résultat encore meilleur la résolution est passée de 5° à 1°, apportant une précision plus nette (voir figure 11). Le courant apparaît beaucoup mieux car le dipôle caractérisant le courant des données de vitesses radiales est nettement plus présent (voir figure 11 a). Comme il a été vu dans la partie sur le traitement des données l'inconvénient de la résolution à 1° est la perte d'une certaine quantité d'information, essentiellement loin du CODAR donc potentiellement peu

utile, mais par contre le dipôle caractérisant le courant est plus marqué (voir figure 6 a).

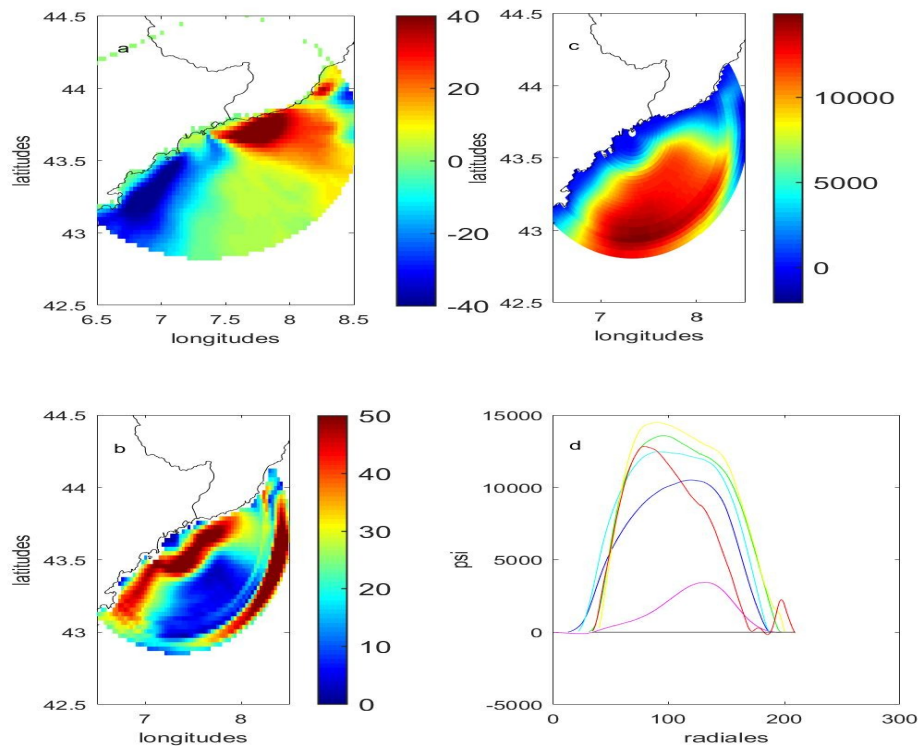


Figure 11 : en a vitesses radiales du 01/11/2015 pouvant aller de -40 à 40 cm/s. En b la fonction de courant de la MCRV. En c courant obtenu à partir des vitesses cartésiennes après avoir appliqué la MCRV. En d les valeurs de la fonction de courant suivants les radiales des rayons 5 à 30 par pas de 5 (rose 5, bleu foncé 10, bleu clair 15, vert 20, jaune 25, rouge 30). Ces graphiques sont obtenus avec une fois les données lissées puis ensuite après avoir redressé l'erreur d'intégration ceci avec une résolution de 1°.

Une fois les données lissées puis la fonction de courant redressée une meilleure résolution offre l'avantage indéniable de montrer un courant net correspondant aux valeurs données dans les références à savoir, en hiver, une vitesse pouvant aller de 0,5 à 1 m/s et une largeur de 25 kilomètres (voir figure 11 c). Bien sur le manque de données loin du CODAR, avec des données souvent bruitées de surcroît (voir figure 6 b et c) font que loin du CODAR le courant apparait comme spatialement incohérent (voir 11 c). A partir de là l'utilisation d'un masque semble nécessaire pour couvrir cette incohérence et ne représenter alors que la partie vraisemblable du courant (voir figure 12 et 13). La portée attendue du CODAR est de 60 kilomètres soit une vingtaine de cellules sur les 32 de la portée vraiment maximale couverture CODAR. Les mesures trop éloignées ou au Nord-Ouest entrainant la formation d'un courant totalement incohérent loin du CODAR. Il est à noter aussi que même en ayant lissé les données puis redressé l'erreur obtenue après intégration à la

frontière Est les courbes de la fonction de courant suivant les radiales ont du mal à redescendre sans à coup à zéro même si cette condition est quand même réalisée (voir figure 11 d pour le rayon 30 en rouge). Donc pour les rayons élevés de 25 ou 30 cellules il est difficile d'obtenir une fonction de courant qui voit sa condition aux limites réalisée sans petits sauts qui impliquent un courant non spatialement cohérent.

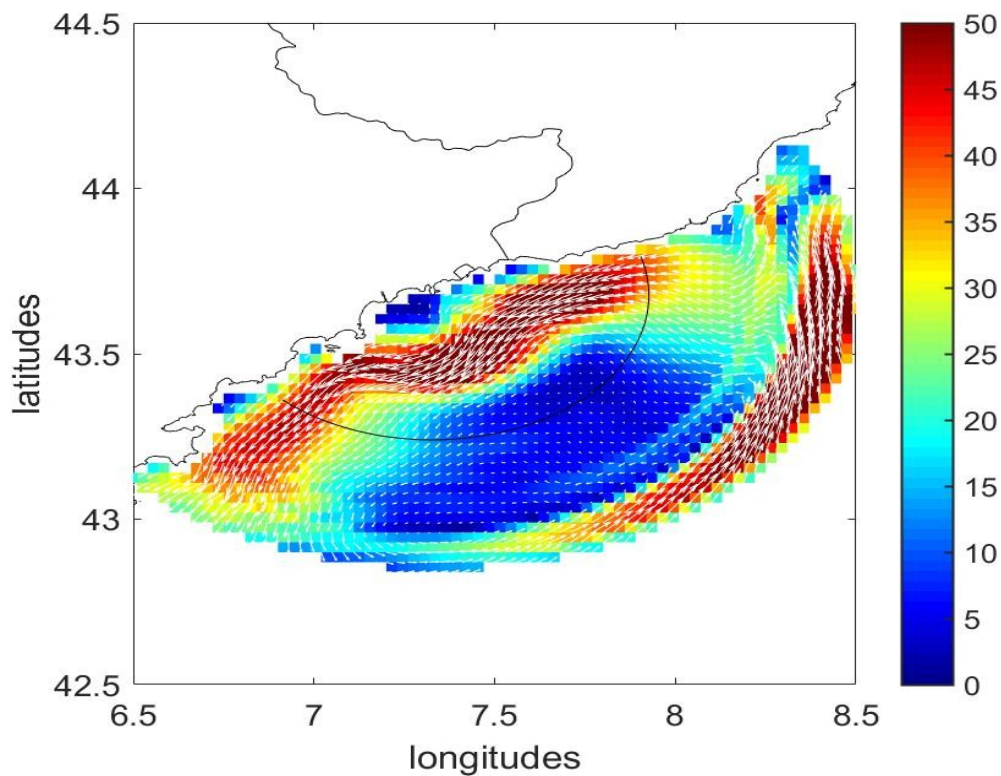


Figure 12 : représentation du courant avec une vitesse caractéristique de l'ordre de 0,5 m/s avec aussi les vecteurs courant représentés en blanc. Le trait noir indique la portée qui semble ajuster au mieux le courant ici de 16 cellules sur les 32 maximum soit environ 50 kilomètres. C'est le jour du premier Novembre qui est représenté.

Pour que le courant soit justement représenté il est nécessaire que la veine de courant voie la même intensité en entrée (au Nord-Est) qu'en sortie (au Sud-Ouest) d'où la réduction de la portée de moitié sur la figure 12. En effet le premier Novembre offre un courant spatialement cohérent jusqu'à une certaine limite à l'Ouest mais à l'Est ce courant manque d'intensité pour être pris en compte sur plus de cellules. La portée maximale de 32 cellules a donc été réduite de moitié mais le courant Nord apparaît comme vraiment cohérent avec cette restriction (voir figure 13).

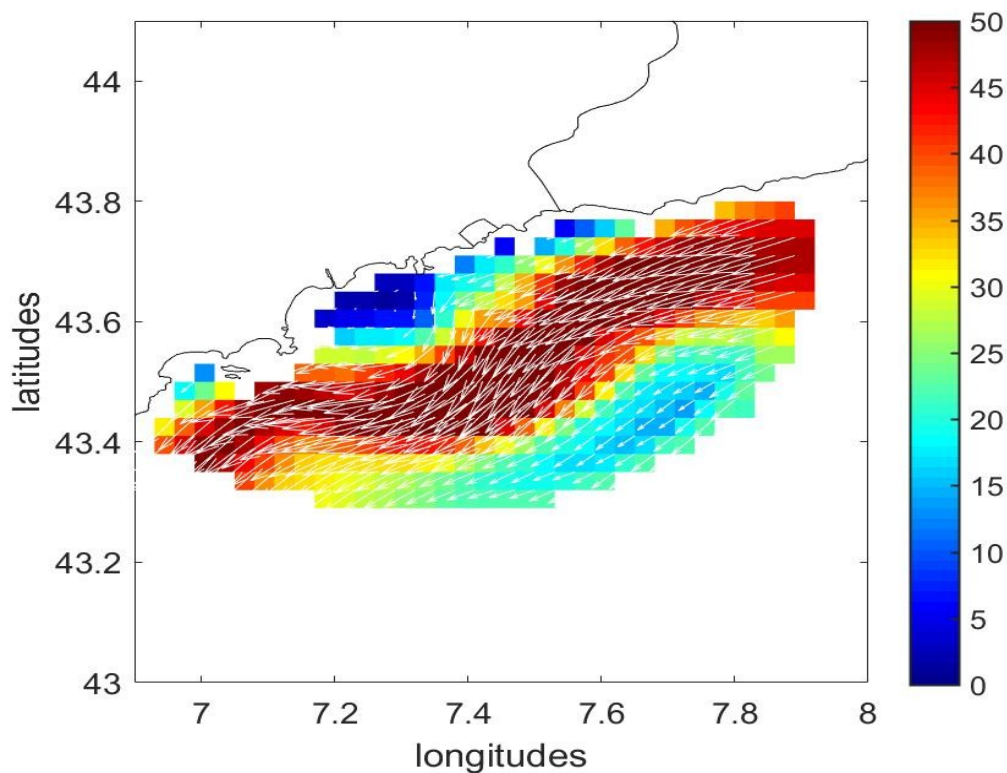


Figure 13 : Le courant est représenté pouvant aller jusqu'à 50 cm/s et les vecteurs courant sont visible en blanc. De plus un masque restreignant l'éventail CODAR à 16 cellules soit 48 kilomètres est appliqué. C'est le jour du premier Novembre qui est représenté.

