

Université de la Méditerranée

Aix - Marseille II



Stage Master II

Spécialité : Océanographie Physique et Météorologie Côtière

**Suivi de structures tourbillonnaires et filamentaires dans
le Golfe du Lion, avec la technique des ondelettes**

CENTRE D'OCEANOLOGIE DE MARSEILLE



LABORATOIRE D'OCEANOGRAPHIE ET DE BIOGEOCHIMIE



Directeurs de stage :

Andrea Doglioli

Anne Petrenko

Frédéric Diaz(co-tutelle)

Présentée par : Ziyuan HU Année : 2007

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord particulièrement Anne PETRENKO et Andréa DOGLIOLI de m'avoir accueilli au sein de leur équipe de recherche et de m'avoir dirigée pendant six mois avec beaucoup de patience et de disponibilité.

J'adresse ma reconnaissance à Frédéric DIAZ et Stéphane BLAIN de m'avoir encouragé et de m'avoir donné des conseils.

Je remercie également Claude Estournel et Patrick Marsaleix qui ont fourni les données pour réaliser mon stage, m'ont aidé et ont répondu à toutes mes questions sur le modèle SYMPHONIE.

Je remercie Clément FONTANA et Alexandre ALLOU pour leur aide en programmation Matlab.

Enfin, toute ma gratitude se dirige vers les personnes qui ont partagé ma vie, amis, amies, ainsi que ma famille à qui je dédie ce travail.

Résumé

L'objectif de ce travail est de rechercher des structures tourbillonnaires dans le Golfe du Lion à partir des sorties 3D du modèle SYMPHONIE. On se focalise sur la partie ouest du plateau continental du golfe qui est soupçonnée être une zone clef pour l'étude des échanges entre le plateau et la circulation méso-échelle via les structures tourbillonnaires. En appliquant la technique d'analyse en ondelettes sur la vorticité relative, on arrive à identifier et à suivre temporellement 14 tourbillons dans la période juillet-octobre sur 3 années (2001, 2004 et 2005). Cette première étude présente les évolutions des propriétés et la dynamique de ces structures. Une comparaison avec les images satellites montre que les résultats du modèle et de l'analyse sont assez réalistes. Les résultats de ce travail de modélisation donne aussi la confiance quant à la réussite de capturer des structures de méso-échelle pendant une campagne en mer.

Abstract

This study aims mainly at looking for eddy structures in the Gulf of Lion in the results of the numerical model SYMPHONIE. Our emphasis is put on the western side of the continental shelf, which is thought to be a pivotal location for the study of exchanges between the shelf and the mesoscale circulation via eddy structures. In order to identify and time-track eddies, we applied Wavelet analysis to relative vorticity. In this way, we found 14 structures in the period July-October of the years 2001, 2004 and 2005. The time evolutions of properties and dynamics of these eddies are presented and discussed. Comparisons with satellite images show the success of the numerical model and analysis technique. These results suggest that observing a mesoscale structure during a cruise in this specific area is a realizable objective.

<u>Introduction générale.....</u>	1
<u>Chapitre 1. L.O.B et le projet LATEX.....</u>	2
1.1 Le Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie.....	2
1.2 Le projet LATEX.....	2
<u>Chapitre 2. Carte de la région d'étude et ses grandes caractéristiques.....</u>	3
2.1 Situation générale.....	3
2.2 Une bathymétrie complexe.....	3
2.3 Les vents dominants.....	3
2.3.1 Vents de Sud-Est.....	4
2.3.2 Vents de Nord-Ouest.....	4
2.4 Le Rhône.....	5
2.5 La circulation générale	5
<u>Chapitre 3. Le Modèle Numérique.....</u>	6
3.1 Présentation du modèle SYMPHONIE.....	6
3.1.1 Le domaine de modélisation.....	6
3.1.2 La grille du modèle.....	6
3.2 Les équations principales.....	7
3.2.1 Equations du mouvement.....	7
3.2.2 Equations de transport.....	8
3.2.3 Equations de fermeture.....	9
3.3 Les conditions aux limites.....	11
3.3.1 À la surface libre.....	11
3.3.2 Au fond.....	12
3.3.3 Aux frontières latérales.....	13
3.4 Les apports d'eau douce.....	13
3.5 Choix des forçages.....	13
<u>Chapitre 4. La Sortie du Modèle et le traitement des données.....</u>	14
4.1 Descriptions des sorties 3D du modèle SYMPHONIE.....	14
4.2 Traitement des données du modèle.....	14
<u>Chapitre 5. L'identification et le suivi des structures tourbillonnaires.....</u>	19
5.1 Histoire de la technique d'analyse en ondelettes.....	19
5.2 L'analyse en ondelettes.....	20
5.2.1 Description de l'analyse.....	20
5.2.2 L'identification des structures.....	21
5.3 Le suivi temporel	22
<u>Chapitre 6. Résultats et discussions.....</u>	24
6.1 Les tourbillons cycloniques à l'ouest du Golfe du Lion.....	25
6.1.1 C2(01) en 2001.....	26
6.1.2 C3(01) en 2001.....	28
6.1.3 Bilan des tourbillons cycloniques.....	29
6.2 Les tourbillons anticycloniques à l'ouest du Golfe du Lion.....	31
6.2.1 A1(01) en 2001.....	31

6.2.2 A1(04) en 2004.....	34
6.2.3 Phénomènes particuliers.....	36
6.2.4 Bilan des tourbillons anticycloniques.....	37
6.3 Comparaisons avec les images satellitales.....	38
Conclusion et perspectives.....	41
Bibliographie.....	43

Introduction

L'Océan côtier ne couvre que 8% en surface océanique et 0.05% en volume, mais il représente le lien le plus important entre le milieu terrestre et le milieu marin. La zone côtière est particulièrement exposée avec une présence importante des activités humaines (40% de la population mondiale vit à moins de 100 km des côtes). L'océanographie en milieu côtier est aujourd'hui l'enjeu de nombreux intérêts pour la connaissance du fonctionnement des écosystèmes marins côtiers, notamment pour en assurer une meilleure gestion et une protection contre les perturbations anthropiques qu'ils subissent.

La difficulté à acquérir des données *in situ* physiques et biogéochimiques à très haute résolution spatiale et temporelle et à étudier expérimentalement de manière couplée les processus dynamiques et biogéochimiques en particulier à méso et sub-méso échelle, apporte les incertitudes à la compréhension quantitative d'échanges de matière et d'énergie entre ces zones côtières et hauturières.

Durant ces dernières décennies, de nombreuses études ont été menées sur la compréhension d'impact de l'activité méso-échelle sur la biogéochimie. Ce sujet de stage s'inscrit dans une phase d'étude pilote du projet **LATEX** (**L**Agrangian **T**ransport **E**Xperiment) proposé par le Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie. L'objectif de ce stage est de rechercher des structures tourbillonnaires dans le Golfe du Lion avec la technique des ondelettes. Le présent rapport est donc le rassemblement des résultats issus de ce stage.

Après une présentation du Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie dans lequel j'ai travaillé pendant six mois et le projet LATEX (chapitre 1), je présenterai les résultats de mes recherches bibliographiques sur les principales caractéristiques du Golfe du Lion (chapitre 2). Je parlerai ensuite du modèle numérique qui fournit toutes les données pour étudier les processus hydrodynamiques dans le golfe (chapitre 3). Une description des sorties du modèle de différentes versions et le traitement des données feront l'objet du chapitre 4. On passera à la méthode d'analyse en ondelettes avec laquelle j'ai réalisé le suivi des structures tourbillonnaires (chapitre 5), et j'exposerai les différentes structures que j'ai trouvées et leurs caractéristiques (chapitre 6). La comparaison des résultats numériques avec les images satellites se fera aussi dans le chapitre 6. Enfin, je présenterai les conclusions sur un bilan des résultats de mon stage.

Chapitre 1. L.O.B et le projet LATEX

1.1 Le Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie

Le laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie (LOB) est une Unité Mixte de Recherche du CNRS et de l'Université de la Méditerranée. Au début de 2007, le LOB comptait 11 enseignants-chercheurs, 10 chercheurs CNRS, 2 ATERs, 2 chercheurs IRD en accueil et 6 ITAs. Au cours du contrat quadriennal actuel, le LOB accueille ou a accueilli 26 doctorants. La nouvelle structure du LOB s'est recentrée sur l'étude des processus physiques ou biologiques affectant la production et le transport de matière au sein des écosystèmes marins autour de l'activité de deux nouvelles équipes :

- L'équipe 1 « Océanographie physique, réponse biologique, environnement côtière » a pour objet d'étude principal la circulation des masses d'eau à différentes échelles et les processus d'échanges à petite échelle siégeant en leurs interfaces, ainsi que l'implication directe de ces phénomènes - tant advectifs que diffusifs - sur le compartiment biologique et les flux biogéochimiques.
- L'équipe 2 « Biogéochimie marine et structure fonctionnelle des communautés pélagiques » s'intéresse au cycle des éléments biogènes dans la couche de surface et les recherches seront spécifiquement orientées sur l'influence de la disponibilité relative des nutriments majeurs: N, P et Si sur le contrôle de la composition de la communauté planctonique, de la structure du réseau trophique pélagique et, *in fine*, du flux de matière biogène exportée hors de la couche de surface.

1.2 Le projet LATEX 00 (2007) et LATEX (2008 - 2010)

Depuis une dizaine d'années, Le LOB, qui a été maître d'œuvre dans diverses campagnes (Moogli, Sarhygol, Golts, Golts/Argol, Ecolophy) dans le Golfe du Lion, propose une nouvelle démarche pour effectuer une étude couplée physique biogéochimie dans le Golfe du Lion. Le projet LATEX (2008-2010) a ainsi pour objectif d'étudier le rôle de structures de méso-échelles sur l'évolution de la distribution de traceurs conservatifs ou biogéochimiques. Le projet pilote LATEX 00 (2007) a pour les objectifs l'approfondissement de la connaissance des processus de (sub) méso-échelle dans le Golfe du Lion et d'effectuer des tests de navigation lagrangienne et déterminer la concentration ambiante en SF6.

Chapitre 2. Carte de la région d'étude et ses grandes caractéristiques

2.1 Situation générale

Le Golfe du Lion est situé sur la façade méditerranéenne française au nord-ouest du bassin Méditerranéen (Figure 2-1). Il constitue un domaine océanique côtier qui représente une zone de transition entre la mer du large et le continent. Le plateau se prolonge par un talus continental abrupt en forme d'arc de cercle.



Figure 2-1: Localisation et bathymétrie du Golfe du Lion

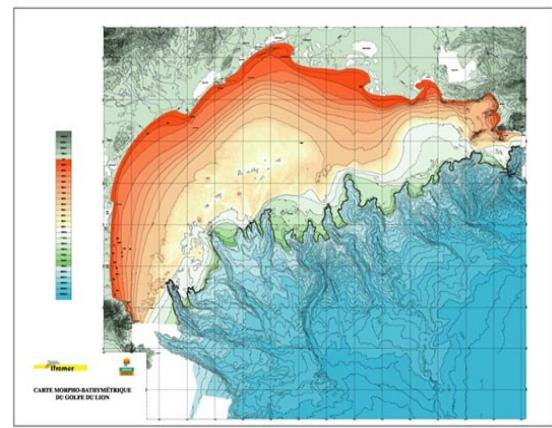


Figure 2-2: Carte morpho-bathymétrique du Golfe du Lion

2.2 Une bathymétrie complexe

Le Golfe du Lion est une des rares régions de la Méditerranée possédant un plateau continental étendu (Figure 2-1 et 2-2). Ce plateau constitue, en effet, un croissant d'environ 100 km de diamètre, pouvant atteindre une largeur de 60 km au niveau de Montpellier. Par ailleurs, la pente du plateau est faible et les zones rocheuses y sont rares. Le talus continental est quant à lui très irrégulier et le plus souvent entaillé par les canyons (Figure 2-2). Il présente parfois une pente assez douce, prolongeant alors le plateau presque sans discontinuité.

2.3 Les vents dominants

Le Golfe du Lion est la région la plus ventée et la plus agitée de toute la Méditerranée. En raison de la forme très marquée de l'orographie au nord-ouest de la Méditerranée, des dépressions atmosphériques traversent le bassin et entraînent généralement des changements brusques dans la direction des vents: du Sud-est au Nord-Ouest.

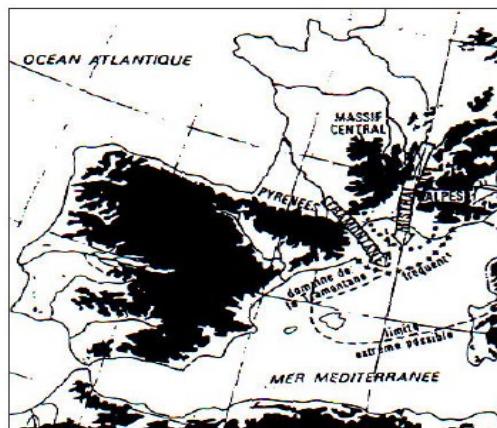


Figure 2-3: Orographie du bassin méditerranéen occidental et représentation des vents de secteur Nord-Ouest

2.3.1 Vents de Sud-Est

Ces vents peuvent souffler violemment en automne, hiver et printemps. Leur vitesse peut atteindre jusqu'à 25 m/s. Ils jouent un rôle important dans le transport sédimentaire, notamment dans le transport des particules rejetées par le Rhône, car ils génèrent une grande houle et de forts courants côtiers.

2.3.2 Vents de Nord-Ouest

Ces vents sont le Mistral et la Tramontane (Figure 2-3). Ils soufflent tout au long de l'année à travers les vallées qui séparent les trois massifs montagneux que sont les Alpes, le Massif Central et les Pyrénées. Localement, leur direction est constante. Le Mistral souffle en moyenne un jour sur trois dans le Languedoc, la Camargue et en Provence. La Tramontane souffle 1 jour sur 2 dans le Roussillon. Ces vents durent généralement quelques jours en soufflant à une vitesse moyenne de 10 à 15 m/s en été. En hiver, ils sont plus forts et peuvent persister plusieurs semaines. À cette période, ils entraînent alors les masses d'air continentales froides et sèches.

2.4 Le Rhône

Les apports d'eau douce du Golfe du Lion proviennent à 90% du Rhône qui débouche au nord du plateau continental. Le débit du Rhône est de l'ordre de 1700 m³/s et peut aisément dépasser 5000 m³/s en période de crue, au printemps et à l'automne. Près de l'embouchure du fleuve, la couche dessalée a une épaisseur de plusieurs mètres. Elle s'épaissit vers le large en se mélangeant aux masses d'eau du plateau. Lors d'un épisode de vent, l'eau douce se mélange intensément avec les couches sous-jacentes. Cette eau turbide peut se détecter loin de l'embouchure: elle constitue un panache qui est généralement dévié vers le Sud-Ouest en raison de Coriolis et du Mistral.

