



**UNIVERSITE DU SUD TOULON-VAR**

**MASTER SCIENCES ET TECHNOLOGIES 2ème ANNEE**

Mention : Physique et Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Physique et Surveillance de l'Environnement

Année universitaire 2013-2014

**CAPPELLI Robin**

## **Modélisation hydrodynamique du canyon de Cassidaigne**

Stage effectué du 1er février 2014 au 1er août 2014 au sein du laboratoire LER-PAC  
du centre IFREMER de La Seyne sur Mer

Directeur de stage : Ivane Pairaud

Responsable du stage pour l'université : Anne Molcard

Juin 2014



## Remerciements

Je tiens à remercier ma famille pour avoir été présente tout au long de mon parcours et pour m'avoir soutenu dans les moments difficiles.

Je remercie également mes professeurs du master PSI-PSE pour m'avoir fait découvrir le domaine de l'océanographie physique.

Je remercie toutes les personnes du LER-PAC pour m'avoir accueilli, plus particulièrement Ivane Pairaud pour m'avoir donné la chance de réaliser ce stage et Marie-Claire Fabri pour avoir répondu à mes questions concernant les coraux d'eau froide peuplant le canyon de Cassidaigne.

## Sommaire

Remerciements.....	p.1
Sommaire.....	p.2
Liste des tableaux et figures.....	p.3
I) Introduction.....	p.4
II) Matériel et méthodes.....	p.6
II.1 Observations.....	p.6
II.2 Modélisation hydrodynamique.....	p.7
III) Validation du modèle.....	p.10
III.1 Reproduction de la variabilité temporelle de la stratification : comparaison en points fixes.....	p.10
a) Bouée Candhis.....	p.10
b) Stations TMedNet.....	p.12
III.2 Capacité du modèle à reproduire les processus hydrodynamiques.....	p.15
a) Le long des trajets SAVED.....	p.15
b) Comparaisons aux images satellites.....	p.19
IV) Caractéristiques hydrodynamiques de la zone du canyon.....	p.20
IV.1 Caractéristiques de la zone d'étude CASCANL.....	p.20
IV.2 Caractéristiques dans la zone de vie des coraux.....	p.24
V) Conclusion et perspectives.....	p.28
Bibliographie.....	p.30
Annexes 1 à 7	

## Liste des tableaux et figures

Tableau 1 : Position des stations de mesures TMedNet.....	p.7
Figure 1 : Position de la bouée fixe de type Candhis du Planier et des stations TMedNet	p.7
Figure 2 : Bathymétrie des trois configurations utilisées.....	p.9
Figure 3 : Roses des vents en trois points pendant la simulation.....	p.10
Figure 4 : Série temporelle (température) de la bouée Candhis.....	p.11
Figure 5 : Série temporelle (température) d'une station TMedNet pour une profondeur...	p.12
Figure 6 : Série temporelle (température) de 3 stations TMedNet à toute les profondeurs	p.13
Tableau 2 : Mesures statistiques de trois stations TMedNet.....	p.14
Figure 7 : Diagramme de Taylor et diagramme cible pour une station TMedNet.....	p.14
Figure 8 : Température et salinité mesurées et simulées d'un trajet SAVED.....	p.16
Figure 9 : Série temporelle (température et salinité) d'un trajet SAVED.....	p.17
Figure 10 : Courants mesurés et simulés d'un trajet SAVED.....	p.18
Figure 11 : Intensité et direction des courants mesurés et simulés d'un trajet SAVED.....	p.18
Figure 12 : Images satellites lors d'un événement d'upwelling.....	p.19
Figure 13 : Exemple d'événement d'upwelling simulé par la configuration.....	p.21
Figure 14 : Exemple d'événement de downwelling simulé par la configuration.....	p.22
Figure 15 : Exemple d'événement d'intrusion d'eaux du Rhône.....	p.23
Figure 16 : Exemple d'intrusion du CNM sur le plateau du Golfe du Lion.....	p.24
Figure 17 : Courants maximums & moyens avec ellipses de variances dans le canyon....	p.25
Figure 18 : Courants à différentes profondeurs dans le canyon lors d'un upwelling.....	p.26
Figure 19 : Courants près du fond du canyon lors d'un upwelling.....	p.27
Figure 20 : Températures moyennes, maximales et écart-type près du fond du canyon....	p.27

## **D) Introduction**

Les canyons sous-marins sont des lieux d'échanges entre les eaux du fond et les eaux des couches supérieures. Ces échanges sont favorisés par des processus d'upwellings et de downwellings et la circulation entourant ces lieux est complexe [Howatt, 2013] : les courants du fond proches du canyon de Cassidaigne s'écoulent vers l'Ouest globalement, les courants intermédiaires ont plutôt tendance à remonter le canyon et donc à renforcer les upwellings, les courants au niveau du plateau sont influencés par la bathymétrie et suivent donc les isobathes du canyon, enfin les courants de surface ne sont pas ou peu influencés par la présence du canyon.

En Méditerranée, ces canyons abritent de nombreuses espèces de coraux, notamment des coraux d'eaux froides ne pouvant supporter très longtemps une température supérieure à 15 degrés Celsius [Fabri et al., 2013].

Le canyon de Cassidaigne situé dans la baie de Cassis est un canyon particulier car en plus de servir d'habitats à certaines espèces de coraux, il a servi pendant de nombreuses années en tant que lieu de décharge de la bauxite [Dauvin, 2010], un produit de la fabrication de l'aluminium qui une fois dans l'eau s'apparente à de la boue rouge qui empêche les coraux de se développer car ceux-ci ont besoin d'un sol rigide afin de s'implanter. Ils ont également besoin de forts courants pour être nettoyés.

Les eaux à l'Est du Golfe du Lion sont soumises à deux forçages principaux : le premier vient du vent et affecte les couches d'eaux superficielles, la direction privilégiée Nord/Nord-Ouest du vent ainsi que l'orientation des côtes font que le Golfe du Lion comprend six points sources d'upwellings dont le plus intense est centré sur la baie de Cassis [Albérola & Millot, 2003] ; le second vient du Courant Nord s'écoulant au large, sa variabilité méso-échelle se manifeste sous forme de méandres et il peut engendrer des turbulences d'échelle spatio-temporelle relativement petite [Bocognano, 1995].

Cette zone est aussi soumise au phénomène d'oscillations d'inertie : au large, les masses d'eaux peuvent décrire des mouvements quasi circulaires d'un rayon de quelques kilomètres. A proximité de la côte, le phénomène se complexifie par la génération d'ondes internes et des courants opposés de part et d'autre de la thermocline [Millot et Crépon, 1981].

La zone autour du canyon a fait l'objet d'une précédente expérience consistant en l'implantation de six mouillages courantométriques pendant deux legs, le premier de fin Avril

à fin Novembre 1995 (été) et le second de début Décembre à début Mai 1996 (hiver), depuis la tête de canyon jusqu'au fond du plateau [Albérola & Millot, 2003].

Cette expérience a montré que les courants moyens ainsi que les ellipses de variance à 95% de variabilité associées sont orientés vers l'Ouest tout en suivant la bathymétrie du canyon, ils sont aussi plus intenses l'hiver (Leg 2) qu l'été (Leg 1). Il se dégage aussi de cette étude que les courants, analysés avec une décomposition orthogonale aux valeurs propres (EOF), possèdent deux modes de circulation : le premier correspond à une circulation uniforme vers l'Ouest alors que le second correspond à une recirculation des courants par le Sud [Albérola & Millot, 2003].

En outre, une étude de la zone de Marseille à aussi été réalisée à l'aide de modèles numériques [Pairaud et al., 2011]. Elle a confirmé que cette zone était fréquemment le siège d'upwellings aux niveau des Calanques et que le panache du Rhône peut s'étendre jusque dans la baie de Marseille avec une occurrence non négligeable.

Le but de ce stage est de mettre en place une configuration du modèle numérique MARS3D [Lazure et Dumas, 2007] autour du canyon de Cassidaigne puis de la valider afin d'étudier l'hydrodynamique ainsi que l'hydrologie de ce canyon pour voir si les conditions environnementales sont favorables au bon développement des différentes espèces de coraux installées dans le canyon.

Ce stage s'est déroulé au laboratoire LER-PAC (Laboratoire Environnement Ressource Provence Azur Corse) de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) qui a pour mission la surveillance du milieu marin et mène en parallèle des activités de recherche appliquée pour comprendre l'évolution des écosystèmes.

Dans ce qui suit, nous détaillons les observations disponibles et le modèle utilisé, puis nous comparons les résultats du modèle avec des observations de la zone pendant la période automnale afin de valider la configuration. Enfin nous étudions l'hydrodynamique et l'hydrologie du domaine dans son ensemble ainsi que celles de la zone de vie des coraux au niveau du canyon de Cassidaigne.

## **II) Matériel et méthode**

L'étude de la circulation dans le canyon de Cassidaigne repose sur l'utilisation de différents types d'observations (in-situ ou satellitaires) ainsi que sur la modélisation numérique hydrodynamique.

### **II.1 Observations**

Des images satellites de couleur de l'eau provenant de satellites (VIIRS, MODIS) traitées avec l'algorithme OC5 sont mises à disposition par l'IFREMER (F. Gohin, com. personnelle) et permettent de repérer la signature des événements comme les upwellings avec un échantillonnage journalier en l'absence de nuages.

Des images satellites de température de surface de la mer sont disponibles via le site internet de MyOcean (<http://www.myocean.eu>). Lors de ce stage nous avons utilisé les images journalières L3S d'une résolution spatiale d'un kilomètre [Buongiorno Nardelli et al.,2013] qui permettent d'avoir la température de surface basée sur l'utilisation d'images nocturnes. Nous avons également utilisé les images NOAA AVHRR Canal 4 OSIS (images Golts acquises par le CMS/SATMOS, traitées au MIO de La Seyne sur Mer) qui permettent d'avoir les gradients de température et donc les structures des masses d'eaux deux fois par jour.

Des données de température et de salinité sont également accessibles le long de trajets effectués par le TETHYS II via son thermosalinographe situé à deux mètres sous la surface, ainsi que des données de courant mesurées par son ADCP (Acoustic Doppler Currents Profiler) de coque. Elles sont disponibles dans la base de données SAVED (Système Acquisition Validation Exploitation de Données du Tethys II) (<http://saved.dt.insu.cnrs.fr>). Les trajets sont précisés en annexe 3.

Des données horaires de température de l'eau ont été enregistrées en plusieurs stations fixes du réseau TMedNet (<http://www.t-mednet.org>), équipées chacune d'une ligne de 9 thermomètres maximum positionnés à des profondeurs de -45 à -5 mètres par palier de cinq mètres (tableau 1 et figure 1). Elles nous ont été fournies par l'Institut Pytheas (F. Zuberer).

Tableau 1 : Position des différentes stations de mesures TMedNet.

Sites	Longitude	Latitude
Cassidaigne	5°32,742'E	43°08,740'N
Méjean	5°13,468'E	43°19,701'N
Morgiou	5°27,083'E	43°12,046'N
Planier Veyron (-45 à -35m)	5°15,150'E	43°12,448'N
Planier Souquet (-30 à -5m)	5°14,080'E	43°11,968'N
Riou Sud	5°23.420'E	43°10.370'N

Enfin, des données de température de surface de l'eau et de houle sont disponibles à la bouée Candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ) (<http://Candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>) du Planier dont la position est 43°12,50'N et 5°13,80'E (figure 1), avec deux mesures par heure pour la température.

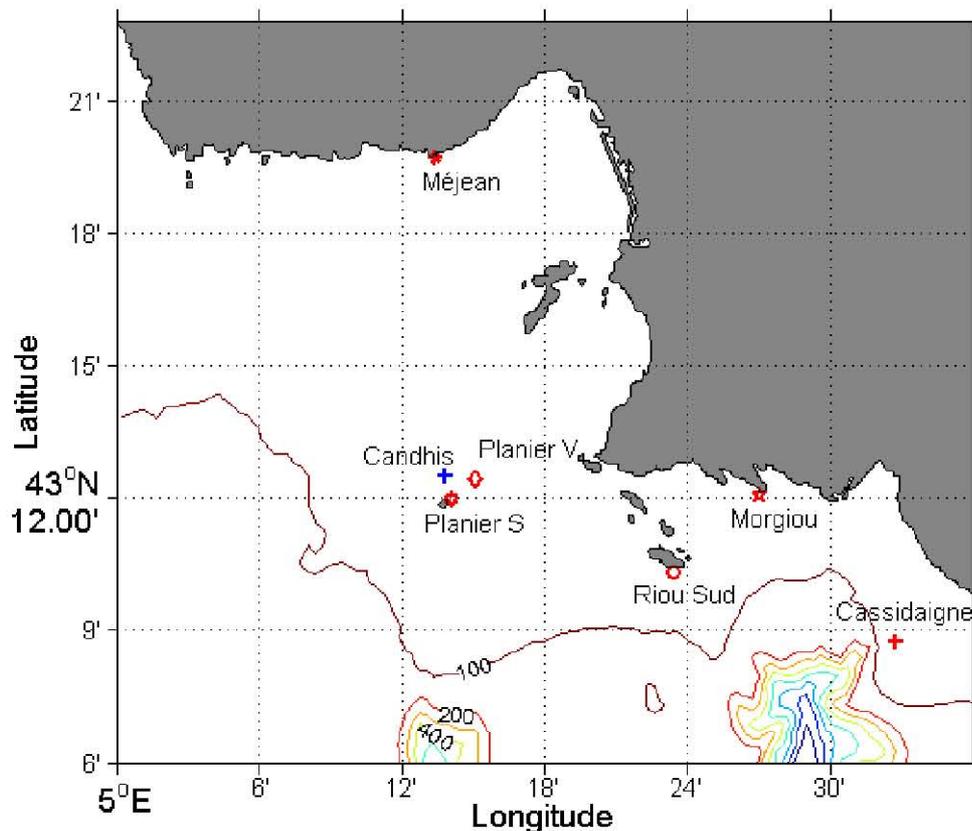


Figure 1 : Position de la bouée Candhis du Planier et des stations fixes du réseau TMedNet .

## II.2 Modélisation hydrodynamique

Pour étudier l'hydrodynamique du canyon, nous utilisons la version 10.3 du modèle MARS3D (Model for Application at Regional Scale) développé par l'IFREMER (Lazure et Dumas, 2007) qui résout les équations de Navier-Stokes sous l'approximation hydrostatique et

celle de Boussinesq (annexe 1) et les équations de la thermodynamique. Il utilise des niveaux  $\sigma$  généralisés comme coordonnées verticales, ceux-ci permettant d'avoir le même nombre de niveaux en tout point indépendamment de la bathymétrie du domaine considéré (Song et Häidvogel, 1994) et utilise une grille de type Arakawa-C1 (annexe 1).

La configuration CASCAN pour « Cassidaigne Canyon » de MARS3D a été développée pour étude. Comme nous sommes limités par un facteur d'échelle entre la grille de MENOR et celle du zoom, nous ne pouvons passer d'une configuration de basse résolution (1,2 km) à une configuration à très haute résolution (80 m), il nous faut donc passer par une configuration intermédiaire, CASCANL, ayant une résolution de 400 mètres.

Cette configuration prend en compte un domaine autour du canyon de Cassidaigne allant de 5,00°E à 5,83°E en longitude et de 42,67°N à 43,38°N en latitude (figure 2), sa résolution horizontale est d'environ 400 mètres et elle possède 60 niveaux verticaux de type  $\sigma$  généralisés (resserrés au fond et à la surface). Le pas de temps est de 25 secondes : celui-ci a été optimisé afin de diminuer le temps de calcul de la simulation, de faire en sorte qu'elle reste stable et de pouvoir écrire un fichier de sortie des données toutes les trois heures précisément.

Les conditions aux limites sont de type Dirichlet et une couche éponge de dix points de grille est appliquée aux frontières dans laquelle la viscosité est multipliée par quatre. Le modèle utilise la fermeture de la turbulence de Gaspard et al. (1990).

La configuration CASCANS est une configuration de type AGRIF : il s'agit d'une imbrication dans CASCANL dite « 2-way », c'est-à-dire incluant une rétroaction de la dynamique du zoom vers CASCANL. Son domaine s'étend de 5,35°E à 5,59°E en longitude et de 42,96°N à 43,21°N en latitude (figure 2) sa résolution horizontale est d'environ 80 mètres et comme les autres configurations possède 60 niveaux verticaux de type  $\sigma$  généralisés.

La configuration opérationnelle MENOR (Méditerranée Nord Occidentale) du modèle MARS3D fournit la circulation à grande échelle et l'hydrologie aux frontières et en conditions initiales de la configuration CASCANL se focalisant sur le canyon de Cassidaigne. Les champs de forçage sont tri-horaires (niveau de la surface libre, température, salinité et courants horizontaux) avec une résolution horizontale d'environ 1,2 km sur 60 niveaux verticaux  $\sigma$  généralisés.

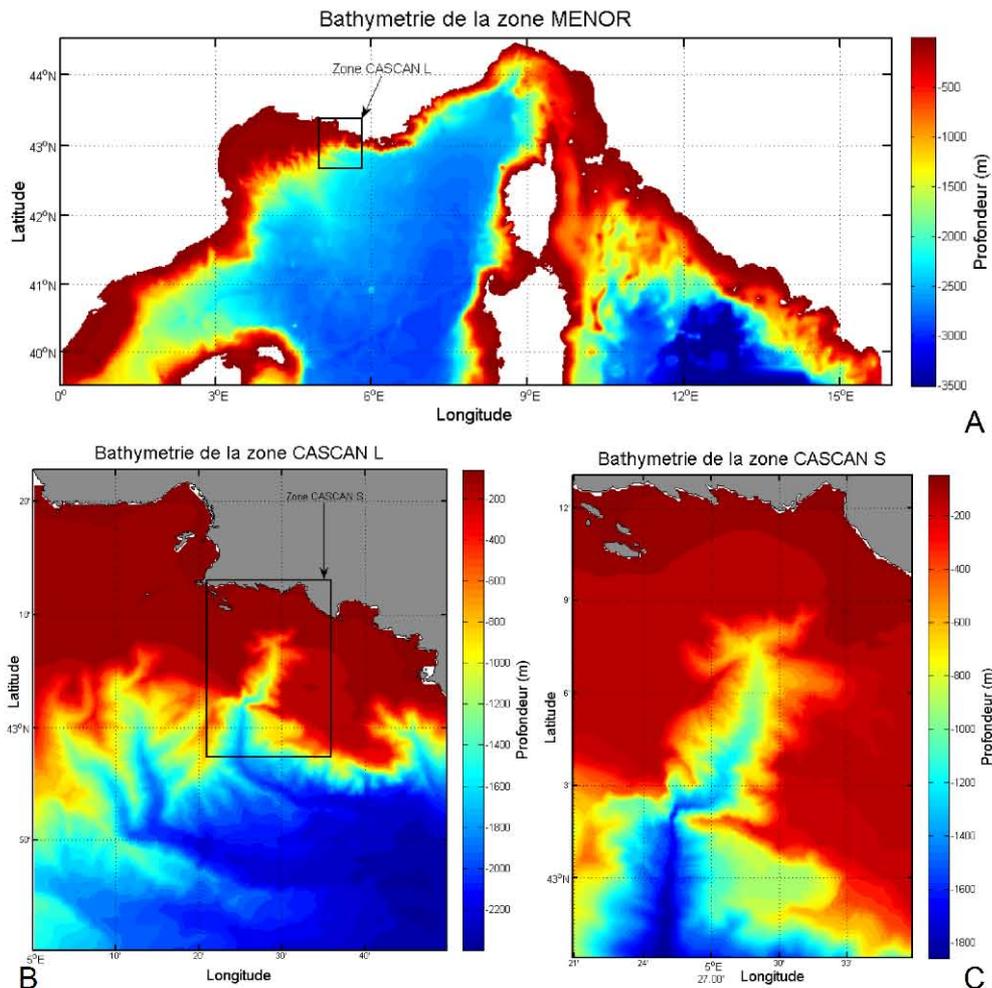


Figure 2: A) Bathymétrie du domaine couvert par MENOR;  
 B) Bathymétrie du domaine couvert par CASCANL;  
 C) Bathymétrie du domaine couvert par CASCANS.