Le courant Nord semble être plutôt réaliste pour sa morphologie, pour le premier Novembre, et les valeurs de vitesses comprises entre 0,5 et 1m/s semblent être respectées de plus sa largeur fait bien les 25 kilomètres qui sont cités dans les écrits donc la MCRV paraît être une très bonne méthode lorsqu'il s'agit de représenter le courant à partir de cartes de vitesses radiales. Après que les données soient lissées et après que la fonction de courant soit redressée le courant ondule de façon cohérente devant le CODAR le long des côtes des Alpes Maritimes. Cependant de grosses restrictions ont dues être faites sur la portée du CODAR du cap Ferrat essentiellement parce que le CODAR manque de données au loin et dans la zone la plus au Nord Est, ce qui est fort contraignant par rapport à sa portée espérée de 60 kilomètres, mais on atteint quand même une couverture de 48 kilomètres. Ceci dit ne dépassant pas les 60 kilomètres les résultats de la MCRV semblent bons. Un autre jour a été pris en compte pour exposer les résultats de cette méthode, c'est le jour précédent le premier Novembre à savoir le 31 Octobre (voir figures 15 et 16) qui présente globalement les mêmes similitudes mais qui peut être comparé à une carte de SST par la suite, la carte SST du premier Novembre n'étant pas disponible. Une fois les données lissées puis après avoir appliqué la correction de l'erreur d'intégration la MCRV donne pour le 31 Octobre des résultats plutôt similaires à ceux du premier Novembre (voir figure 14).

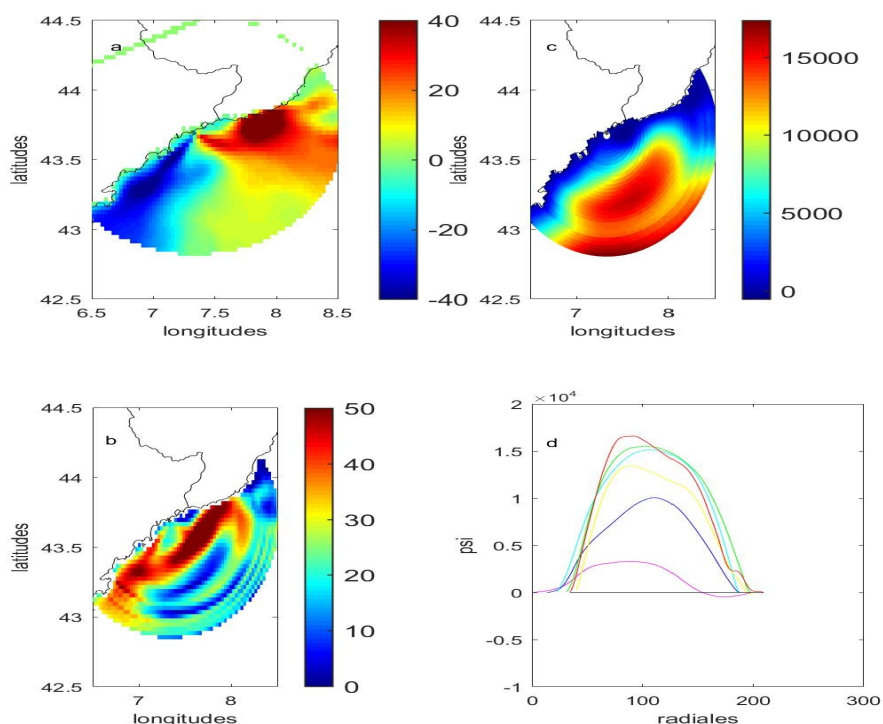


Figure 14 : en a vitesses radiales du 31/10/2015 pouvant aller de -40 à 40 cm/s. En b la fonction de courant de la MCRV. En c courant obtenu à partir des vitesses cartésiennes après avoir appliqué la MCRV. En d les valeurs de la fonction de courant suivants les radiales des rayons 5 à 30 par pas de 5 (rose 5, bleu foncé 10, bleu clair 15, vert 20, jaune 25, rouge 30). Ces graphiques sont obtenus avec une fois les données lissées puis ensuite après avoir redressé l'erreur d'intégration ceci avec une résolution de 1° .

Le courant doit obligatoirement être masqué pour une certaine portée, pour le 31 Octobre 18 cellules soit presque 60 kilomètres (54 kilomètres), pour être correctement représenté (voir figure 16). Pour des portées plus grandes le courant est trop incohérent spatialement pour être pris en compte. De plus le manque de couverture CODAR au Nord-Est réduit la portée qui pourrait être meilleure en vue de la morphologie du courant au Sud-Ouest (voir figure 15). Cette journée va être comparée aux données SST dans la partie suivante.

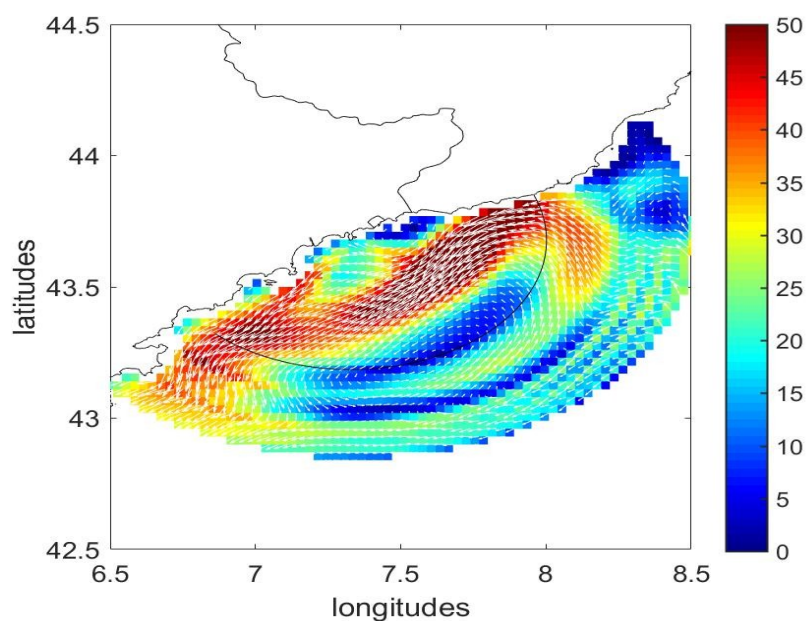


Figure 15 : représentation du courant, avec la MCRV, pouvant aller jusqu'à 50 cm/s pour le 31/10/2015. Les vecteurs courant sont en blanc. Le trait noir représente une portée de 18 cellules.

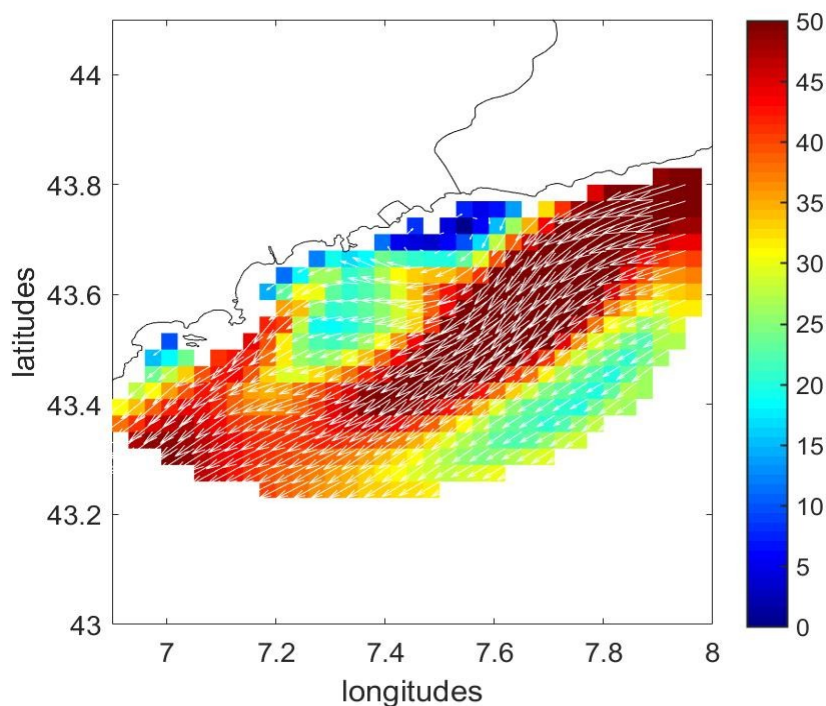


Figure 16 : Le courant est représenté pour des vitesses allant jusqu'à 50cm/s pour le 31/10/2015. Les vecteurs blancs représentent les vecteurs courant. Un masque a été appliqué ne conservant que les 18 cellules les plus proches du CODAR.

3. Résultats

Les résultats de la MCRV vont maintenant être comparés aux données océanographiques de la campagne OSCAHR. 4 cartes de courant avec SST sont choisies parmi celles les plus représentatives sur les 9 disponibles. 3 jours de données ADCP sont représentés car les trois autres sont trop à l'Est du CODAR pour être correctement analysés, dû au fait que la couverture CODAR est mauvaise au Nord Est. 3 jours de trajectoires de flotteurs sont aussi comparés, les autres jours ayant des trajectoires trop près des côtes pour effectuer une comparaison significative.

3.1 Comparaison avec les données de Sea Surface Temperature

Les cartes SST ont été procurées durant la campagne OSCAHR pour appuyer les nombreuses données océanographiques de cette campagne. Le courant doit suivre de façon parallèle les isothermes vues par les SST [12], les tourbillons se formant dans les accumulations d'eaux côtières plus chaudes. Cette analyse intuitive de la façon dont le courant doit circuler le long des côtes permet à travers 4 SST sur lesquelles sont superposées des champs de vecteurs courant de commenter la morphologie du courant Nord. La première SST voit le courant qui circule le long des côtes et qui est poussé de la côte par un petit tourbillon (voir figure 17). La SST de ce jour, qui est celui du 31 Octobre, voit même une corrélation intéressante avec les vecteurs courants qui scinde le courant au niveau d'une petite partie de signature thermique à 18,6°C au Sud du CODAR ce qui indiquerait que les données CODAR une fois traitées avec la MCRV peuvent permettre de représenter des petites structures tourbillonnaires ou particulières du courant avec une assez bonne précision. Un masque limitant la portée a moins de 60 kilomètres soit 20 cellules est ajusté pour ne garder que la partie la plus cohérente de la représentation des vecteurs courant.

Le jour étudié suivant est le 29 Novembre, la SST présente une forte accumulation d'eau chaude ou effectivement un tourbillon est présent ce qui indique encore la cohérence du courant Nord, ondulant le long de la côte, obtenu par MCRV en comparaison des signatures thermiques de la mer (voir figure 18). Le front thermique et la circulation du courant semblent être en adéquation.