2.5 La circulation générale

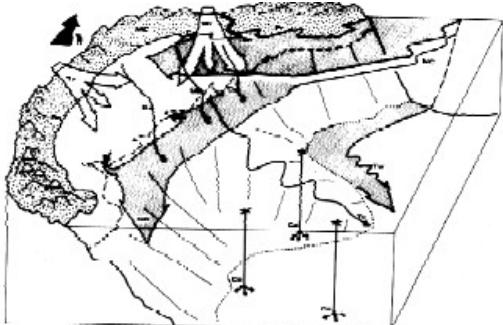


Figure 2-4 : vents, canyons et circulation générale dans le Golfe du Lion

Le courant Liguro Provençal Catalan ou Courant Nord est une composante importante de la circulation générale dans l'ouest de la Méditerranée (Figure 2-4). Ce courant géostrophique longe la pente continentale du Golfe du Lion. Ses caractéristiques montrent une variabilité saisonnière. En hiver, il est étroit (25km) et proche de la côte avec une profondeur jusqu'à 450 m et une vitesse

rapide entre 0.5 et 1m/s [Petrenko, 2003]. Au printemps, il devient peu profond (250m) et plus large (40 km) avec une vitesse ralentie de 0.2 m/s. Il s'éloigne de la côte en été [Conan et Millot, 1995]. Le flux est doublé en hiver par rapport à l'été en raison du forçage par les processus thermohalins. Le Courant Nord subit aussi une variabilité méso-échelle (de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres) marquée principalement par la croissance de méandres.

Dans la partie centrale du Golfe du Lion, le Courant Nord est très nettement dirigé vers le sud-ouest tout au long de l'année. Ses interactions avec la bathymétrie entraînent par ailleurs la formation de courants complexes de petite échelle.

Chapitre 3. Le Modèle Numérique

3.1 Présentation du modèle SYMPHONIE

Le modèle hydrodynamique 3D Symphonie est développé par l'équipe d'océanographie côtière du Laboratoire d'Aérologie de Toulouse. Ce modèle tient compte des hypothèses d'incompressibilité, de Boussinesq et d'équilibre hydrostatique.

3.1.1 Le domaine de modélisation

La région modélisée est orientée de 31° par rapport à l'axe nord-sud géographique (Figure 3-1a). La zone de modélisation s'étend sur 348 kilomètres X 1020 kilomètres avec une maille de 3 kilomètres dans chacune des directions. On zoom sur le Golfe du Lion qui est la zone d'intérêt (Figure 3-1b).

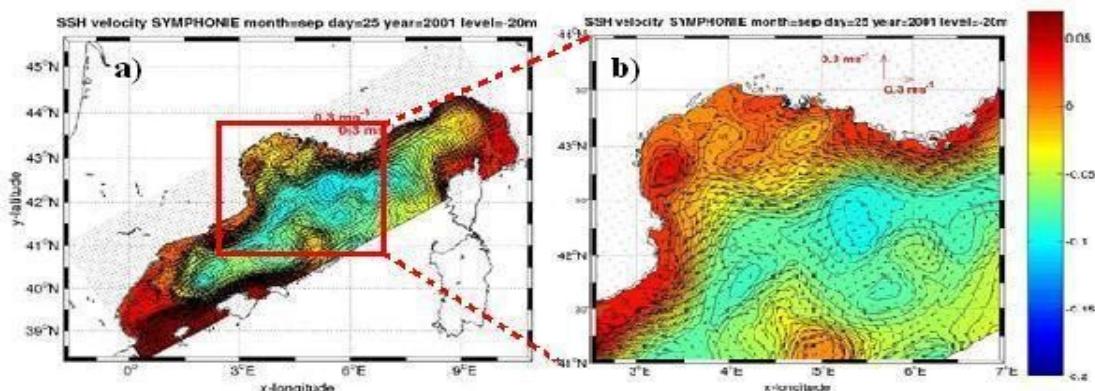


Figure 3-1: Carte de la SSH sur la zone de modélisation a), et sur le Golfe du Lion b)

3.1.2 La grille du modèle

Des coordonnées sigma généralisées sont utilisées sur la verticale et constituent une grille sur laquelle discréteriser les équations du modèle. Elle est ainsi étagée sur 40 niveaux pouvant se resserrer près de la surface et au fond. Ce système de repérage est associé aux coordonnées cartériennes sur l'horizontale. Elle est par ailleurs construite sur un schéma de type "C" [Arakawa et Suarez, 1983] dans lequel les variables sont définies un point sur deux et de façon alternée (Figure 3-2):

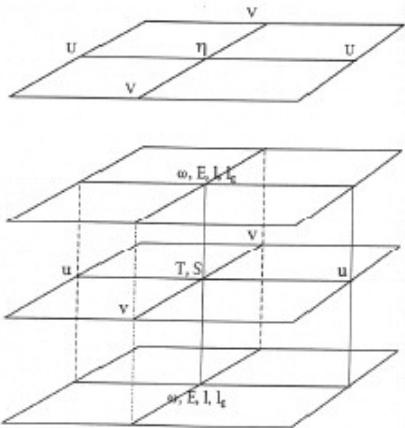


Figure 3-2: Grille du modèle SYMPHONIE

- L'élévation de la surface, au centre du niveau supérieur.
- La température et la salinité, au centre de chaque maille et à chaque niveau.
- Les composantes horizontales de la vitesse, au milieu des côtés de façon alternée et à chaque niveau.
- L'énergie cinétique, les longueurs caractéristiques et la composante verticale de la vitesse sont calculées au centre des mailles, à des niveaux verticaux intermédiaires.

3.2 Les équations principales

Les équations du modèle, formulées dans un système de coordonnées cartésiennes (O, x, y, z), l'axe Ox étant orienté positivement vers le sud, l'axe Oy vers l'est et l'axe Oz vers le Zénith. l'origine O se situe au niveau de repos de la surface de la mer.

3.2.1 Equations du mouvement

Les équations de Navier-Stokes s'écrivent:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} u = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + f \cdot v + v_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial (-u' w')}{\partial z} \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} v = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - f \cdot u + v_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial (-v' w')}{\partial z} \quad (3-2)$$

u, v sont les composantes horizontales de la vitesse du mouvement. f est le paramètre de Coriolis. ρ_o est la densité de référence de l'eau de mer au sens de l'hypothèse de Boussinesq. v_h est le coefficient de viscosité horizontale turbulente. u' , v' et w' sont les composantes turbulentes de la vitesse du mouvement.

L'hypothèse hydrostatique traduit l'équilibre entre la force de pression et la force de pesanteur. Elle fournit la pression: $P(z) = P_a + g \int_z^\eta \rho \cdot dz$ (3-3)

où P_a est la pression atmosphérique, g est l'accélération de la gravité et η l'élévation de la surface libre par rapport au zéro de l'axe Oz. $z = \eta(x, y, t)$ constitue ainsi la surface libre du modèle tandis que $z = -h(x, y)$ repère le fond.

Les équations (3-1) et (3-2) donnent l'évolution des composantes horizontales de la vitesse. Celle de la composante verticale, ω , peut être obtenue à l'aide de l'équation de continuité, avec l'hypothèse d'incompressibilité:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (3-4)$$

associée à la condition cinématique à la surface en $z = \eta$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - \omega = 0 \quad (3-5)$$

Cette dernière équation suppose l'absence de flux de particules fluides à travers la surface. Son intégration sur la verticale donne:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (H \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \bar{v}) = 0 \quad (3-6)$$

$H = h + \eta$ représente l'épaisseur totale de la colonne d'eau au repos et h la bathymétrie locale.

\bar{u} et \bar{v} sont les vitesses verticales moyennées sur la verticale:

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} (u, v) dz \quad (3-7)$$

La solution pour l'élévation de la surface libre sera donc fournie par l'intégration temporelle de l'équation (3-6).

3.2.2 Equations de transport

Elles concernent le transport des quantités telles que la température T et la salinité S:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} T = \frac{\partial (-T' \omega')}{\partial z} + \frac{Q_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} S = \frac{\partial (-S' \omega')}{\partial z} \quad (3-9)$$

Q_c est le flux solaire incident. C_p est le coefficient de chaleur massique: $C_p = 3950 \text{ J/kg.K}$

Les flux turbulents verticaux de chaleur et de salinité (seconds terme du membre de droite) sont modélisés à l'aide du concept de diffusivité turbulente (partie 3.2.3).

$I(z)$ est la fraction de ce flux qui parvient au niveau z : $I(z)=\exp(-\lambda z)$ avec $\lambda = 0.05 \text{ m}^{-1}$, le coefficient d'atténuation, choisi à partir des tables de Jerlov (1976) en eau claire.

La masse volumique est alors obtenue à partir de S et T par l'équation d'état:

$$\rho=\rho_0[1-\alpha(T-T_0)+\beta(S-S_0)] \quad (3-10)$$

dans laquelle α et β sont les coefficients d'expansion thermique et de contraction saline. Ils valent respectivement $2.41 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ et $7.45 \cdot 10^{-4} \text{ psu}^{-1}$. T_0 et S_0 sont les température et salinité de référence $T_0 = 19.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_0 = 35 \text{ }^{\circ}\text{‰}$, se rapportant à ρ_0 : $\rho_0 = 1024.8 \text{ kg/m}^3$.

3.2.3 Equations de fermeture

L'indétermination qui réside dans les termes de flux turbulents des équations (3-1), (3-2) et (3-8), (3-9) ne permet pas de résoudre le système d'équations. Il est nécessaire d'ajouter des équations que l'on appelle "de fermeture". A l'aide de ces équations, on exprime les termes indéterminés en fonction de variables calculées par le modèle. On utilise pour cela une relation entre les flux turbulents et les gradients verticaux des paramètres non turbulents (hypothèse de fermeture newtonienne):

$$-(\overline{u'w'}, \overline{v'w'}) = v_t \frac{\partial(u, v)}{\partial z} \quad (3-11)$$

$$-(\overline{T'w'}, \overline{S'w'}) = \Gamma_t \frac{\partial(u, v)}{\partial z} \quad (3-12)$$

v_t est le coefficient de viscosité cinématique équivalent lié à la turbulence. Il ne dépend pas des propriétés du fluide mais du type d'écoulement.

Γ_t est le coefficient de diffusivité turbulente, il s'exprime pour la température (respectivement la salinité) par le rapport de v_t avec le nombre de Prandtl turbulent (respectivement de Schmidt turbulent).

La turbulence intervient à une échelle spatiale inférieure à une maille du modèle. La viscosité turbulente est reliée à l'énergie cinétique turbulente E par la relation:

$$v_t = C_k \cdot L \cdot E^{1/2} \quad (3-13)$$

C_k est une constante empirique. L est la longueur de mélange qui est une échelle de longueur caractéristique de la dimension des tourbillons associés à l'écoulement turbulent. E est défini par:

$$E = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + \omega'^2) \quad (3-14)$$

où u' , v' et ω' sont les composantes turbulentes de la vitesse.

Par ailleurs, E est une variable prognostique, c'est à dire calculée à partir de l'équation d'évolution suivante (3-15):

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \underbrace{v_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]}_{(1)} + \underbrace{\frac{g}{\rho_0} \cdot v_t \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}_{(2)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial E}{\partial z} \right)}_{(3)} - \varepsilon + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial E}{\partial y} \right)}_{(4)}$$

Dans cette équation, le terme (1) représente la production d'énergie turbulente par cisaillement de vitesse, (2) est un terme de flottabilité, le terme (3) représente la redistribution verticale d'énergie par diffusion turbulente, le terme (4) la diffusion horizontale. La dissipation ε est paramétrée en fonction de la longueur de dissipation L_ε :

$$\varepsilon = \frac{C_\varepsilon \cdot E^{3/2}}{L_\varepsilon} \quad (3-16)$$

Pour déterminer les longueurs de mélange et de dissipation, le modèle utilise l'approche de Bougeault and Lacarrère [1989] qui est intéressante car la formulation des longueurs tient compte de la stabilité locale du fluide et permet ainsi d'améliorer la représentation des échanges turbulents, notamment au niveau de la thermocline.

On explique les longueurs L et L_ε de la façon suivante: soit une particule fluide possédant une énergie cinétique turbulente, elle peut effectuer un trajet maximum en convertissant toute son énergie cinétique turbulente en énergie potentielle. Elle peut se déplacer ainsi vers le haut d'une longueur L_h et vers le bas d'une longueur L_b alors:

$$E(v) = \frac{g}{\rho_0} \int_z^{z+L_h} (\rho(z) - \rho(z')) dz' \quad (3-17)$$

$$E(v) = \frac{g}{\rho_0} \int_{z-L_b}^z (\rho(z) - \rho(z')) dz' \quad (3-18)$$

On définit ensuite L et L_ε par les relations:

$$L = \min(L_h, L) \quad (3-19)$$

$$L_\varepsilon = \sqrt{L_h \cdot L_b} \quad (3-20)$$

Enfin, les constantes $C\varepsilon$ et C_k ont été déterminées par Gaspar et al. [1990] pour l'océan: $C_\varepsilon = 0.1$ et $C_k = 0.7$.

3.3 Les conditions aux limites

Ces conditions concernent la surface, le fond ainsi que les frontières latérales ouvertes sur l'océan et celles fermées à la côte.

3.3.1 A la surface libre

Les conditions en surface sont les suivantes :

$$\rho_o v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (3-21)$$

$$E = \frac{\|\vec{\tau}_b\|}{\rho_0 \sqrt{C_\varepsilon \cdot C_k}} \quad (3-22)$$

$$\left(v_t \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=n} = Q_e + Q_s + Q_l + (1 - T_r) Q_c \quad (3-23)$$

$$\left(v_t \frac{\partial S}{\partial z} \right)_{z=n} = (E_s - P_{rs}) S \quad (3-24)$$

La tension de surface $\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ est calculée à partir de $\rho_{0\text{air}}$ la masse volumique de l'air (1.266 kgm^{-3}), de la vitesse du vent \vec{V}_{vent} donnée par le modèle ALADIN de Météo-France à 10 m d'altitude et de Cv le coefficient de traînée:

$$\vec{\tau}_s = \rho_{0\text{air}} C_v \| \vec{V}_{vent} \| \vec{V}_{vent} \quad (3-25)$$

Dans les bilans de chaleur et de sel à la surface ((3-23) et (3-24)), Q_s est le flux de chaleur sensible, Q_e représente le flux de chaleur latente et Q_l est le flux radiatif de grandes longueurs d'ondes, Q_c correspond le flux radiatif dans les courtes longueurs d'onde, T_r est le coefficient de transmission; P_{rs} est le taux de précipitation et E_s est le taux d'évaporation .

Les conditions atmosphériques constituant un forçage dynamique primordial du Golfe du Lion, la modélisation des flux atmosphériques à l'interface océan-atmosphère est capitale et nécessite une bonne prise en compte des conditions réelles.

3.3.2 Au fond

Les conditions aux limites à cette frontière s'écrivent en $z = -h$:

$$\rho_o v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (3-26)$$

$$E = \frac{\|\vec{\tau}_b\|}{\rho_0 \sqrt{C_\varepsilon \cdot C_k}} \quad (3-27)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = 0 \quad (3-28)$$

La tension de cisaillement sur le fond $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ dépend de manière quadratique de la vitesse horizontale près de cette frontière V_b , prise sur le premier niveau de la grille située à la hauteur z_1 par rapport au fond:

$$\vec{\tau}_b = \rho_0 C_d \|\vec{V}_b\| \vec{V}_b \quad (3-29)$$

C_d est le coefficient de traînée. Il s'exprime en fonction de la longueur de rugosité et de la constante de Von Karman κ par une loi logarithmique:

$$C_d = \left(\frac{\kappa}{\log(Z_1/Z_0)} \right)^2 \quad (3-30)$$

La longueur de rugosité caractérise l'intensité du frottement. Elle est prise égale à 0.01m. Les relations précédentes sont obtenues en faisant l'hypothèse que le courant suit un profile logarithmique au voisinage du fond. Z_1 est la distance entre le premier niveau sigma et le fond.