Le forçage atmosphérique est fourni par les champs du modèle ARPEGE (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle) de Météo-France, dont la résolution horizontale est de dix kilomètres et de fréquence horaire. Les champs concernés sont les composantes horizontales du vent à dix mètres au dessus du sol, la température de l'air à deux mètres au dessus du sol, l'humidité relative, le flux solaire, le flux infra-rouge, les précipitations, la nébulosité totale correspondant à la couverture nuageuse.

D'après le modèle ARPEGE, deux régimes de vents dominant dans la zone étudié : un vent de Nord-Ouest (Mistral) de forte intensité et un vent d'Est plus faible (figure 3) ; ces régimes sont caractéristiques de la zone Marseillaise et on peut remarquer une rotation de ces régimes de vent avec la longitude : le Mistral est dévié vers l'Ouest et le vent d'Est dévié vers l'Est au niveau des calanques, correspondant à ce qui est observé.

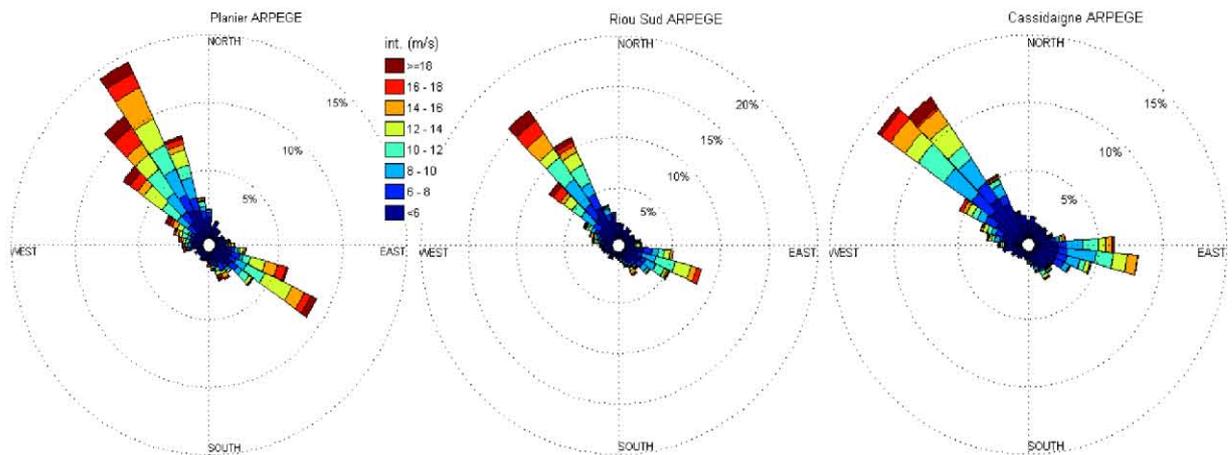


Figure 3 : Roses des vents du modèle ARPEGE aux coordonnées des stations TMedNet Planier (gauche), Riou Sud (milieu) et Cassidaigne (droite) pour la période du 1er Septembre 2013 au 31 Décembre 2013.

Les simulations couvrent la période de Septembre à Décembre 2013.

### III) Validation du modèle

Avant d'utiliser les résultats de la configuration pour étudier l'hydrodynamique du canyon, il nous faut comparer les champs de sortie aux observations disponibles sur la durée de la simulation, pour la période du 1<sup>er</sup> Septembre au 31 Décembre 2013.

Les comparaisons ont été effectuées avec la configuration CASCANL car il faut d'abord valider la configuration de plus grande emprise avant de faire des simulations avec le zoom CASCANS, d'autant plus que les coûts de calcul associés à ce dernier sont importants et la simulation sur la période de quatre mois a été disponible très tardivement. Des comparaisons avec la configuration MENOR ont été effectuées en parallèle.

Durant cette étape de validation, un certain nombre d'outils statistiques ont été utilisés, nous les détaillons dans l'annexe 2a.

#### **III.1 Reproduction de la variabilité temporelle de la stratification : comparaison en points fixes**

##### **a) Bouée Candhis**

Nous commençons par comparer les données de température de surface de la bouée Candhis du Planier aux données de température de surface du point de grille le plus proche de la configuration CASCANL. A partir de cette comparaison (non montrée ici), on remarque

que la configuration sous-estime le réchauffement.

Nous avons donc l'idée de faire la même comparaison en diminuant l'intensité du vent ARPEGE soufflant sur tout le domaine, qui était à la base multipliée par 1,2 car jugée trop faible lors d'une précédente étude (P. Garreau, com. personnelle) et aussi avec la température de surface de MENOR moyennée entre les quatre points de grille les plus proches de la position de la bouée (figure 4).

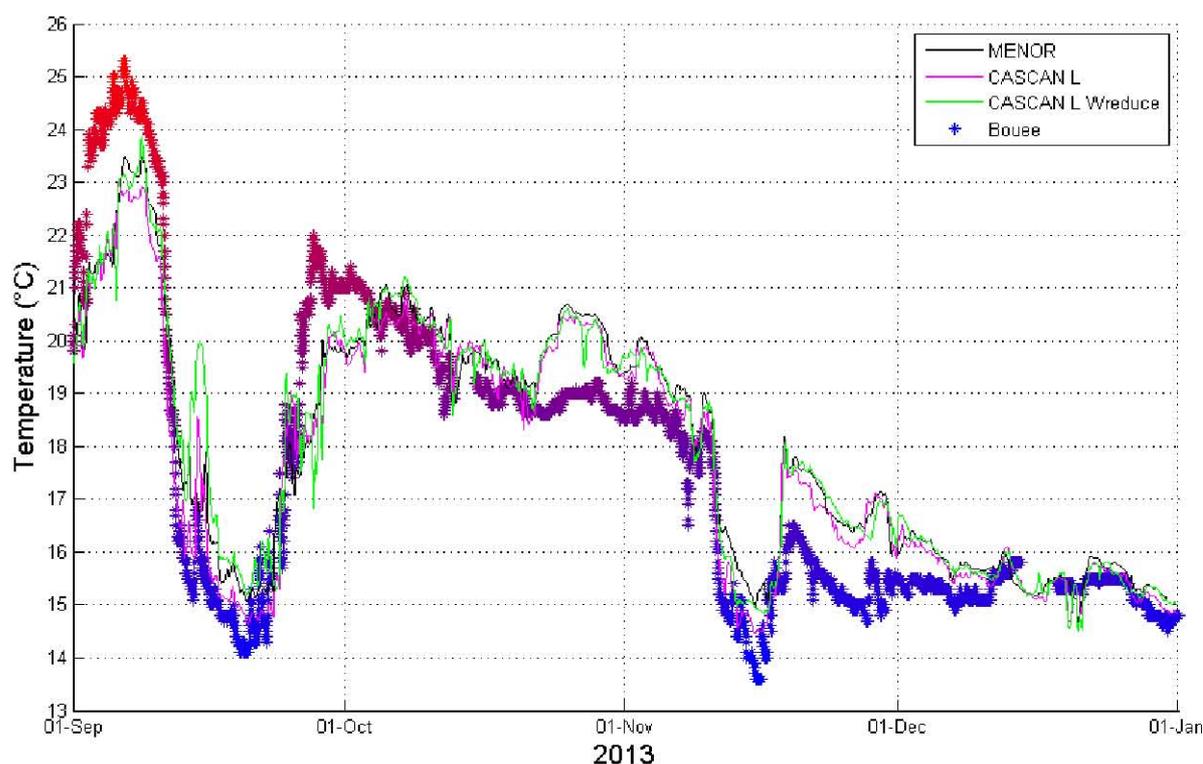


Figure 4 : Température de surface mesurée par la bouée Candhis du Planier comparée aux températures de surface des configurations MENOR (noir), CASCANL (violet) et CASCANL avec le vent diminué (vert).

A partir de ces comparaisons, nous voyons que la configuration CASCANL reproduit bien les variations de température, mais la sous-estime jusqu'à début Octobre puis la surestime jusqu'à mi Décembre.

Nous remarquons aussi que les courbes des différentes configurations sont proches, ce qui indique que la température de la configuration CASCANL est plus fortement influencée par le forçage aux frontières et les échanges de chaleur avec l'atmosphère.

De plus, la configuration CASCANL reproduit un peu mieux la température de surface en ce point que les autres configurations, nous prendrons donc par la suite seulement les sorties de la configuration CASCANL ayant le vent de base (multiplié par 1,2).

## b) Stations TMedNet

Nous comparons ensuite les données de température mesurées aux stations TMedNet aux températures des configurations CASCANL et MENOR (figure 5). Pour cela, nous extrayons comme précédemment soit les températures du point le plus proche (si la station est proche du centre de la maille) soit les températures moyennes des deux ou quatre points autour de la station (si celle-ci est située entre plusieurs mailles successives), puis nous interpolons la température modélisée à la profondeur de la température observée.

Nous ne nous intéressons ici qu'aux stations Cassidaigne, Planier (Veyron + Souquet) et Riou Sud du fait que les stations Méjean et Morgiou sont trop proches des côtes (résultats en annexe 2a et 2b).

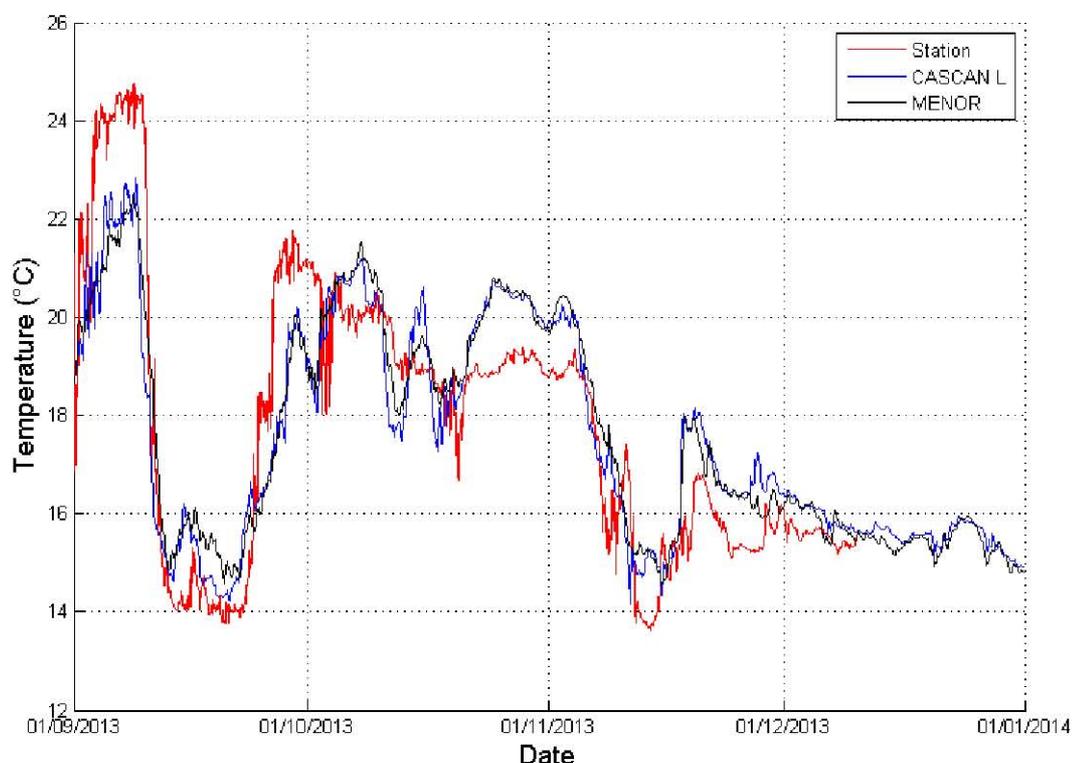


Figure 5 : Température de la station Riou Sud à 10 mètres de profondeur mesurée (rouge) et modélisée par CASCANL (bleu) et MENOR (noir).

Nous voyons que globalement les modèles reproduisent bien les variations de température mais ont tendance à la sous-estimer jusqu'à début Octobre puis à la surestimer.

Afin d'avoir une vision plus globale des événements, nous traçons l'évolution sur la verticale et sur le temps de la température modélisée et mesurée à chaque station (figure 6).

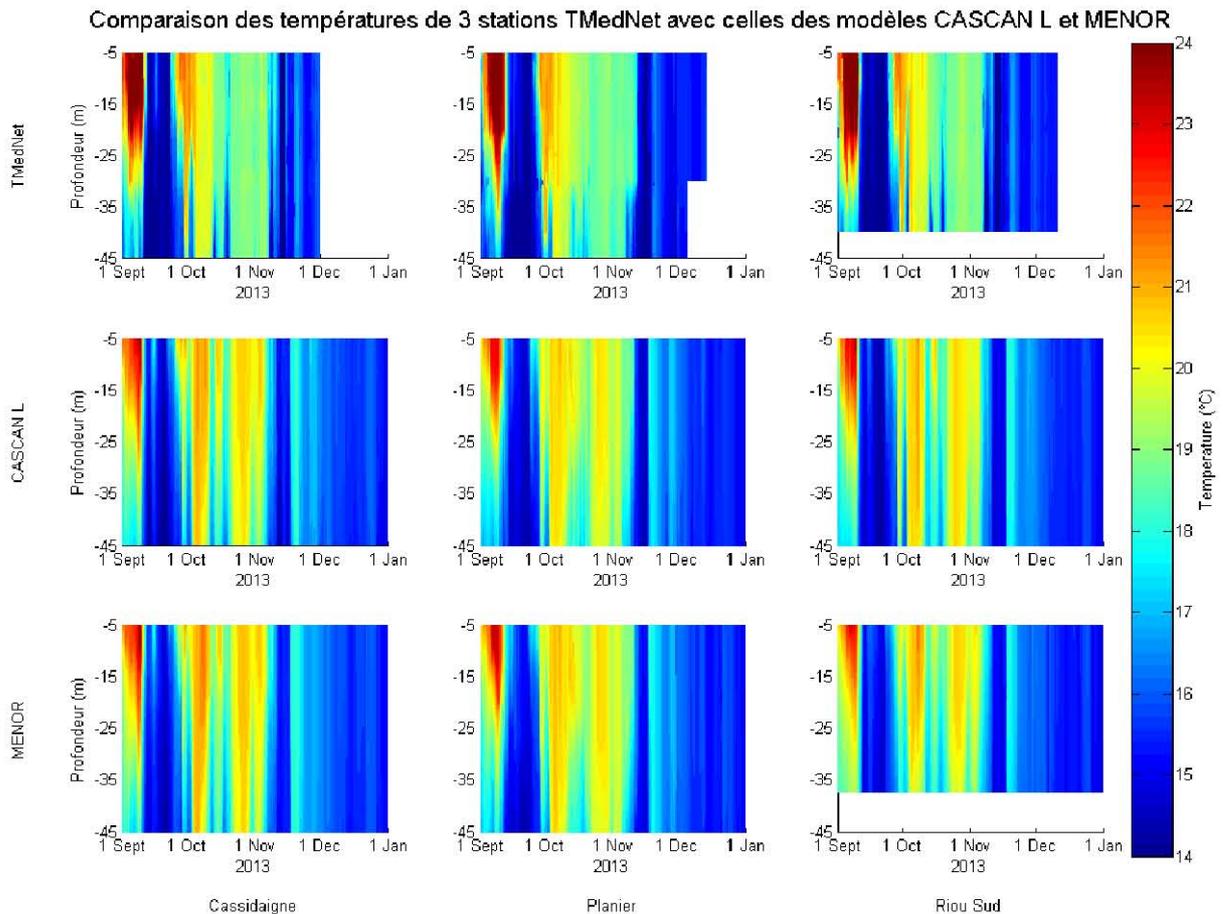


Figure 6 : Séries temporelles des températures des stations Cassidaigne, Planier et Riou Sud de gauche à droite pour TMedNet, CASCANL et MENOR de haut en bas.

Nous pouvons distinguer que la température est plus chaude l'été vers la surface, puis il y a une homogénéisation durant l'automne, avec pour les deux des températures plus froides durant les upwellings (renforçant l'homogénéisation par mélange des couches d'eau à l'automne).

Ces événements sont cohérents entre les stations et sont cohérents avec les observations de la bouée Candhis du Planier. Les séries temporelles sont bien reproduites par les configurations CASCANL et MENOR, néanmoins elles sous-estiment les températures début Septembre et les sur-estiment fin Octobre – début Novembre.

Afin d'être plus précis dans les comparaisons, nous décidons de faire une analyse statistique (tableau 2) propre à chaque jeu de données : calcul de la température moyenne, de l'écart-type ainsi que de la médiane ; mais aussi propres aux comparaisons entre ces jeux de données : calcul du biais entre la température modélisée par rapport à celle de la station TMedNet, du coefficient de corrélation (cor) et de la moyenne quadratique des différences de températures entre la configuration et la station (rms) (voir annexe 2a).

	Prof (m)	Biais TC	Biais TM	Moy TO	Moy TC	Moy TM	Std TO	Std TC
<b>CASSIDAIGNE</b>	5 – 45	0,46	0,61	17,38	17,84	17,99	2,47	2,13
<b>PLANIER SOUQUET</b>	5 – 30	0,25	0,46	17,59	17,85	18,05	2,58	2,09
<b>PLANIER VEYRON</b>	35 – 45	0,69	0,77	16,40	17,09	17,16	1,95	1,84
<b>RIOU SUD</b>	5 – 35	0,36	0,40	17,29	17,65	17,69	2,51	2,08
	Std TM	Median TO	Median TC	Median TM	Cor TC	Cor TM	Rms TC	Rms TM
<b>CASSIDAIGNE</b>	2,07	17,18	17,76	17,92	0,90	0,89	1,17	1,31
<b>PLANIER SOUQUET</b>	2,05	18,22	17,92	18,16	0,92	0,91	1,10	1,20
<b>PLANIER VEYRON</b>	1,78	16,11	17,09	17,12	0,94	0,93	0,97	1,06
<b>RIOU SUD</b>	2,01	16,75	17,41	17,56	0,89	0,87	1,22	1,31

Tableau 2 : Données statistiques de températures des stations TMedNet (O) comparées à celles des configurations CASCANL (C) et MENOR (M).

Ces informations statistiques nous indiquent que la configuration CASCANL reproduit les champs de température aux différentes stations TMedNet avec plus de précision que la configuration MENOR : les biais sont plus faibles, les écart-types plus proches, les corrélations sont meilleures et les moyennes quadratiques des différences sont plus faibles.

Nous remarquons que les biais les plus importants sont ceux des stations Cassidaigne et Planier Veyron.

Pour voir les différences en fonction des profondeurs, nous traçons le diagramme de Taylor pour Cassidaigne, représentant le coefficient de corrélation ainsi que l'écart-type en fonction de la profondeur, et un diagramme cible (figure 7), représentant le biais et la rms centrée (rms des écarts de températures de la configuration et de la station), dont le signe dépend de celui de la différence entre l'écart type de la configuration et celui des mesures, en fonction de la profondeur (voir les formules en annexe 2a).

