

---

# Comparaison de l'activité mésoéchelle entre différents modèles numériques 3D de circulation

---

## Résumé :

L'essor des modèles numériques de circulation océanique à haute résolution a permis depuis quelques années une étude spécifique des processus de mésoéchelle, qui semblent tenir une place importante dans les échanges physiques et biologiques au sein des océans. L'objet du stage présenté dans ce rapport est de comparer les activités mésoéchelle, et plus précisément l'activité tourbillonnaire, de différents modèles numériques de circulation à l'aide d'un programme de détection et de suivi automatique de tourbillons. Ainsi, nous avons pu observer spécifiquement l'influence de la résolution sur l'activité tourbillonnaire et nous avons mis en évidence la difficulté à reproduire une activité tourbillonnaire similaire dans différents modèles numériques.

**Mots clefs :** *modélisation, tourbillons de (sub)mésoéchelle, Golfe du Lion*

Stage encadré par :

**Andrea Doglioli et Anne Petrenko**

[andrea.doglioli@univmed.fr](mailto:andrea.doglioli@univmed.fr) / tél. +33 (0)4 91 82 91 09

[petrenko@com.univmed.fr](mailto:petrenko@com.univmed.fr) / tél. +33 (0)4 91 82 90 61

Laboratoire d'océanographie physique et biogéochimique

*LOPB - UMR 6535 Campus de Luminy Case 901 F-13288 MARSEILLE Cedex 9*

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



## Remerciements

Je tiens à remercier Andrea Doglioli, Anne Petrenko et Christel Pinazo pour avoir accepté d'encadrer ce stage ainsi que pour leurs conseils et leur disponibilité tout au long de ces trois mois au sein du LOPB.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers Marion Frayse, Ivane Pairaud et Olivier Legalloudec pour les données précieuses qu'ils m'ont fournies et le temps qu'ils m'ont consacré.

Enfin, je voudrais saluer toutes les personnes qui ont pu m'aider au cours de ce stage, en particulier Rose Campbell, Marion Kersale, Francesco Nencioli et Jérôme Bouffard.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Les différents processus de circulation dans le Golfe du Lion</b>	<b>2</b>
2.1	Le courant Liguro-provençal ou courant nord . . . . .	2
2.2	Un forçage atmosphérique fort entraînant une activité mésoéchelle intense . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Les modèles de circulation 3D et l'outil WATERS</b>	<b>3</b>
3.1	Présentation des différents modèles et principales hypothèses . . . . .	3
3.2	Les principales différences entre les modèles . . . . .	4
3.2.1	Différences dans la formulation du modèle . . . . .	4
3.2.2	Extension spatiale des configurations utilisées . . . . .	5
3.2.3	Périodes d'étude . . . . .	5
3.3	L'outil WATERS . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Étude comparative de l'activité tourbillonnaire entre les différents modèles de circulation</b>	<b>9</b>
4.1	Les critères de sélection des tourbillons . . . . .	9
4.2	Impact de la résolution sur les tourbillons . . . . .	9
4.3	Une activité tourbillonnaire propre à chaque modèle . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>13</b>

## 1 Introduction

L'océanographie fait aujourd'hui largement appel à la modélisation car cette dernière constitue un outil de plus en plus fiable et précis pour décrire fidèlement les différents processus de circulation dans les mers et océans. Les modèles informatiques ont fait leurs preuves en ce qui concerne les processus de grande échelle, mais il reste aujourd'hui une grande marge de progrès pour ce qui est de la compréhension et de la reproduction des phénomènes de petite échelle, notamment en milieu côtier. Hors, 40% de la population mondiale (soit 3 milliards de personnes) vit en zone littorale. On comprend donc bien l'intérêt de savoir comprendre et reproduire des phénomènes qui vont avoir une très forte influence sur la physique et la biologie marine de cette zone.

Le stage que j'ai effectué au LOPB s'inscrit donc dans cette démarche de compréhension des échanges physiques et biogéochimiques entre la côte et le large qui constitue un des axes majeurs d'étude du laboratoire, notamment au travers des projets LATEX (LAgrangian Transport EXperiment) et MASSILIA (Modélisation de la baie de MArSeILLE : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin) portés respectivement par Frederic Diaz et Anne Petrenko d'une part et Christel Pinazo d'autre part. Le projet LATEX se focalisait sur l'étude d'un tourbillon cyclonique bien précis au large du Cap d'Agde et a mis en oeuvre à la fois des simulations numériques et des mesures *in situ* afin de comprendre le processus de formation de ce tourbillon et l'impact de sa présence sur les échanges entre les eaux du Golfe du Lion et celles du large. La démarche du projet MASSILIA est similaire en combinant outil numérique et mesures expérimentales, cependant, la zone d'étude est ici la rade de Marseille donc s'inscrit dans un milieu côtier où l'influence de l'homme doit également être prise en compte.