3.3.3 Aux frontières latérales

Pour les frontières latérales fermées, on applique une condition de nullité pour le flux normal à la frontière. Concernant les frontières latérales ouvertes, on applique des conditions radiatives [Oey and Chen, 1992]. La composante normale du transport U s'écrit:

$$U = U_0(t) \pm \sqrt{gH} (\eta - \eta_0(t)) \quad (3-31)$$

On leur associe de plus un schéma de relaxation pour le courant (horizontal et vertical), la densité, la température et la salinité. Cette relaxation s'effectue sur une zone périphérique du domaine modélisé et le temps de relaxation choisi dépend du modèle: 10 jours pour le mode interne et 4 heures pour le mode externe. Concernant la température et la salinité, des conditions "upstream" sont appliquée entraînant une advection des champs de grande échelle sous des conditions de flux entrant.

3.4 Les apports d'eau douce

Cinq fleuves sont pris en compte dans ces travaux: le Rhône (grand et petit), l'Aude, l'Hérault et l'Orb. Ils sont modélisés par des canaux longs de quelques points de grille dans l'une ou l'autre des directions horizontales du modèle. Aux points source de ces fleuves, la composante horizontale du courant dans le canal s'exprime en fonction du débit D, de la largeur L et de la profondeur hc du canal:

$$U_{canal} = \frac{D}{L \cdot h_c} \quad (3-32)$$

Les débits des fleuves évoluent dans le temps grâce aux données fournies par la Compagnie Nationale du Rhône et la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement. Concernant la température, une valeur de 8°C est imposée au point source pendant toute la période de simulation. Le profil vertical du courant dans le canal est logarithmique.

3.5 Choix des forçages

Le modèle MOM fournit pour la Méditerranée des champs de grande-échelle hebdomadaires pour 2001. Pour 2004 et 2005, le modèle OPA est utilisé pour forcer le modèle côtier SYMPHONIE. Pour le forçage du vent, on a utilisé les flux Aladin prévus toutes les 3 heures.

Chapitre 4. Les Sorties du Modèle et les traitements des données

4.1 Description des sorties 3D du modèle SYMPHONIE

Les sorties du modèle SYMPHONIE sont distribuées sous format Netcdf. Chaque fichier Netcdf contient les valeurs des variables prognostiques du modèle: la température (T), la salinité (S), les deux composantes de vitesse (U, V) et l'élévation de la surface (SSH). Chaque fichier contient aussi les valeurs de plusieurs paramètres et variables dérivées nécessaires pour le fonctionnement du modèle et pour l'exploitation des résultats (paramètres de grille, coordonnées géographiques des mailles de grille, profondeur des niveaux sigma, densité) et, pour la version 2004 du modèle, les données des forçages.

En conséquence des évolutions apportées au modèle SYMPHONIE, il existe des changements dans les données pour chaque année. Le modèle 2001 a tourné sur une grille de 340 X 116 mailles, tandis que ceux en 2004 et 2005 ont tourné sur une grille de 339 X 115. Les données sont moyennées quotidiennement pour l'année 2001 et enregistrées comme des fichiers mensuels. Par contre, pour les données en 2004 et 2005, les champs de vitesse sont moyennés sur 2 jours tandis que les autres variables sont des valeurs instantanées et toutes les données sont enregistrées chaque deux jours. Tous ces changements demandent ainsi une bonne familiarisation des sorties du modèle. En particulier, ces petites différences dans les configurations du modèle ont demandé des adaptations de mes routines de traitement des données.

4.2 Traitement des données du modèle

Comme base de départ pour développer un package d'outil pour le traitement des sorties du modèle, j'ai utilisé le paquet ROMS_TOOLS [http://www.brest.ird.fr/Roms_tools/]. Ce paquet a été développé pour le modèle ROMS qui a les mêmes caractéristiques de base que SYMPHONIE: grille horizontale Arakawa C, grille verticale sigma, time-splitting.

- Ligne de côte

L'outil M_Map [<http://www.eos.ubc.ca/~rich/map.html>] est utilisé pour extraire une ligne de côte à haute résolution (Figure 4-1). Le masque terre-mer est défini en attribuant des grandes valeurs sur toutes les variables des grilles terrestres.

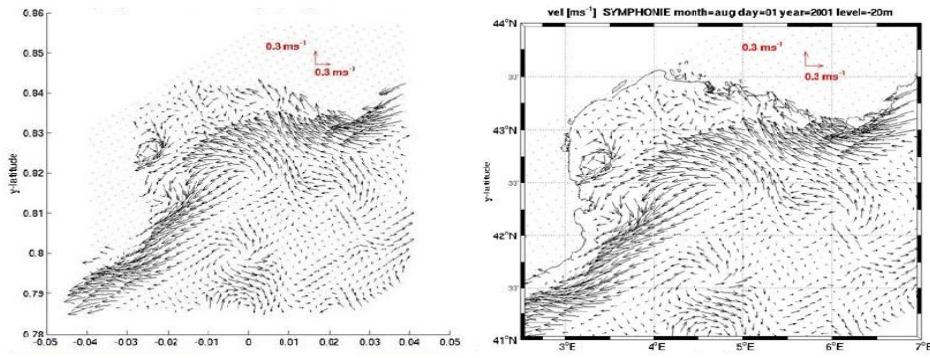


Figure 4-1: Extraction de la ligne de côte le 1 août 2001 à 20 m

- Rotation des vecteurs vitesse

Les champs de vitesse sont calculés dans le repère du modèle SYMPHONIE qui a une inclinaison par rapport l'axe nord-sud géographique (Figure 3-1, Ch 3). Donc, les rotations des vecteurs sont faites sous la forme:

$$\begin{aligned} U_{rot} &= U * \cos(\alpha) + V * \sin(\alpha); \\ V_{rot} &= U * \sin(\alpha) + V * \cos(\alpha); \end{aligned} \quad (4-1)$$

où alpha est l'angle de rotation de la grille qui est égale 31° (Figure 4-2).

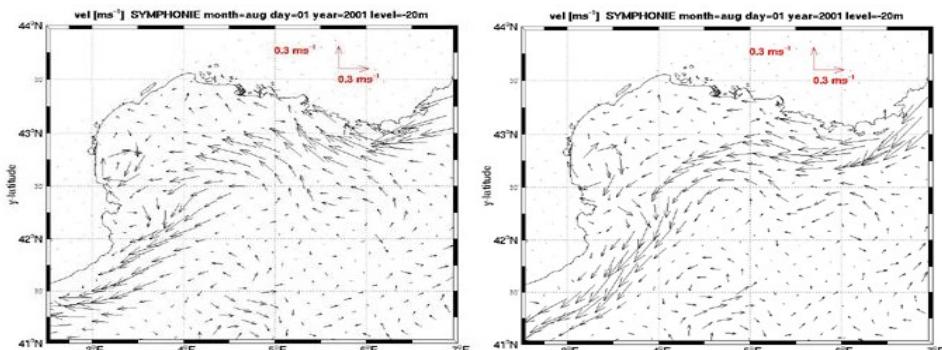


Figure 4-2: Cartes horizontales des vecteurs de vitesse brutes (gauche) et des vecteurs tournés (droite) le 1 août 2001 à 20 m

- Passage de la coordonnée sigma à la coordonnée z

Pour des raisons logistiques liées à l'expérience de marquage au traceur SF6, il est souhaité d'avoir

un environnement physique stratifié. J'ai donc étudié les profondeurs inférieures à 50 mètres. Afin d'étudier des structures à une profondeur donnée, tous les champs définis sur la grille C et en coordonnées sigma doivent être interpolés sur la même grille scalaire en horizontale et en coordonnée-z verticale.

La transformation des résultats du modèle de la grille sigma à des niveaux z constants est effectuée par la formule:

$$V = \frac{((V1 - V2) * Z + V2 * Z1 - V1 * Z2)}{(Z1 - Z2)} \quad (4-2)$$

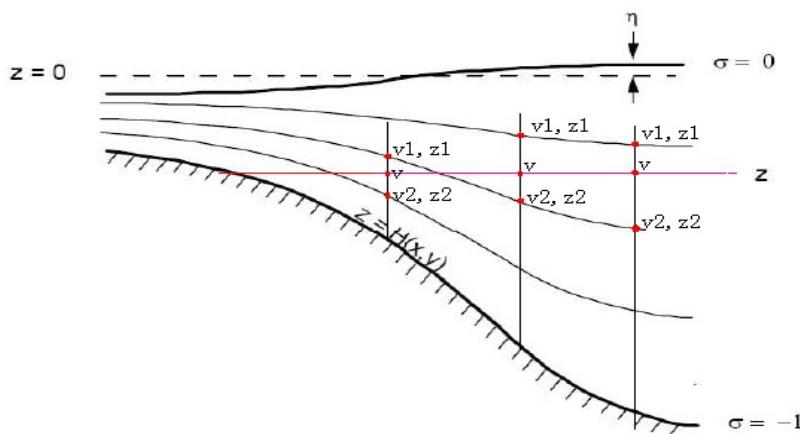


Figure 4-3: Grille sigma avec un niveau z choisi

Z est la profondeur choisie (la ligne rouge; Figure 4-3). Z1 et Z2 correspondent aux profondeurs des deux points de grille les plus proches de Z dans chaque maille horizontale, et V1, V2 sont des variables sur ces deux grilles respectivement. Z1 et Z2 jouent un rôle de poids dans l'interpolation. Les profondeurs des niveaux sigma pour les variables scalaires et les vitesses sont aussi nécessaires pour effectuer ce calcul.

Les profondeurs contenues dans les fichiers sont les profondeurs à l'instant initial de chaque enregistrement. C'est à dire, pour 2001, comme les fichiers sont enregistrés mensuellement, les profondeurs sont les valeurs du premier jour de chaque mois. Pour les profondeurs exactes à chaque instant qui reste dans chaque mois, il faut prendre en compte les élévations de la surface. Mais, comme celles-ci sont négligeables devant la profondeur, le calcul exact n'a finalement pas été fait. Pour 2004 et 2005, les profondeurs correspondent bien à chaque instant étudié.

- Calculer le champ horizontal de la vorticité relative

L'études des structures tourbillonnaires nécessite de calculer la vorticité relative.

$$\text{La définition de la vorticité relative horizontale est : } \zeta = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \quad (4-3)$$

Un fait remarquable ici est que les composantes de vitesse U et V dans la formulation sont des variables brutes. Autrement dit, la vorticité relative est calculé directement par le rotationnel des vitesses sans la rotation décrite précédemment. Cela est permis du fait que ζ est scalaire et évite une perte de la résolution générée par la rotation. Pour discréteriser cette formule, il faut tenir en compte que les champs U et V sont fournis sur la grille décalée, ils nécessitent aussi une interpolation sur la grille de scalaire. Toutefois, j'ai testé aussi une comparaison des différents résultats faisant le calcul en commençant par interpoler les champs de vitesse sur la grille de calcul, et le calcul à partir des champs tournés. Comme vu dans la figure 4-4, la différence entre les résultats de deux méthodes est assez petite. Finalement, j'ai choisi de calculer la vorticité à partir des champs de vitesse sur la grille décalée et non tournée, et puis de l'interpoler vers la grille scalaire.

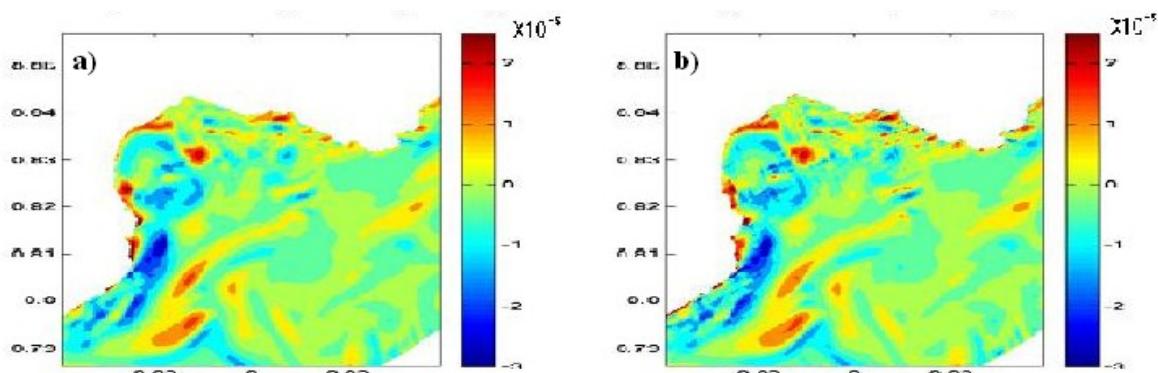


Figure 4-4 : a) Carte horizontale de la vorticité relative interpolée après le calcul des champs de vitesse sur les grille décalée. b) Carte horizontale de la vorticité relative calculée à partir des champs de vitesse interpolée sur la grille scalaire.

- Visualisation des données

Une fois finies les préparations des données, le logiciel Matlab nous a permis de visualiser tous les champs instantanés et puis de créer les animations qui représentent très bien la circulation et les

évolution des structures (Pour les animations, voir sur le site web personnel: <http://www.com.univ-mrs.fr/~h307258>).

A partir des visualisations, sous certains critères (voir Ch6), on peut alors choisir la période et la zone d'étude où apparaissent des structures à étudier.

A la fin de ces études, on peut faire un bilan sur les sorties du modèle à partir des résultats. Ceux-ci sont bons sauf deux problèmes:

- Les données du mois de janvier en 2001, prenant en compte le spin up, ne sont pas exploitables.
- Pour les sorties du modèle en 2005, la présence inhabituelle du Courant Nord, dans le Golfe du Lion, à partir de mi-octobre jusqu'à la fin du mois (Ch 6, Figure-19), nous faisait douter du réalisme des sorties du modèle. Cependant, il semblerait que ce soit dû aux forçages météorologique(C. Estournel, communication personnelle).

Chapitre 5. L'identification et le suivi des structures tourbillonnaires

5.1 Histoire de la technique d'analyse en ondelettes.

L'analyse en ondelettes a été introduite au début des années 1980, dans un contexte d'analyse du signal et d'exploration pétrolière. Il s'agissait à l'époque de donner une représentation des signaux permettant de faire apparaître simultanément des informations temporelles (localisation dans le temps, durée) et fréquentielles. Les ondelettes n'ont depuis lors cessé de se développer et de trouver de nouveaux champs d'application : la stockage numérique des empreintes digitales effectué par le FBI, la compression des images pour la télévision haute définition et le téléphone vidéo, le stockage ou la transmission de résultats de mesures sismiques, la modélisation des cascades d'énergie dans des écoulements hydrodynamiques fortement turbulents.

Dans le domaine de l'océanographie, la technique des ondelettes a été appliquée aux résolutions numériques des ondes Kelvin et Rossby par Jameson et Miyama [2002]. Luo et Jameson [2002] ont réalisé une application d'analyse en ondelettes à des structures évoluant temporellement comme les tourbillons ou les fronts décrits par le modèle numérique ou par des données satellites. Récemment, Doglioli et al. [2006] ont développé un algorithme, basé sur une superposition des structures à chaque instant sur des niveaux verticaux différents, pour capturer et suivre tridimensionnellement dans un modèle numérique l'enveloppe des tourbillons des Aiguilles dans l'océan Atlantique.