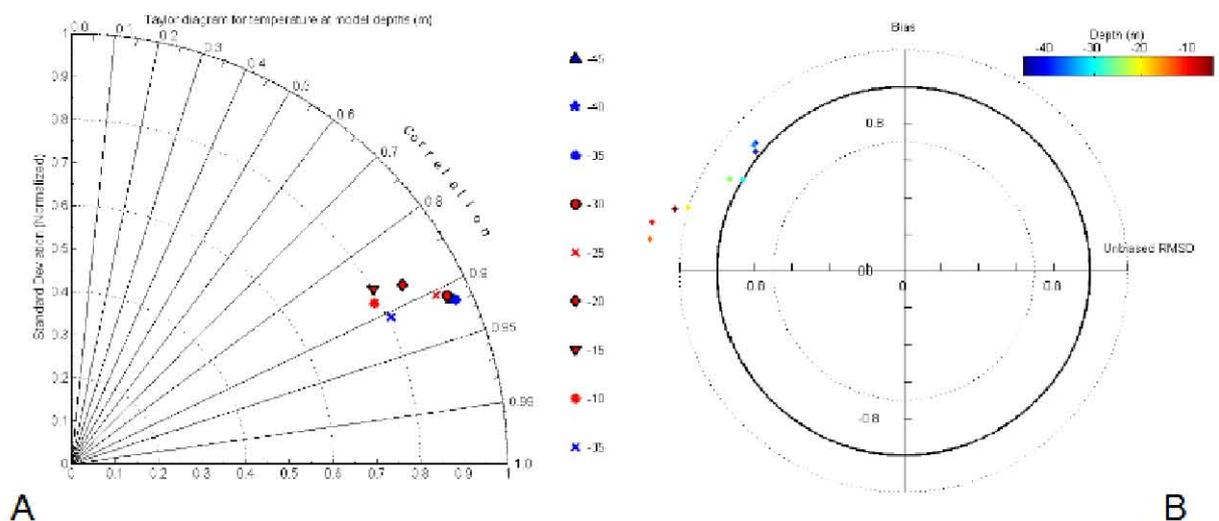


Figure 7: A) Diagramme de Taylor pour la température de la station Cassidaigne pour CASCANL et B) Diagramme cible correspondant.

D'après la figure 7A, les coefficients de corrélation sont proches de 0,9 donc le modèle reproduit bien les températures observées, avec une tendance à sous-estimer leurs variations d'après l'écart-type normalisé (inférieur à 1).

Ces diagrammes expliquent aussi pourquoi le biais est plus important pour les stations Cassidaigne et Planier Veyron : en effet à l'aide du diagramme cible (figure 7B), nous voyons que le biais augmente avec la profondeur et les stations sont plus profondes.

Cependant ces données présentent une rms centrée plus faible et un coefficient de corrélation plus proche de 1. La meilleure précision des données issues de la configuration CASCANL pour les profondeurs plus importantes peut être due à la faible résolution du modèle ARPEGE par rapport à celle notre configuration, il faudrait faire une autre simulation utilisant les données d'un modèle météorologique ayant une meilleure résolution (AROME par exemple) qui reproduirait les variations de vent locales (et peut-être mieux la température de l'air également).

Nous avons fait les mêmes types de diagrammes avec les données de MENOR (voir annexe 2b), les résultats issus de cette analyse sont similaires à ceux obtenus avec CASCANL mais avec des statistiques moins bonnes conformément aux résultats du tableau 2.

### **III.2 Capacité du modèle à reproduire les processus hydrodynamiques**

#### **a) Le long des trajets SAVED**

Afin de pouvoir comparer les données des trajets SAVED aux données de la configuration CASCANL, les courants, la température et la salinité ont été extraits « online » du modèle de façon à prendre en compte la forte variabilité temporelle des courants dans la zone.

Nous éliminons dans un premier temps certains trajets jugés peu intéressants car trop proches des frontières du domaine, puis nous effectuons des comparaisons entre la température et la salinité du thermosalinographe (TSG) du TETHYS II et celles de la configuration CASCANL interpolées à la profondeur de la mesure, parmi tous les trajets auxquels nous avons fait les comparaisons de salinité et de température (annexe 3), nous avons remarqué des événements particuliers : celui du 8-9 Novembre 2013 (S\_13\_147) par exemple. La figure 8 présente les températures modélisées et observées à deux mètres sur le trajet qui va du Sud du Cap Couronne (Nord-Ouest du domaine) jusqu'au Sud du Cap Sicié. Durant son trajet, le bateau rencontra d'abord les eaux d'un panache du Rhône du Sud Cap

Couronne au Sud de Marseille (caractérisées par une salinité plus basse qu'aux alentours) puis une fois dépassé Marseille, il mesura la signature d'un upwelling survenu quelques jours auparavant (caractérisée par une baisse de température en surface et des courants de surface dirigés vers le large).

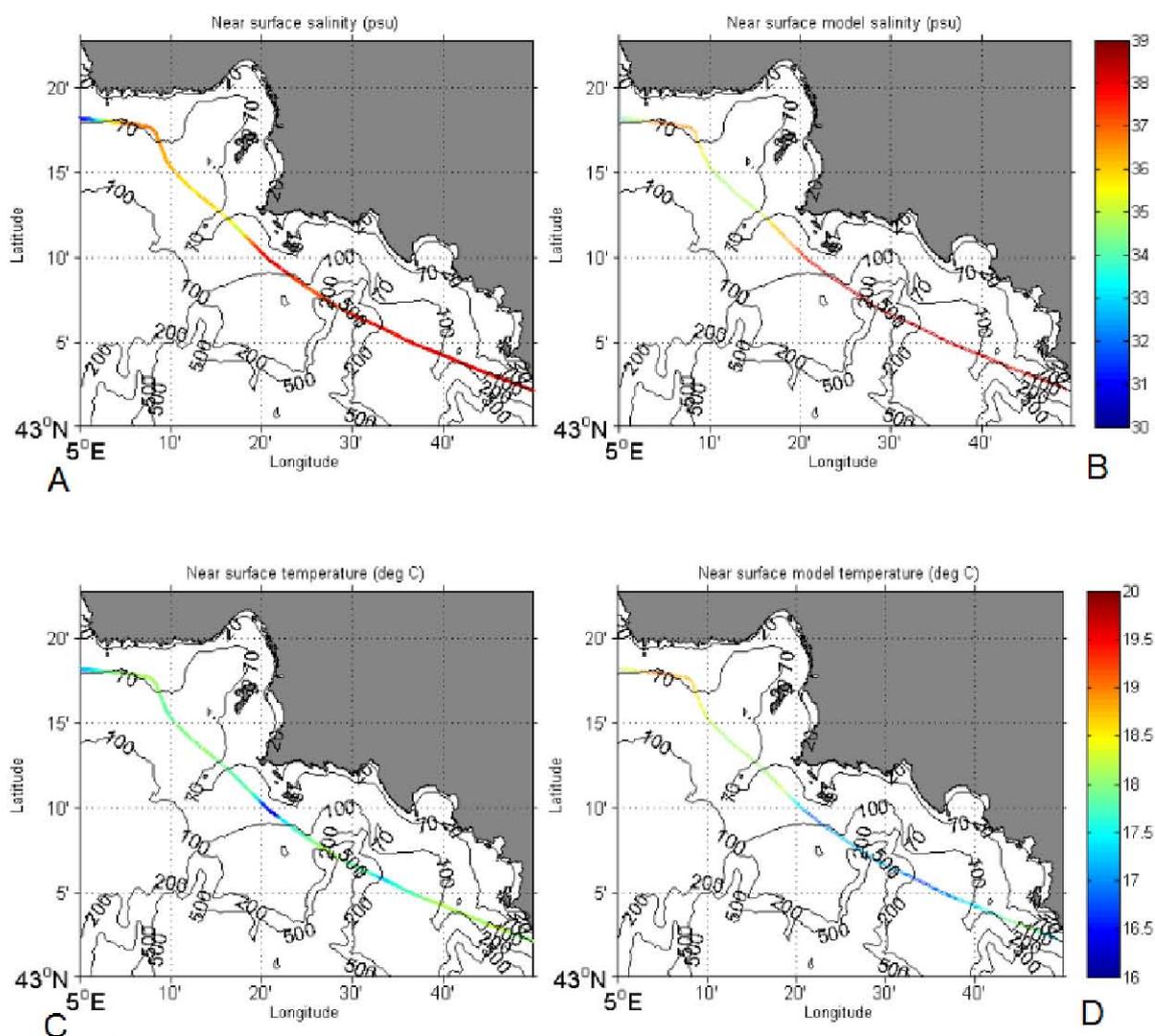


Figure 8 : Trajet du TETHYS II du 9 Novembre 2013 : A) Salinité mesurée; B) Salinité simulée par CASCANL; C) Température mesurée; D) Température simulée par CASCANL.

Les comparaisons avec la configuration CASCANL montrent que celle-ci reproduit bien temporellement les différents événements le long du trajet (figure 9), cependant la signature de l'upwelling décrite par CASCANL est plus large et plus chaude que celle observée par le TSG, et CASCANL surestime la température et sous-estime la salinité associées à l'intrusion des eaux du Rhône dans la baie de Marseille.

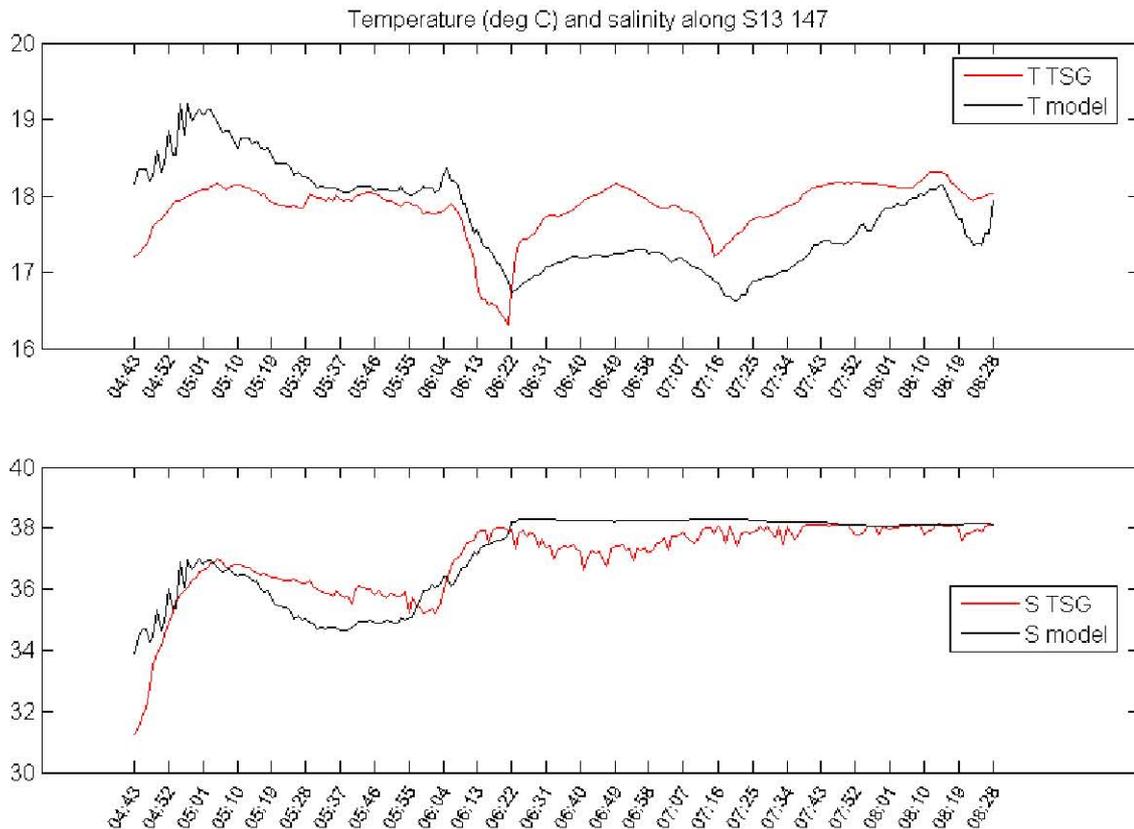


Figure 9 : Séries temporelles de la température et de la salinité du TSG (rouge) et de la configuration CASCANL (noir) pour le trajet S\_13\_147 du TETHYS II.

Concernant les autres trajets, la configuration a tendance à surestimer la température mais représente bien la salinité, à l'exception d'un événement d'intrusion des eaux du Rhône présent uniquement pour le modèle le 1er Novembre 2013 (voir annexe 3).

Nous regardons à présent les données de courants mesurées par l'ADCP du TETHYS II et nous recherchons comme précédemment un trajet présentant un événement particulier sur les courants, celui-ci est le trajet du 4 Novembre 2013 (S\_13\_145). Ce trajet partait, dans le domaine CASCANL, du milieu de sa frontière Sud puis remontait vers le Nord-Ouest avant de se terminer à La Ciotat, pendant ce trajet l'ADCP mesura un cisaillement horizontal dans les courants (figure 10), présent sur toute la profondeur de la mesure (environ 50 mètres) excepté en surface.

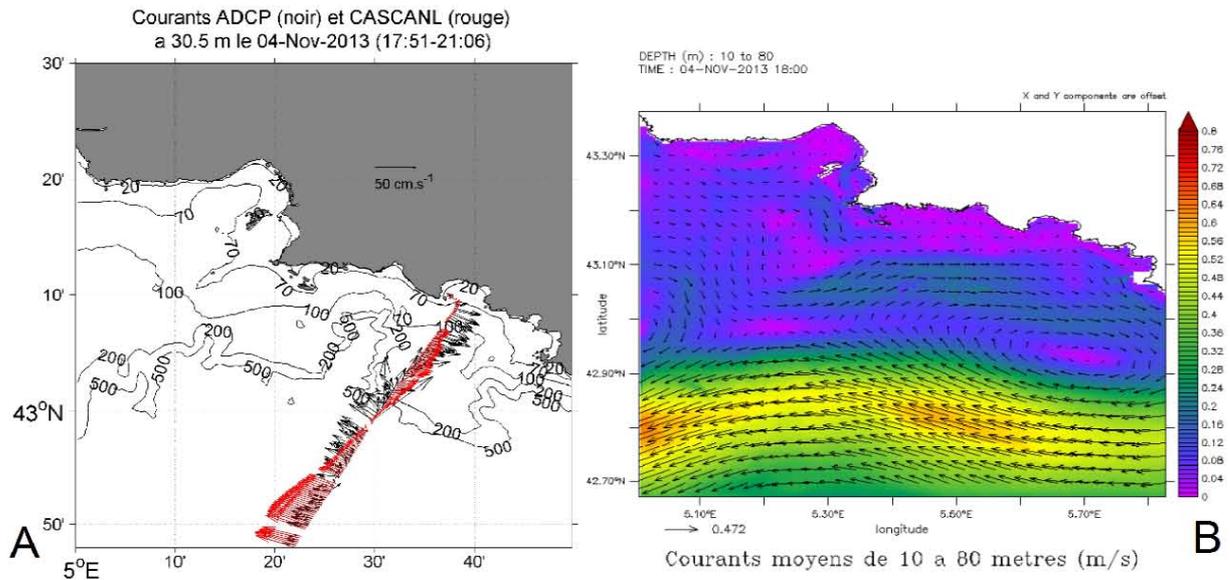


Figure 10 : A) Trajet S\_13\_145 du TETHYS II avec les courants de l'ADCP (noir) et ceux de CASCANL (rouge) à 30,5 mètres de profondeur ; B) Tourbillon modélisé lors du trajet (courants moyens de 10 à 80 mètres) le 4 Novembre 2013 à 18 heures.

Ce cisaillement est reproduit par la configuration CASCANL mais la renverse se trouve plus au Sud, de plus elle est présente sur toute la colonne d'eau alors que pour l'ADCP elle est absente en surface (figure 11).

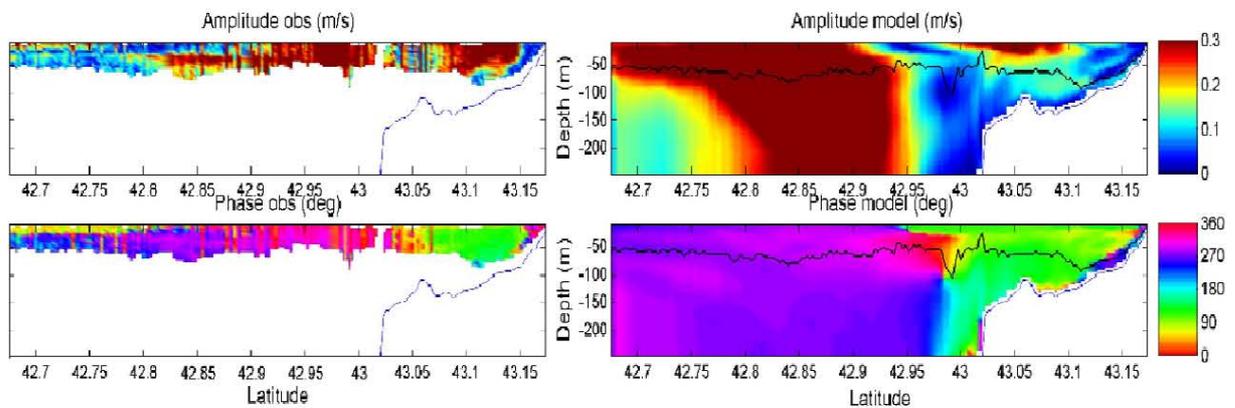


Figure 11 : Amplitudes ( $m.s^{-1}$ ) et phases ( $^{\circ}$ ) des courants en fonction de la latitude (haut et bas respectivement) de CASCANL et de l'ADCP (droite et gauche respectivement) du trajet S\_13\_145 du TETHYS II.

La renverse de courant résulte d'un tourbillon créé par l'activité méso-échelle du Courant Nord-Méditerranéen, qui est dévié vers le Nord-Ouest créant ainsi un courant de retour associé à un tourbillon. De plus nous sommes dans une situation de début d'upwelling ce qui modifie la direction des courants de surface. Concernant l'intensité des courants, elle est surestimée au Sud et bien représentée au Nord, mais la renverse est décalée vers le Sud

pour CASCANL.

Pour les autres trajets que nous avons conservés (annexe 3), les résultats sont assez similaires : les directions des courants sont plutôt bien reproduites, cependant les intensités ne sont pas toujours bien modélisées.

### b) Comparaisons aux images satellites :

La comparaison aux images de température de surface (SST) et de couleur de l'eau (chlorophylle-a) permet de confirmer que la configuration reproduit les bonnes structures hydrologiques en surface pour une date donnée.