Il existe aujourd'hui une grande variété de modèles développés par différentes équipes et l'objet de ce stage a été d'inter-comparer les activités tourbillonnaires issues des sorties de ces modèles pour une zone correspondant à l'est du Golfe du Lion, au large de Marseille. Pour ce faire, j'ai adapté et amélioré le logiciel WATERS [1] qui est un outil de détection et de suivi de tourbillons basé sur l'analyse en ondelettes.

Je débiterai ce rapport par une introduction à la circulation dans le Golfe du Lion ainsi que par les résultats issus de la bibliographie concernant l'activité tourbillonnaire dans cette région, puis je présenterai les différents modèles auxquels j'ai eu accès pour effectuer mon étude, je décrirai le fonctionnement et l'utilisation de l'outil WATERS et enfin, j'exposerai les principaux résultats de ce stage.

## 2 Les différents processus de circulation dans le Golfe du Lion

Nous présenterons dans cette partie les conditions de circulation ainsi que les résultats présents dans la littérature concernant l'activité tourbillonnaire dans la zone qui nous intéresse.

### 2.1 Le courant Liguro-provençal ou courant nord

Le parcours du Courant Nord (CN) s'étend de l'Italie à l'Espagne en longeant le Golfe du Lion suivant la pente continentale. Il s'agit d'un courant de densité soumis à l'équilibre géostrophique (entre les forces de pression et la force de Coriolis). Ce courant constitue une sorte de barrière entre les eaux du Golfe du Lion et celles de la plaine abyssale [2]. Malgré des variabilités saisonnières, on peut noter les caractéristiques suivantes pour le courant nord :

- une trentaine de kilomètres de largeur
- profondeur de l'ordre de 400 m
- amplitude maximale de la vitesse au coeur du CN  $v = 1.0 \text{ m/s}$

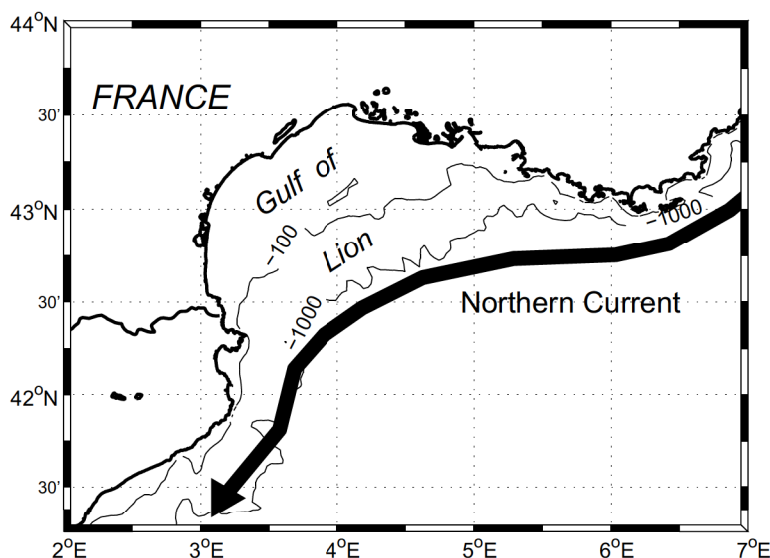


FIGURE 1 – Position du courant nord et des isobathes  $-100 \text{ m}$  et  $-1000 \text{ m}$

Nous retiendrons pour la suite de l'étude que ce courant peut créer une frontière naturelle pour les tourbillons qui naissent en zone côtière [3], de plus nous verrons que les instabilités générées par ce courant peuvent être à l'origine d'une forte activité tourbillonnaire dans l'est du Golfe du Lion.