Dans mon étude, la technique est employée à identifier des tourbillons à partir de tranches horizontales de la vorticité relative calculée. La procédure d'étude peut être décomposée en deux: l'analyse en ondelettes et le suivi temporel. Le paquet WATERS (Wavelet Analysis for Time-tracking Eddies in Regional models) des routines MATLAB développées par Doglioli et al. [2006], a été adapté pour cette étude. Cet outil est basé sur le paquet de traitement en ondelettes Wavelab (pour plus de détails se référer à [<http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/>]).

5.2 L'analyse en ondelettes.

5.2.1 Description de l'analyse.

L'analyse en ondelettes consiste en une décomposition d'un signal de façon similaire à la transformation de Fourier dans laquelle les signaux sont décomposés comme une somme de fonctions sinus et cosinus. La différence principale entre ces 2 analyses est que l'analyse en ondelettes donne une représentation des signaux permettant de faire apparaître simultanément des informations temporelles et fréquentielles tandis que la transformation de Fourier a seulement la localisation dans la fréquence.

Le paquet de traitement employé utilise la base de Haar comme la base d'ondelette sur laquelle on décompose le signal. L'analyse génère une famille d'ondelettes à partir d'une forme d'ondelette générique appellée ondelette mère (Figure 5-1) par dilatation ou translation (Figure 5-2). Le signal est représenté comme la somme pondérée de ces petites ondes dilatées ou translatées [<http://www2.isye.gatech.edu/~brani/wp/kidsA.pdf>]. Les poids de ces ondelettes dans la décomposition s'appellent les coefficients d'ondelette qui forment la transformée en ondelettes.

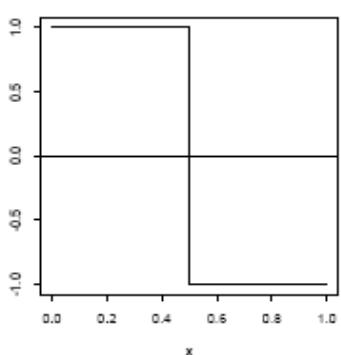


Figure 5-1 : l'ondelette Haar mère

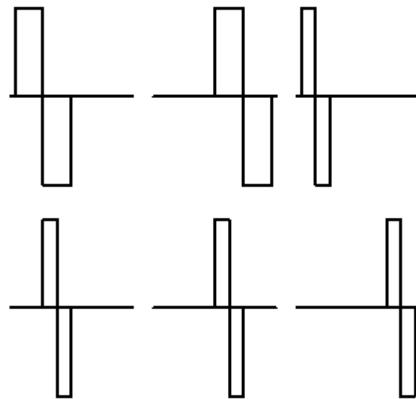


Figure 5-2 : Dilatation et translation d'ondelette Haar entre 0 et 1

Ici, l'analyse est utilisée pour décomposer les champs de vorticité relative et pour extraire des structures locales dans l'espace. La vorticité relative a été choisie puisqu'elle a donné un résultat excellent pour l'identification des tourbillons [Doglioli et al., 2006 et références incluses].

5.2.2 L'identification des tourbillons.

La figure 5-3 a) montre par exemple la vorticité relative du 25 septembre 2001 à 20 mètres. Pour l'analyse en ondelettes, il est nécessaire de travailler sur un domaine carré ($2^N \times 2^N$). J'ai donc travaillé sur un domaine carré incluant 64 X 64 points de grille. Il est situé sur la zone d'étude qui couvre l'ouest du golfe. Il peut aussi être positionné à deux autres endroits: le milieu et l'est du golfe.

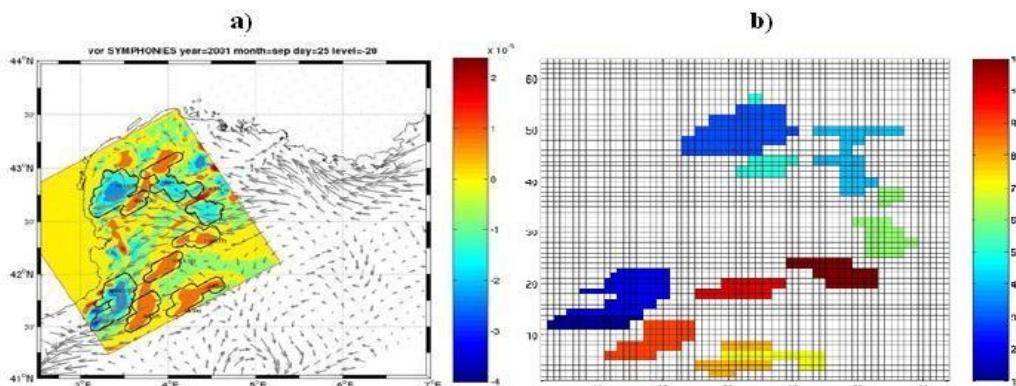


Figure 5-3: a) carte horizontale de la vitesse et de la vorticité relatives et des contours des tourbillons dans la zone d'étude le 25 septembre 2001 à 20 m; b) Carte horizontale d'identification initiale des tourbillons.

Il existe 8 vraies structures identifiables dans la figure 5-3 a). L'analyse en ondelettes repère 11 structures (Figure 5-3 b). La barre des couleurs correspond à ces 11 structures. Il existe des problèmes avec cette analyse en ondelettes. Par exemple, les structures 9, 10 et 11 (orange, rouge et rouge foncé respectivement) sont distinguées dans l'analyse en ondelettes alors qu'elles semblent appartenir au même filament de vorticité cyclonique (Figure 5-3 a). De même, les structures 7 et 8 (jaune et orange clair) appartiennent évidemment à la même structure de vorticité cyclonique. Un autre problème rencontré est que la structure 6 (cyan) est composée de deux tâches de vorticité de signe différents. Et de façon générale, il semble que les résultats d'analyse manquent de précision.

Pour avoir des résultats plus précis, une plus haute résolution du modèle serait nécessaire. Mais, pour mes études, toutes les résolutions fournies sont de grille de 3 km et, par conséquence je n'ai pas beaucoup de choix. Du coup, j'ai utilisé une option du paquet WATERS qui permet d'augmenter le nombre de structures identifiables et ensuite qui regroupe les structures proches et du même signe. Ainsi on obtient une résolution "artificielle" plus importante (Figure 5-4).

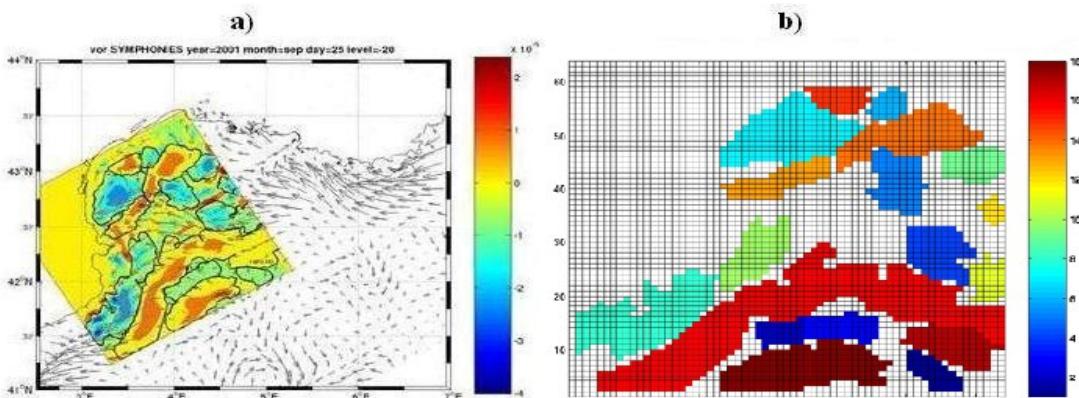


Figure 5-4: a) carte horizontale de la vitesse et de la vorticité relatives et des contours fins des tourbillons dans la zone d'étude le 25 septembre 2001 à 20 m; b) Carte horizontale d'identification des tourbillons en option.

Les deux cartes montrent que l'option détecte 18 structures, apporte une meilleure identification des tourbillons et que les contours correspondent aussi mieux aux tâches de vorticité. Surtout, les trois problèmes expliquées précédemment sont résolus.

Mais, il faut tenir en compte que les incertitudes d'analyse existent quand même, le seul moyen radical est d'améliorer la résolution du modèle.

À la fin de cette étape, chaque structure indépendante est comptée et sa surface est aussi calculée. Le centre du tourbillon est défini par le point de grille qui a le maximum local de la valeur absolue de vorticité relative. Le diamètre du tourbillon D est la moyenne de la distance D^{NS} et D^{EW} . D^{NS} et D^{EW} étant les cordes méridienne et zonale qui interceptent le tourbillon en passant par son centre. La salinité et la température sont moyennées sur la surface du tourbillon. Le même calcul a été fait

aussi sur l'énergie cinétique qui est définie par la formule: $E = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{U^2 + V^2}$

où U et V sont les composantes de vitesse.

5.3 Le suivi temporel.

À partir de la carte des contours des tourbillons, on peut choisir une structure à laquelle on s'intéresse. Avec une séquence temporelle des contours de tourbillon, on est capable de réaliser le suivi temporel de la structure étudiée (Figure 5-5).

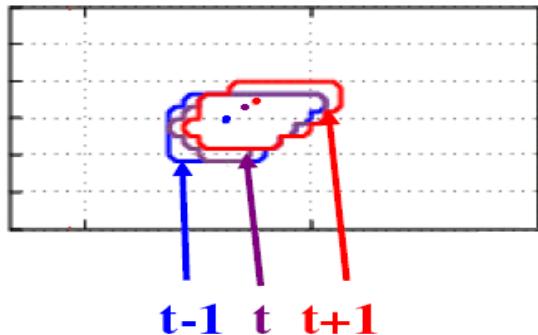


Figure 5-5: Séquence temporelle des tourbillons aux instants consécutives.

Les 3 contours de couleur différente sont les tourbillons capturés par l'analyse en ondelettes à 3 instants consécutives ($t-1$, t et $t+1$). Les 3 points sont les centres des structures de couleur correspondante. La structure à instant t est considérée comme le suivi du même tourbillon à $t-1$ dans le sens direct, ou du tourbillon à instant $t+1$ dans le sens à rebours si les critères suivants pourraient être satisfaits:

$$\text{En arrière: } C_{t,z} \in \mathbb{C}_{t-\Delta t,z}$$

$$\text{En avant: } C_{t,z} \in \mathbb{C}_{t+\Delta t,z}$$

Où $C_{t,z}$ est le centre du tourbillon choisi à instant t et profondeur z , $\mathbb{C}_{t-\Delta t,z}$ $\mathbb{C}_{t+\Delta t,z}$ sont deux séries des points de grille du même tourbillon à instant $t-1$ et $t+1$. Δt est le pas de temps des sorties du modèle et est égal à 1 jour pour 2001, et 2 jours pour 2004 et 2005.

La distance couverte par le centre du tourbillon pendant Δt est considérée comme le déplacement du tourbillon. Donc, de chaque distance instantanée, la vitesse de déplacement du tourbillon est calculée en divisant cette distance par le pas de temps.

L'instant initial du suivi direct et du suivi à rebours sont respectivement le début et la fin de la durée de vie du tourbillon. Pour chaque structure choisie, les suivis dans les 2 sens ont été faits afin de préciser les dates de la "naissance" et de la "mort" du tourbillon. Les résultats d'analyse sur la vorticité relative sont aussi représentés sur la salinité, la température et la SSH pour avoir des caractéristiques de chaque structure.

Chapitre 6. Résultats et discussions

Ce chapitre regroupe différentes études que j'ai conduites sur la période choisie de mi-juillet à fin octobre, à 20 mètres de profondeur. La période englobe la floraison automnale du Golfe du Lion, durant laquelle la campagne LATEX de 2009 devrait avoir lieu. La profondeur 20 mètres a été choisie pour avoir un environnement physique stratifié et une zone mélangée inférieure à 50m. L'analyse en ondelettes m'a permis de trouver et de suivre 14 structures tourbillonnaires à l'ouest et au centre du Golfe du Lion sur 3 années : 2001, 2004 et 2005. Parmi ces 14 tourbillons, il y a 7 structures anticycloniques et 7 cycloniques.

En 2001 (Figure 6-1), deux structures sont anticycloniques: A1(01) et A2(01), et trois sont cycloniques : C1(01), C2(01) et C3(01). Les figures sont rangées par ordre chronologique. Sauf C2(01) qui est au milieu du Golfe, les quatre autres se situent dans la zone ouest.

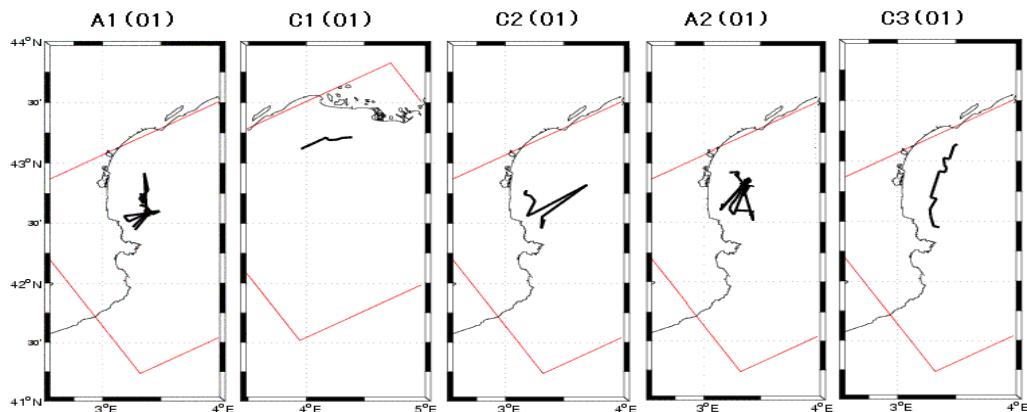


Figure 6-1: Trajets des 5 tourbillons en 2001 obtenues par l'analyse en ondelettes.

En 2004 (Figure 6-2), j'ai trouvé aussi deux tourbillons anticycloniques à l'ouest : A1(04) et A2(04), et trois tourbillons cycloniques : C1(04) à la sortie du Rhône; C2(04) au milieu et C3(04) à l'est du golfe.

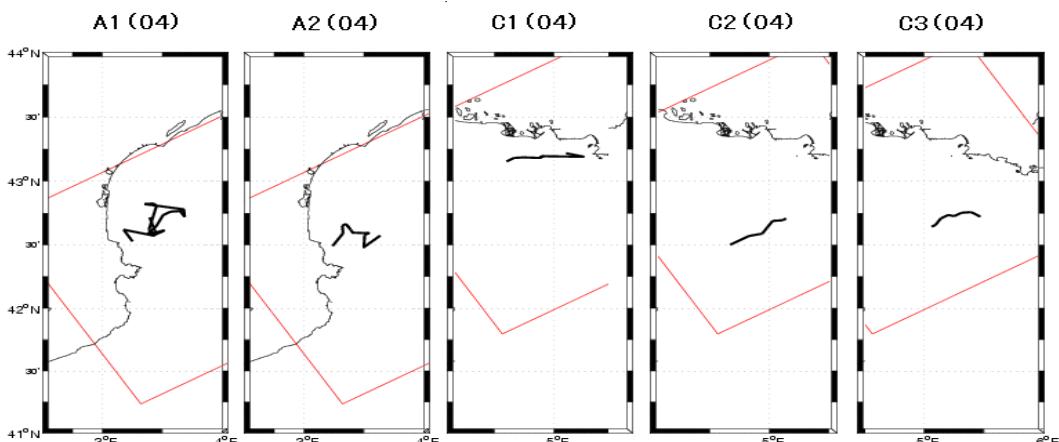


Figure 6-2: Trajets des 5 tourbillons en 2004 obtenues par l'analyse en ondelettes.