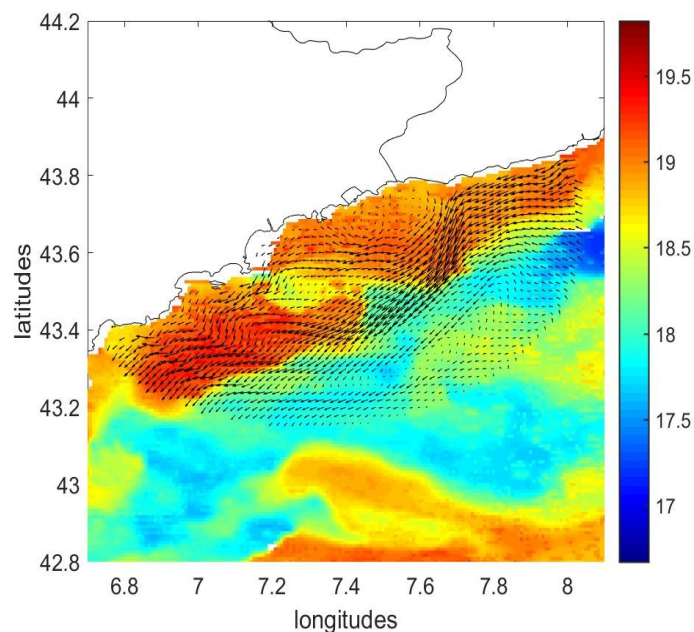


Figure 17 : SST du 31 Octobre superposée au champ des vecteurs courant obtenus par MCRV. Un masque limitant la portée à 60 kilomètres a été appliqué. La SST va de 16,75°C à 19,75°C.

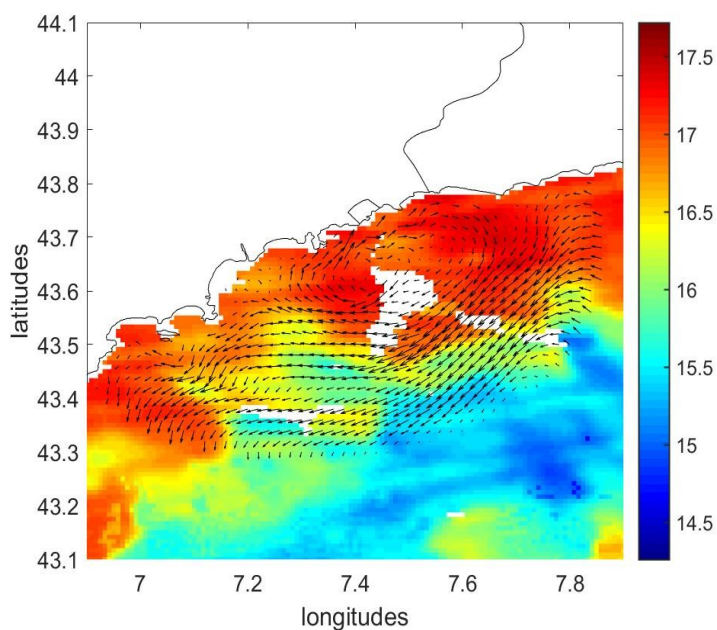


Figure 18 : SST du 29 Novembre et champ des vecteurs courant du même jour. Le masque appliqué est de 15 cellules (45 kilomètres). La SST va de 14,25°C à 17,75°C.

Le 30 Octobre voit une SST et un front thermique guidant le courant Nord qui semblent très bien corrélés à la vue de la forme que prend le courant qui fait un virage très marqué au Sud pour éviter un tourbillon qui s'est créé dans une accumulation d'eaux chaudes (voir figure 19).

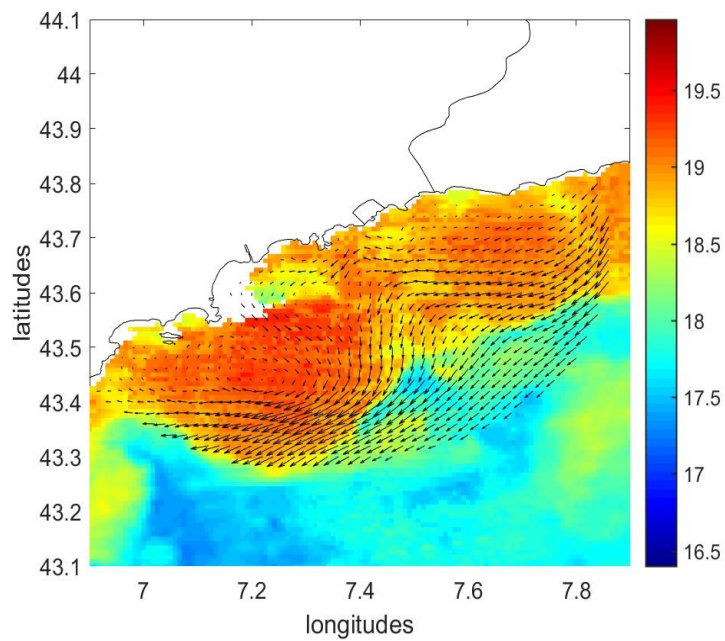


Figure 19 : SST du 30 Octobre superposée au champ des vecteurs courant. Le masque appliqué limite la portée à 15 cellules (45 kilomètres). La SST va de 16,5°C à 20°C.

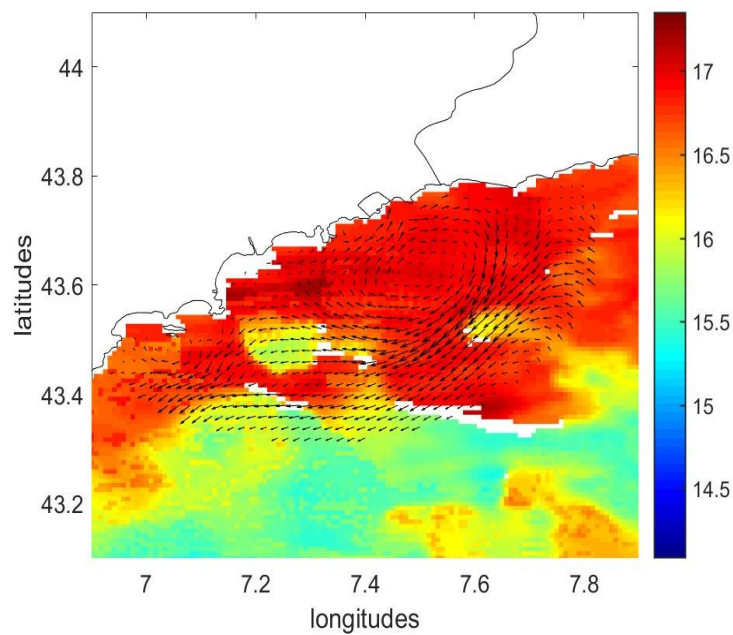


Figure 20 : SST du premier Décembre avec le champ des vecteurs courants. La SST va de 14 à 17,5°C. Le masque appliqué limite la portée à 15 cellules (45 kilomètres).

Le premier Décembre la présence d'une forte concentration d'eaux chaudes, près des côtes, est accompagnée d'un tourbillon qui s'y loge au centre et qui dévie le courant (voir figure 20).

Il a donc été montré que la MCRV apporte des résultats convaincants en comparaison aux SST qui décrivent bien le courant et les tourbillons côtiers. Comme il a été dit lors de l'introduction cette

partie de la méditerranée est le siège d'un courant Nord qui devient instable en hiver lorsque sa veine de courant se rétrécit et donc accélère entraînant des tourbillons qui se forment alors. La MCRV malgré sa portée restreinte qui est due en première approximation aux manques de données loin du CODAR et aux interférences mais qui peut aussi être dues à des problèmes de divergence du champ des vecteurs loin du CODAR donne des résultats satisfaisants pour les similitudes rencontrées avec les SST lors de cette analyse.

3.2 Comparaison avec les données de l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Les trois jours intéressants pour les mesures de l'ADCP de coque du Thétys 2 sont les 30 et 31 Octobre et le 6 Novembre car ils sont dans la partie Ouest ou au centre de la couverture CODAR. Les trois autres jours de mesures ADCP à savoir le 3, 4 et 5 Novembre se sont déroulés trop à l'Est de la couverture CODAR pour obtenir d'assez bons résultats car cette partie de la zone CODAR manque de mesures. Ceci étant pour les trois jours à l'Ouest de la couverture CODAR les champs de vecteurs courant sont interpolés sur les radiales ADCP pour effectuer une comparaison valable et des comparaisons entre les vitesses ADCP et les vitesses reconstruites à partir de la MCRV sont dressées afin d'établir une analyse du courant Nord présent le long des côtes des Alpes Maritimes notamment pour une grosse veine de courant qui est vue le 31 Octobre par le CODAR du cap Ferrat et aussi par l'ADCP du Thétys 2 (voir figure 21).

La grosse veine de courant présente dans la partie bleue du dipôle est aussi présente sur les données ADCP et les données CODAR ce qui traduit la présence d'un fort courant Nord. Les parties plus complexes plus au Nord sont moins exploitables car la radiale ADCP passe proche des côtes ce qui limite la précision sur les mesures CODAR étant donné qu'un masque doit s'appliquer le long de ces côtes qui sont souvent lieues de vitesses radiales faibles difficilement visibles par le CODAR. Les vitesses interpolées du champ des vecteurs courant et ADCP sont comparées mais ne donnent donc pas de résultats très convaincants (voir figure 22).

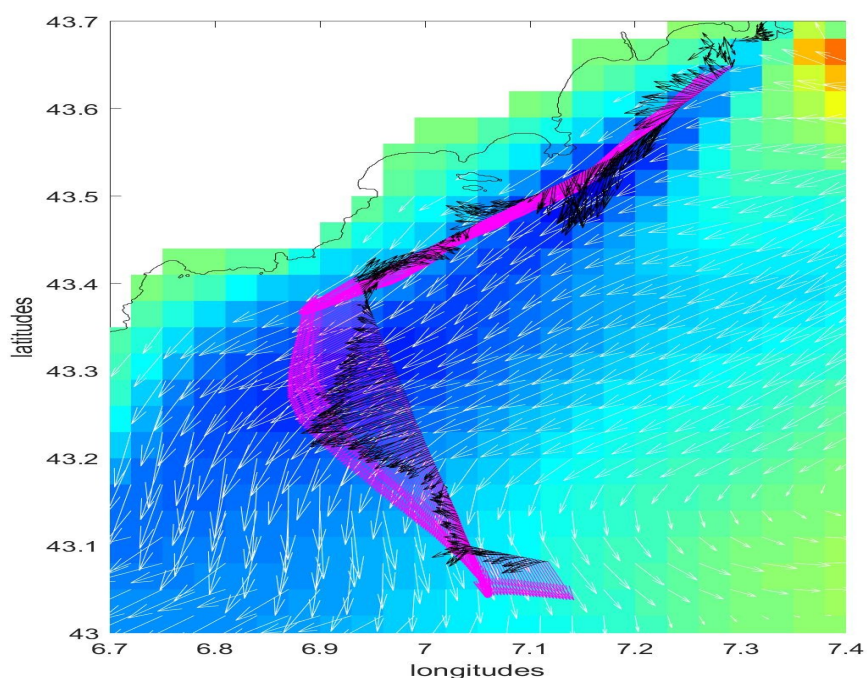


Figure 21 : en noir les vitesses ADCP et en violet les vitesses interpolées des vecteurs courant reconstruits par la MCRV. Les vecteurs blancs représentent les vecteurs courant non interpolés. Le fond correspond au dipôle des vitesses radiales caractéristique du courant. Ces vitesses sont valables pour les données du 31 Octobre