### 2.2 Un forçage atmosphérique fort entraînant une activité mésoéchelle intense

Le Golfe du Lion présente des caractéristiques aérologiques marquées par la présence de vents forts et directionnels soufflants majoritairement depuis la terre dans le secteur nord pour le mistral et ouest à nord-ouest pour la tramontane. Ces vents ont des caractéristiques similaires, à savoir qu'ils sont froids et secs, et que leur intensité peut atteindre les  $25 \text{ m/s}$  en rafale et  $10 - 15 \text{ m/s}$  en moyenne sur une journée [2]. Les travaux d'Estournel et al (2003) [4] ont montré par des simulations numériques les conséquences de ces vents sur la circulation dans le Golfe du Lion et il s'en est dégagé des zones de formation privilégiée de tourbillons. Si on ajoute à ces travaux ceux de Rubio et al (2005) [5], Hu et al (2009) [6] et Forget et al (2008) [7], réalisés à partir de modèles pour les deux premiers et d'observations radar HF pour le dernier, on peut dégager quatre zones principales propices à l'activité tourbillonnaire.

Deux zones, l'une au large du cap d'Agde et l'autre au large du cap Creus ne rentreront pas dans le cadre de cette étude. Ce sont les deux autres respectivement au large de Marseille et au large du cap Sicié qui feront l'objet de l'étude.

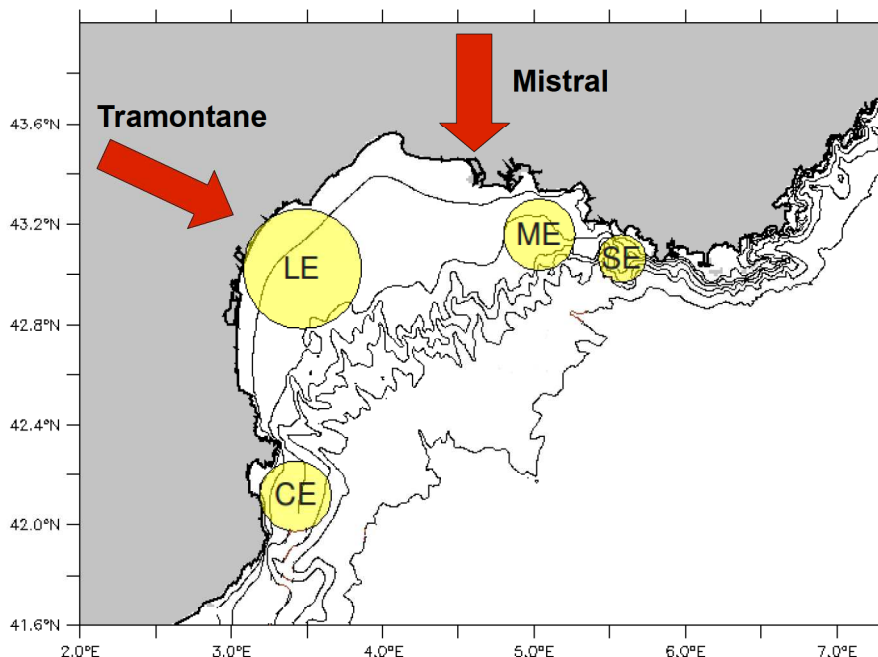


FIGURE 2 – Les vents dominants et les zones de formation préférentielles de tourbillons. On retrouve d'est en ouest les tourbillons au large du cap Sicié (SE pour Sicié Eddy), au large de Marseille (ME pour Marseille Eddy), au large du cap d'Agde (LE pour Latex Eddy) et enfin, au large du cap Creus (CE pour Creus Eddy). Le mistral et la tramontane sont représentés dans leur orientation privilégiée. Adapté de la thèse d'A. Schaeffer [8]

### 3 Les modèles de circulation 3D et l'outil WATERS

Dans cette partie, nous présenterons les modèles qui nous intéressent pour cette étude en détaillant leurs caractéristiques et en exhibant leurs différences, puis nous étudierons l'outil WATERS qui permet une détection et un suivi automatique des structures tourbillonnaires.

#### 3.1 Présentation des différents modèles et principales hypothèses

J'ai eu accès pour ce stage à trois modèles de circulation 3D développés et utilisés en France par la plupart des laboratoires d'océanographie. Il s'agit des modèles MARS3D, OPA-NEMO et Symphonie. Ces acronymes désignent le modèle général utilisé pour les simulations, mais j'emploierai dans la suite du rapport le nom des configurations de ces modèles que j'ai utilisées. Ainsi, j'ai travaillé avec les configurations RHOMA et MENOR de MARS3D, et avec la configuration Mercator NEATL36 de OPA-NEMO. Pour le dernier modèle j'emploierai indifféremment le terme Symphonie pour le modèle ou pour la configuration en prenant soin de préciser la résolution spatiale utilisée. Ces trois modèles présentent certaines caractéristiques communes. Ils reposent notamment tous les trois sur une résolution numérique des équations primitives de l'hydrodynamique dans l'hypothèse hydrostatique et dans l'approximation de Boussinesq. Ainsi, les équations auxquelles sont soumises les différentes variables physiques sont les suivantes :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_i + \underbrace{u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}}_j + \underbrace{f u}_k = -\underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y}}_l + \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)}_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