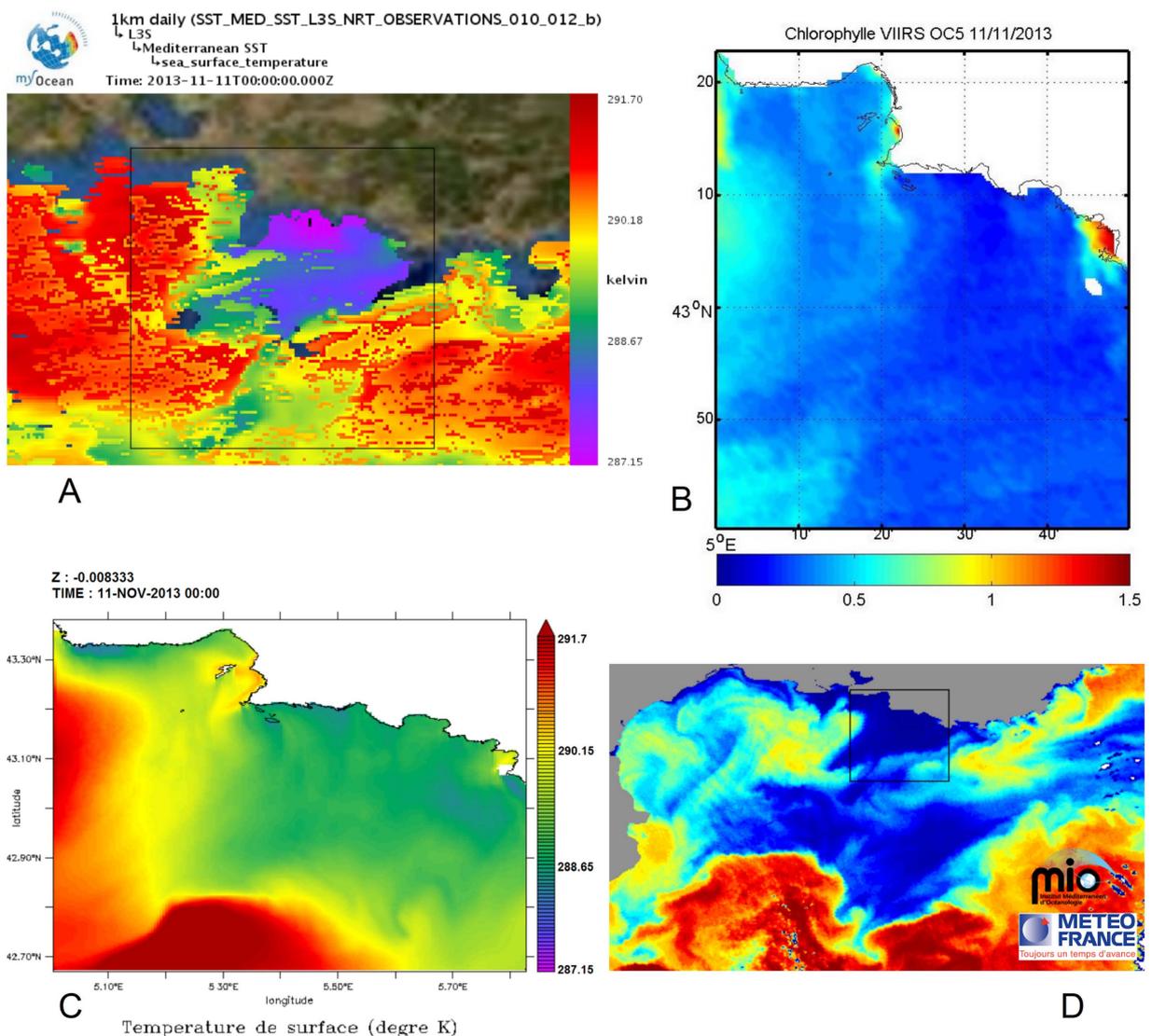


Figure 12 : Images satellites du 11 Novembre 2013 A) SST L3S au km de MyOcean ; B) Concentration en chlorophylle-a de VIIRS ; C) SST simulée par CASCANL ; D) SST du CMS Golts (fausses couleurs).

Un événement d'upwelling caractérisé par des températures basses à la côte a été observé le 11 Novembre 2013 d'après les données L3S de MyOcean (figure 12A), ainsi que les données CMS Golts environ 16 heures plus tard (figure 12D). Il est également présent et les structures sont plutôt bien reproduites par la simulation CASCANL (figure 12C). Celle-ci surestime la température par rapport à la carte de SST L3S mais il est difficile de comparer à cette mesure moyennée et entachée des effets de peau.

Cet événement d'upwelling est également caractérisé à partir de la chlorophylle observée par les satellites VIIRS (figure 12) et MODIS car la région des calanques est une zone particulière qui voit sa concentration en chlorophylle-a diminuer lorsqu'elle est soumise à un upwelling [Pinazo C., 2013].

Les mêmes constats sont faits pour la comparaison aux autres images satellites disponibles : tendance à la surestimation de la température par la configuration mais des structures bien reproduites.

Pour conclure, nous venons de voir que malgré le fait que la configuration CASCANL ait tendance à surestimer les températures, elle est cohérente temporellement et spatialement avec les observations et elle est plus précise que la configuration de plus grande échelle MENOR.

#### **IV) Caractéristiques hydrodynamiques de la zone du canyon :**

Une fois la configuration CASCANL validée, nous pouvons nous focaliser sur les résultats de celle-ci afin de répertorier les différentes situations hydrodynamiques de la zone d'étude dans son intégralité mais aussi de la zone de vie des coraux, au fond du canyon de Cassidaigne.

##### **IV.1 Caractéristiques de la zone d'étude CASCANL :**

A cause des régimes de vent soufflant sur la zone et de la configuration géographique des côtes, plusieurs types d'événements peuvent se produire, notamment des upwellings par vents de Nord-Ouest et des downwellings par vents d'Est à Sud-Est.

Du fait de la proximité du Rhône ainsi que de la présence du Courant Nord (CN) dans

notre zone d'étude, il peut y avoir de intrusions des eaux du Rhône à l'Ouest de notre domaine et des intrusions du CN sur le plateau du Golfe du Lion depuis le Sud-Est.

Durant toute la période de simulation CASCANL, nous avons répertorié sept événements d'upwellings (annexe 4) dont deux importants en terme de gradient de température et de durée : l'un se déroulant du 9 Septembre 2013 au 20 Septembre, sa « signature » (présence d'eau froide à la côte) disparaissant le 28 Septembre (figure 13), l'autre se déroulant du 5 Novembre 2013 au 15 Novembre, sa signature disparaissant le 19 Novembre. Les chutes de températures sont d'environ 8,5 degrés Celsius et de 5,4 degrés Celsius respectivement. La majorité des upwellings présente une signature en température dans la région des calanques de Marseille et quelques uns dans la région de la côte bleue (Nord-Ouest du domaine). La présence du canyon a tendance à renforcer le processus.

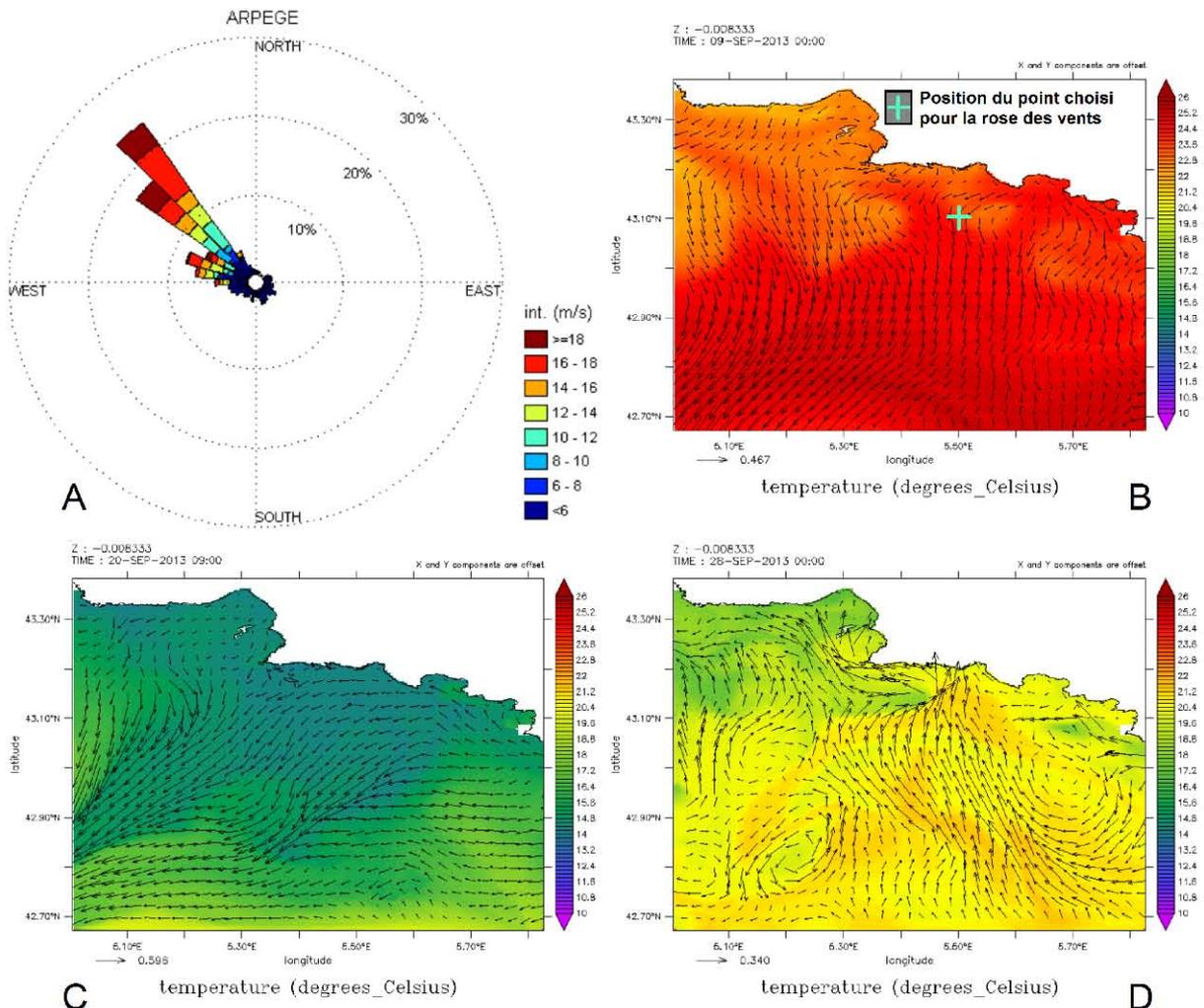


Figure 13 : Upwelling modélisé par CASCANL du 9 au 28 Septembre 2013 :  
 A) Vent du modèle ARPEGE du 8 au 28 Septembre 2013 à la position 5,5°E et 43,1°N ;  
 B) Température et courants de surface en début d'upwelling ; C) Température et courants de surface en fin d'upwelling ; D) Température et courants de surface après disparition de la signature de l'upwelling.

Contrairement aux upwellings, les downwellings se développent lorsqu'il y a des vents de Sud-Est, ainsi il y en a beaucoup moins que les upwellings, mais nous en avons cependant recensé quatre durant notre période de simulation.

Afin de pouvoir les observer, nous traçons les températures et les courants de surface, les températures et les courants à 100 mètres de profondeur ainsi que la rose des vents soufflant en un point proche du canyon (figure 14).

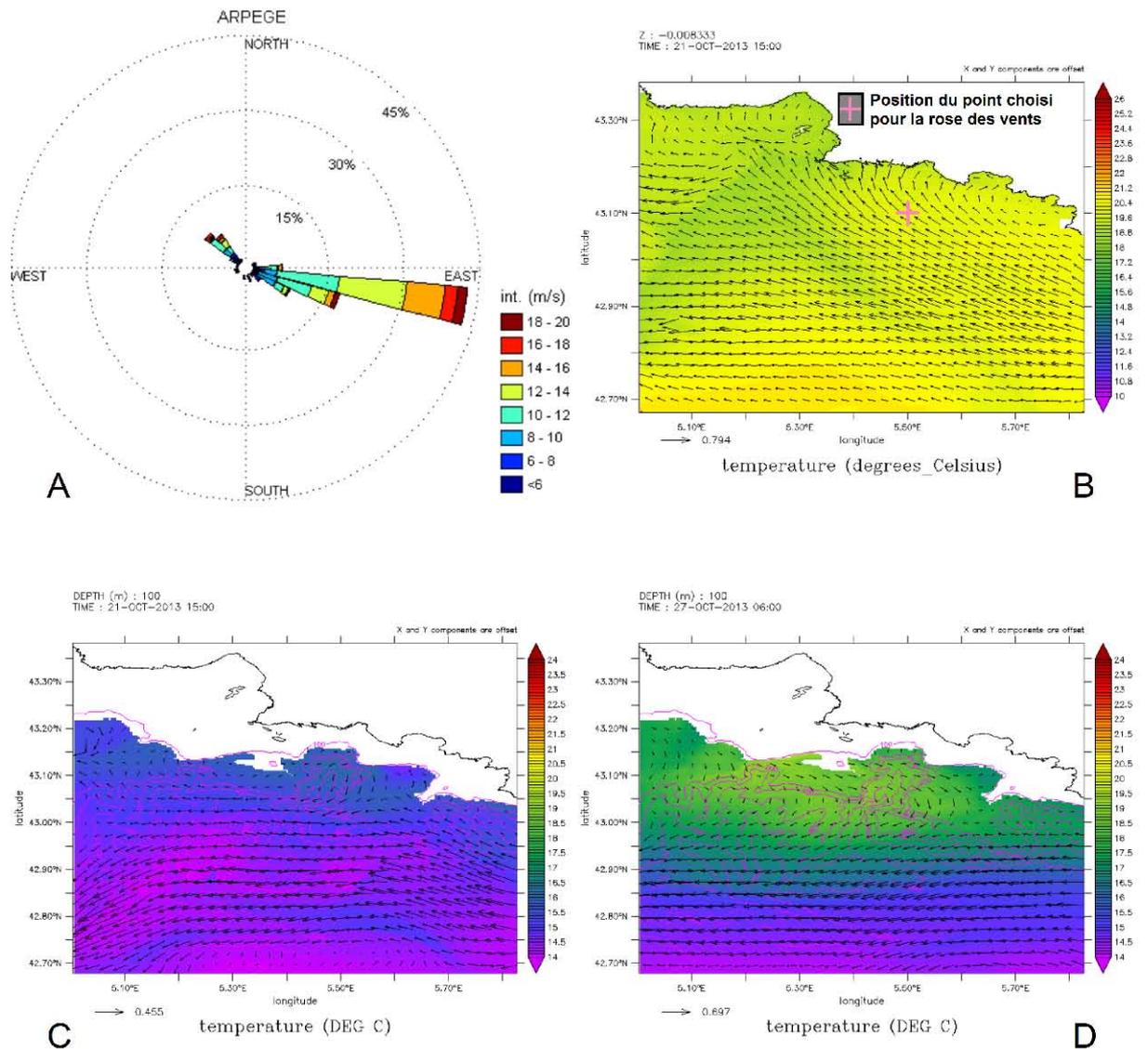


Figure 14 : Downwelling modélisé par CASCANL du 21 au 30 Octobre 2013 :  
 A) Vent du modèle ARPEGE du 17 au 30 Octobre 2013 à la position 5,5°E et 43,1°N ;  
 B) Température et courants de surface en début de downwelling ; C) Température et courants à 100 mètres de profondeur en début de downwelling ; D) Température et courants à 100 mètres de profondeur en fin de downwelling.

Lors d'un downwelling, les courants de surface sont dirigés vers la côte (figure 14B), cela est dû au régime de vent Est Sud-Est soufflant sur le domaine (figure 14A) et cela

entraîne une plongée des eaux de surface et ainsi une augmentation locale de la température dans les couches d'eau plus profondes (figure 14C et 14D). Les températures diminuent à nouveau à partir du 27 Octobre à six heures.

Un autre phénomène survenant fréquemment lors de notre simulation est l'intrusion d'eaux dessalées (et donc de masse volumique faible) en provenance du Rhône. L'intrusion de ces eaux dans notre zone d'étude est facilement repérable à l'aide de la salinité de surface qui présente un très fort gradient spatial lors de tels événements (figure 15).

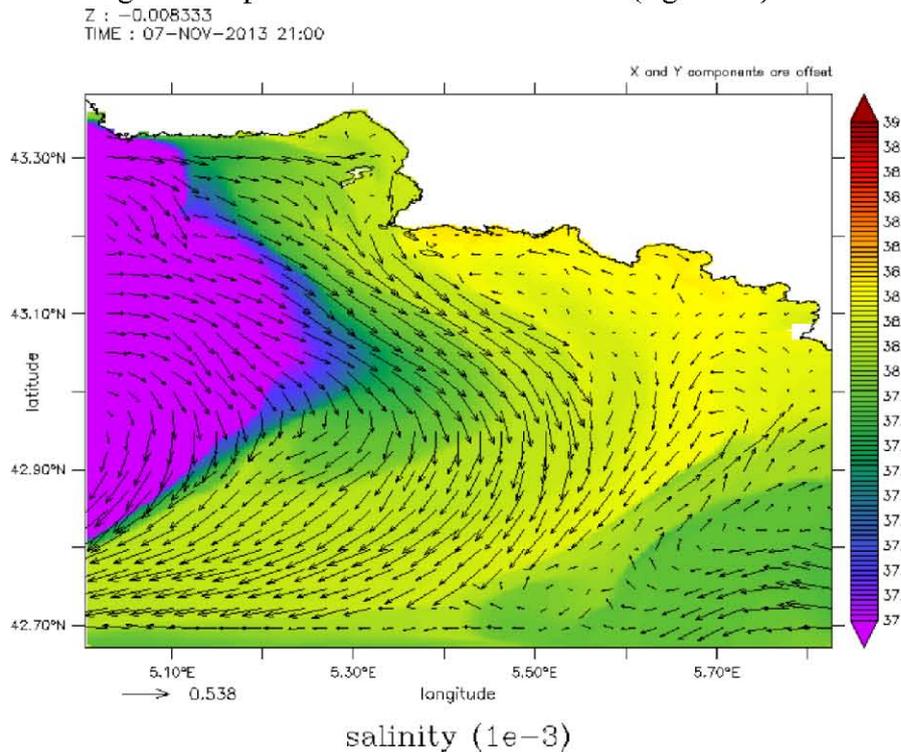


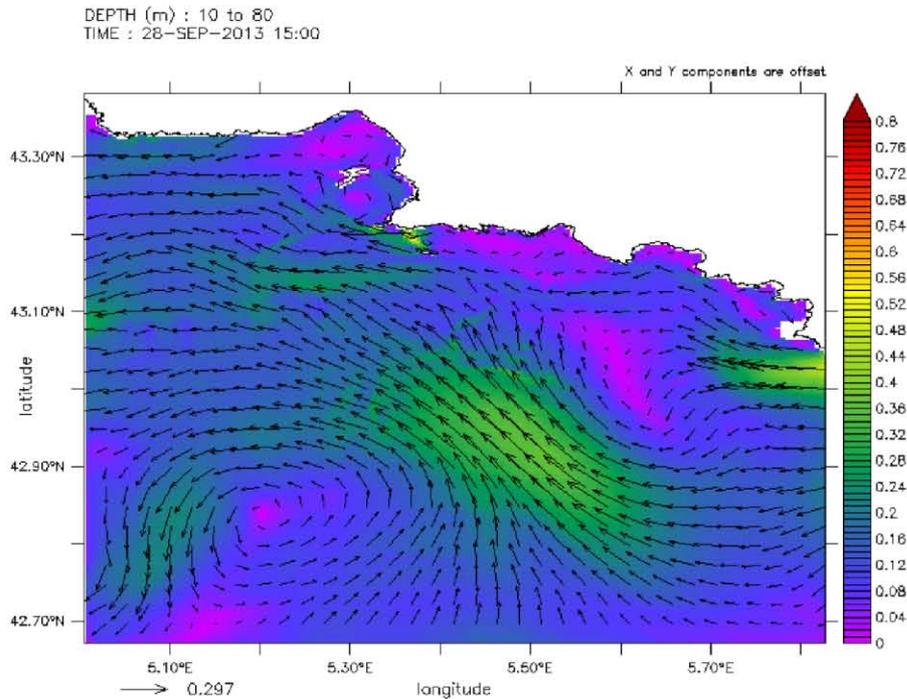
Figure 15 : Exemple d'intrusion d'eaux du Rhône dans le domaine CASCANL le 7 Novembre 2013 à 21 heures d'après la salinité et les courants de surface.

Ces événements surviennent régulièrement tout au long de la simulation et nous avons dénombré 14 occurrences (voir annexe 5). Nous avons calculé la durée d'intrusion de ces eaux à partir du moment où celles-ci apparaissent dans le domaine jusqu'au moment où elles disparaissent, soit en se mélangeant avec les eaux environnantes, soit en sortant du domaine.

Ces intrusions ont un temps de rétention des eaux très variable, pouvant aller de quelques heures à une vingtaine de jours, qui dépend principalement des courants de surface de la partie Ouest du domaine et donc des vents.

L'extension dans le domaine de ces intrusions dépend aussi des courants de surface et peut aller jusqu'au large des calanques de Marseille.

Le dernier type d'événement présent lors de la simulation est l'intrusion du Courant Nord sur le plateau du Golfe du Lion. Ce courant s'écoule aux abords de la frontière Sud de notre configuration et généralement vers l'Ouest mais il peut arriver que le CN subisse une inflexion vers le Nord et envahisse le plateau du Golfe du Lion (figure 16).