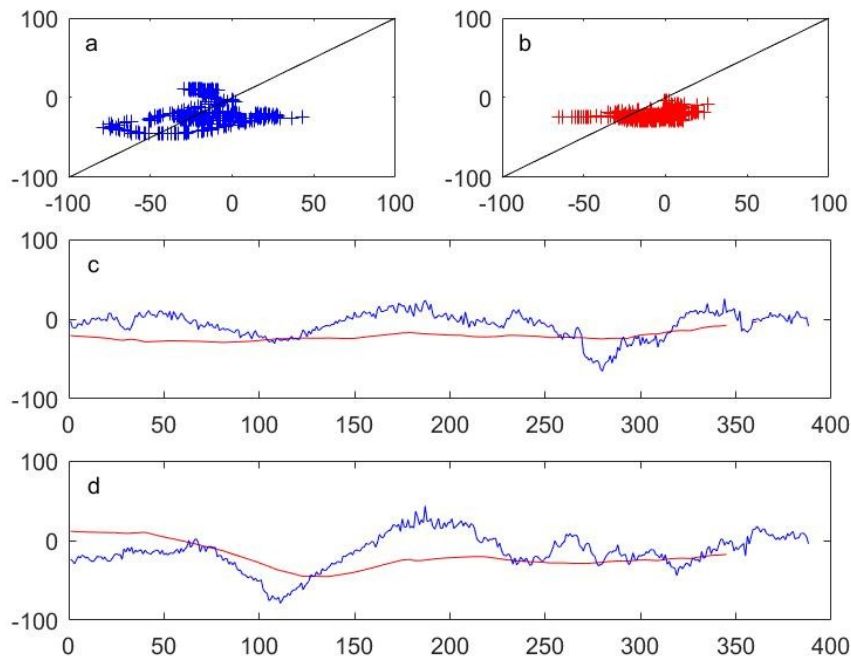


Figure 22 : en a la comparaison entre les vitesses zonales de l'ADCP et de la MCRV (en bleu) et en b la comparaison entre les vitesses méridionales (en rouge) entre ADCP et MCRV. En c les vitesses méridionales sont représentées avec en bleu celles de l'ADCP et en rouge celles de la MCRV. En d les vitesses zonales sont représentées avec en bleu celles de l'ADCP et en rouge celles de la MCRV. Ces données sont celles du 31 Octobre.

Comme il a été précisé les mesures ADCP se faisant près de la côte pour le début du trajet les vitesses interpolées peuvent sembler inadéquates en comparaison, celle-ci pouvant déjà s'avérer plus juste lorsque les vitesses sont comparées sur la radiale perpendiculaire au courant Nord donc entre les points 290 à 360 (voir figure 22 c et d). Les deux jours suivant fournissent de meilleurs résultats.

Le 30 octobre donne des résultats plus en adéquation entre vitesses ADCP et vitesses interpolées du CODAR sachant qu'un tourbillon côtier est visible sur les données ADCP et également sur les données CODAR (voir figure 23). Les vitesses sont aussi beaucoup plus comparables entre elles (voir figure 24).

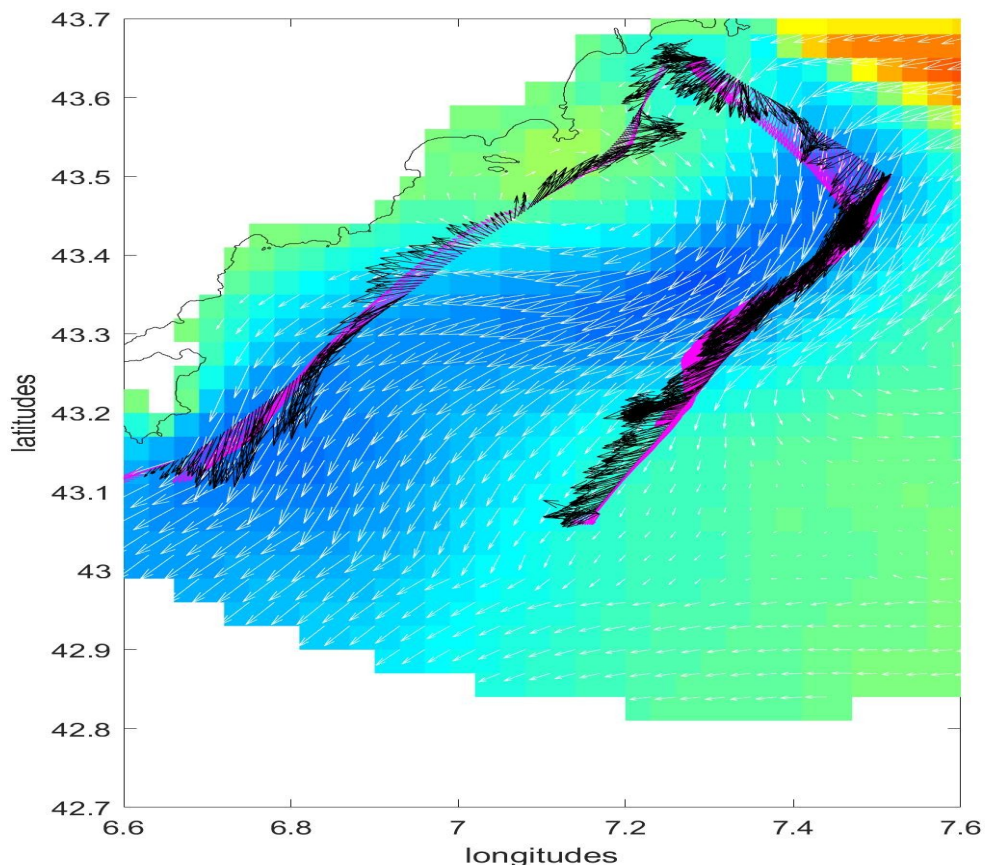


Figure 23 : en noir les vitesses ADCP et en violet les vitesses interpolées des vecteurs courant reconstruits par la MCRV. En blanc les vecteurs courant et en fond le dipôle caractéristique du courant. Les données sont datées du 30 Octobre.

Pour le 30 Octobre les vitesses ADCP et CODAR sont plus comparables que pour le 31

Octobre. La comparaison des vitesses méridionales entre vitesses ADCP et vitesses interpolées du CODAR est quasiment identique (voir figure 24 b et c). Il est à préciser pour expliquer l'origine des écarts de vitesses que l'ADCP de coque du Thétys 2 mesure des vitesses dans des couches d'eaux plus profondes, à 16 mètres, que le CODAR qui mesure des vitesses sur une couche de moins d'un mètre de la surface de l'eau. Il est donc probable que lorsqu'il y a de fort entrainement du courant des différences de vitesses puissent se faire entre les eaux de surfaces et des eaux à 16 mètres.

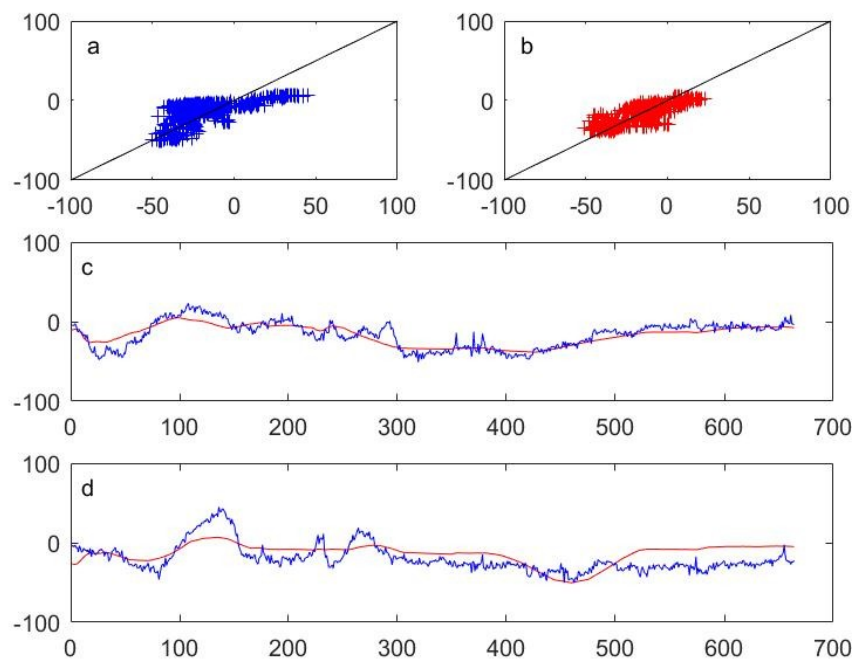


Figure 24 : en a la comparaison entre les vitesses zonales de l'ADCP et de la MCRV (en bleu) et en b la comparaison entre les vitesses méridionales (en rouge) entre ADCP et MCRV. En c les vitesses méridionales sont représentées avec en bleu celles de l'ADCP et en rouge celles de la MCRV. En d les vitesses zonales sont représentées avec en bleu celles de l'ADCP et en rouge celles de la MCRV. Ces données sont celles du 30 Octobre.

Le troisième jour à savoir le 6 Décembre apporte de très bons résultats sur la comparaison entre vitesses reconstruites de surfaces et vitesses plus profondes ADCP (voir figure 25). Les composantes méridionales et zonales de ces vitesses semblent être comparables (voir figure 26).

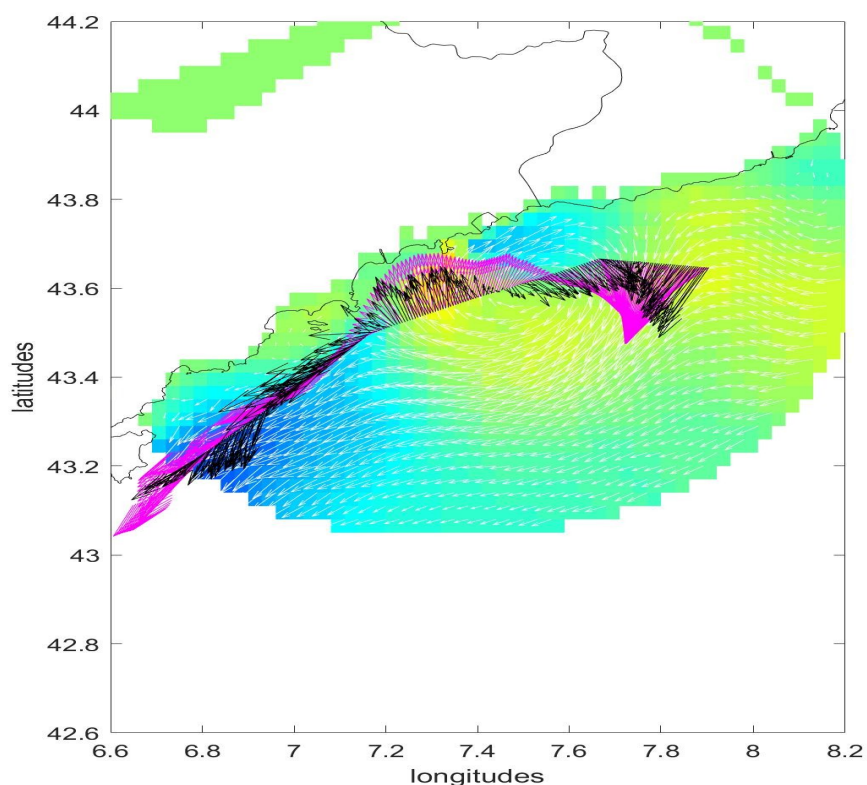


Figure 25 : en noir les vecteurs vitesses ADCP et en violet les vecteurs vitesses de la MCRV interpolés sur ces points de mesures. En blanc les vecteurs courant et en fond le dipôle caractéristique du courant. Les données sont datées du 6 Novembre.