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

avec  $u$ ,  $v$ ,  $w$  les composantes du vecteur vitesse,  $f$  le paramètre de Coriolis,  $P$  la pression,  $\rho$  la masse volumique de l'eau,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $\tau_{ij}$  les tensions de Reynolds. (1) et (2) correspondent aux équations du mouvement sur l'horizontale, (3) sur la verticale et (4) représente l'équation de continuité ou de conservation de la masse. Les deux principales hypothèses prises en compte sont l'hypothèse hydrostatique (3) et l'approximation de Boussinesq selon laquelle la densité varie peu de sa valeur de référence :  $\rho = \rho_0 + \rho'$  (avec  $\rho_0 = 1027.34 \text{ kg/m}^3$ ), ce qui permet de considérer  $\rho \simeq \rho_0$  dans les équations de quantité de mouvement selon l'horizontale. On retrouve dans ces équations les termes de variation temporelle (i), d'advection (j), de Coriolis (k), de gradient de pression (l) et de diffusion (m).

## 3.2 Les principales différences entre les modèles

### 3.2.1 Différences dans la formulation du modèle

On peut dégager quatre différences majeures dans la modélisation qui vont affecter de manière sensible la circulation obtenue en sortie :

- les conditions aux limites
- le modèle de diffusivité horizontale retenu
- les forçages atmosphériques et notamment leur résolution spatiale et temporelle
- la résolution

On peut résumer les choix faits pour ces paramètres dans le tableau suivant :

	Symphonie	MENOR et RHOMA	Mercator
Résolution	1 km et 3 km	1.2 km et 200 m	1/36°
Forçage aux limites	general circulation model of the mediterranean sea (OGCM)	OGCM et MENOR	Mercator ORCA12
Diffusivité horizontale	opérateur Laplacien	Smagorinsky (1963)	opérateur isopycnal Laplacien
Forçage atmosphérique	ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) (0.1° × 0.1°) (3h)	ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) (0.1° × 0.1°) (3h)	ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) (0.5° × 0.5°) (6h)



### 3.2.2 Extension spatiale des configurations utilisées

Une autre différence importante à noter entre les différentes configurations est l'extension spatiale de chacune d'entre elle. Ainsi, pour des raisons pratiques de temps de calcul mais également de pertinence des modèles, les configurations à très haute résolution sont confinées près de la côte, alors que les modèles à plus grande maille couvrent des surfaces bien plus grandes. La figure 3 représente les extensions spatiales des différentes configurations utilisées, en se restreignant à notre zone d'intérêt, c'est-à-dire, le Golfe du Lion (la configuration NEATL36 de OPA-NEMO par exemple est beaucoup plus étendue que sur la carte et couvre toute la Méditerranée et l'Atlantique nord). Cela a une conséquence sur l'étude, car si l'on veut comparer tous les modèles, il faut se restreindre à la zone d'étude la plus près des côtes et par conséquent, se priver de nombreux phénomènes tourbillonnaires qui peuvent se produire à sa frontière ou au delà. Nous verrons plus tard qu'il a parfois fallu s'affranchir de cette règle et exclure la configuration RHOMA de l'étude pour certains tourbillons car celle-ci est trop restrictive.

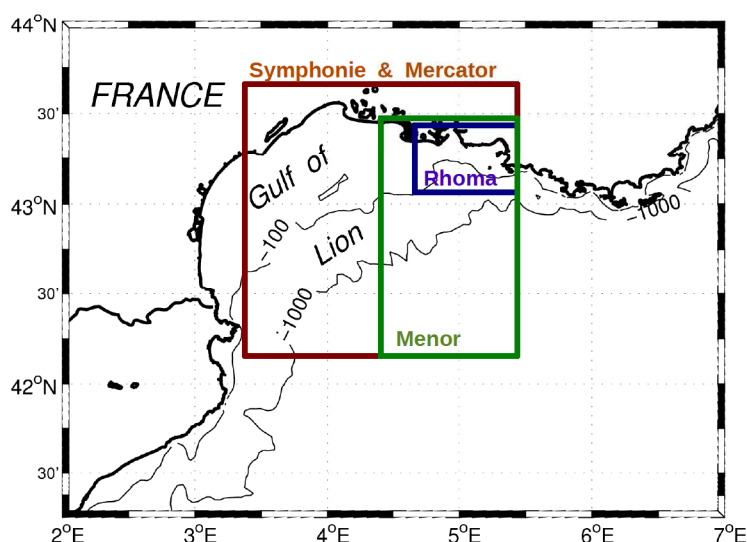


FIGURE 3 – Carte représentant les extensions géographiques des zones sur lesquelles les analyses ont été effectuées pour les différents modèles.