Courants moyens de 10 a 80 metres (m/s)

Figure 16 : Exemple d'intrusion du CN sur le plateau du Golfe du Lion modélisée par la configuration CASCANL le 28 Septembre 2013 à 15 heures.

Ces intrusions sont au nombre de sept pour toute la durée de la simulation et sont caractérisées par des courants entrants sur le plateau depuis 10 mètres de profondeur (afin d'enlever la contribution du vent aux courants) jusqu'à plus de 80 mètres de profondeur.

#### IV.2 Caractéristiques hydrodynamiques dans la zone de vie des coraux :

Afin d'étudier les courants s'écoulant dans la zone de vie des coraux, nous utilisons un programme Matlab de calcul et de tracé des courants maximums, ici sur toute la durée de la simulation et pour les dix premiers mètres au dessus du fond (figure 17 A). Nous avons aussi développé un programme Matlab permettant de tracer la moyenne temporelle et verticale des courants, dans les intervalles de temps et de profondeur voulus, ainsi que les ellipses de variance à 65% de variabilité autour des valeur moyennes [Billy Kessler, [http://www.pmel.noaa.gov/maillists/tmap/ferret\\_users/fu\\_2005/msg00315.html](http://www.pmel.noaa.gov/maillists/tmap/ferret_users/fu_2005/msg00315.html)] associées à ces courants (figure 17 B).

Ces courants sont importants pour les coraux car les courants moyens permettent d'apporter les substances nutritives de façon continue aux coraux tandis que les courants maximums permettent de les nettoyer des impuretés.

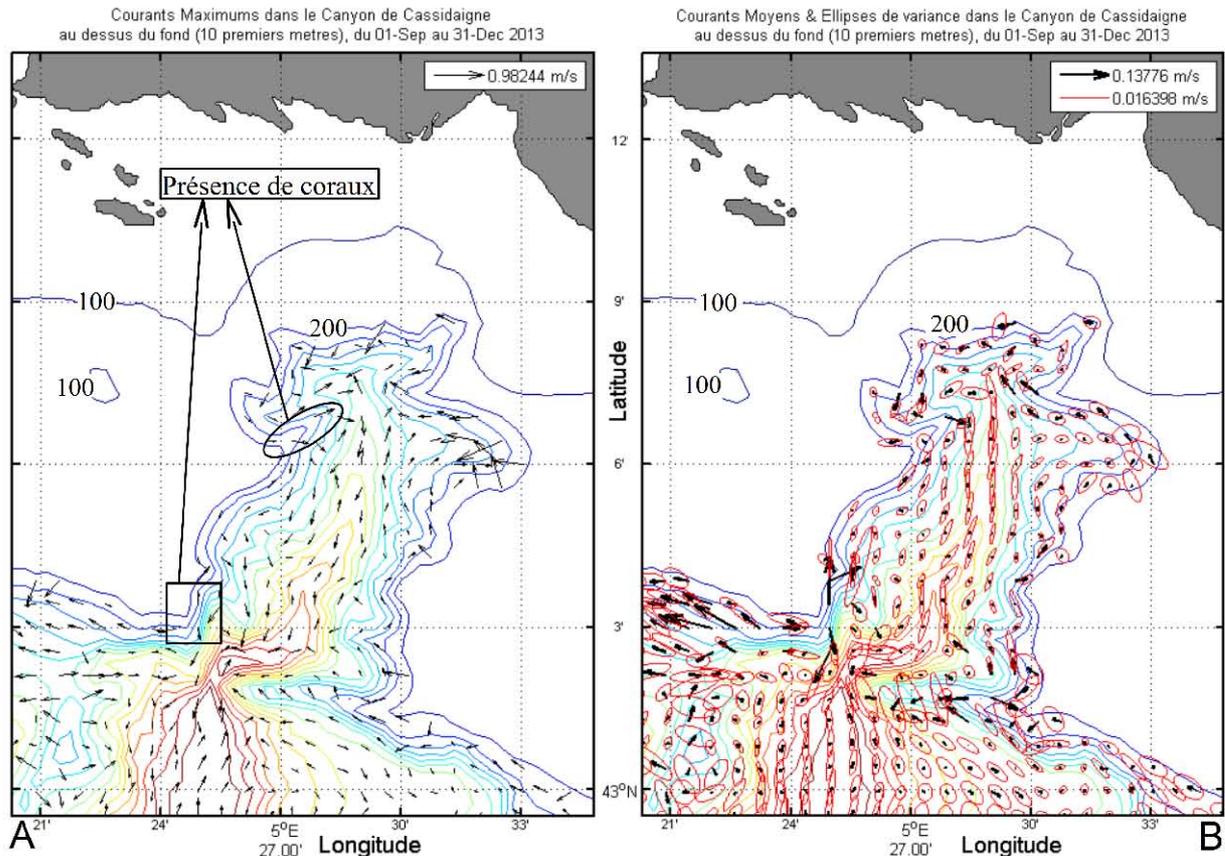


Figure 17 : A) Courants maximums ; B) Courants moyens avec ellipses de variance à 65% simulés par CASCANL pour la période du 1<sup>er</sup> Septembre au 31 Décembre 2013 sur les dix derniers mètres avant le fond à partir de 200 mètres de profondeur.

Nous remarquons que les courants moyens (figure 17 B) suivent la bathymétrie du canyon et que les ellipses de variance représentent toutes les directions sur les bords du canyon mais elles sont orientées Nord-Sud dans le lit de celui-ci. Cela signifie que les nutriments nécessaires aux coraux d'eau froide proviennent principalement des bords du canyon. Nous remarquons également que les courants maximums sont dirigés, quant à eux, du plateau continental vers le lit du canyon sur le pourtour du canyon et dirigés vers le Nord ou le Sud dans le lit, les courants servant à nettoyer les coraux sont donc plutôt des plongés d'eau du plateau vers le lit du canyon.

De plus, nous pouvons voir que les courants moyens sont plus intenses aux lieux de présence des coraux que dans le reste du canyon (autre représentation en annexe 6), ce qui favorise la présence de coraux dans ces zones.

Nous nous intéressons désormais aux courants du canyon durant un événement d'upwelling, comme celui-ci doit être assez puissant pour engendrer un mouvement au fond, nous ne prendrons en compte que les deux upwellings principaux de notre période.

Globalement, les courants sont dirigés vers l'extérieur du canyon dans les couches d'eau intermédiaire (figure 18) vers le Nord en tête de canyon ainsi qu'au fond (interpolés à 20 mètres au dessus du fond, non montré). Il arrive cependant que sur la période les courants de fond oscillent entre le Nord et le Sud (figure 19).

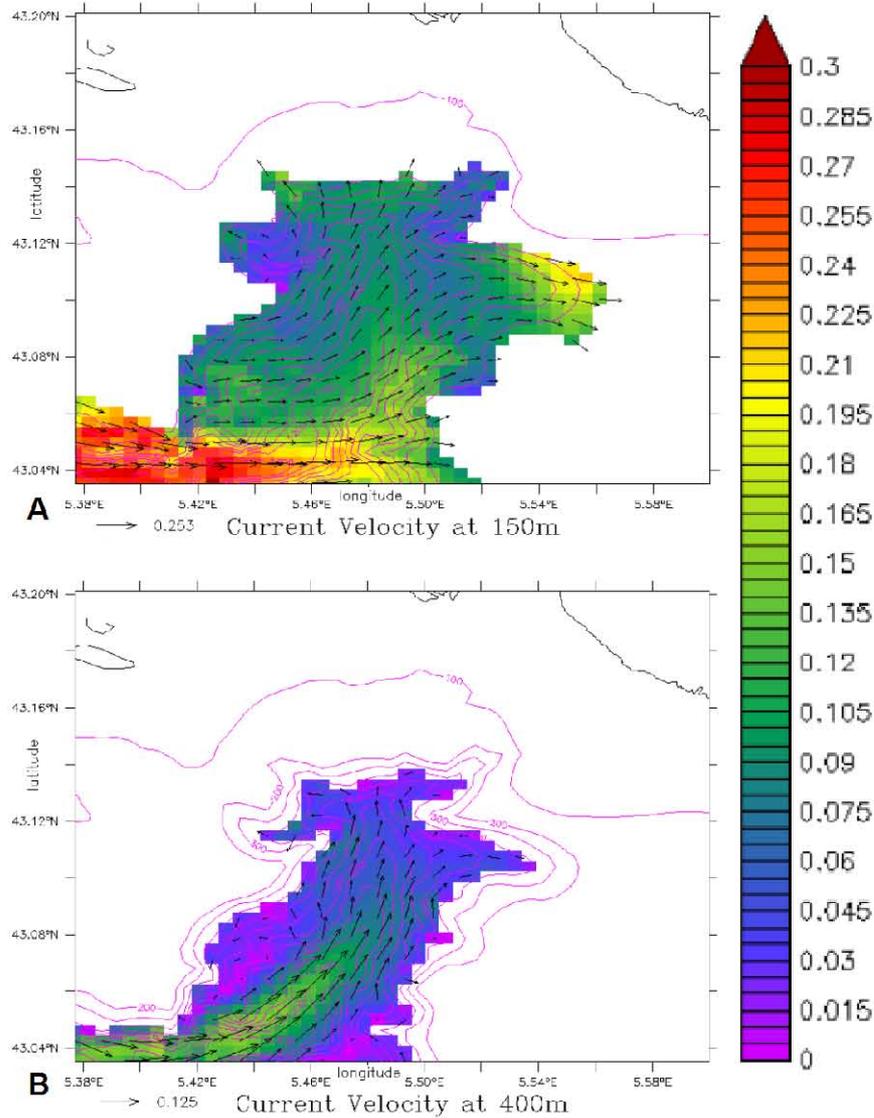


Figure 18 : Courants horizontaux (en m/s) lors d'un upwelling, le 11 Novembre 2013 à 9 heures : A) à 150 mètres de profondeur et B) à 400 mètres de profondeur.

Ces courants sont cohérents avec la situation d'upwelling qui implique des remontées d'eau profonde et donc des courants horizontaux dirigés du large vers la côte dans les couches d'eau profondes.

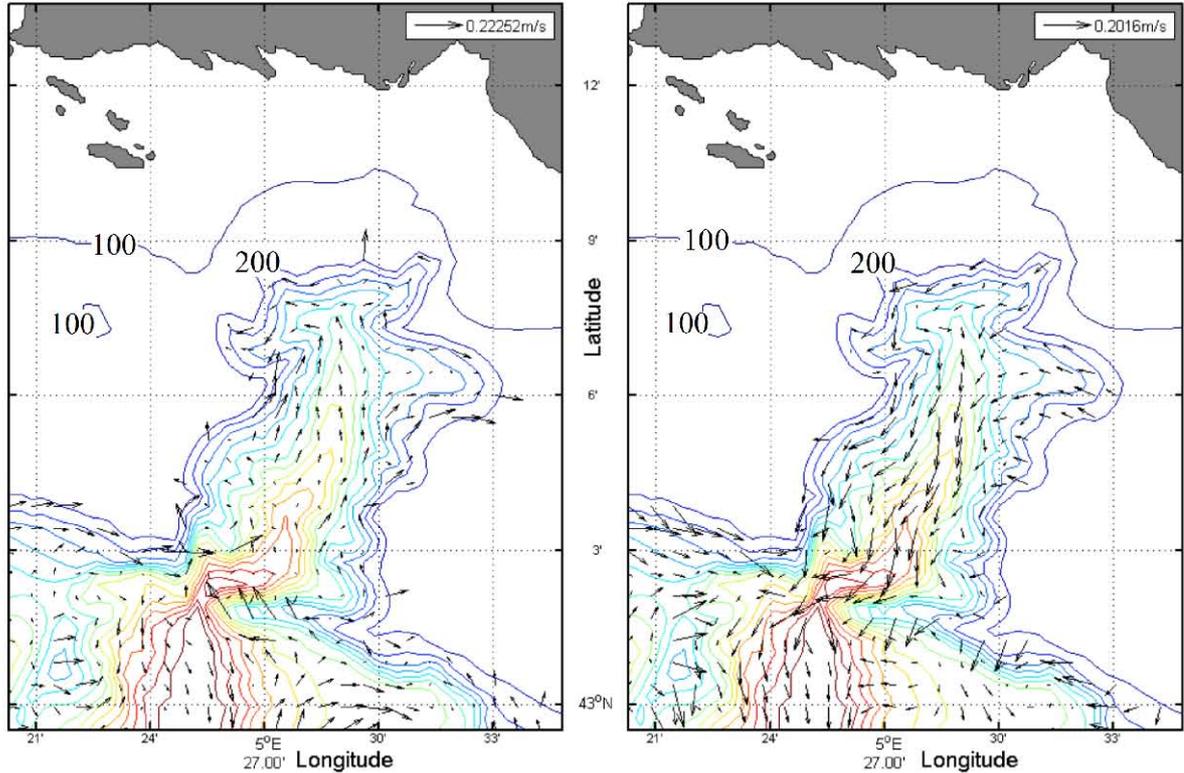


Figure 19 : Courants interpolés à 20 mètres au dessus du fond le 11 Novembre à 6 heures (gauche) et à 12 heures (gauche).

Les coraux qui vivent dans le canyon de Cassidaigne sont des coraux d'eau froide : ils ne peuvent pas survivre très longtemps dans une eau étant à plus de 15 degrés Celsius. Sachant cela, nous calculons les températures moyennes et maximales dans le fond du canyon ainsi que leurs écart-type (figure 20).

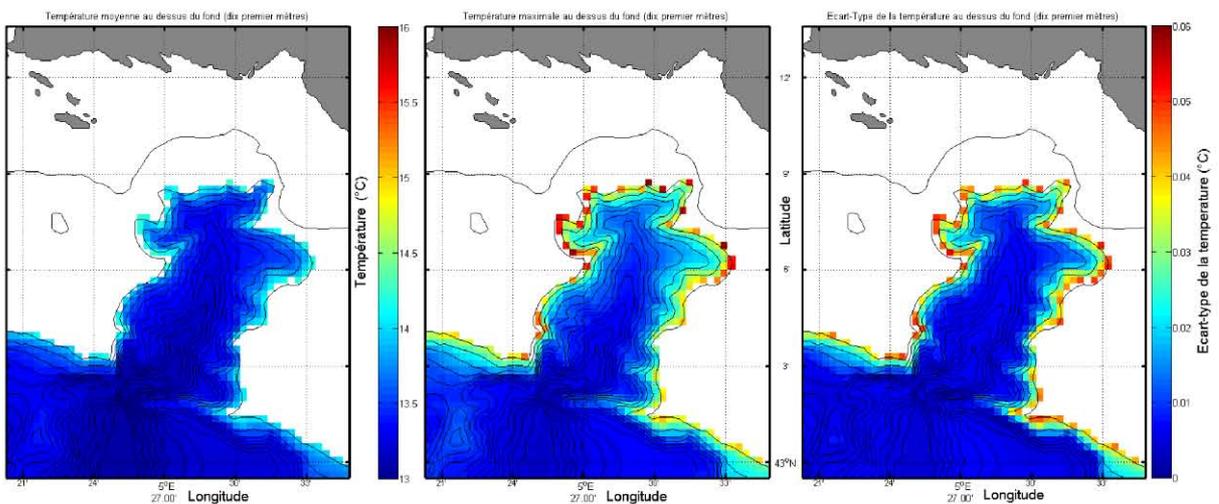


Figure 20 : Températures moyennes (gauche), maximales (milieu) et écart-types (droite) sur les 10 premiers mètres au dessus du fond du 1<sup>er</sup> Septembre au 31 Décembre 2013.

Ces températures sont assez basses en moyenne et bien que le maximum puisse dépasser les 15 degrés Celsius, l'écart-type reste très faible (inférieur à  $0,1^{\circ}\text{C}$ ), ce qui implique que les températures maximales proviennent d'événements extrêmes ne durant que peu de temps. Elles sont donc idéales pour le développement des coraux d'eau froide.

Nous faisons la même étude sur la salinité près du fond, celle-ci ne varie que très peu durant la simulation (écart-type inférieure à 0,01) avec des valeurs moyennes allant de 38,4 à 38,7 et des maximums ne dépassant pas 38,7 (annexe 7).

## **V) Conclusion et perspectives**

Afin d'étudier l'hydrodynamique du canyon de Cassidaigne, nous avons mis en place une configuration du modèle MARS3D nommée CASCANL, imbriquée dans la configuration opérationnelle MENOR et forcée par les champs du modèle atmosphérique de Météo-France ARPEGE.

Nous avons ensuite validé la configuration CASCANL à l'aide d'observations variées, aussi bien in-situ que satellitaires, se situant dans notre zone d'étude durant la période de simulation. Les résultats indiquent que CASCANL reproduit d'une part la variabilité saisonnière de la température (chaude en fin d'été puis baisse progressive jusqu'à fin Décembre) et d'autre part les différents événements (upwellings, intrusions des eaux du Rhône) se produisant dans la zone.

Après avoir validé la configuration CASCANL, nous avons utilisé les résultats des simulations afin de repérer et de lister les événements particuliers se déroulant à plusieurs reprises durant notre simulation tels que les upwellings, les downwellings, les intrusions des eaux du Rhône et les intrusions du Courant Nord sur le plateau du Golfe du Lion. Les deux principaux vents de la zone sont favorables au développement soit d'upwellings soit de downwellings, avec une probabilité plus élevée pour les upwellings car associés aux vents dominants de Nord-Ouest.

Enfin nous avons utilisé la configuration pour étudier l'hydrodynamique dans les zones de vie des coraux dans le canyon de Cassidaigne. Nous avons pu confirmer que les courants situés aux endroits colonisés par les coraux étaient plus intenses que les courants dans le lit du canyon et aux alentours, ce qui indique la raison pour laquelle les coraux ont colonisé ces

espaces plutôt que les autres.

Les températures du fond du canyon près des zones de vie des coraux sont adéquates pour le bon développement de ceux-ci car elles sont basses en moyennes, les écart-types associés sont faibles et bien que certaines dépassent les 15 degrés Celsius (température limite de vie des coraux d'eau froide), il s'agit d'événements extrêmes se produisant rarement de durée brève.

Ce stage m'a donc permis de mieux comprendre la physique au niveau de ce canyon sous-marin, j'ai pu acquérir des connaissances concernant les espèces de coraux vivant en Méditerranée Nord Occidentale et développer mes compétences en programmation.

Nous avons comme perspective concernant la suite de ce stage de forcer la configuration CASCANL par les sorties atmosphériques du modèle météorologique à haute résolution AROME afin de voir si l'augmentation de résolution des forçages atmosphériques a un impact sur les processus représentés et permet de réduire l'écart de température aux observations.

Nous allons aussi faire l'étude de la configuration CASCANS et de la configuration impactée par celle-ci afin de savoir si les changements induits par CASCANS dans CASCANL permettent de mieux représenter la physique de la zone d'étude ou non et si le zoom est plus précis.

Enfin, nous utiliserons la configuration de très haute résolution CASCANS pour étudier l'hydrodynamique dans le canyon de Cassidaigne et plus spécifiquement les zones de vie des coraux.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Albérola C., Millot C., 2003. Circulation in the French mediterranean coastal zone near Marseilles: the influence of wind and the Northern Current. *Continental Shelf Research* 23: 587-610.

Buogiorno Nordelli B., Tronconi C., Pisano A., Santoleri R. (2013). High and UltraHigh resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project. *Remote Sensing of Environment* 129: 1-16.

Dauvin J-C., 2010. Toward an impact assessment of bauxite red mud waste on the knowledge of the structure and the functions of bathyal ecosystems: The example of the Cassidaigne canyon (north-western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin* 60: 197-206.

Fabri M-C., Pedel L., Beuck L., Galani F., Hebbeln D., Freiwald A., 2013. Megafauna of vulnerable marine ecosystems in French mediterranean submarine canyons: Spatial distribution and anthropogenic impacts. *Deep-Sea Res. II* , <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.06.016i> .