La comparaison entre vitesses ADCP et champ des vecteurs reconstruits interpolés donne donc des résultats convaincants et les tourbillons du 30 Octobre et du 6 Novembre sont visualisables et les composantes méridionales et zonales des vitesses ADCP et du champ des vecteurs interpolés semblent être comparables. Il est à préciser que les mesures ADCP sont instantanées tandis que les résultats de la MCRV sont calculés avec des données moyennées sur un jour entier ce qui peut induire des erreurs. Ce tableau présente les différents coefficients de corrélation, en vitesse zonale et méridionale. Les résultats sont bons pour le 30 Octobre et le 6 Novembre mais mauvais pour le 31 Octobre

Tableau 1. Valeurs calculées des coefficient de corrélation entre les vitesses CODAR (surface) et l'ADCP (1^{er} bin à 16 m)

jours	30/10/2015	31/10/2015	06/10/2015
Coefficient de corrélation en vitesse zonale	0,5722	0,1886	0,7458
Coefficient de corrélation en vitesse méridionales	0,8579	0,3013	0,8251

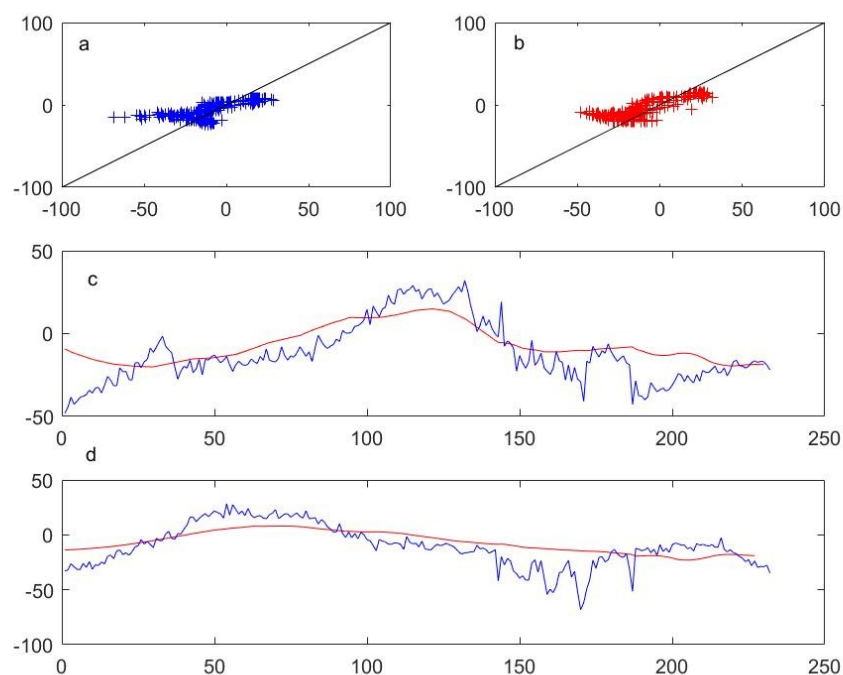


Figure 26 : en a la comparaison entre les vitesses zonales de l'ADCP et de la MCRV (en bleu) et en b la comparaison entre les vitesses méridionales (en rouge) entre ADCP et MCRV. En c les vitesses méridionales sont représentées avec en bleu celles de l'ADCP et en rouge celles de la MCRV. En d les vitesses zonales sont représentées avec en bleu celles de l'ADCP et en rouge celles de la MCRV. Ces données sont celles du 6 Novembre.

3.3 Comparaison avec les données des flotteurs

Seuls les premiers jours de trajectoires de flotteurs, à savoir du 6 au 10 Novembre, sont intéressants pour l'étude menée car les autres jours ces trajectoires vont se loger dans les recoins des côtes ce qui limite l'étude sachant que ces creux sont souvent lieux de vitesses radiales quasi nulles ne pouvant pas donner de résultats significatifs avec la MCRV. L'étude commence avec le flotteur 1 qui est lâché le 6 Novembre au Sud du CODAR du cap Ferrat. Sa trajectoire est directement guidée par le courant mais ses vitesses zonales et méridionales rencontrent quand même quelques imprécisions avec les vitesses zonales et méridionales interpolées du champ des vecteurs reconstruit avec la MCRV (voir figure 26). On s'aperçoit que la vitesse zonale suit la même tendance mais que la vitesse méridionale décroche entre les points 50 à 90. Ceci étant la trajectoire du flotteur semble être portée par le champ des vecteurs reconstruit par MCRV.

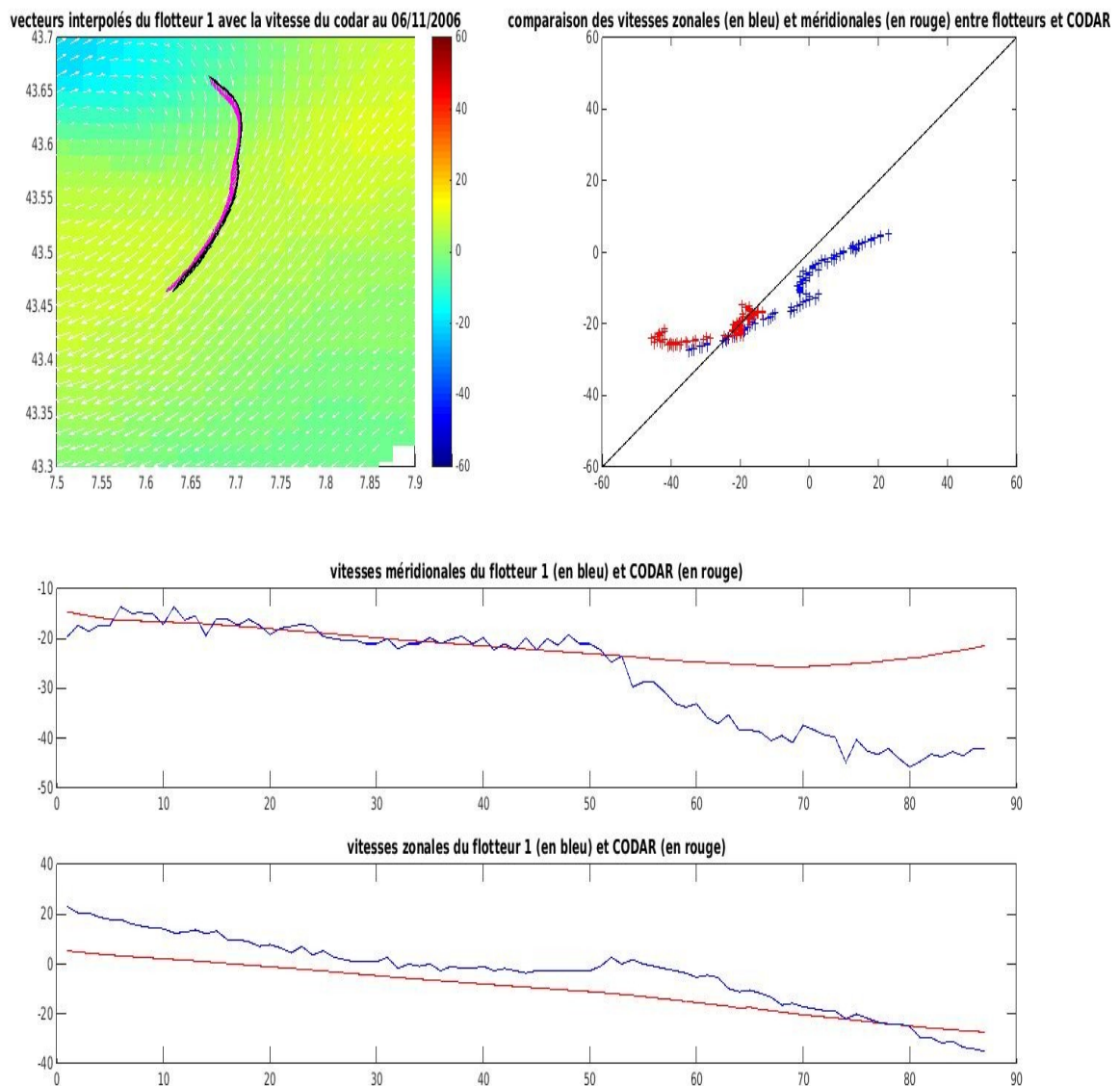


Figure 26 : trajectoire du flotteur 1 le 6 Novembre (en noir) avec les vecteurs MCRV interpolés (en violet) et champ du courant reconstruit (en blanc) en haut. Avec la comparaison des vitesses zonales et méridionales entre CODAR et flotteurs à droite. En bas comparaison des vitesses zonales et méridionales entre MCRV et flotteur.

Le flotteur 1 suit le courant le 7 Novembre avec cette fois ci une vitesse méridionale parfaitement comparable à la vitesse méridionale interpolée seulement la vitesse zonale décroche entre les points 1 et 30 (voir figure 27).