### 3.2.3 Périodes d'étude

La méthodologie retenue pour sélectionner les périodes durant lesquelles l'activité tourbillonnaire serait analysée a été la suivante. Nous sommes partis d'images satellites de couleur de l'eau, à partir de laquelle, par algorithme, on dérive la concentration en chlorophylle. Sur ces images, nous avons sélectionné les périodes durant lesquelles on pouvait détecter une activité tourbillonnaire très probable (cf fig 4). En faisant l'hypothèse raisonnable que les modèles sont assez réalistes, on sélectionne ainsi des périodes qui présentent a priori une forte activité tourbillonnaire.

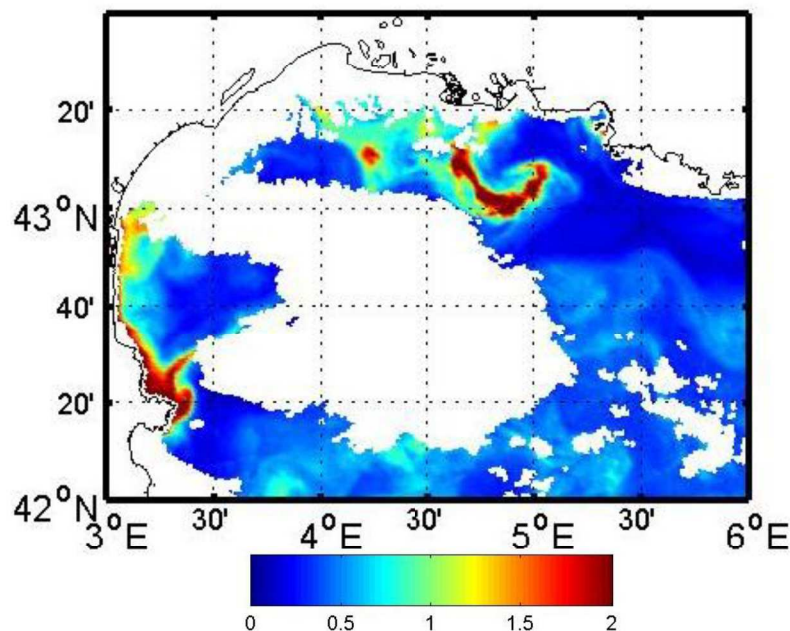


FIGURE 4 – Image de couleur de l’eau par le satellite Seawifs. On remarque un tourbillon cyclonique probable vers (43°N, 5°E). Cette période sera donc sélectionnée pour étude.

Il faut bien noter ici que cette méthode vise simplement à maximiser les chances de trouver un tourbillon dans les modèles pour certaines dates et ne constitue en aucun cas une étude comparative systématique entre l’activité tourbillonnaire modélisée et celle mesurée via la couleur de l’eau.

Mais il se pose alors un problème de disponibilité des données issues des modèles. En effet, tous ces modèles ont été développés par des laboratoires différents ou des équipes différentes qui n’ont pas forcément besoin de données sur les mêmes périodes. Ainsi, il n’a été possible d’obtenir qu’un recoupement partiel des différentes dates sélectionnées pour l’analyse des données.

Les différentes périodes étudiées sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

	Symphonie	RHOMA	MENOR	Mercator
Avril 2007	×	×		
Juin 2007	×	×	×	
Octobre 2007	×	×		
Décembre 2007	×	×	×	
Juin 2008	×	×	×	×
Octobre 2008	×	×	×	×

### 3.3 L’outil WATERS

WATERS est un programme de détection et de suivi automatique de structures tourbillonnaires basé sur l’analyse en ondelettes. Cet outil codé sous MATLAB a été initialement développé par Andrea Doglioli pour des sorties du modèle ROMS [1]. Il a par la suite été adapté par ZiYuan Hu pour des sorties de modèle Symphonie [6]. Une grande partie de mon travail lors de ce stage a tout d’abord consisté à prendre en main cet outil et à le faire évoluer pour qu’il s’adapte aux sorties des configurations Mercator, RHOMA et MENOR des modèles OPA-NEMO et MARS3D.