En 2005 (Figure 6-3), quatre structures tourbillonnaires sont capturées. Un tourbillon anticyclonique A1(05) se présente toujours à l'ouest du golfe, une structure de vorticité positive que l'on l'appelle pseudo-C(05) est située sur le bord intérieur du Courant Nord, et deux tourbillons anticycloniques se forment l'un après l'autre à la sortie du Rhône (A-Rhône a (05) et A-Rhône b(05)).

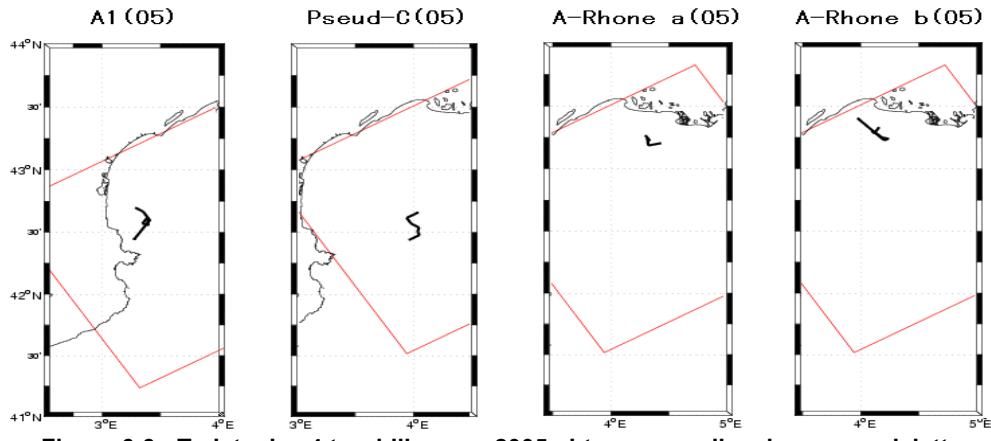


Figure 6-3 : Trajets des 4 tourbillons en 2005 obtenues par l'analyse en ondelettes.

Comme vu dans le chapitre précédent, en utilisant l'analyse en ondelettes sur la vorticité, on peut suivre chaque tourbillon depuis sa naissance jusqu'à sa mort. La même technique m'a permis aussi d'étudier l'évolution de la salinité, de la température et de l'élévation de la surface libre correspondants pour la même structure. Ensuite, en superposant la vitesse au contour du tourbillon, j'ai étudié l'influence du champ de courant sur celui-ci. Je cherchais à trouver une zone avec une forte occurrence de tourbillons de caractéristiques choisies: taille relativement grosse ($D \geq 20$ km), durée de vie assez longue ($T \geq 15$ jours) et, si possible, interagissant avec le Courant Nord. Ces critères m'ont conduite à me focaliser sur la zone ouest du Golfe du Lion.

Dans la suite de cette étude, je vais exposer les structures cycloniques, les anticycloniques et puis je ferai un bilan sur leurs signatures et sur les images satellites.

6.1 Les tourbillons cycloniques à l'ouest du Golfe du Lion.

Il y a seulement deux structures cycloniques qui ont été trouvées dans cette zone d'étude: C2(01) et C3(01). Donc ce sont ces 2 structures que je vais vous présenter.

6.1 .1 C2(01) en 2001 :

- caractéristiques générales du tourbillon

Ce tourbillon cyclonique se développe le 15 août près du Cap Leucate et disparaît le 29 août 2001 près du Cap Cerbère; il a donc une durée de vie de 15 jours. La figure 6-4 montre que l'eau de cette structure, par rapport aux eaux avoisinantes, est plus salée et plus chaude. L'élévation de surface libre est plus basse que celle des eaux ambiantes (Figure 6-4). En moyenne sur sa durée de vie, ce tourbillon a une vitesse moyenne de déplacement de 12 cm/s et un diamètre de 29 km.

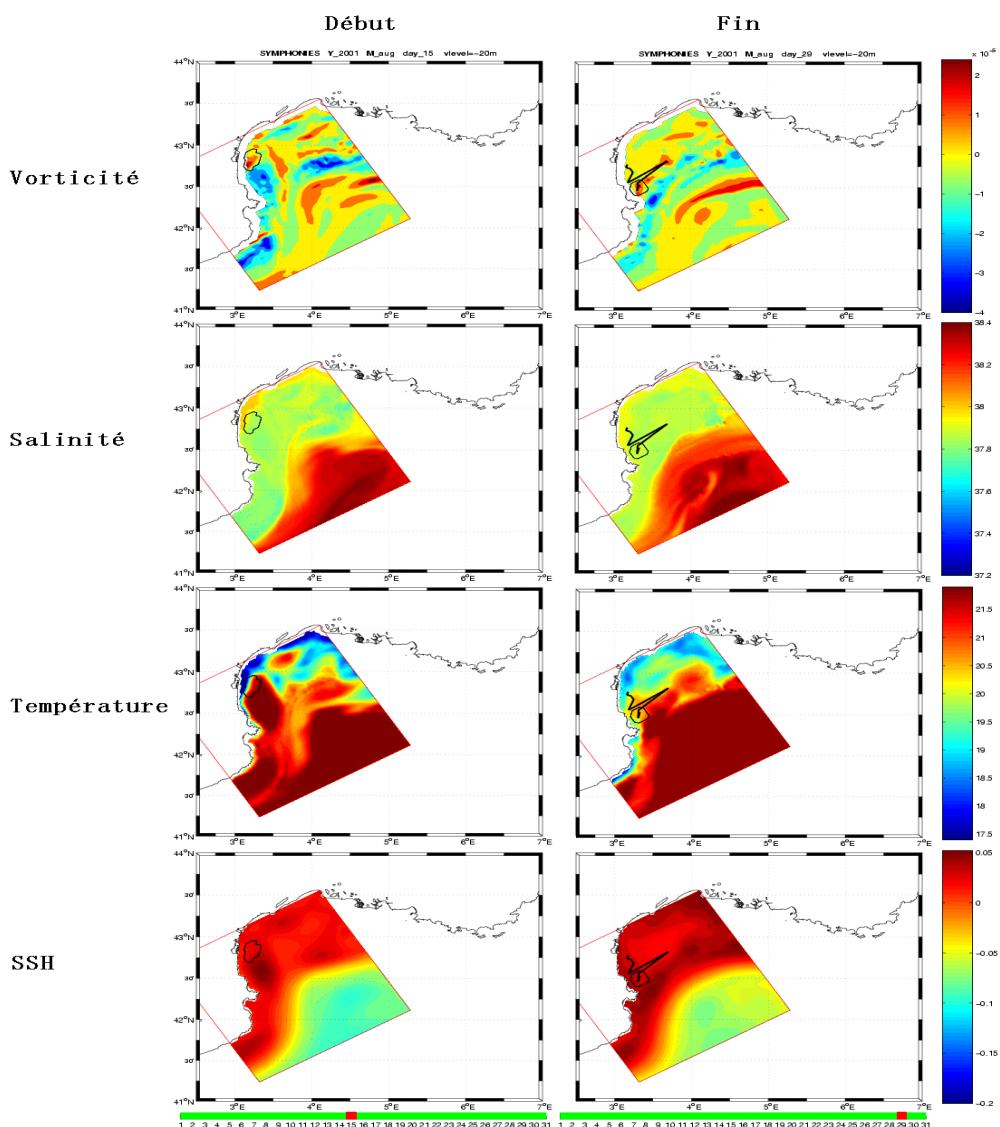


Figure 6-4 : Cartes horizontales de Vorticité, S, T, SSH de la structure cyclonique C2(01) à son début (15 août 2001) et à sa fin (29 août 2001) à 20m. Le contour (ligne fine) encercle la surface du tourbillon et la ligne épaisse est le trajet de la structure.

La figure 6-5 illustre les évolutions, pendant la durée de vie du tourbillon, de la vitesse de déplacement, de la taille du tourbillon et de l'énergie cinétique moyennée sur toute la structure. A partir des positions du centre du tourbillon, estimées par l'analyse en ondelettes, il est possible de calculer la vitesse moyenne de déplacement de la structure entre les deux instants temporels.

La barre d'erreur pour la vitesse de déplacement est calculée en considérant une incertitude d'une maille de grille (3km) sur la position du centre. Pour chaque intervalle de temps (1 jour pour 2001, et 2 jours pour 2004 et 2005), elle est donc constante et égale à 4 cm/s pour 2001, et 2 cm/s respectivement pour 2004 et 2005. La barre d'erreur pour le diamètre est la différence entre D^{NS} et D^{EW} (voir partie 5.2.1).

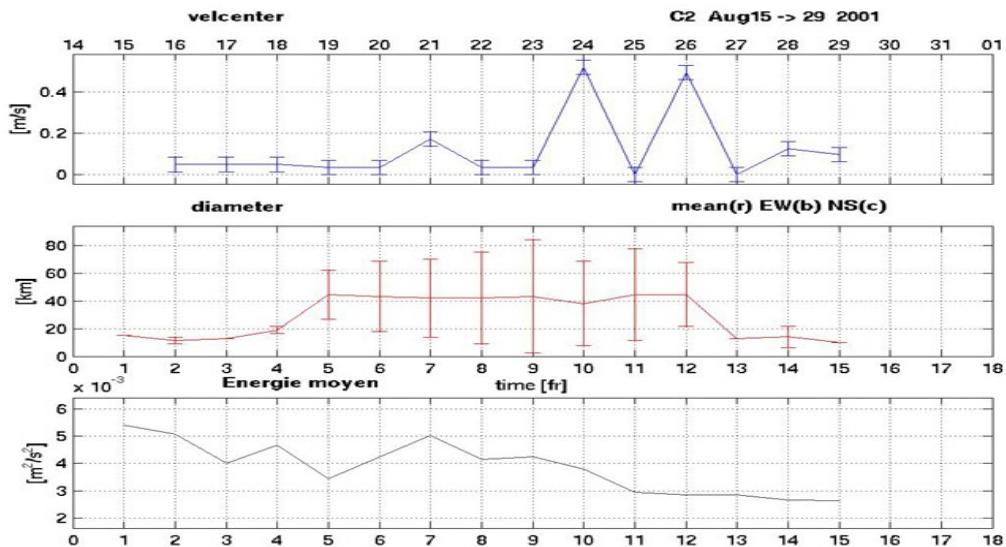


Figure 6-5 : Vitesse de déplacement, Diamètre moyen et Energie cinétique moyenne de la structure cyclonique C2(01) à 20m.

Les pics de la vitesse dans la figure 6-5 correspondent à des sauts du centre du tourbillon. La figure 6-6 désigne la séquence temporelle d'évolution de ce tourbillon. On voit bien que, le 18 août, il existe deux structures très proches qui ont le même signe de vorticité. Les faibles dimensions des tourbillons océaniques (~ 25 km), comparées à la taille de la grille du modèle (3 km), empêche l'ondelette de bien les distinguer.

En effet, à partir du 19 août, deux structures ont été considérées comme une seule structure. En plus, le 24, l'intensité de la vorticité de la structure à l'ouest augmente et l'analyse, qui définit le centre comme le maximum de la valeur absolue de la vorticité (voir partie 5.3), déplace le centre de la

structure 'double' à l'ouest. Le 26 août, la structure d'origine intensifie sa vorticité et donc "reprend" le centre. Cette difficulté à distinguer la structure explique aussi la croissance de la taille du tourbillon. Principalement la faiblesse de résolution du modèle gène l'analyse discernant la frontière entre les deux structures.

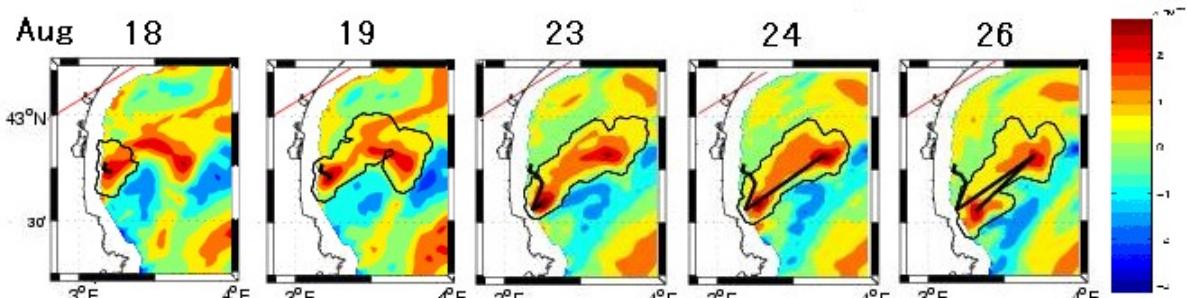


Figure 6-6 : Séquence temporelle des cartes de vorticité et contour du tourbillon cyclonique C2(01) à 20m

La salinité et la température à 20 mètres moyennées sur l'aire du tourbillon montrent une augmentation légère de la salinité du 15 au 18 août correspondant à une diminution de température (Figure 6-7). Les barres d'erreur, qui reportent la valeur de la déviation standard, indiquent une plus forte variation avant que les 2 structures s'approchent. Ce fait peut indiquer qu'il y a eu effectivement un échange entre les 2 structures, mais seulement une analyse 3D pourra mieux expliquer le phénomène.

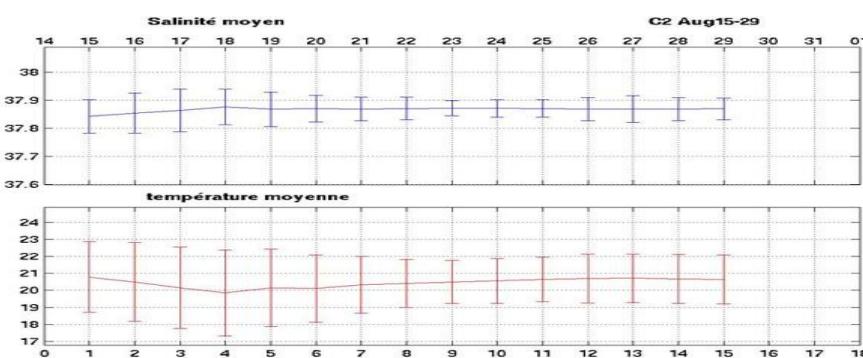


Figure 6-7 : Salinité moyenne et température moyenne de la structure cyclonique C2(01) à 20m.

6.1.2 C3(01) en 2001 :

Le cyclone C3(01) se forme près du Cap d'Agde le 26 septembre 2001, et bouge vers le sud jusqu'au 9 octobre entre Cap Cerbère et Cap Creus (Figure 6-8). Il a des caractéristiques similaires

à celles de C2(01): plus salé et moins chaud, avec une SSH moins élevée par rapport aux eaux ambiantes (voir page web personnelle).