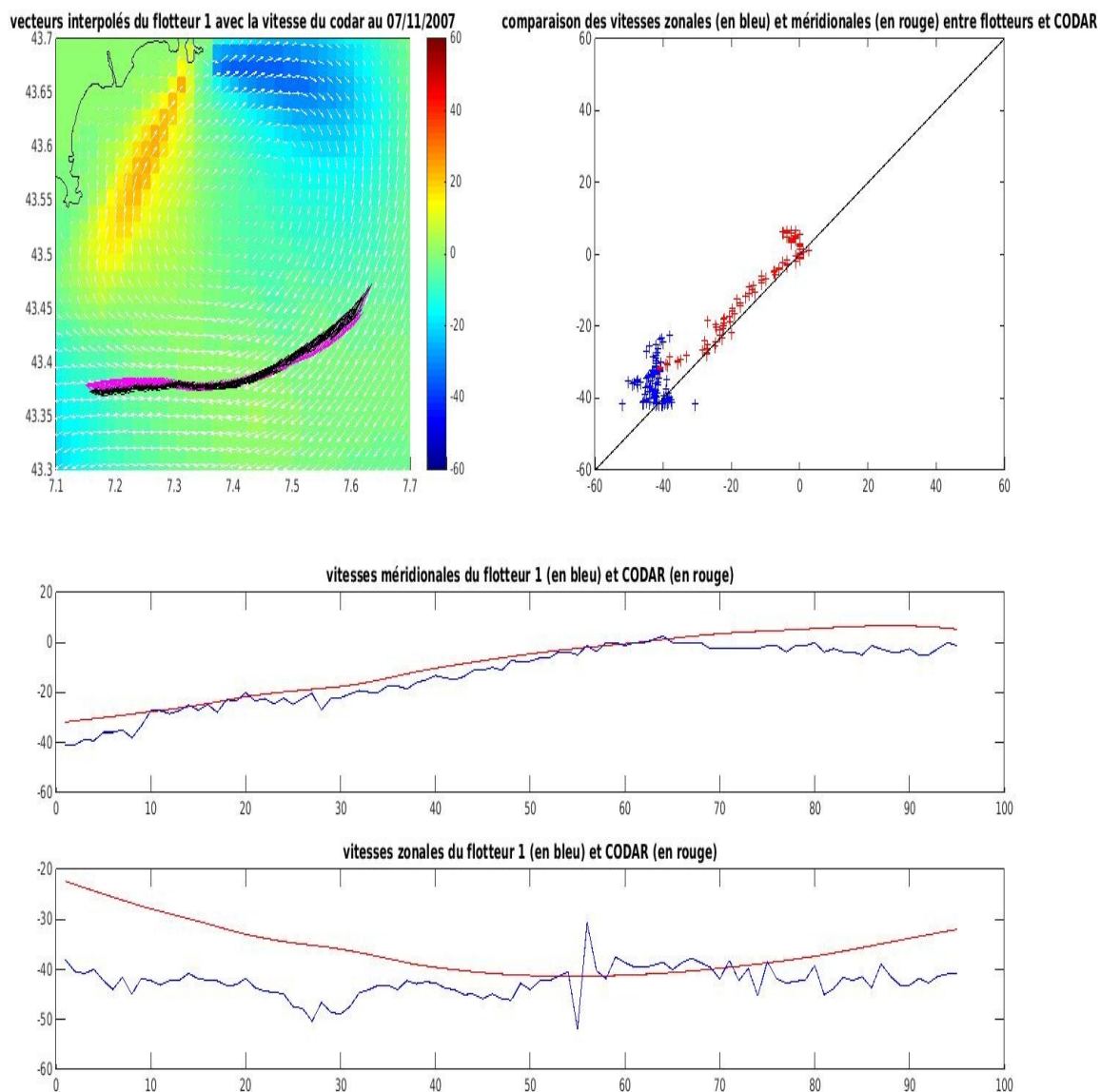


Figure 27 : trajectoire du flotteur 1 le 7 Novembre (en noir) avec les vecteurs MCRV interpolés (en violet) et champ du courant reconstruit (en blanc) en haut. Avec la comparaison des vitesses zonales et méridionales entre CODAR et flotteurs à droite. En bas comparaison des vitesses zonales et méridionales entre MCRV et flotteur.

Le 8 Novembre le flotteur 1 suit le courant et sa vitesse zonale est très comparable à la vitesse zonale interpolée de la MCRV seulement la vitesse méridionale n'est plus assez comparable entre les points 1 et 50 (voir figure 28).

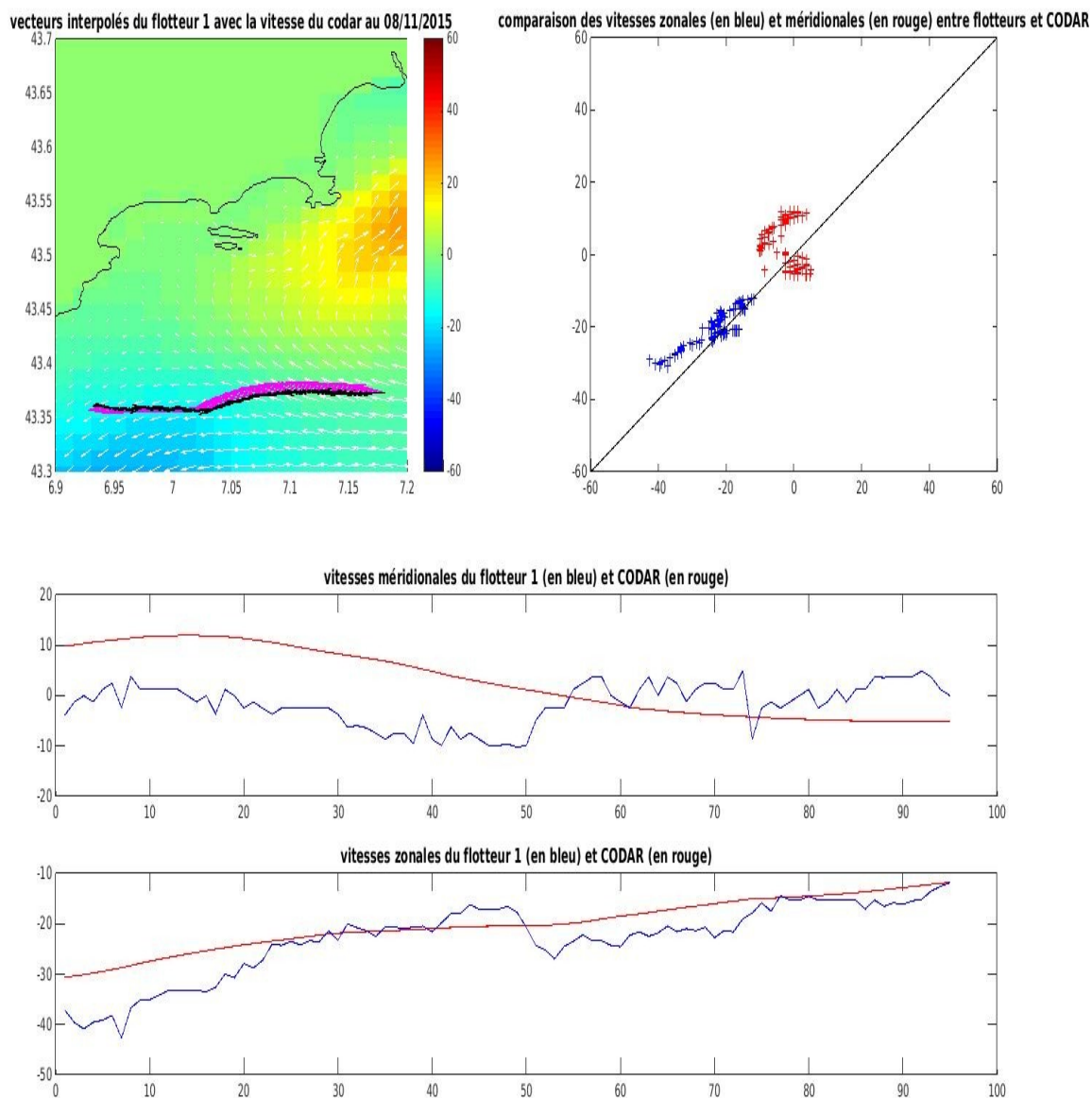


Figure 28 : trajectoire du flotteur 1 le 8 Novembre (en noir) avec les vecteurs MCRV interpolés (en violet) et champ du courant reconstruit (en blanc) en haut. Avec la comparaison des vitesses zonales et méridionales entre CODAR et flotteurs à droite. En bas comparaison des vitesses zonales et méridionales entre MCRV et flotteur.

Le 9 Novembre le flotteur 1 suit le courant et subi de grosses variations de vitesses mais celles-ci ont l'air comparables avec les vitesses interpolées de la MCRV (voir figure 29).

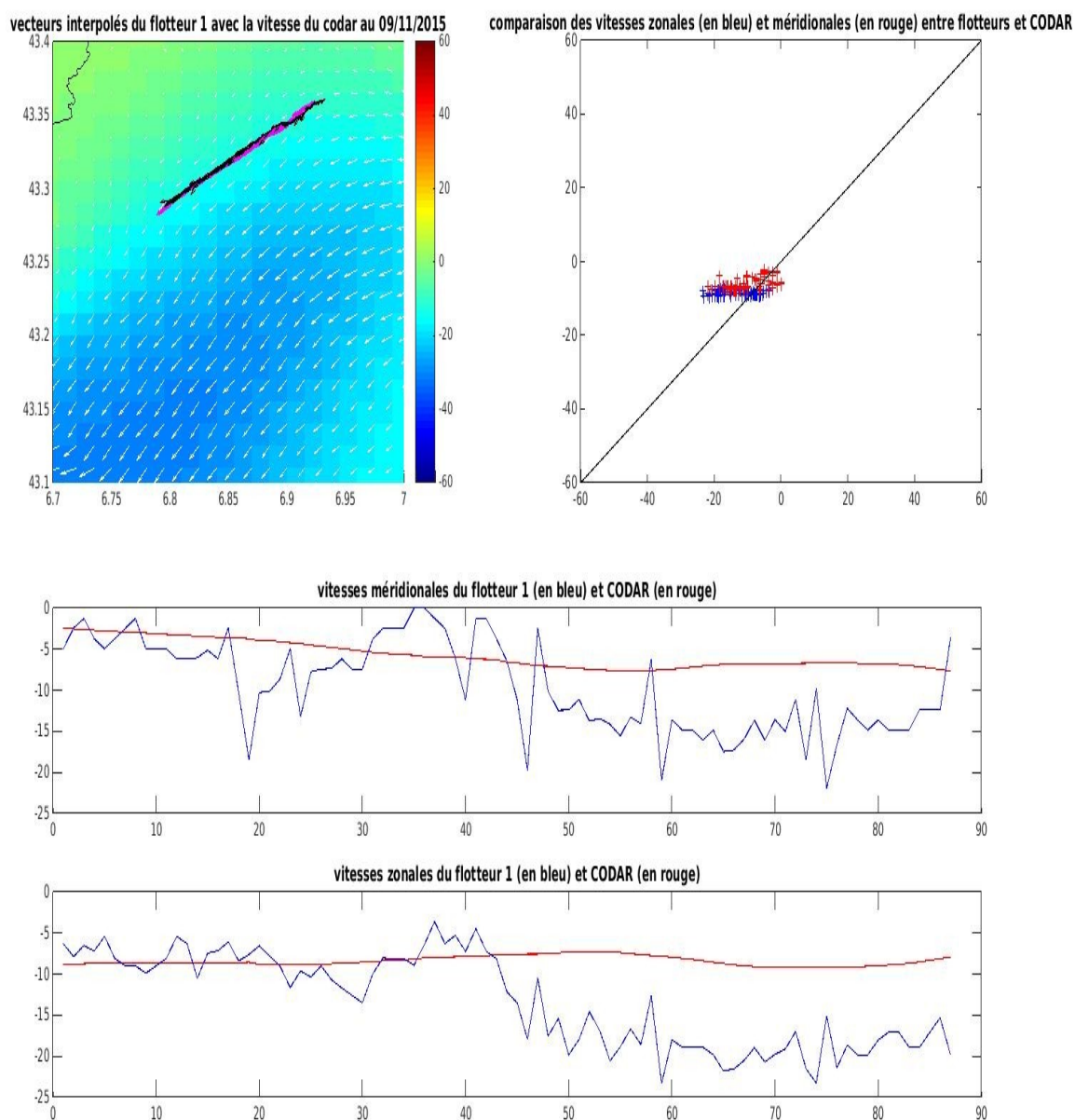


Figure 29 : trajectoire du flotteur 1 le 9 Novembre (en noir) avec les vecteurs MCRV interpolés (en violet) et champ du courant reconstruit (en blanc) en haut. Avec la comparaison des vitesses zonales et méridionales entre CODAR et flotteurs à droite. En bas comparaison des vitesses zonales et méridionales entre MCRV et flotteur.