Cet outil utilise l’analyse en paquets d’ondelettes. Celle-ci s’effectue sur la variable physique pertinente pour l’étude des tourbillons, c’est-à-dire la vorticité relative ou composante verticale du rotationnel de vitesse.  $\zeta = \vec{k}(\nabla \times \vec{V})$ . Il va s’agir alors de séparer la partie cohérente (spatiale et temporelle) de cette variable qui correspond aux structures tourbillonnaires de la partie incohérente par un seuillage



bien choisi des coefficients issus de l'analyse en ondelettes.

Le principe de fonctionnement de ce programme est le suivant. Il reçoit en entrée un champ de vitesse 3D à partir duquel il construit un champ de vitesse 2D obtenu par interpolation à la profondeur choisie (dans toute l'étude, celle-ci est fixée à  $-20$  m). Il calcule alors la vorticité relative en tout point. Puis, il effectue une décomposition en ondelettes sur une base choisie automatiquement à l'aide d'un calcul d'entropie. Le seuillage intervient alors et s'effectue en calculant pour tous les seuils possibles l'entropie du jeu de coefficients obtenus. On obtient alors l'entropie du jeu de coefficients en fonction de la valeur du seuil et le programme retient comme seuil pertinent celui pour lequel l'entropie est minimale. Par la suite, le logiciel effectue une décomposition en ondelettes inverse et affiche la vorticité relative sur une carte en prenant soin d'entourer les zones reconnues comme étant tourbillonnaires par l'analyse en ondelettes (fig 4).

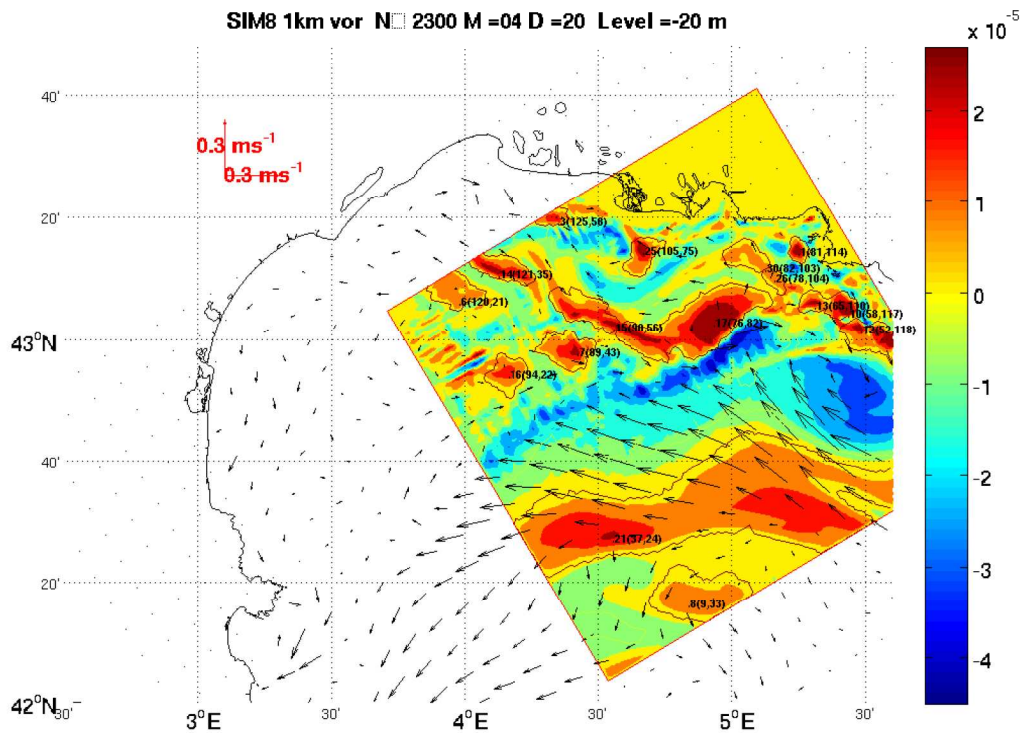


FIGURE 5 – Carte de la vorticité relative en sortie de WATERS. Les zones tourbillonnaires sont entourées en trait fin et numérotées. La vorticité est donnée en  $s^{-1}$  et les flèches correspondent au vecteur vitesse tous les 9 points de grille.