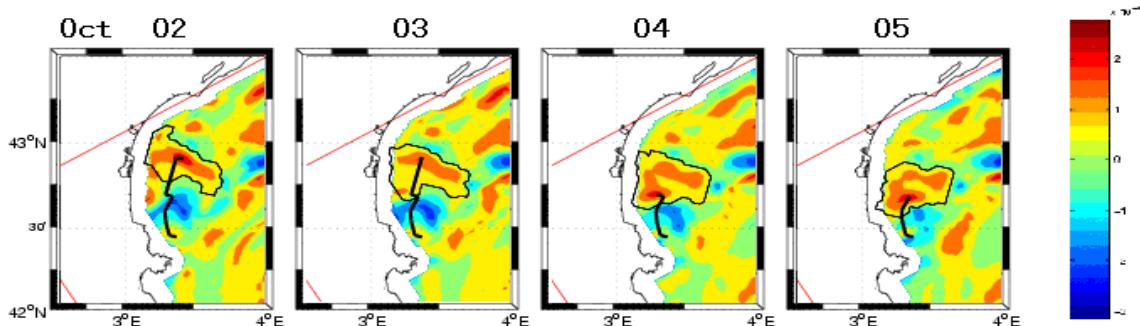


Figure 6-8 : Séquence temporelle des cartes de vorticité et de la trajectoire du centre de la structure cyclonique C3(01) le 2, 3, 4 et 5 Octobre. Cette trajectoire est suivie à rebours dans le temps.

Le pic de la vitesse de déplacement le 3 octobre est dû à un déplacement du maximum de vorticité à l'intérieur de la même structure (Figure 6-9). En effet, le 4 octobre, il existe deux tâches de vorticité dans la structure, et la tâche qui vient d'apparaître est plus intense que celle d'origine. Elle devient donc le centre de toute la structure.

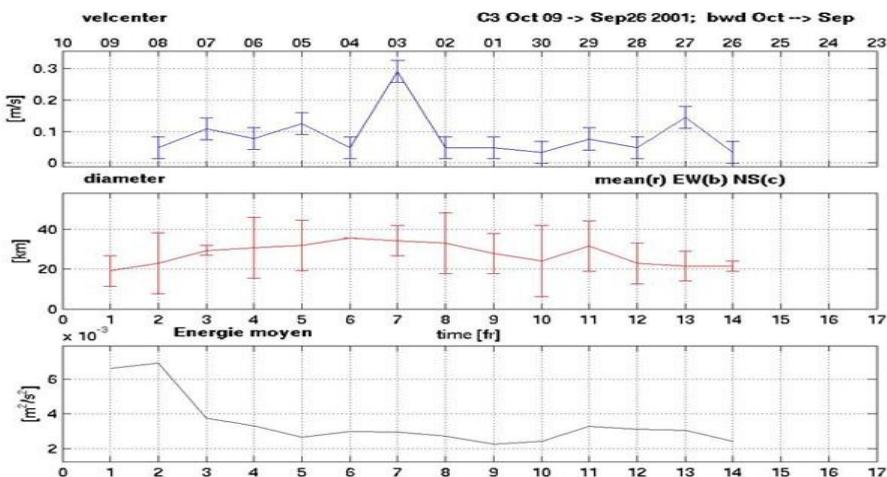


Figure 6-9 : Vitesse de déplacement, Diamètre moyen et Energie cinétique moyenne de la structure cyclonique C3(01) à 20m.

6.1.3 Bilan des tourbillons cycloniques.

Pour comparer les caractéristiques de chaque structure, tous les paramètres sont moyennés sur la durée de vie de chaque tourbillon.

N O M	Durée (J)	vitesse (cm/s)	Diamètre (km)	S	T	SSH
C1(01)	15	4 ± 2	21 ± 4	37.90 +	18.1 -	-
C2(01)	15	12 ± 17	29 ± 15	37.87 +	20.4 -	-
C3(01)	19	9 ± 7	28 ± 6	37.00 +	19.0 -	-
C1(04)	19	5 ± 5	47 ± 10	37.93 +	16.2 -	-
C2(04)	13	5 ± 2	27 ± 6	37.91 +	18.0 -	-
C3(04)	17	3 ± 1	70 ± 26	37.92 +	18.5 -	-
pseudo-C(05)	17	3 ± 2	22 ± 7	37.72 -	19.4 -	-
Moyenne	16	6	35	37.89	18.5	

Tableau 1: Bilan des tourbillons cycloniques

- Les erreurs sur la vitesse et le diamètre sont estimées à partir de la deviation standard de la série temporelle. Le fait que, pour certains cas, les erreurs sont plus grandes que la valeur moyenne, C2(01) par exemple, est dû aux fortes incertitudes sur la position du centre déjà montrées. Le diamètre de 70 km de C3(04) ne désigne pas que ce tourbillon a une taille si grande. Il est dû à l'existence d'un méandre, de même signe de vorticité et proche de C3(04), qui est incorporé dans la même structure par l'analyse en ondelettes (voir page web personnelle). La déviation correspondante est aussi relativement grande. Tous ces incertitudes dans l'analyse sont principalement la conséquence de la faiblesse de résolution du modèle.
- les signes '+' ou '-' dans les colonnes S et T indiquent la variation par rapport aux eaux avoisinantes: '+' indique que le tourbillon est plus salé et plus chaud, '-' le contraire.
- À cause de la forte pente de la SSH décroissante de la côte vers le large, ce signe + ou - n'a une valeur que locale, une SSH absolue pour la structure n'ayant pas été calculée.
- Comme mentionné dans le chapitre 4, il y a une incertitude sur le réalisme des données du modèle en 2005. La seule structure cyclonique de 2005 n'a pas une forme de tourbillon bien définie (d'où aussi son nom). Toutefois, pour ce qui concerne les valeurs moyennes, on n'observe pas une forte différence par rapport aux autres années.

6.2 Les tourbillons anticycloniques dans l'ouest du golfe du Lion.

Il y a cinq structures anticycloniques qui ont été suivies dans cette zone. Je présenterai les deux tourbillons anticycloniques qui sont les plus représentatifs et puis j'introduirai les phénomènes particuliers observés dans le suivi des autres structures.

6.2.1 A1(01) en 2001 :

Le tourbillon anticyclonique A1(01) est moins salé, plus chaud et avec une SSH plus élevée par rapport aux eaux ambiantes (Figure 6-10). Ces caractéristiques sont contraires de celles des tourbillons cycloniques. A1(01) a une durée de vie de 32 jours, une vitesse moyenne de déplacement de 8 cm/s et un diamètre moyen de 40 km (voir page web personnelle).

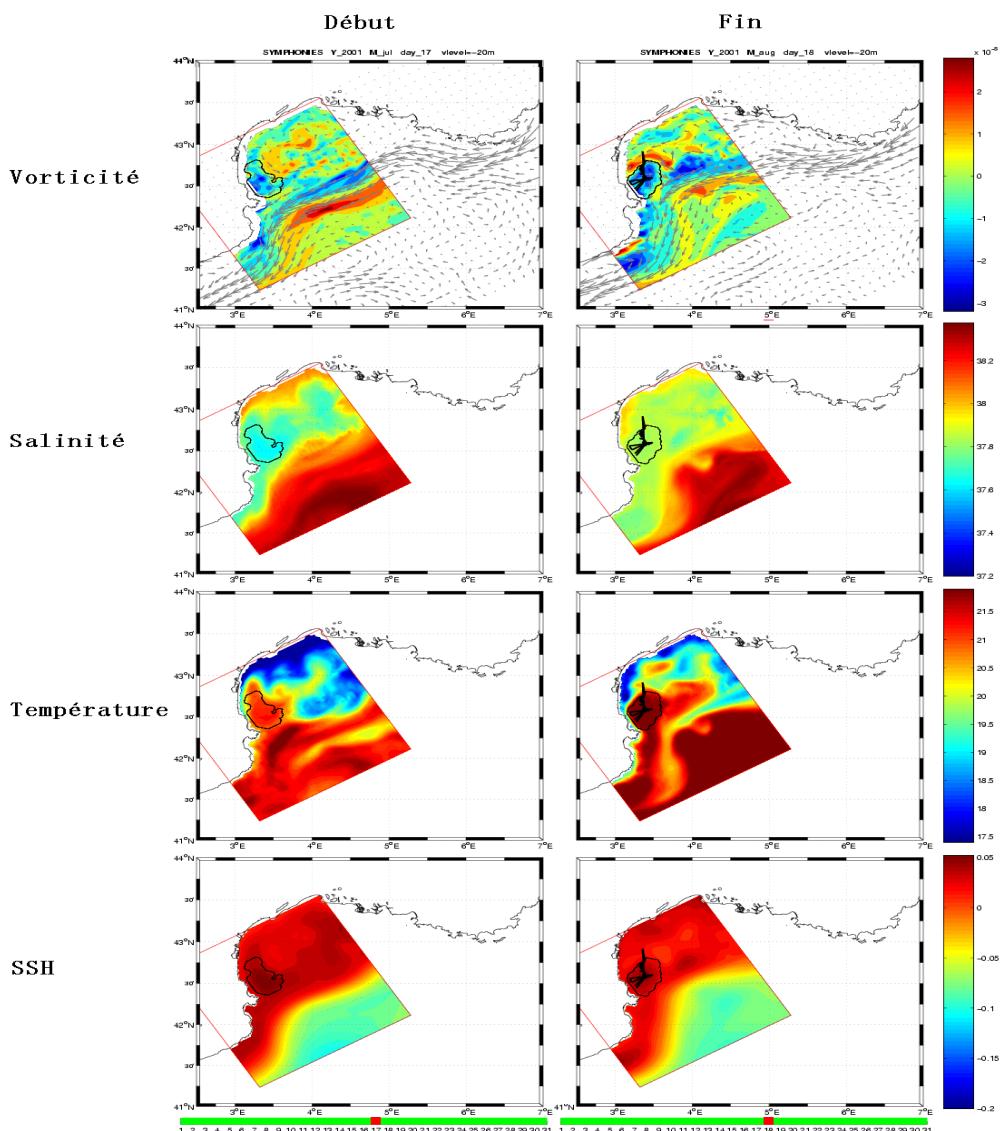


Figure 6-10 : Cartes horizontales de Vorticité, S, T, SSH de la structure anticyclonique A1(01) à son début (17 juillet 2001) et à sa fin (18 août 2001) à 20m.

A1(01) se forme le 17 juillet 2001; en même temps, au nord, un autre tourbillon de même type commence à se développer. Celui-ci est englobé par A1(01) cinq jours après le 22 juillet (Figure 6-11).

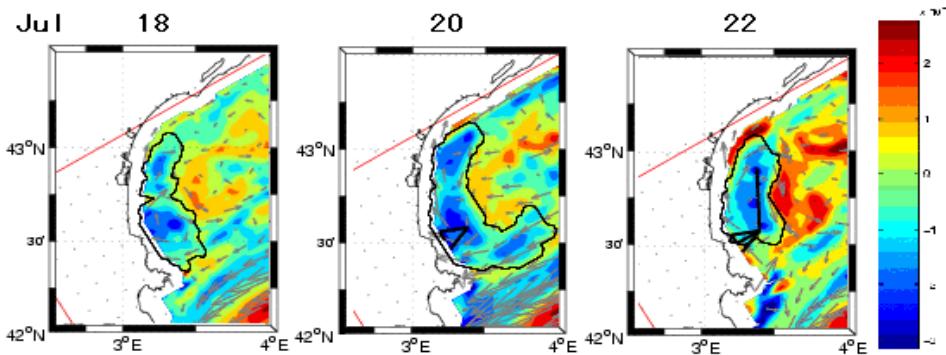


Figure 6-11 : Séquence temporelle des cartes de vorticité et de la trajectoire du centre de la structure anticyclonique A1(01) le 18, 20 et 22 Juillet

Après cette expansion, A1(01) est stable jusqu'au mois d'août. En effet il reste confiné dans la même zone ($42^{\circ}30' - 43^{\circ}\text{N}$, $3^{\circ} - 3^{\circ}30'\text{E}$). A partir du 7 août, cette structure commence à bouger un peu vers le large en s'approchant du Courant Nord (Figure 6-12).

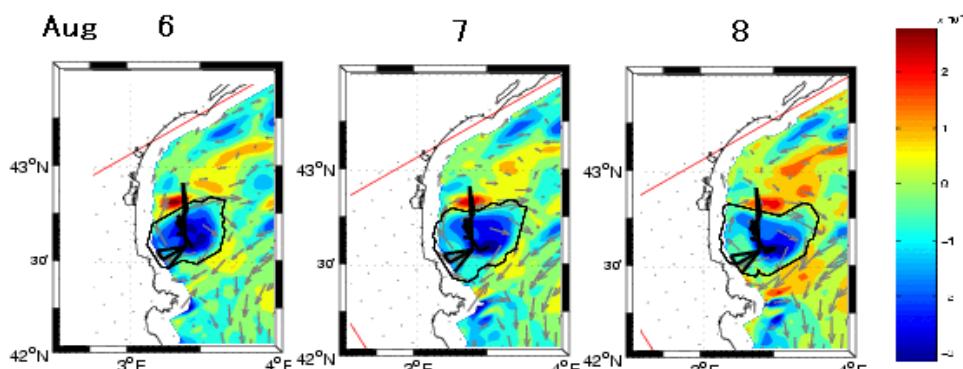


Figure 6-12 : Séquence temporelle des cartes de vorticité et de la trajectoire du centre de la structure anticyclonique A1(01) le 6, 7 et 8 Août

Pour mieux présenter et comprendre l'interaction entre le tourbillon et le Courant Nord, regardant le contour qui représente la position du tourbillon, j'ai représenté les contours de la vitesse de 15 à 30 cm/s, qui représente en général la présence du Courant Nord (Figure 6-13). En effet le Courant Nord a généralement des vitesses qui dépassent les 20 cm/s , avec des maxima dans les 50 cm/s. Ainsi on peut analyser les positions relatives du tourbillon et du Courant Nord.

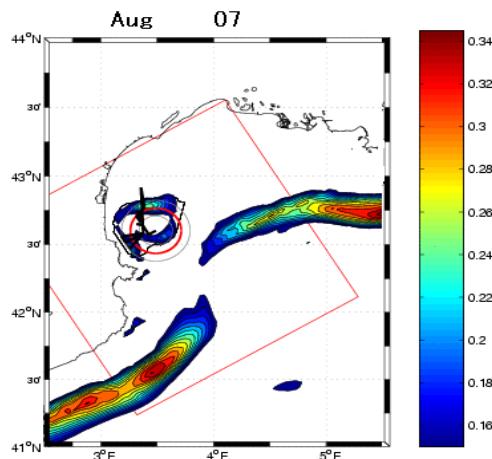


Figure 6-13 : la position du tourbillon (le contour noir), et la position du Courant Nord (le contour en couleur) le 7 août. Le cercle épais rouge indique le diamètre moyen du tourbillon et les deux cercles gris sont D^{NS} et D^{EW} (voir partie 5.2.2).