Le flotteur 1 suit une trajectoire qui le mène à heurter les côtes par la suite, à partir du 10 Novembre, ce qui rend l'étude irréalisable car trop proche des côtes. Ceci étant ce flotteur a donné de bons résultats en accord avec les résultats de la MCRV surtout au niveau de ses trajectoires mais aussi au niveau de ses vitesses qui sont en majeure partie comparables à celles trouvées par MCRV.

L'étude est maintenant menée avec le flotteur 2 qui est lui aussi lâché au Sud du CODAR du cap Ferrat. Sa trajectoire suit le courant mais ses vitesses zonales et méridionales ne sont en accord que sur les 40 premiers points, les 40 restant les résultats de la MCRV appliqués aux données CODAR ont tendance à trop surestimer la valeur de la vitesse vue par le flotteur 2 (voir figure 30).

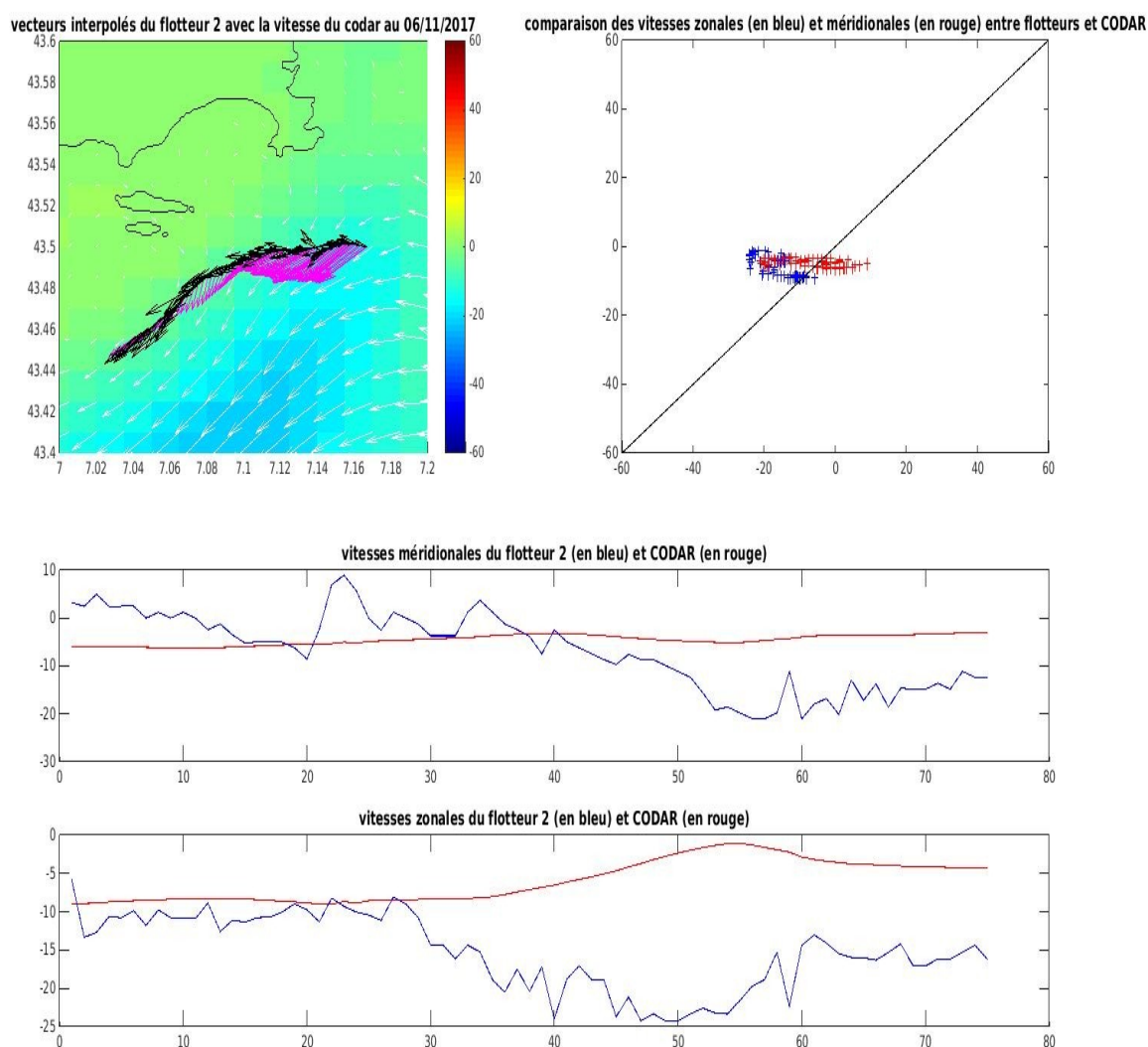


Figure 30 : trajectoire du flotteur 2 le 6 Novembre (en noir) avec les vecteurs MCRV interpolés (en violet) et champ du courant reconstruit (en blanc) en haut. Avec la comparaison des vitesses zonales et méridionales entre CODAR et flotteurs à droite. En bas comparaison des vitesses zonales et méridionales entre MCRV et flotteur.

Le jour suivant, à savoir le 7 Novembre, le flotteur 2 suit le courant et donne des vitesses qui peuvent être comparables en ordre de grandeur avec ceux de la MCRV (voir figure 31).

Encore une fois le courant emporte le flotteur 2 vers les côtes, à partir du 8 Novembre, et il n'est plus possible de suivre sa trajectoire et sa vitesse avec le CODAR. Seulement, pour les jours

étudiés, il est possible de se rendre compte que les données flotteurs restent très proche des données CODAR en termes de trajectoire mais aussi en termes de vitesses ce qui est plutôt encourageant pour dire que la MCRV fonctionne bien du moment que l'on n'est pas trop proche des côtes, le masque faisant que les points dans les creux soient difficilement accessibles.

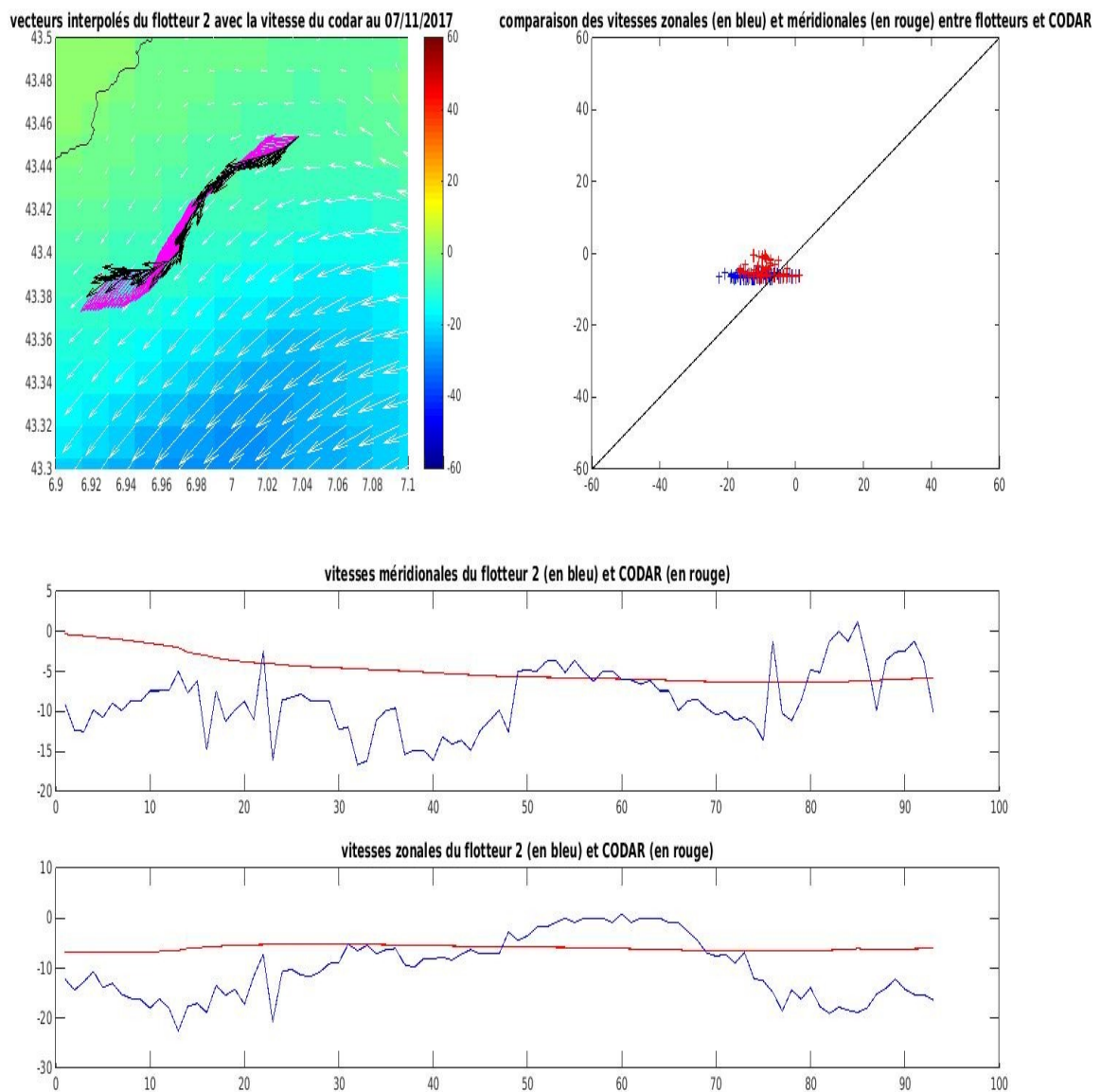


Figure 31 : trajectoire du flotteur 2 le 7 Novembre (en noir) avec les vecteurs MCRV interpolés (en violet) et champ du courant reconstruit (en blanc) en haut. Avec la comparaison des vitesses zonales et méridionales entre CODAR et flotteurs à droite. En bas comparaison des vitesses zonales et méridionales entre MCRV et flotteur.

4. Discussion et conclusion

Au vu des résultats obtenus avec la MCRV le courant Nord et ses multiples tourbillons côtiers ont pu être caractérisés tant en vitesse, de l'ordre d'un demi mètre par seconde qu'en épaisseur, de l'ordre d'une trentaine de kilomètres. Les résultats sont globalement en accord avec les différentes données SST, ADCP et flotteurs de la campagne océanographique OSCAHR mais les vitesses comparées manquent parfois de précisions. Il a été expliqué pourquoi les données sont lissées puis pourquoi la fonction de courant doit être redressée à la frontière Est pour améliorer les résultats. Les cartes de courant sont cohérentes du moment que l'on ne dépasse pas une portée d'un peu moins de 60 kilomètres.