Il suffit alors de cliquer sur la zone de la carte où se trouve le tourbillon que l'on veut étudier et WATERS se charge alors de suivre l'évolution du tourbillon dans le temps jusqu'à ce que celui-ci disparaisse, et il sauvegarde une carte avec le tourbillon entouré pour chaque pas de temps (dans toute cette étude il s'agit d'un suivi journalier) (fig 5). Les tourbillons dont la vorticité relative est positive, correspondant à des tourbillons cycloniques dans l'hémisphère nord apparaîtront dans les tons rouges sur la carte alors que ceux pour lesquels la vorticité relative est négative (tourbillons anticycloniques dans l'hémisphère nord) sont représentés dans les tons bleus sur la carte.

Le critère d'arrêt du suivi temporel concerne le recouvrement du centre du tourbillon. Celui-ci est calculé pour chaque pas de temps et il faut qu'il soit présent dans la structure délimitée lors du pas de temps suivant afin d'être sûr que l'on ne "saute" pas d'une structure à une autre voisine lors du suivi automatique.

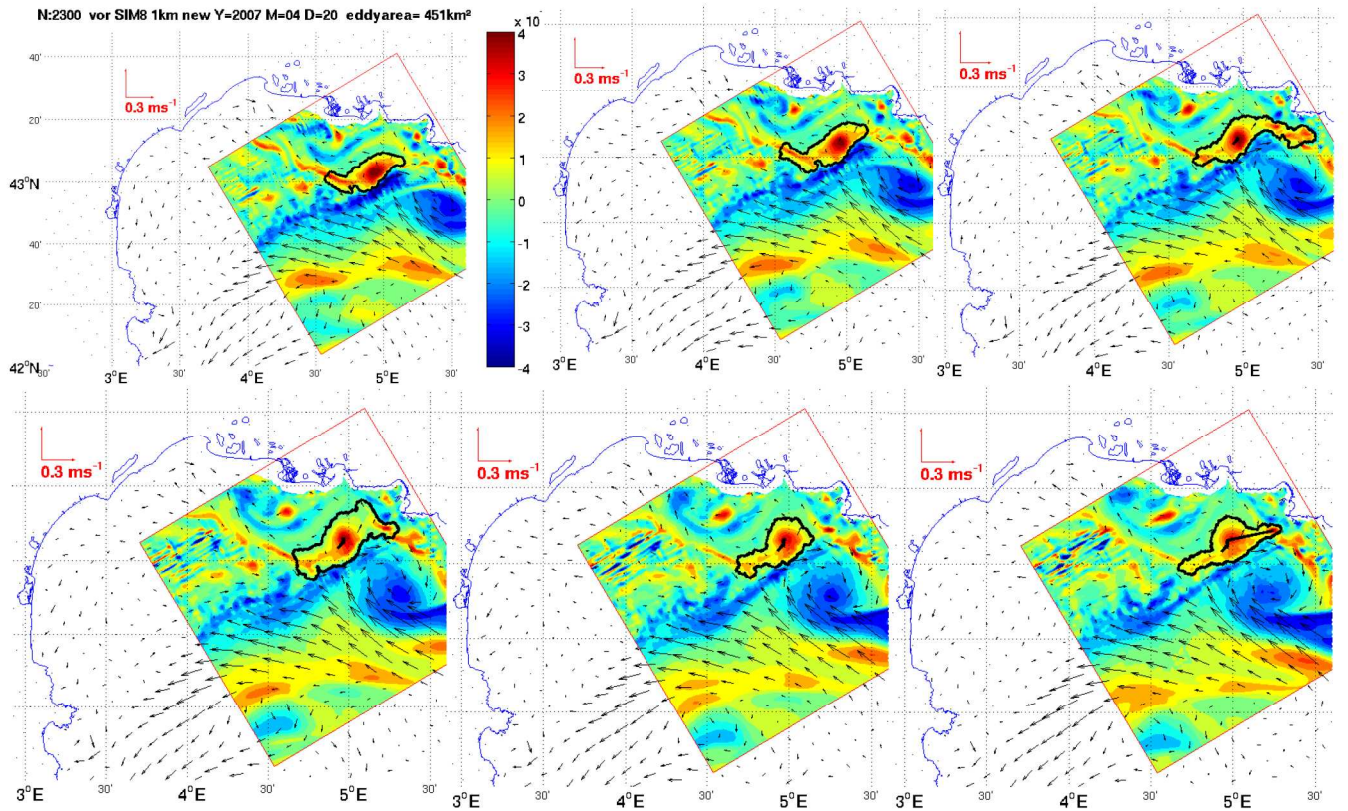


FIGURE 6 – Exemple de cartes de vorticité en sortie de WATERS pour le suivi d'un tourbillon sur 6 jours dans la configuration Symphonie 1km. La vorticité est donnée en  $s^{-1}$  et les flèches correspondent au vecteur vitesse tous les 9 points de grille. La ligne noire à l'intérieur des frontières du tourbillon correspond à la trajectoire du centre du tourbillon.