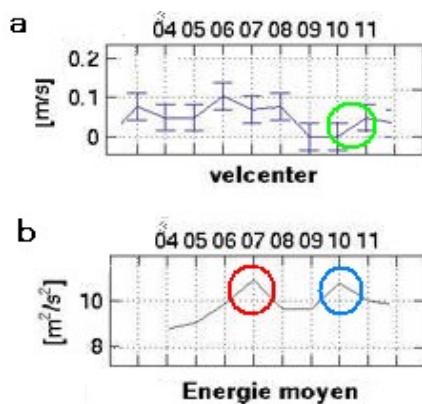


Figure 6-14: a) la vitesse moyenne de déplacement du tourbillon, b) l'énergie cinétique moyenne du tourbillon pendant le début du mois d'août. (Pour toute la période, voir page web personnelle)

La figure 6-13 montre que la position de la vitesse maximale du tourbillon est au nord de la structure le 7 août. Avant ce jour, il existe aussi les mêmes types de tâche à la frontière du tourbillon, mais elles sont moins intenses (voir page web personnelle). Autrement dit, la rotation du tourbillon augmente jusqu'au 7 août (cercle rouge, Figure 6-14b). Le tourbillon commence à s'approcher du Courant Nord à partir de ce jour. On pense ainsi que le 7 août est la phase du début d'interaction entre le tourbillon et le Courant Nord. Le maximum de vitesse arrive au sud le 8 août et

deux jours après, il rencontre le Courant Nord (10 août) (Figure 6-15). Encore une fois, l'énergie cinétique s'accroît (cercle bleu, Figure 6-14 b).

Après l'interaction avec le Courant Nord, le déplacement du tourbillon reprend de la vitesse (cercle vert, Figure 6-14 a). Il semblerait que le tourbillon est "attiré" par le Courant Nord (Figure 6-15).

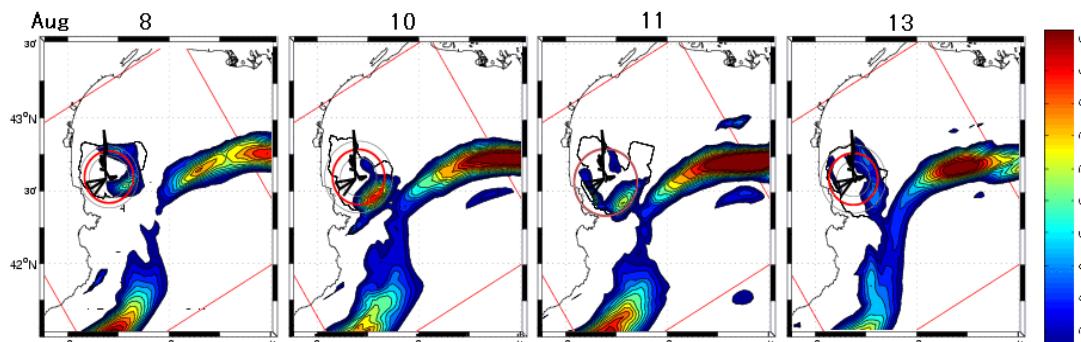


Figure 6-15 : La position du tourbillon (le contour noir), et la position du Courant Nord (le contour en couleur) le 8, 10, 11 et 13 août

La figure 6-16 montre que, à la fin de cette période, A1(01) entre dans une partie du bord intérieur du Courant Nord.

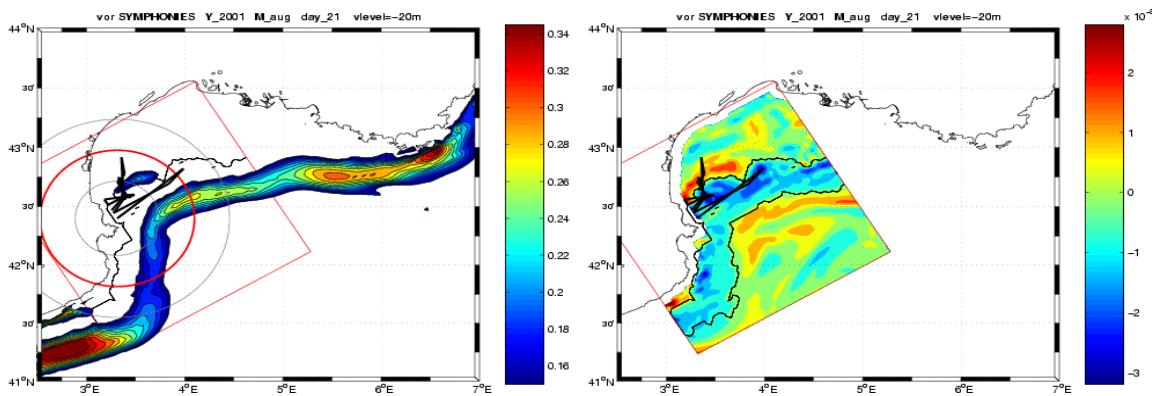


Figure 6-16 : La position du tourbillon (le contour noir) et la position du Courant Nord (le contour en couleur); carte de vorticité et de la trajectoire du centre de A1(01) le 21août.

6.2.2 A1(04) en 2004:

L'analyse sur la structure A1(04) commence le premier juillet; le même jour, une autre structure se forme simultanément au sud. D'une façon similaire à ce qui se passait pour C2(01), la structure du sud devient de plus en plus intense. Le 19 juillet, une seule structure "double" est reconnue par l'analyse et le centre est au sud.

Le 23 juillet, les 2 structures se séparent et l'analyse, étant donné que le centre se situe au sud, continue à suivre la structure sud.

Le 25, on a nouveau une fusion des deux tourbillons, qui se séparent le 29. Toutefois, le centre reste au sud. J'ai donc décidé de réinitialiser l'analyse le 29 juillet pour recommencer à suivre le tourbillon d'intérêt (voir Figure 6-17 où il y a 2 images différentes pour le 29 juillet)

Après la réinitialisation, l'analyse arrive à suivre A1(04) sans autres soucis jusqu'au 19 septembre. A1(04) reste sur le même endroit presque 14 jours depuis le début du deuxième suivi. À partir du 10 août, le centre se déplace vers l'est, et une partie du tourbillon est transportée vers le centre du Golfe par le courant (indiqué par la flèche) qui est probablement généré par le vent [Gatti et al., 2006] (Aug 14, Figure 6-17). Ce phénomène d'allongation engendre une croissance du diamètre du tourbillon (voir page web personnelle et Tableau 2).

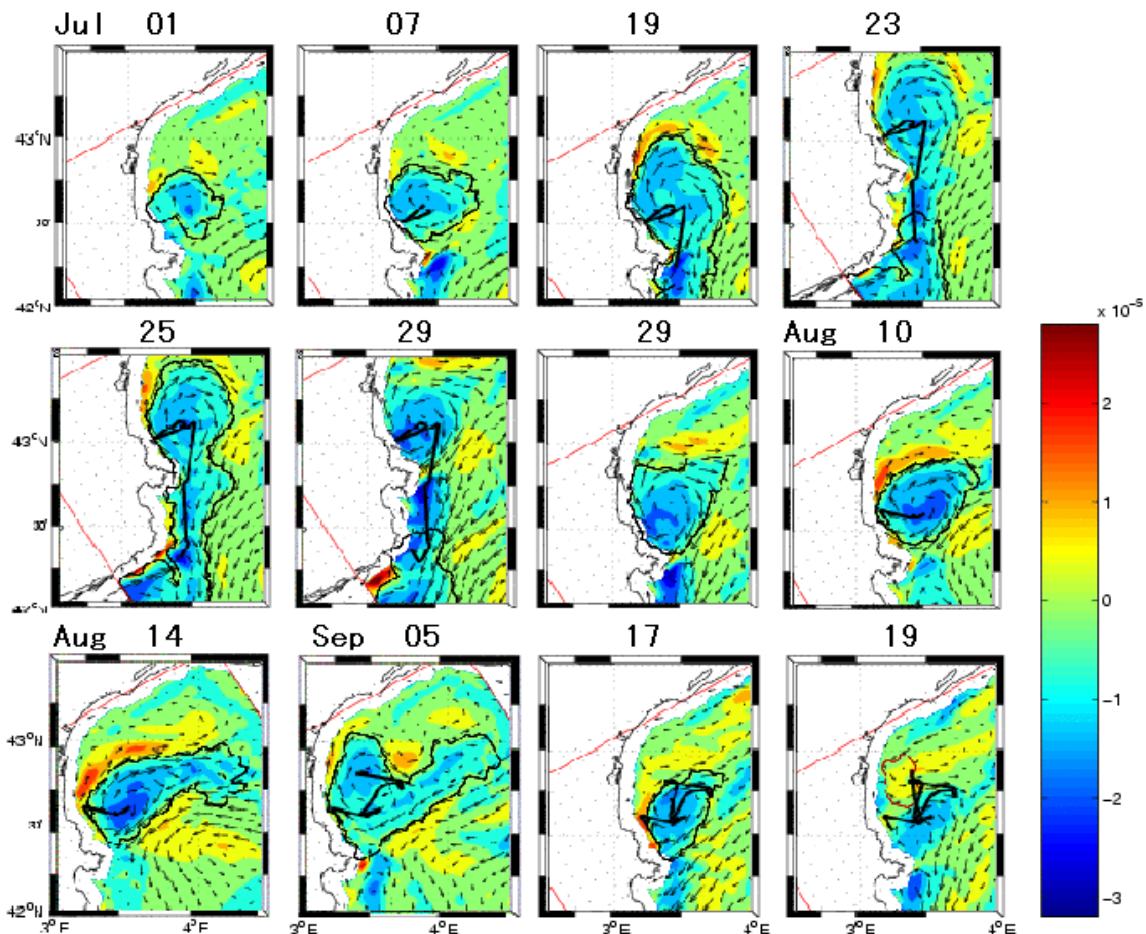


Figure 6-17 : Séquence temporelle des cartes de vorticité et contour du tourbillon anticyclonique A1(04) à 20m

On voit bien que, le 5 septembre, la partie ouest du tourbillon se divise. Elle remonte vers le nord et s'approche de la côte. Cette partie de la vorticité plus intense devient le nouveau centre du tourbillon. Par contre, le morceau d'origine devient de plus en plus faible pour finalement disparaître. Quel processus physique engendre ce phénomène de division? L'influence du vent? La présence des canyons? Ou les actions des deux? Toutes ces questions restent à préciser.

À la fin de sa vie (17 juillet, Figure 6-17), le tourbillon retourne à sa place d'origine. Il se dissipe au même endroit donc, deux jours après, l'analyse n'arrive plus de le suivre.

A1(04) a les mêmes caractéristiques (moins salé, plus chaud et avec SSH plus élevée) que A1(01), une durée de vie relativement longue (51 jours), une vitesse de 4 cm/s et un diamètre de 57 km (voir page web personnelle).

6.2.3 Phénomènes particuliers.

Pour les trois autres tourbillons anticycloniques trouvés dans cette zone: A2(04) a des caractéristiques similaires à celles des structures anticycloniques précédentes; A2(01) et A1(05) sont un peu particuliers pour certaines caractéristiques. Du coup, je les présenterai brièvement.

- A2(01) :

A2(01) se forme du 4 septembre jusqu'au 6 octobre avec des paramètres comparables à ceux du tourbillon A1(01) (voir page web personnelle), sauf que sa salinité est plus élevée pendant toute la période (Figure 6-18). Pour tous les autres tourbillons anticycloniques, l'eau dans la structure est moins salée.

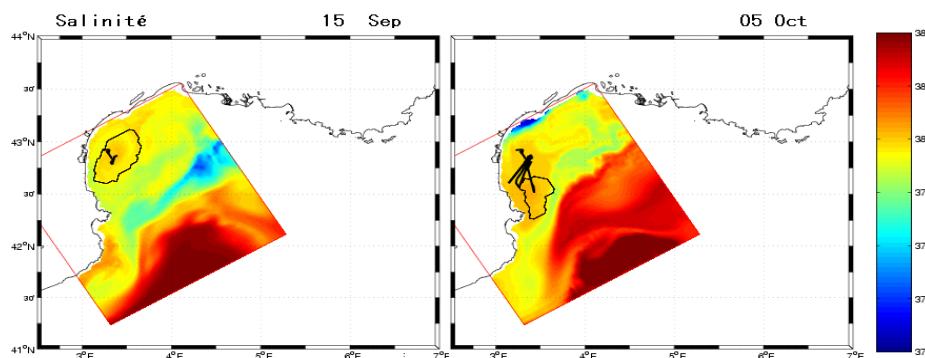


Figure 6-18 : Cartes horizontales de la salinité de la structure anticyclonique A2(01) le 15 septembre et 5 octobre.

Au début de la période, la température moyenne de toute la structure est de 21.6°C; et à la fin, elle décroît jusqu'à 18.9°C. Quel phénomène introduit cette chute de température brutale : le vent? Existe-t-il un lien entre cette métamorphose et l'eau salée? Tous ces problèmes restent encore des questions ouvertes.

- A1(05):

A1(05) est suivi du 25 septembre jusqu'au 15 octobre, avec une durée de vie de 21 jours. Il a tout à fait le même type de caractéristiques générales que les tourbillons anticycloniques (voir page web personnelle). Mais, comme indiqué dans la figure 6-19, le Courant Nord n'est plus à sa place normale: il entre dans le golfe et se retrouve le long de la côte. En conséquence, on soulève la suspicion de la réalité du forçage impliqué dans le modèle pour 2005. De ce fait, pour le bilan général des tourbillons, on refait le calcul de tous les paramètres en enlevant ceux de 2005.

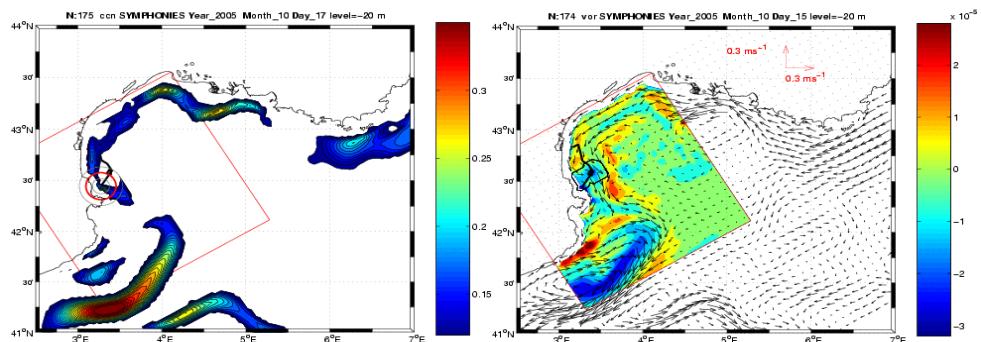


Figure 6-19 : Les position relatives du tourbillon et le Courant Nord, et la carte horizontale de la vorticité de la structure cyclonique A1(05) le 15 octobre.

6.2.4 Bilan des tourbillons anticycloniques.

Le tableau 2 résume les paramètres moyennés temporellement de chaque tourbillon anticyclonique. Le tourbillon anticyclonique dans ces études a une durée de vie moyenne d'environ 37 jours, qui est beaucoup plus longue que celle du tourbillon cyclonique (16 jours, Tableau 1). Le diamètre moyen du tourbillon anticyclonique est de 43 km, avec une vitesse de déplacement de 5 cms^{-1} contre 35 km et 6 cms^{-1} pour le tourbillon cyclonique (Tableau 1).