Ce qui est cohérent avec les spécifications et cahier des charges des instruments CODAR, qui pour cette fréquence (13,5MHz) à portée moyenne ne garantissent une disponibilité de la donnée à 95% du temps que jusqu'à 60 kilomètres. Au-delà, c'est du bonus. C'est-à-dire à plus de 60 kilomètres, on ne peut pas garantir que le niveau signal sur bruit (SNR) soit suffisant pour permettre la mesure. Ce SNR dépend de la puissance du radar en émission (40W), des interférences radioélectriques (très présentes l'après-midi), et de l'état de la mer (perte de propagation du signal électromagnétique en onde de sol pour des mers agitées).

Seules les données dites idéales RDLi, de pattern parfait, ont été utilisées. Les données modifiées RDLm, à savoir avec un pattern d'antenne ajusté, n'ont pas pu être testées car celles-ci sont trouées et ne peuvent donc pas être appliquée à la MCRV. Ceci étant fort dommage car le dipôle caractérisant le courant Nord est plus intense sur les fichier modifiées RDLm.

La résolution est passée à 1° après un reprocess, à savoir traitement de données, car le dipôle caractéristique du courant Nord est bien plus visible. La résolution initiale de 5° n'est pas gardée comme résolution pour les résultats, seulement pour l'analyse qu'il a pu être faites sur les améliorations de la MCRV. Les données ont été lissées puis l'erreur d'intégration aux frontières a été retranchée lorsque ceci était utile. Les données statistiques sur le mois de données étudiées, du 29/10/2015 au 06/12/2015, aident quant à la répartition de la couverture CODAR. Les mesures loin du CODAR viennent à manquer et la partie Nord Est de la couverture CODAR subi des interférences. Ce qui limite les performances du CODAR du cap Ferrat.

Si la deuxième station était en fonctionnement, le CODAR de Dramont disposant lui aussi d'un système compact mono-antenne, il serait possible d'utiliser deux fois la méthode aux caractéristiques de reconstruction vectorielle, une fois sur chaque CODAR. Puis les cartes de courant pourraient être obtenues en croisant les radiales des deux CODARs comme il est habituel

de faire. Enfin les données de radiales croisées et intégrées pourraient être comparées en vue d'obtenir des résultats plus fiables. De plus en appliquant deux fois la MCRV on aurait beaucoup plus de couverture CODAR qu'en croisant les données de vitesses radiales des deux CODARs, du cap Ferrat et de Dramont.

L'hypothèse de non divergence du courant sur sa hauteur semble être acceptable lorsqu'on ne s'éloigne pas trop du CODAR, trop loin le dipôle des vitesses radiales s'élargit et le courant devient incohérent spatialement. Le CODAR est censé fonctionner correctement jusqu'à 60 kilomètres et l'expérience a prouvé que seuls les 60 premiers kilomètres donnent des résultats valables.

Le problème de portée peut être dû au vent fort soufflant dans cette zone de la Méditerranée mais les données de vitesses et directions du vent n'ont pas donnés de corrélations intéressantes sur ce principe. Ceci étant la MCRV donnent des résultats valables pour les 50 premiers kilomètres et les sorties modèles ont pu être validées par ces mesures *in situ*.

La piste la plus souhaitable pour continuer ce travail de reconstruction du courant avec une station CODAR unique serait d'utiliser OMA (Optimum Mapping Analysis) pour tester une méthode d'interpolation et la comparer aux résultats précédents. La MCRV ayant donné des résultats encourageant et offre une possibilité de traitement des données radar dans le cas un seul radar d'une configuration est disponible.

Les modèles numériques Symphonie et Mars3dEco3m peuvent donc être appuyés par les résultats de la MCRV tant dans la morphologie même du courant Nord que dans le déplacement du tourbillon côtier qui se loge souvent près des côtes bordant le CODAR du cap Ferrat (voir figure 32). Tourbillon qui peut être visible sur les résultats de modèles numériques et sur les cartes de courant reconstruit par MCRV.

Le tableau suivant présente les tourbillons et la présence d'un courant qui ondule le long des côtes pour la durée du 29/10/2015 au 06/12/2015. Les modèles Symphonie et Mars3dEco3m présentent des similitudes, suivant les jours, avec les résultats de la MCRV. En effet les tourbillons côtiers et la morphologie du courant Nord sont identiques, suivant les jours, entre les résultats de la MCRV et les sorties modèles. Les modèles placent cependant les tourbillons côtiers au même endroit, un peu à l'Est du CODAR, pour tous les jours tandis que les résultats de la MCRV montrent un déplacement des tourbillons le long des côtes. Cependant le courant Nord possède à peu près la même morphologie entre modèles et résultats de la MCRV appliqués aux données CODAR du cap Ferrat.

Le tableau qui suit indique les jours où le courant Nord longe les côtes et quand un tourbillon côtier est présent.

jours	29/10	30/10	31/10	01/11	02/11	03/11	04/11	05/11	06/11
tourbillon	oui	oui	non	oui	non	non	non	oui	oui
courant	oui	oui	oui	oui	non	non	non	oui	oui
07/11	08/11	09/11	10/11	11/11	12/11	13/11	14/11	15/11	16/11
oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
oui	oui	oui	non	oui	oui	non	non	non	non
17/11	18/11	19/11	20/11	21/11	22/11	23/11	24/11	25/11	26/11
oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
non	non	oui	non	non	non	oui	non	oui	oui
27/11	28/11	29/11	30/11	01/12	02/12	03/12	04/12	05/12	06/12
non	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non
non	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	oui	oui

Dans le cas d'un CODAR équipé d'un système compact mono-antenne pouvant assurer l'émission et la réception du signal la MCRV est une bonne méthode de reconstruction du courant à appliquer aux données. Cette méthode permet d'obtenir des cartes de courant qui ont l'air cohérente avec des données océanographiques et de modèles numériques. La MCRV offre la possibilité de traiter les données lorsqu'un seul CODAR est disponible et donne des résultats encourageants.

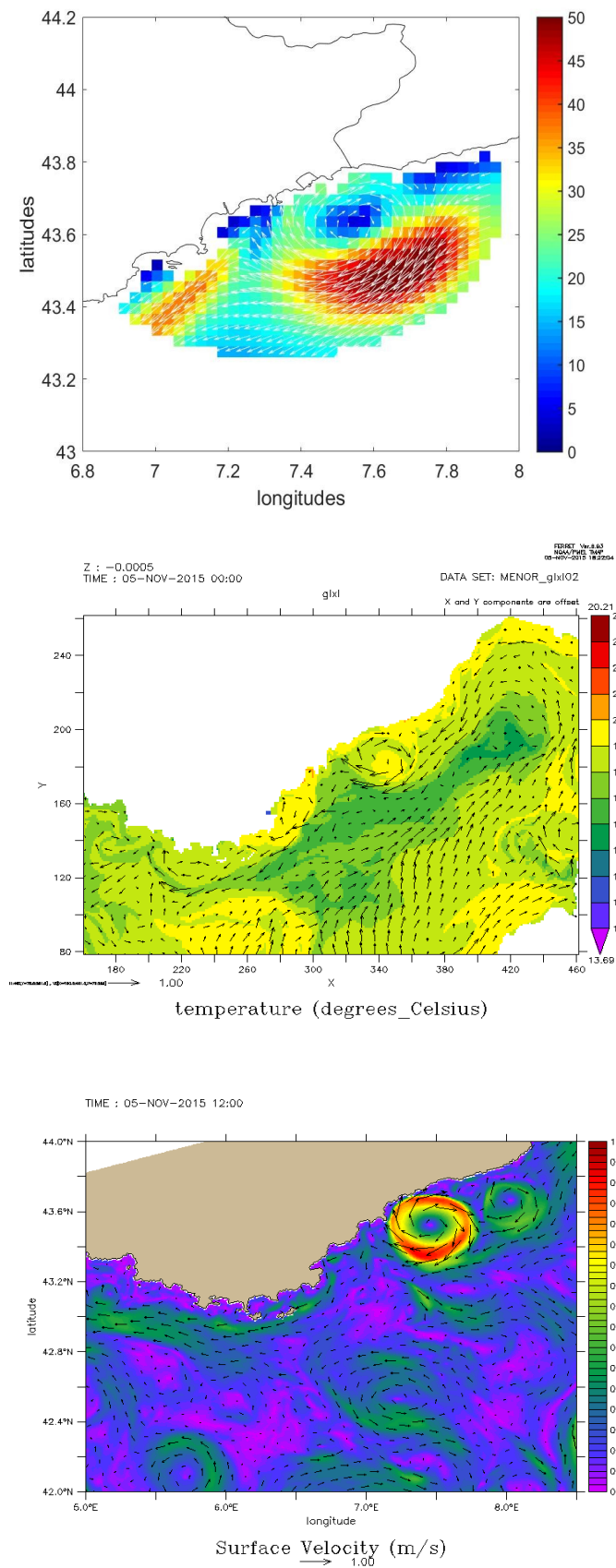


Figure 32 : en haut carte de courant obtenue en appliquant la MCRV aux données du 5 Novembre, au centre, données du modèle Mars3dEco3m, en bas, données du modèle Symphonie.

Bibliographie

- [1] Millot C. et Taupier-Letage I., 2005, Circulation in the Mediterranean Sea.
- [2] Millot C., 1990, The Gulf of Lions hydrodynamics, Continental Shelf Research, vol10 pages 885-894.
- [3] Crepon M. Wald L. et Monget J. M., 1977, Low-frequency waves in the Ligurian Sea during December Journal of geophysical research, vol87 pages 595-600.
- [4] : PARENT du CHATELET J., thèse, Étude des possibilités de mesure des paramètres océaniques avec un radar en onde de ciel.
- [5] Crombie, D. D. 1955 *Nature* 175, 681-2.
- [6] Barrick D. E., 1986, The role of the gravity-wave dispersion relation in hf radar measurements of the sea surface, IEEE journal of oceanic engineering, vol OE-11, NO 2.
- [7] Stewart et joy, 1974, HF radio measurements of surface currents.
- [8] Barrick et al., radar angle determination with music direction finding.
- [9] Barrick, synthesis of total surface current vector maps by fitting normal modes to single-site hf radar data.
- [10] Marmain J., 2010, MCRV présentée dans le rapport de master 2 de Courantologie sur la côte Varoise : reconstruction et analyse du courant à partir d'une station radar unique.
- [11] Marmain J., 2011, Forget P. et Molcard A.: Characterization of ocean surface current properties from single site HF/VHF radar.
- [12] Taupier-Letage I., 2008, On the use of thermal images for circulation studies : applications to the Eastern Mediterranean basin.

Tableau des acronymes

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer.

AVISO : Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data.

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler.

CTD : Conductivity Temperature Density.

SST : Sea Surface Temperature.

MCRV : Méthode aux Caractéristiques de Reconstruction Vectorielle.

CODAR : COastal Dynamics Applications Radar.

WERA : Wave RAdar.

OSCAHR : Observing Submesoscale Coupling At High Resolution.

MIO : Institut Méditerranéen d'Océanologie.

MOOSE : Méditerranean Ocean Observing System on Environment.

RADAR : Radio Detecting And Ranging.

HFSWR : HFSWR (en Anglais High Frequency Surface Wave Radars) High Frequency Surface Wave Radars.

SSS : Sea Surface Salinity.

OMA : Optimum Mapping Analysis.