Howatt T. M., Allen S. E., 2013. Impact of the continental shelf slope on upwelling through submarine canyons. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 118, 5814-5828, doi : 10.1002/jgrc.20401, 2013.

Pairaud I.L., Gatti J., Bensoussan N., Verney R., Garreau P., 2011. Hydrology and circulation in a coastal area off Marseille: Validation of a nested 3D model with observation. *Journal of Marine Systems* 88 20-33.

Pinazo et al., 2013. Rapport MASSILIA: Modélisation de la baie de MarSeILLe : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin.

## ANNEXES

Annexe 1 : équation de MARS3D et grille Arakawa-C1

Annexe 2 : Calculs statistiques

- a) Calculs statistiques et tableau des données
- b) Diagrammes de comparaison des températures modélisées aux températures TMedNet

Annexe 3 : trajets, comparaisons des températures, des salinités et des intensités et directions des courants des autres trajets SAVED

Annexe 4 : tableau récapitulatif des upwellings

Annexe 5 : tableau récapitulatif des intrusions des eaux du Rhône

Annexe 6 : courants moyens et maximums dans le fond du canyon

Annexe 7 : salinité maximale, moyenne et écart-type dans le fond du canyon

ANNEXE 1 : équation de MARS3D et grille Arakawa-C1

Équation de Navier-Stokes avec approximations de Boussinesq et hydrostatique :

Selon x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{\partial(Nz \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} + F_x \quad \text{Eq 1.}$$

Selon y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y} + \frac{\partial(Nz \frac{\partial v}{\partial z})}{\partial z} + F_y \quad \text{Eq 2.}$$

Avec :  $F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_x \frac{\partial u}{\partial x} \right)$  Eq 3 et  $F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left( v_y \frac{\partial u}{\partial y} \right)$  Eq 4.

Selon la verticale :

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = \rho_0 b \quad \text{Eq 5.}$$

Continuité :  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$  Eq 6.

Équations de la thermodynamique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \left( uT - k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( vT - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( wT - k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad \text{Eq 7 ;}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \left( uS - k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( vS - k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( wS - k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq 8.}$$

Avec :

- \_ u,v et w les composantes de la vitesse des courants
- \_  $f = 2\Omega \sin(\phi)$  Eq 8 ; le paramètre de Coriolis
- \_ g l'accélération de la pesanteur
- \_  $\eta$  la surface libre
- \_  $\rho_0$  la masse volumique de référence
- \_ Pa la pression atmosphérique
- \_  $p' = -\rho_0 \int_z^\eta b dz$  Eq 9 ; l'anomalie de pression
- \_  $b = -g(\rho - \rho_0)/\rho_0$  Eq 10 ; la flottabilité

\_ Nz le coefficient de viscosité turbulente verticale

En coordonnées  $\sigma$ , ces équations deviennent :

$$\text{Selon } x : \frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial x} + \pi_x + \frac{1}{D} \frac{\partial \left( \frac{nz}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} + F_x \quad \text{Eq 9.}$$

$$\text{Selon } y : \frac{\partial v}{\partial t} + L(v) + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Pa}{\partial y} + \pi_y + \frac{1}{D} \frac{\partial \left( \frac{nz}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} + F_y \quad \text{Eq 10.}$$

$$\text{Selon } z : \frac{1}{D} \frac{\partial p}{\partial \sigma} = -\rho g \quad \text{Eq 11.}$$

$$\text{Continuité : } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial Dw^a}{\partial \sigma} = 0 \quad \text{Eq 12.}$$

Avec  $L(A) = u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y} + w^a \frac{\partial A}{\partial \sigma}$  le terme d'advection, Eq 13 ;

$$w^a = \frac{1}{D} \left[ w - \sigma \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \left( \sigma \frac{\partial \eta}{\partial x} + (\sigma - 1) \frac{\partial H}{\partial x} \right) - v \left( \sigma \frac{\partial \eta}{\partial y} + (\sigma - 1) \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] \quad \text{Eq 14 ;}$$

$$\pi_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \int_{\sigma}^1 b d\sigma \right] + b \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \text{Eq 15 et}$$

$$\pi_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ D \int_{\sigma}^1 b d\sigma \right] + b \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad \text{termes de pression interne, Eq 16 ;}$$

$$F_x = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} \left[ Dv_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} \left[ Dv_x \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ Dv_x \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{v_x}{D} \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] \quad \text{Eq 17 et}$$

$$F_y = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left[ Dv_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left[ Dv_y \left( \frac{\partial H}{\partial y} - \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ Dv_y \left( \frac{\partial H}{\partial y} - \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{v_y}{D} \left( \frac{\partial H}{\partial y} - \sigma \frac{\partial D}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] \quad \text{termes de frictions horizontales, Eq 18.}$$

Thermodynamique :

$$\frac{\partial DT}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial x} \left( uT - k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial D}{\partial y} \left( vT - k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial D}{\partial \sigma} \left( w^a T - \frac{k_z}{D^2} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) = \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial \sigma} \quad \text{Eq 19 ;}$$

$$\frac{\partial DS}{\partial t} + \frac{\partial D \left( uS - k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial D \left( vS - k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial D \left( w^{\dot{a}} S - \frac{k_z}{D^2} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} = 0 \quad \text{Eq 20.}$$

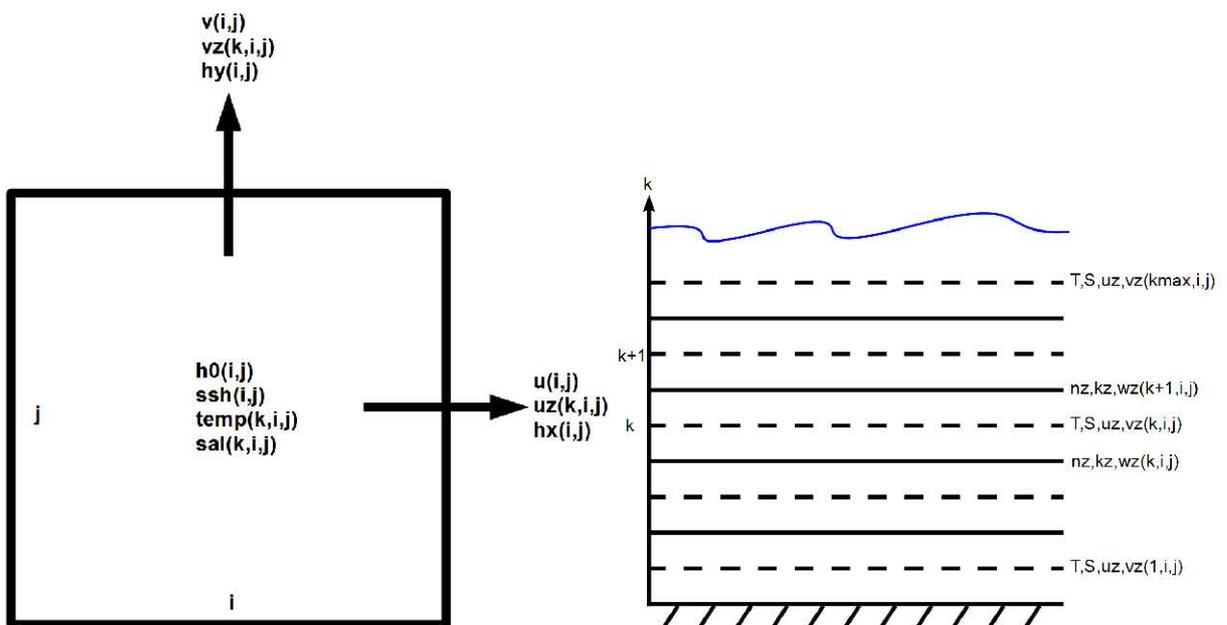
Traceur passif

$$\frac{\partial DT_r}{\partial t} + \frac{\partial D \left( uT_r - k_x \frac{\partial T_r}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial D \left( vT_r - k_y \frac{\partial T_r}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial D \left( w^{\dot{a}} T_r - \frac{k_z}{D^2} \frac{\partial T_r}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} = \text{Sources} - \text{Sinks}$$

Eq 21.

Où D est la profondeur totale et H est la profondeur relative au niveau moyen.

La grille Arakawa-C1 utilisée par MARS3D est une grille permettant de mettre les vitesses calculées entre deux points de grille successifs :



ANNEXE 2 : Calculs statistiques :

a) Calculs statistiques et tableau des données

Biais : Température moyenne du modèle – Température moyenne des observations :

$$B = \bar{T}_m - \bar{T}_o \quad \text{Eq 22.}$$

Corrélation : coefficient de corrélation entre la température du modèle et celle des observations :

$$C = \frac{\text{cov}(T_m, T_o)}{\sqrt{\text{var}(T_m)\text{var}(T_o)}} \quad \text{Eq 23, avec « var » la variance : } \text{var}(T) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2$$

$$\text{Eq 24 ; et cov la covariance : } \text{cov}(T1, T2) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(T1_i - \bar{T1})(T2_i - \bar{T2})] \quad \text{Eq 25.}$$

RMS : moyenne quadratique des différences de températures entre le modèle et les observations :

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_m(i) - T_o(i))^2} \quad \text{Eq 26; avec N le nombre d'observations.}$$

Unbiased RMSD : RMS des écarts de températures du modèle et des observations (utilisé pour le diagramme cible) :

$$RMSD = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N ((T_m(i) - \bar{T}_m) - (T_o(i) - \bar{T}_o))^2} \quad \text{Eq 27.}$$

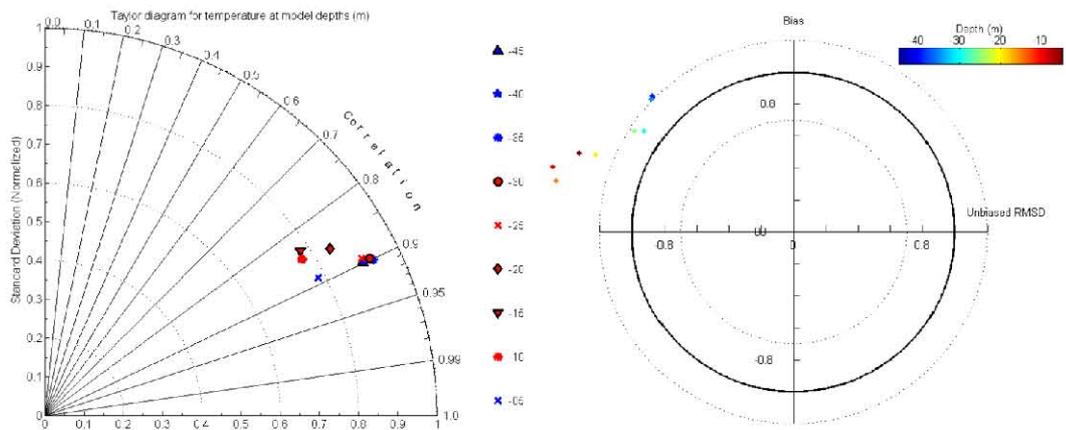
Tableau des données statistiques des autres stations :

	Prof (m)	Biais TC	Biais TM	Moy TO	Moy TC	Moy TM	Std TO	Std TC
<b>MEJEAN</b>	5 – 35	0,1596	0,3046	17,3746	17,5343	17,6792	2,6528	1,9842
<b>MORGIOU</b>	5 – 30	0,4149	0,5585	17,4998	17,9147	18,0583	2,6283	2,1718
	Std TM	Median TO	Median TC	Median TM	Cor TC	Cor TM	Rms TC	Rms TM
<b>MEJEAN</b>	1,8796	18,2710	17,8917	18,1941	0,9312	0,9129	1,0937	1,2485
<b>MORGIOU</b>	2,1453	17,5580	17,8168	18,0472	0,9136	0,8990	1,1690	1,2975

b) Diagrammes de comparaison des températures modélisées aux températures TMedNet

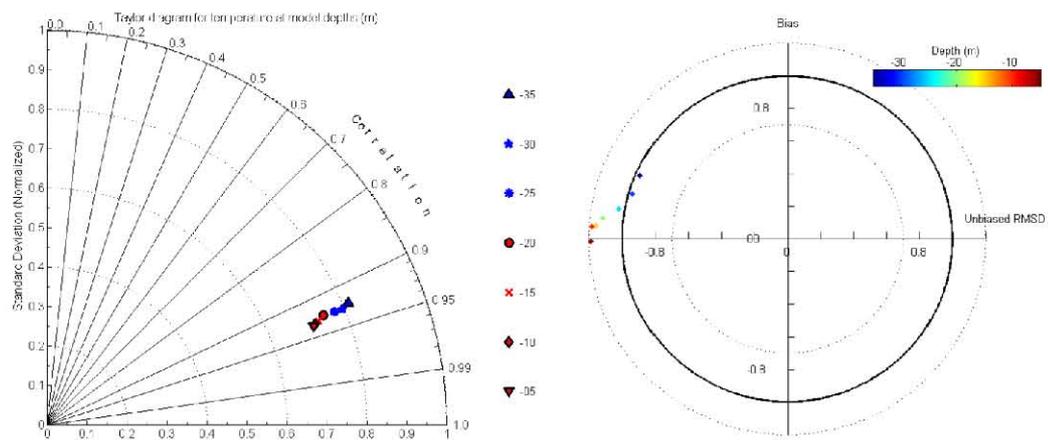
Station de Cassidaigne :

MENOR :

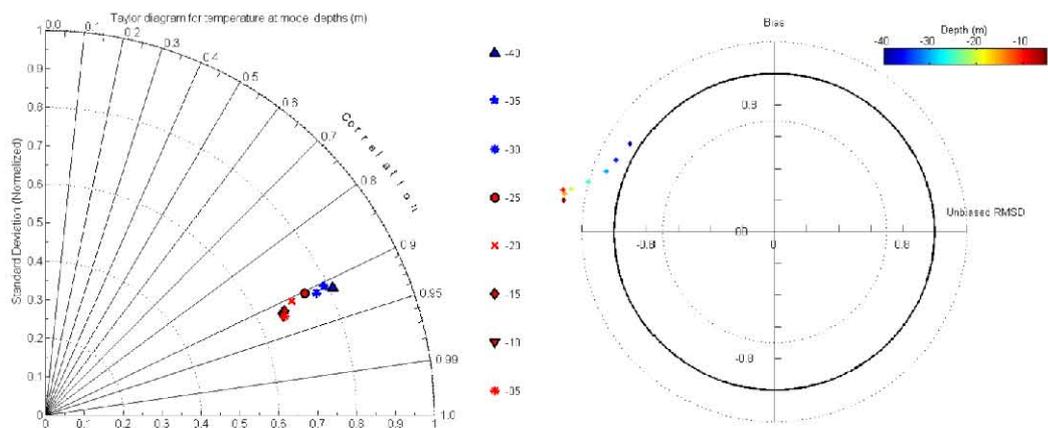


Station de Méjean :

CASCANL :

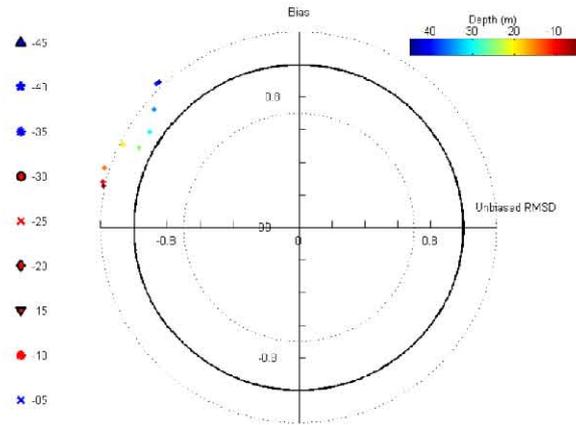
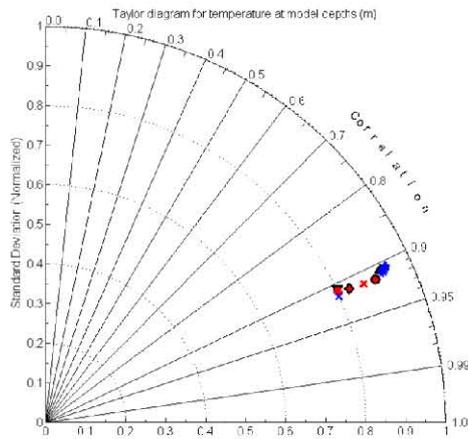


MENOR :

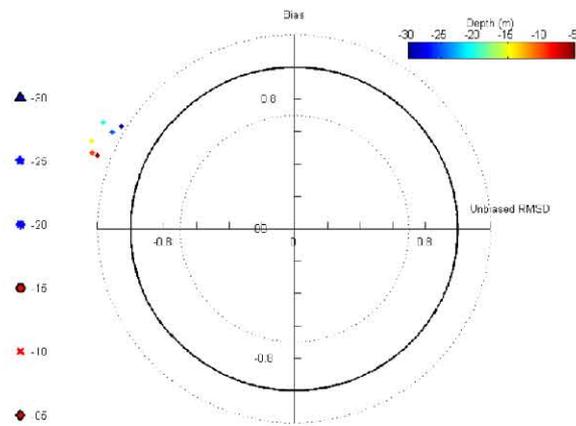
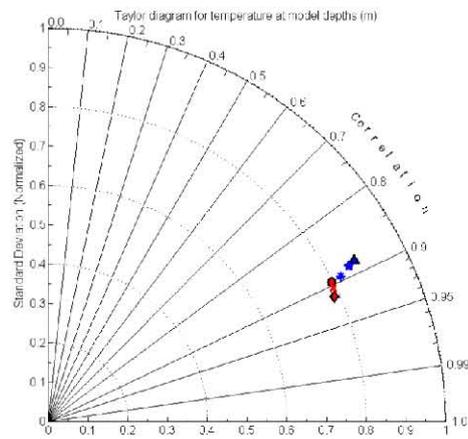


Station de Morgiou :

CASCANL :

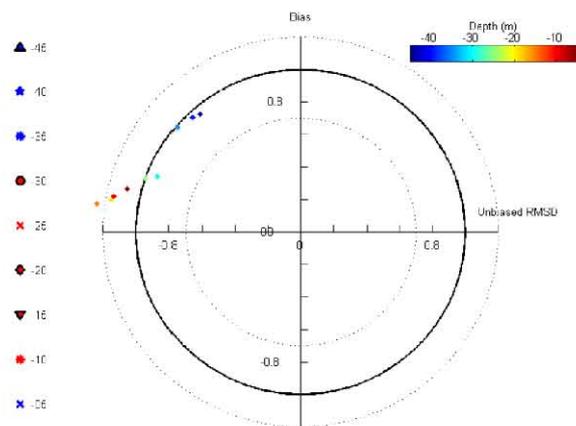
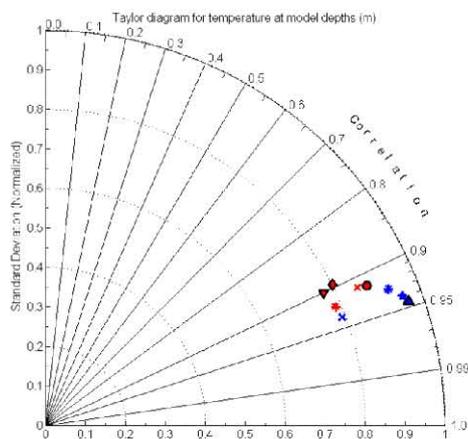


MENOR :