Nom	Durée (J)	vitesse (cm/s)	Diamètre (km)	S	T	SSH	Comportement
A1(01)	32	8 ± 9	40 ± 8	37.75 -	21.0 +	+	N-S
A2(01)	33	10 ± 12	40 ± 4	37.98 +	19.7 +	+	N-S
A1(04)	51	4 ± 4	57 ± 14	37.77 -	20.72 +	+	W-E, S-N,
A2(04)	33	3 ± 3	40 ± 18	37.73 -	19.7 +	+	W-E, S-N,N-S
A1(05)	21	3 ± 3	40 ± 10	37.74 -	18.3 +	+	N-S
A-Rhône a(05)	9	4 ± 2	42 ± 5	37.81 -	19.2 +	+	
A-Rhône b(05)	13	5 ± 6	40 ± 13	37.76 -	18.2 +	+	
Moyenne	27	5	43	37.79	19.6		
Moyenne sans 05	37	5	43	37.80	20.3		

Tableau 2: Bilan des tourbillons anticycloniques

À partir des valeurs moyennes calculées, on peut conclure que, à l'ouest du Golfe du Lion, les tourbillons anticycloniques sont relativement plus gros et plus stables que les tourbillons

cycloniques. Bien sûr qu'en hémisphère Nord, l'effet de la force de Coriolis est favorable au tourbillon anticyclonique, mais, à l'échelle spatio-temporelle de notre cas, on suppose que la stabilité du tourbillon anticyclonique est plutôt dûe à l'effet du Courant Nord. En effet, dans le Golfe du Lion, le Courant Nord crée du côté de son bord interne un environnement anticyclonique qui peut bénéficier aux tourbillons de même vorticité. Parmi les 7 structures anticycloniques de notre étude, 5 se trouvent entre le Cap Béar et le Cap Creus, où une intrusion du Courant Nord se produit sous certaines conditions de vent [Estournel et al., 2003; Petrenko, 2003]. Les deux tourbillons anticycloniques lointains de cette zone, observés près du Rhône en 2005, ont des durées beaucoup plus courtes. Cela explique les dix jours de différence entre la durée moyenne avec les données en 2005 et sans celles en 2005 (Tableau 2).

Une comparaison avec plusieurs études qui ont été faites montre que nos estimations sur la vitesse de déplacement des tourbillons sont réalistes. Par exemple, les cyclones et anticyclones suivis par Doglioli et al. [2006] ont des vitesses de déplacement entre 7.9 cm/s et 11.5 cm/s.

6.3 Comparaisons avec les images satellites.

Afin de vérifier la probabilité d'existence des structures dans la zone d'étude, une comparaison simple avec l'imagerie satellitaire est effectuée. À partir de mesures de couleur de l'eau effectuées par des capteurs tels SeaWiFS, MERIS, MODIS, des algorithmes (par exemple: [Bricand et al., 2002 ; Ouillon et Petrenko, 2005]) permettent de calculer la concentration en chlorophylle a de la couche d'eau supérieure perçue par les satellites. Les pigments chlorophylliens sont présents dans les cellules phytoplanctoniques en suspension. Si l'on considère que le phytoplancton est passif et donc entraîné par advection, le phytoplancton peut alors servir de traceur des phénomènes de la dynamique océanique horizontale.

Je cherchais à trouver, dans les images satellites, des structures assimilables aux résultats du modèle. Trois images ont été choisies, dont deux pour les tourbillon anticycloniques et un pour le cyclone, pour présenter ces confrontations.

- A1(01) (11 août 2001)

Le 11 août 2001, dans la zone ouest du golfe, on observe une tâche de chlorophylle à moins intense sur une image SeaWiFS qui représente probablement une structure (Figure 6-20). Dans le résultat de la modélisation SYMPHONIE du même jour, il existe aussi un tourbillon anticyclonique presqu'au même endroit.

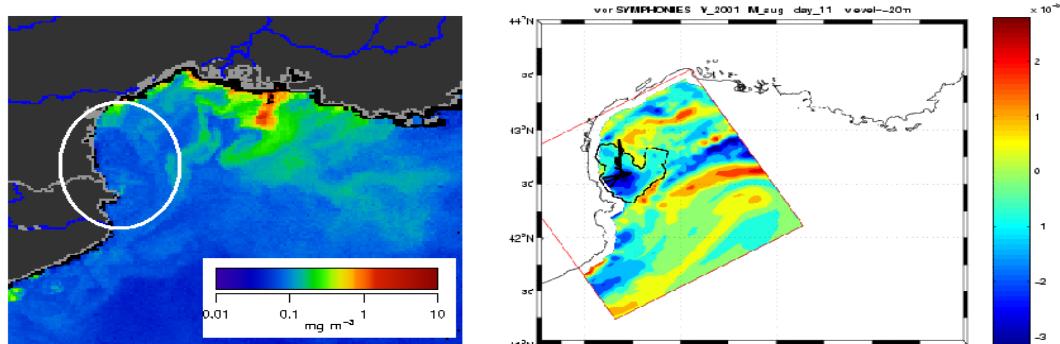


Figure 6-20 : Cartes horizontales de concentration en chlorophylle a (données JRC) et de vorticité de la structure anticyclonique A1(01) (11 août 2001)

- C2(01) (22 août 2001)

Dans la carte de concentration en chlorophylle a du 22 août (Figure 6-21), on observe une petite structure avec une concentration relativement forte tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Le même jour, dans la carte de vorticité, un tourbillon cyclonique se trouve presqu'au même endroit.

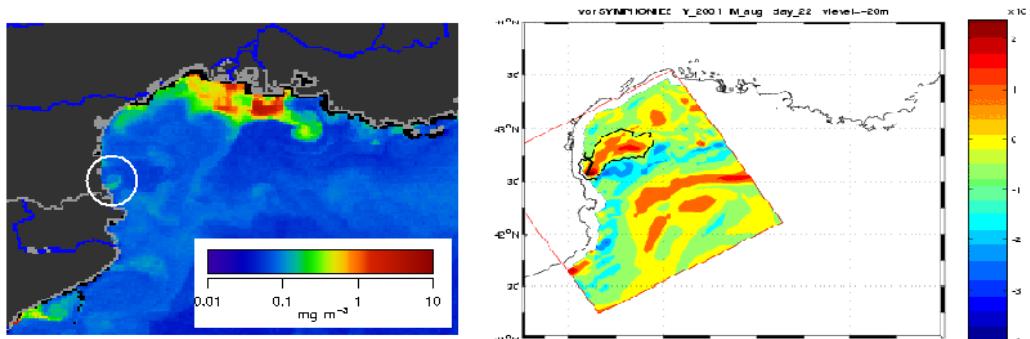


Figure 6-21 : Cartes horizontales de concentration en chlorophylle a (données JRC) et de vorticité de la structure cyclonique C2(01) (22 août 2001)

- A1(04) (16 août 2004)

Le 16 août 2004, une tâche de concentration moins intense a l'air de tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Un tourbillon anticyclonique comparable se présente dans le même temps (Figure 6-22).

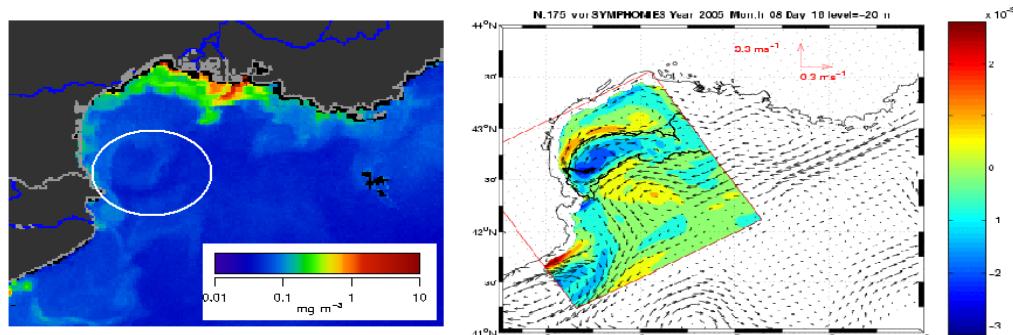


Figure 6-22 : Cartes horizontales de concentration en chlorophylle a (données JRC) et de vorticité de la structure anticyclonique A1(04) (16 août 2004)

Ces structures similaires montrent que les résultats du modèle sont proches des observations satellites de cette région. Il semblerait que les tourbillons anticycloniques correspondent généralement à une tâche de concentration en chlorophylle a moins intense, et le contraire pour les tourbillons cycloniques.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce stage était l'utilisation de la technique d'analyse en ondelettes développée en Matlab pour suivre les structures tourbillonnaires présentes dans les résultats du modèle numérique de circulation SYMPHONIE dans le Golfe du Lion.

Mes études se composent tout d'abord d'une compréhension principale du Golfe du Lion ainsi que du modèle SYMPHONIE. Après m'être familiarisée avec les sorties 3D du modèle de différentes versions, j'ai adapté le paquet ROMS_TOOLS pour traiter les données, en transformant la grille sigma à des niveaux z constant et calculant la vorticité relative. À l'aide du logiciel Matlab, tous les champs sont représentés par des cartes horizontales et puis par des animations afin d'observer les circulations et les évolutions des tourbillons. À partir des visualisations des champs, l'analyse en ondelettes m'a permis d'identifier les structures tourbillonnaires en décomposant la vorticité relative et puis de les suivre temporellement. En même temps que les suivis, pour chaque structure, le diamètre, la vitesse de déplacement, la salinité et la température moyennées sur la surface du tourbillon sont calculés. La durée de vie est obtenu aussi à la fin du suivi. Les études montrent que les contours issus d'analyse en ondelettes sur la vorticité relative accordent principalement les anomalies de chaque caractéristique (S, T et SSH). Mais, la vorticité relative donne une meilleure identification du tourbillon.

La période de la campagne et les critères des tourbillons pour l'objet de l'expérimentation lagrangienne LATEX m'a conduite à chercher des structures assez grosses et stables sur la période de mi-juillet à fin octobre et de me focaliser sur la zone ouest du Golfe du Lion. Parmi les 14 structures capturées et suivies finalement sur ces 3 années, il y en 7 se situant dans cette zone dont 5 sont de type anticyclonique et sont situées entre Cap Béar et Cap Creus. On a remarqué deux sortes d'influence du Courant Nord sur les tourbillons qui s'approche de lui: l'augmentation de la rotation du tourbillon et l'accroissement de la vitesse de déplacement. Une comparaison simple entre les images satellites de concentration en chlorophylle a et les résultats issus du modèle a été faite à la fin de l'étude pour vérifier la probabilité d'occurrence des structures.

Le tableau 3 résume le calendrier des 14 tourbillons étudiés. Les lignes horizontales de couleur et les chiffres représentent le début et la fin de la durée de vie de chaque tourbillon, définis par

l'analyse en ondelettes. La ligne en pointillé pour A1(01) correspond à la période du tourbillon où l'analyse n'arrive pas de le suivre (voir partie 6.2.2). On voit bien que, pendant ces quatre mois, il y a toujours la présence d'une ou de plusieurs structures dans la zone étudiée. Cette forte existence de structures nous donne la confiance quant à la réussite de capturer des structures d'intérêt pendant la campagne proposée par le projet LATEX.

	Juillet	Août	Septembre	Octobre
A1(04)	1 - - - - - 29		17	
A1(01)	17	18		
C1(01)	1	14		
Pseudo-C(05)	6	22		
C2(01)		15 - 29		
A2(01)		4	6	
A-rhone a(05)			19 - 27	
A2(04)			23 - 25	
A1(05)			25 - 14	
C3(01)			26 - 9	
C1(04)			1 - 19	
A2-rhone b(05)			1 - 13	
C2(04)			5 - 17	
C3(04)			21 - Nov. 6	

Tableau 3: Calendrier des tourbillons étudiés

Mon travail a mis en évidence que la résolution du modèle est faible et donne des incertitudes d'analyse. Une modélisation avec une haute résolution serait donc nécessaire pour améliorer ces analyses. De plus, une analyse 3D serait envisageable afin de mieux expliquer les échanges entre les tourbillons. En conséquence, les perspectives pour la suite de ce travail pourraient constituer en une modélisation réaliste de haute résolution et une étude plus approfondie des données satellitales. Par ailleurs, la mise en place d'ACDP mouillés au fond pendant 1 an à l'ouest du Golfe du Lion proposée par le projet LATEX pour mesurer et puis analyser les courants permettrait de préciser l'influence des interactions du Courant Nord avec les structures étudiées. Ces travaux amèneraient une meilleure compréhension de l'activité hydrodynamique de (sub) méso-échelle qui crée des structures jouant un rôle clef dans les échanges côte-large et dans le contrôle de l'activité biologique qui restent encore, à ce jour, mal quantifiés.

Bibliographie

- Arakawa A., et M.J. Suarez, *Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates*, Mon. Weath. Rev., 111, 34-45, 1983.
- Bricaud A., E. Bosc, and D. Antoine, *Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin, Intercomparison of data from various sensors, and implications for primary production estimates*, Remote Sens. Env., 81, 163-178, 2002.
- Berné S., D. Carré, B. Loubrieu, J-P. Mazé, L. Morvan et A. Normand, *Le golfe du Lion, carte morpho-bathymétrique*, Ed. IFREMER, 2004.
- Bougeault P. et P. Lacarrere, *Parameterisation of orography-induced turbulence in a meso-beta scale model*, Mon. Weath. Rev., 117, 1872-1890, 1989.
- Conan P., et C. Millot, *Variability of the northern current off Marseilles, western Mediterranean Sea, from February to June 1992*, Oceanologica Acta, 18(2), 193-205, 1995.
- Doglioli A.M., B. Blanke, S. Speich et G. Lapeyre, *Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: application to Cape Basin eddies*, J. Geophys. Res., 112, C05043, 2007.
- Dufau-Julliand C., *Modélisation 3D réaliste de l'hydrodynamique du Golfe du Lion, Méditerranée Nord-Occidentale, appliquée à l'expérience MOOGLI3*, Thèse en 2004.
- Estournel C., X. Durrieu de Madron, P. Marsaleix, F. Auclair, C. Julliand et R. Vehil, *Observation and modelisation of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lions under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment)*, J. Geophys. Res., 108(C3), 8059, 2003.
- Fieux M., *Formation d'eau dense sur le plateau continental du Golfe du Lion, dans La formation des eaux océaniques profondes*, publié par Colloques internationaux du C.N.R.S., CNRS, Paris, 1974.

Gaspar P., Y. Gregoris et J.M. Lefevre, *A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: tests at station Papa and long-term upper ocean study site*, J. Geophys. Res., 95, 16179-16193, 1990.

Gatti J., A. Petrenko, J-L. Devenon, Y. Leredde et C. Ulses, *The Rhone river dilution zone present in the north-eastern shelf of the Gulf of Lions in December 2003*, Continental Shelf Research, 26, 1794-1805, 2006.

Millot C., *The Gulf of Lions's hydrodynamics*, Cont. Shelf Res., 10 (9-11), 885-894, 1990.

Oey L.Y. et P. Chen, *A model simulation of circulation in the northeast Atlantic shelve and seas*, J. Geophys. Res., 97, 20087-20115, 1992.

Petrenko A., *Circulation features in the Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea; summer versus winter conditions*, Oceanologica Acta, 26, 323-338, 2003.

Référence Site Web

http://www.brest.ird.fr/Roms_tools/

Introduction du paquet ROMS_TOOLS

<http://www.eos.ubc.ca/~rich/map.html>

Explication de l'outil M_Map

<http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/>

Librairie du Wavelab

<http://www2.isye.gatech.edu/~brani/wp/kidsA.pdf>

Introduction simple de l'analyse en ondelettes

<http://www.com.univ-mrs.fr/~h307258>

Page web personnelle de Ziyuan HU