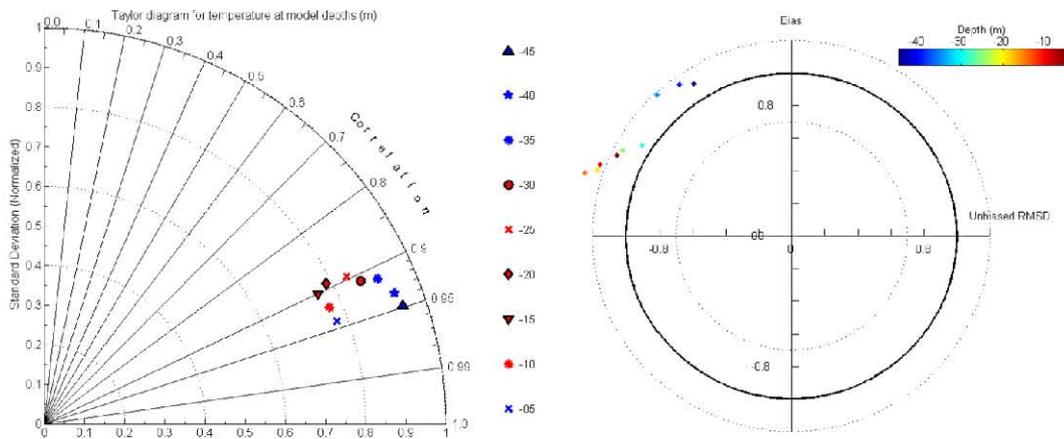


Station du Planier :

CASCANL :

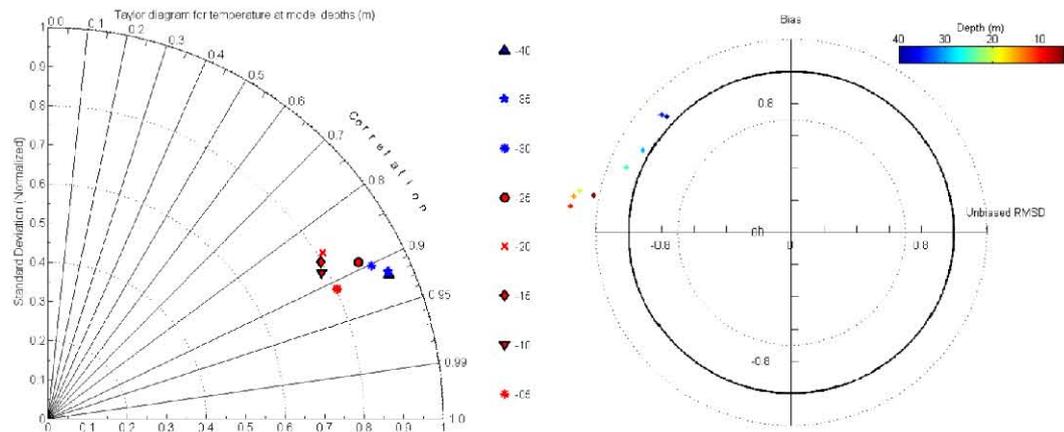


MENOR :

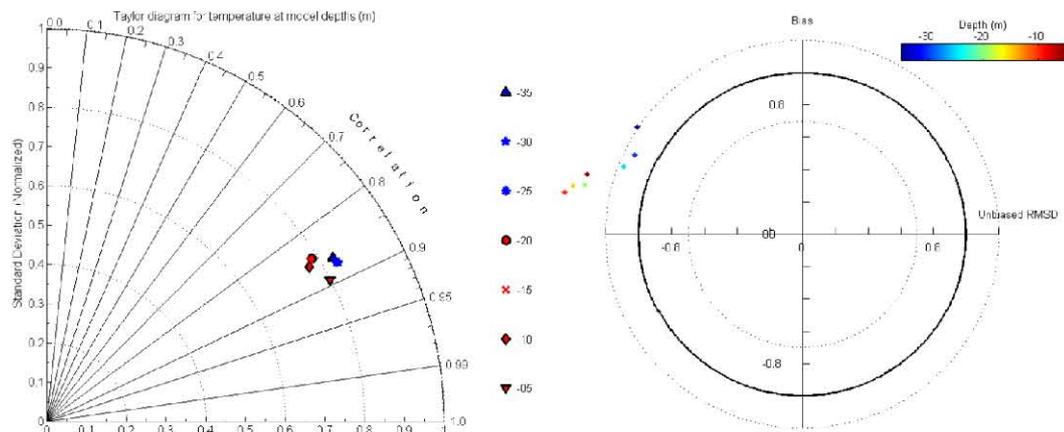


Station de Riou Sud :

CASCANL :



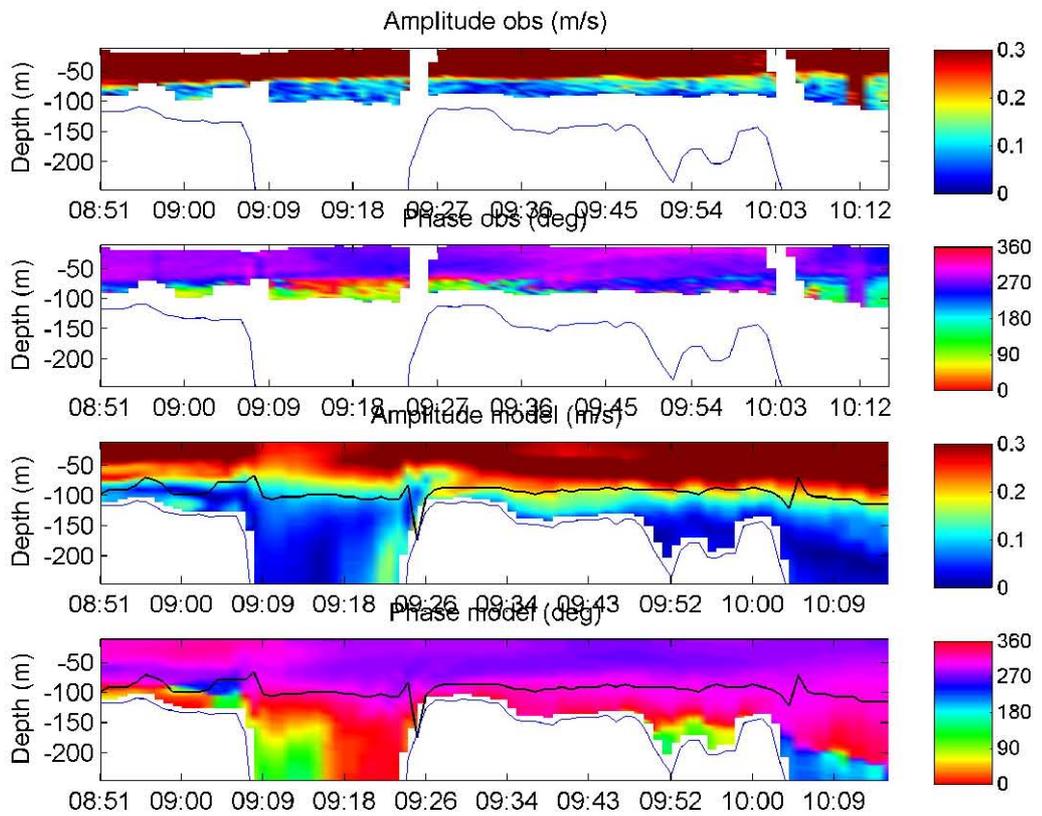
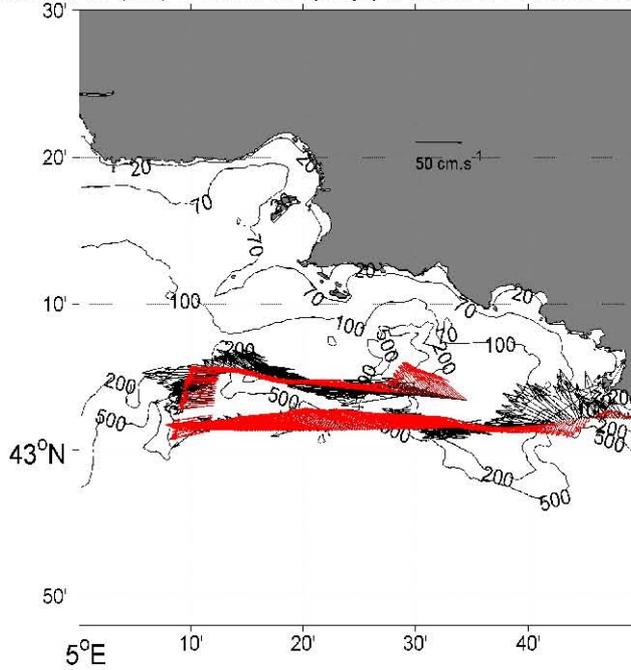
MENOR :

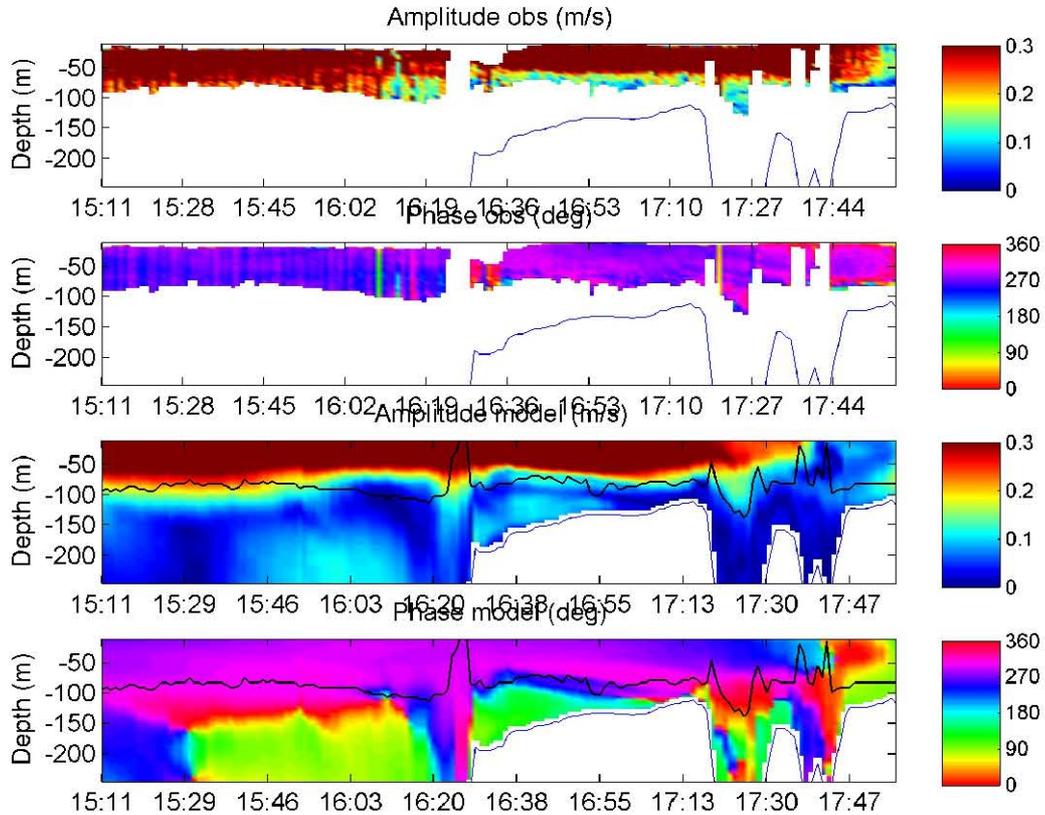
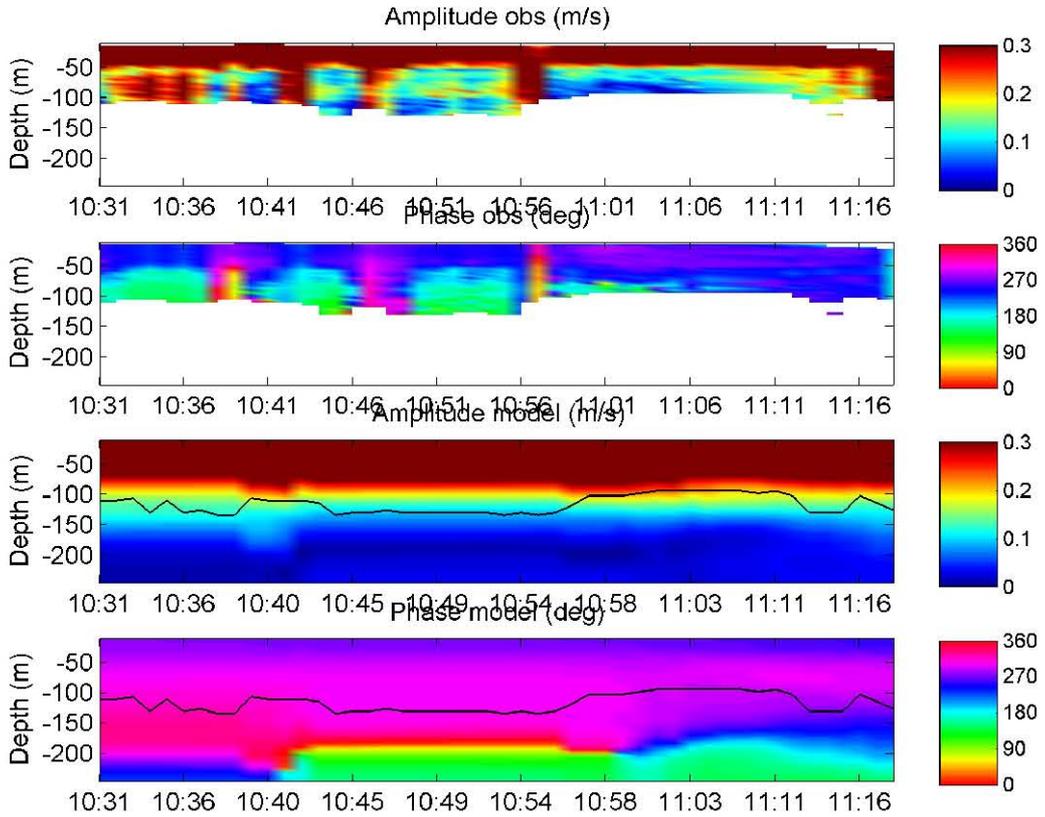


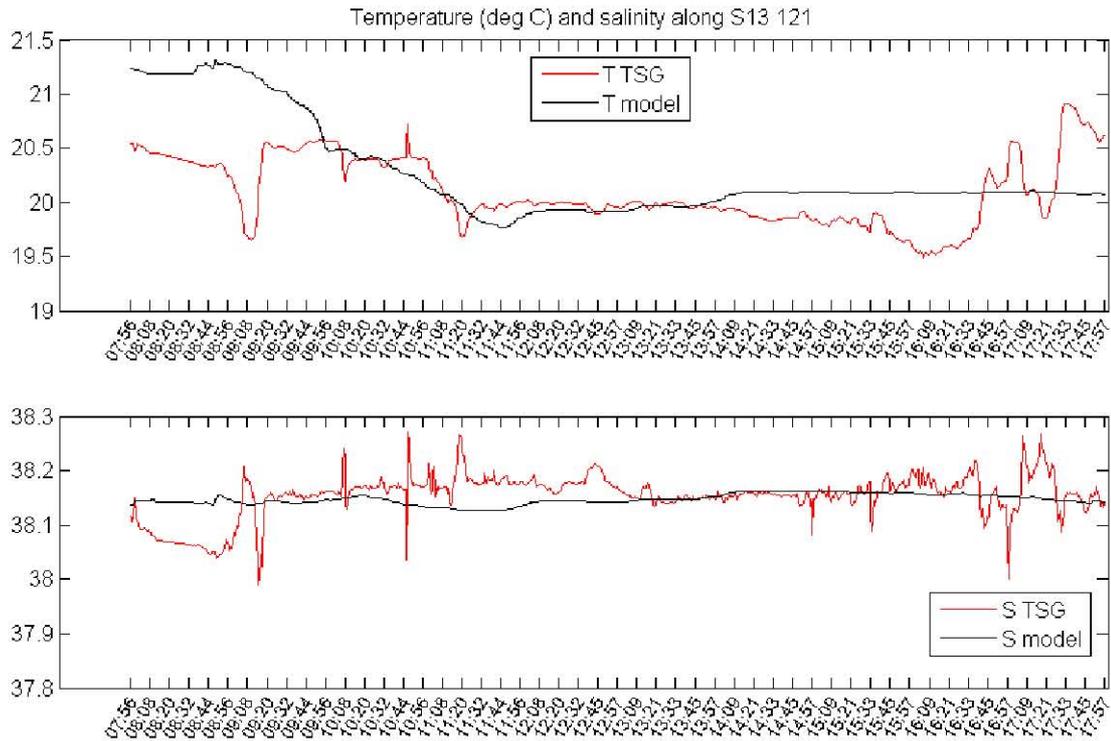
ANNEXE 3 : parcours puis comparaisons des intensités et directions des courants et des températures et salinités des autres trajets SAVED par rapport à la configuration CASCANL:

S\_13\_121 (5 Octobre 2013) :

Courants ADCP (noir) et CASCANL (rouge) a 18.5 m le 05-Oct-2013 (08:51-17:57)

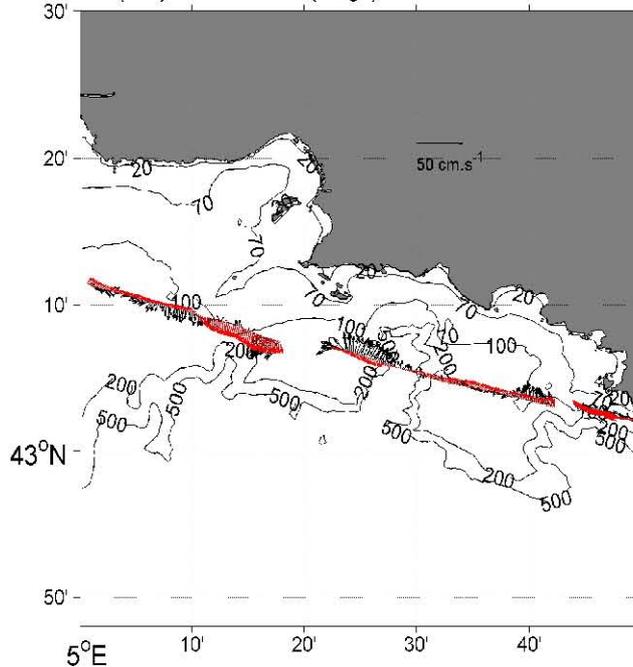


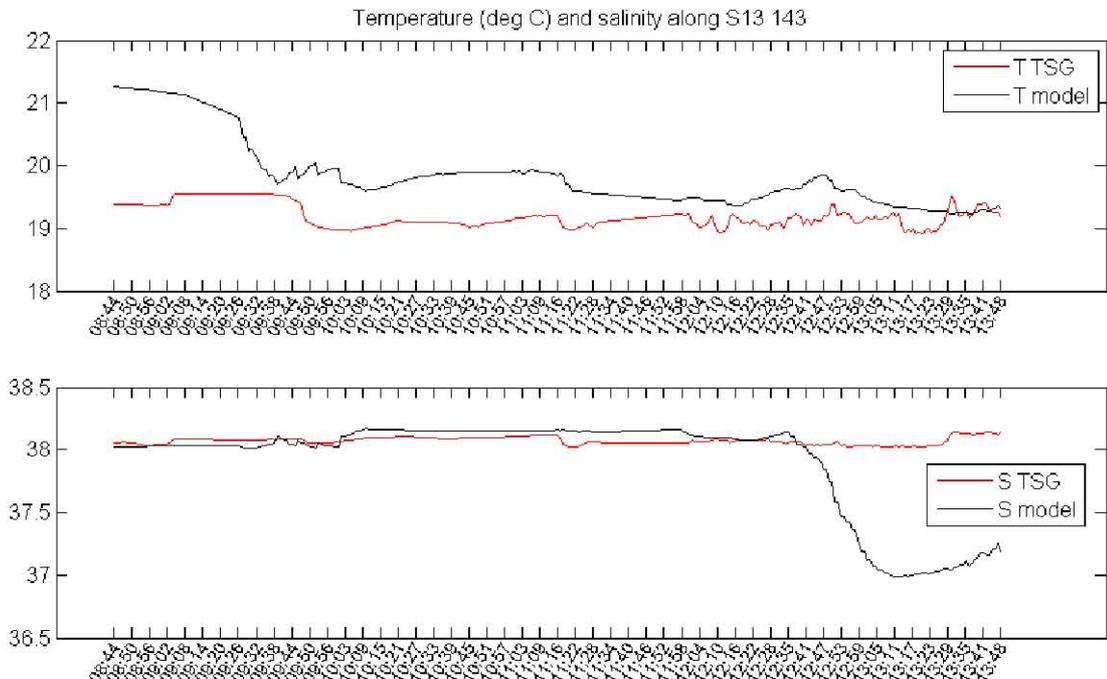
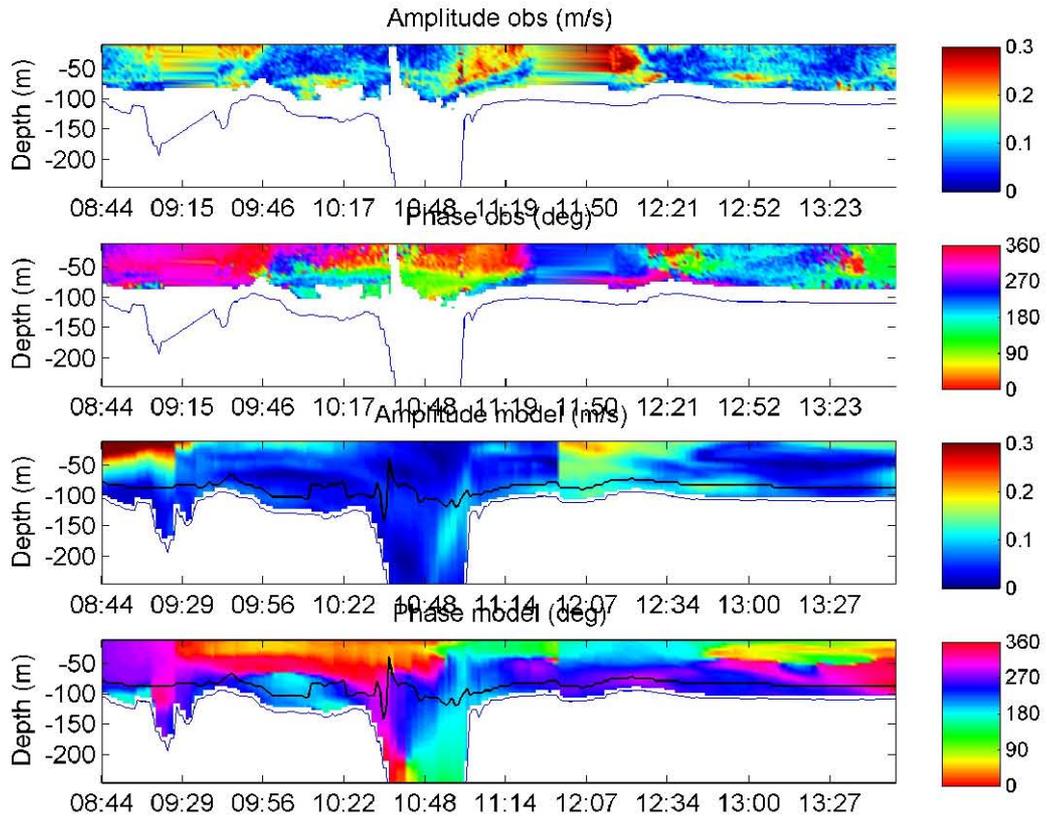




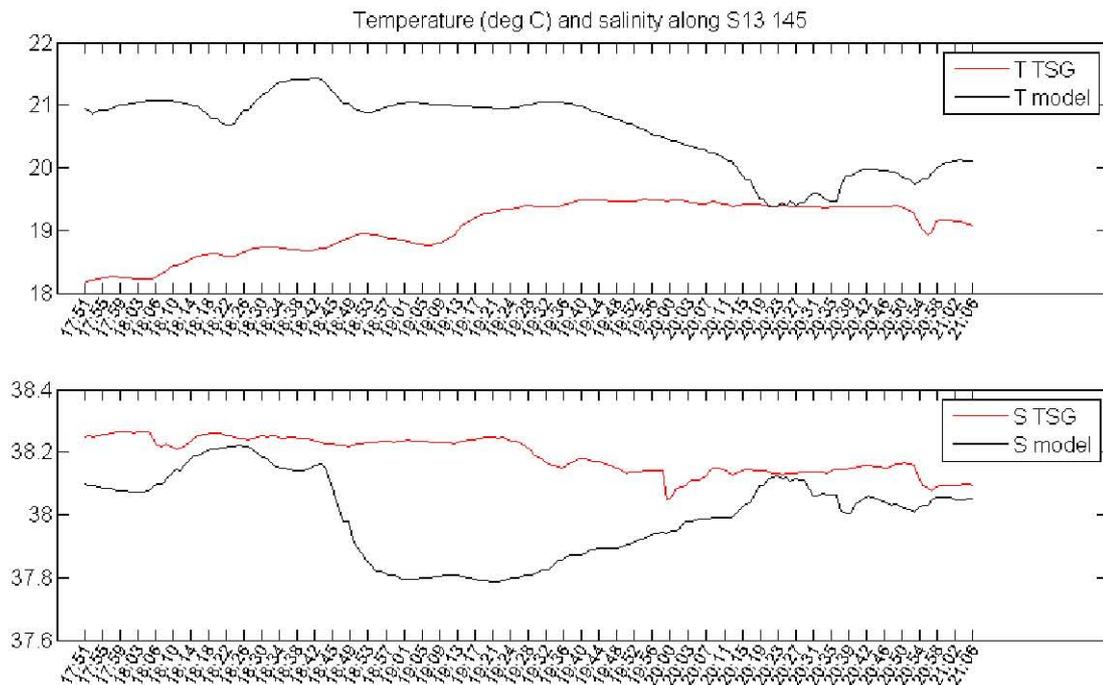
S\_13\_143 (1<sup>er</sup> Novembre 2013) :

Courants ADCP (noir) et CASCANL (rouge) a 30.5 m le 01-Nov-2013 (08:44-13:48)



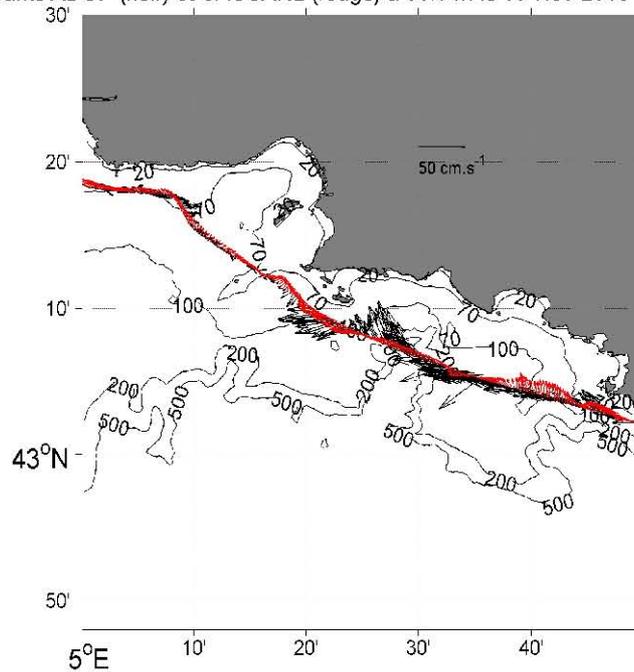


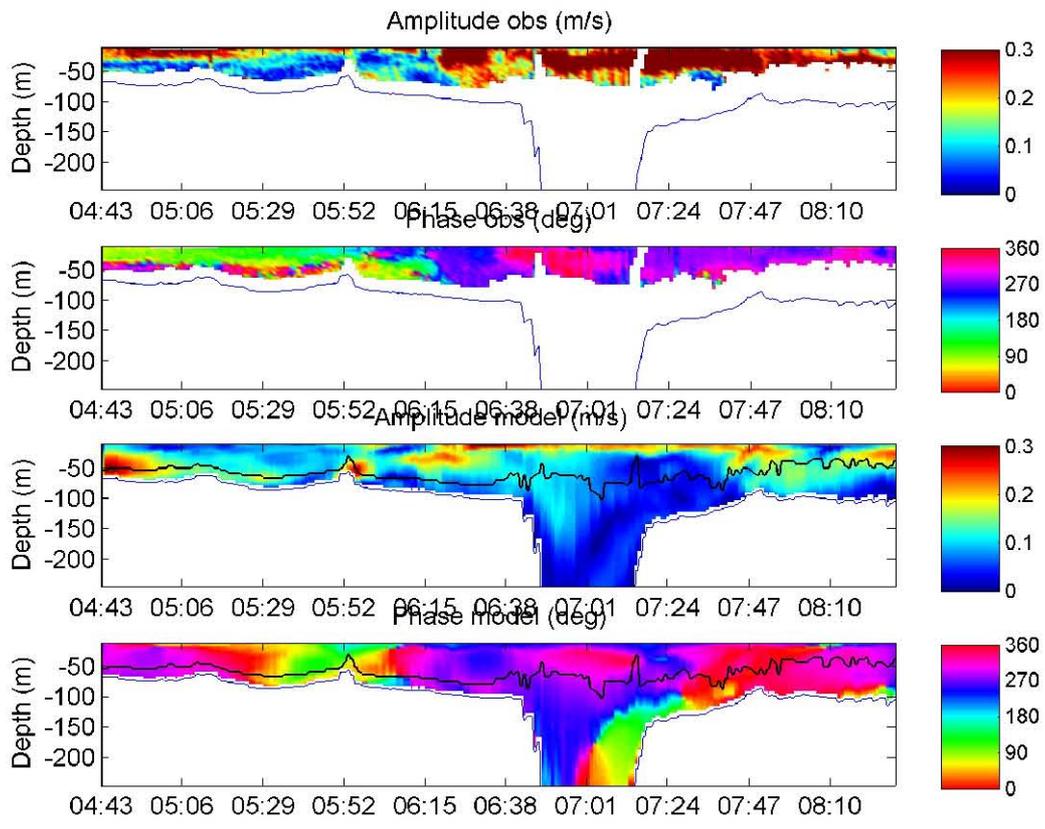
S\_13\_145 (4 Novembre 2013) :



S\_13\_147 (8 Novembre 2013) :

Courants ADCP (noir) et CASCANL (rouge) a 30.5 m le 09-Nov-2013 (04:43-08:28)





#### ANNEXE 4 : tableau récapitulatif des upwellings

Dans le tableau qui suit nous avons répertorié les upwellings et avons noté les températures de surface minimales, maximales et moyennes dans tout le domaine ainsi que la baisse de température (en surface) prise en un point sous l'influence de l'upwelling.

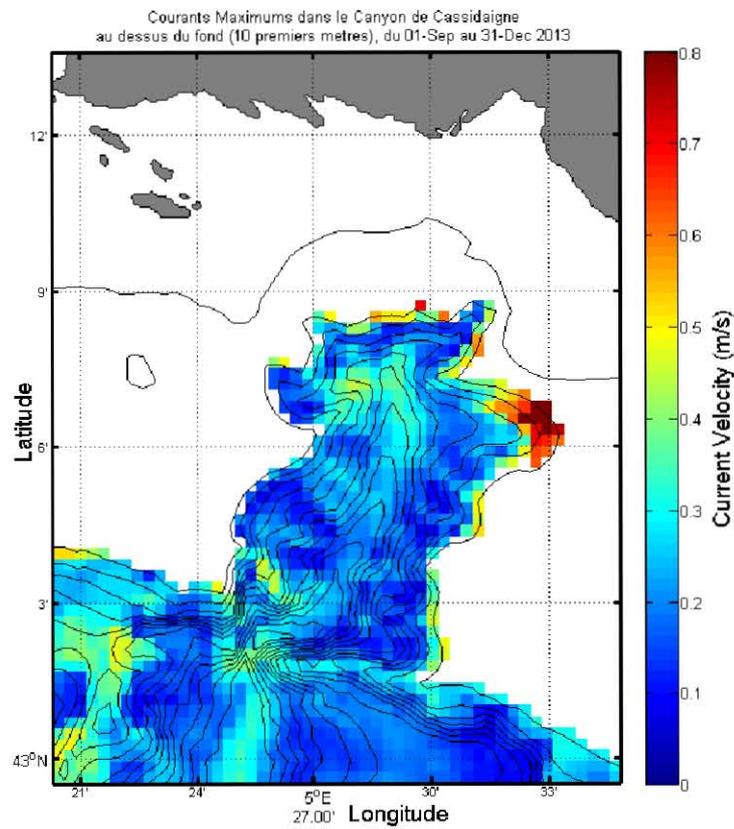
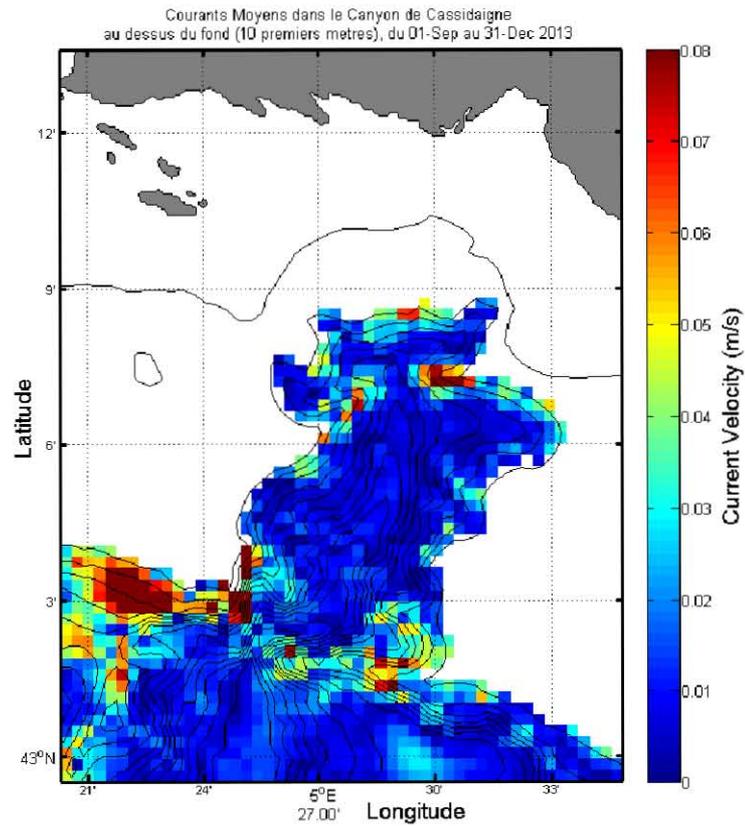
Les dates associées correspondent au début de l'upwelling (courants de surface vers le large mais pas encore de baisse de température en surface) puis fin de l'upwelling (courants de surface ne sont plus dirigés vers le large et la température en surface remonte à partir de cette instant) et disparition de la signature de l'upwelling en surface (température de surface à peu près homogène) avec les étapes intermédiaires (arrêt puis reprise de l'upwelling) s'il y en a.

DATE	TMIN	TMAX	TMOY	ΔT upwelling
09/09/2013 00h	21,59	25,51	24,21	22,7
09 – 13	14,10	25,51	20,39	
13/09/2013 06h	14,10	22,43	17,40	-8,2 (14,5)
13 – 15	14,10	24,36	18,50	
15/09/2013 09h	14,72	22,88	19,51	+2 (16,5)
15 – 20	13,79	23,62	16,90	
20/09/2013 09h	13,92	19,87	15,64	-2,3 (14,2)
20 – 28	13,02	21,77	18,35	
28/09/2013 00h	16,90	21,52	20,25	20,2
10/10/13 15h	19,14	22,18	20,97	20,3
10 – 12	16,33	22,18	20,09	
12/10/13 12h	16,49	21,66	19,81	-3 (17,3)
12 – 14	16,33	21,69	20,18	
14/10/13 15h	17,45	21,52	20,47	19
16/10/13 06h	17,72	21,47	20,40	19,5
16 – 17	16,97	21,47	20,16	
17/10/13 18h	16,97	21,29	19,73	-2,3 (17,2)
17 – 23	16,68	21,30	19,67	
23/10/13 00h	18,54	21,09	20,02	19,9
05/11/13 00h	18,15	21,23	20,08	19,7
05 – 07	16,01	21,23	19,02	
07/11/13 12h	16,08	20,19	18,36	-3,3 (16,4)
07 – 09	15,91	20,21	18,49	
09/11/13 00h	16,41	20,07	18,69	+0,9 (17,3)
09 – 11	13,17	20,07	17,59	
11/11/13 12h	13,25	18,53	15,68	-3 (14,3)
11 – 14	13,03	19,80	15,99	
14/11/2013 00h	13,95	19,63	16,52	+1,2 (15,5)
14 – 15	12,87	19,63	15,96	
15/11/13 18h	13,34	18,86	15,60	-0,8 (14,7)
15 – 19	13,34	19,11	16,81	
19/11/13 00h	14,66	18,90	17,86	17,7
20/11/13 06h	15,07	18,52	17,91	17,9
20 – 25	13,34	18,56	17,37	
25/11/13 15h	14,79	17,93	17,00	-1,6 (16,3)
25 – 28	14,14	17,93	17,05	
28/11/13 00h	14,27	17,68	16,95	16,6
06/12/13 00h	13,89	17,04	15,99	15,8
06 – 07	12,99	17,04	15,81	
07/12/13 00h	12,99	16,56	15,62	-1 (14,8)
00h – 12h	12,98	16,56	15,64	
07/12/13 12h	13,33	16,51	15,70	15,3
26/12/13 00h	14,14	16,27	15,97	15,9
26 – 27	13,18	16,27	15,74	
27/12/13 06h	13,18	15,99	15,45	-1 (14,9)
27 – 28	13,06	16,10	15,46	
28/12/13 06h	13,61	16,10	15,51	15,4

ANNEXE 5 : tableau récapitulatif des intrusions des eaux du Rhône

<b>Durée</b>	<b>Extension zonale</b>	<b>Extension méridienne</b>
??? – 06 Sep 09h	Jusqu'à 5,2°E	Autour de 43,13°N
10 Sep 21h – 11 Sep 03h	Jusqu'à 5,02°E	Autour de 43,18 et 43,27°N
12 Sep 03h – 20 Sep 00h	Jusqu'à 5,2°E	De 42,7°N aux côtes
20 Sep 21h – 21 Sep 06h	Jusqu'à 5,05°E	De 43 à 43,1°N
22 Sep 00h – 28 Sep 15h	Jusqu'à 5,12°E	De 42,93 à 43,17°N
10 Oct 12h – 29 Oct 15h	Jusqu'aux rades de Marseille	De 43,1°N aux côtes
31 Oct 03h – 11 Nov 09h	Jusqu'à 5,5°E	De 42,8°N aux côtes
12 Nov 00h – 14 Nov 00h	Jusqu'à 5,12°E	De 43 à 43,2°N
15 Nov 03h – 17 Nov 18h	Jusqu'à 5,1°E	De 43,08 à 43,3°N
21 Nov 00h – 22 Nov 18h	Jusqu'à 5,24°E	De 43,1 à 43,3°N
01 Déc 00h – 02 Déc 03h	Jusqu'à 5,08°E	De 43,03 à 43,2°N
15 Déc 21h – 21 Déc 18h	Jusqu'à 5,25°E	De 43 à 43,27°N
25 Déc 00h – 29 Déc 18h	Jusqu'à 5,3°E	De 42,95 à 43,31°N
31 Déc 03h – ???	Jusqu'à 5,25°E	De 43,2°N aux côtes

ANNEXE 6 : Courants moyens et maximums sur les dix premiers mètres au dessus du fond  
du 1<sup>er</sup> Septembre au 31 Décembre 2013 :



ANNEXE 7 : Salinités moyennes, maximales et écart-type de celle-ci sur les dix premiers mètres au dessus du fond du 1<sup>er</sup> Septembre au 31 Décembre 2013 :