## 4 Étude comparative de l'activité tourbillonnaire entre les différents modèles de circulation

Dans cette partie, nous présenterons les résultats issus de l'analyse des suivis de tourbillons dans les différents modèles. Nous développerons d'abord la méthode et les critères choisis pour ne travailler que sur des tourbillons pertinents, puis nous présenterons les deux résultats principaux concernant l'impact de la résolution sur les tourbillons et la difficulté de reproduire des tourbillons identiques dans des modèles différents.

### 4.1 Les critères de sélection des tourbillons

Vu le fonctionnement du programme WATERS, il faut à un moment donné choisir un tourbillon et cliquer dessus sur la carte pour en assurer le suivi. Aussi faut-il dégager des critères objectifs pour assurer un choix judicieux de tourbillons.

Le premier d'entre eux est la taille. En effet, les tourbillons ont une taille de l'ordre de grandeur du rayon interne de Rossby qui est ici de l'ordre de 6 km [8]. Ainsi, on ne prendra en compte que les tourbillons qui ont une taille suffisamment importante.

Vient ensuite la pérennité de la structure. On ne prendra pas en compte dans notre étude des phénomènes qui se développent sur une durée trop courte, le minimum étant de l'ordre de 5 jours. On remarque d'ailleurs que ce critère est étroitement lié à la taille de la structure et à sa "pureté" (symétrie, absence de filaments). En effet, un gros tourbillon aura toujours une durée de vie supérieure à la semaine.

Enfin, un critère non plus physique mais pratique gouverne également le choix des tourbillons. Il s'agit du placement de ceux-ci vis-à-vis des zones que recouvrent les différents modèles. En pratique, on ne choisira que des tourbillons qui peuvent être observés dans au moins deux modèles différents.

### 4.2 Impact de la résolution sur les tourbillons

Avant d'effectuer une étude comparative entre des modèles construits sur des hypothèses et des forçages différents, on peut s'intéresser à l'impact de la résolution sur l'activité tourbillonnaire modélisée. En effet, parmi les modèles auxquels j'ai pu accéder, on en trouve deux qui présentent des configurations ayant des résolutions différentes. Il s'agit du modèle Symphonie présentant deux configurations à 1 km et 3 km de résolution et MARS3D pour lequel la résolution est de 1.2 km dans sa configuration MENOR et de 200 m dans sa configuration RHOMA. Il convient de noter que contrairement aux configurations Symphonie qui s'étendent sur la même zone, MARS et RHOMA ne présentent pas la même étendue spatiale, ce qui réduit considérablement le nombre de tourbillons exploitables pour l'analyse, aussi les résultats présentés seront issus des observations sur le modèle Symphonie.

Les figures 7 et 8 présentent un exemple typique de tourbillon étudié dans les deux configurations Symphonie 1km et Symphonie 3km. On peut affirmer que l'on a affaire au même tourbillon vu les périodes très proches de formation et de destruction, la localisation ainsi que le processus de formation. En effet, le tourbillon est détecté pour la première fois le 1er décembre dans les deux configurations, le centre se situe vers ( $43^{\circ}50'N, 5^{\circ}20'$ ) pour les deux configurations et le déplacement de celui-ci est faible tout au long du suivi. De plus le tourbillon semble se former dans les deux cas par le même processus, c'est-à-dire une instabilité du courant nord durant une période pendant laquelle celui-ci est peu marqué. En ce qui concerne la forme du tourbillon, on note dans les deux résolutions présentées une évolution typique, c'est-à-dire qu'au début du suivi, il s'agit d'un tourbillon allongé, présentant de longs filaments qui tendent ensuite à disparaître pour ne conserver qu'une forme quasi circulaire et symétrique. Cette évolution vers un tourbillon rond et symétrique semble plus rapide pour la résolution 1km (fig 7).

On remarque que le tourbillon est plus pérenne pour la configuration de plus haute résolution (1km), avec une durée de vie de 18 jours contre 14 pour la configuration de résolution 3km. La différence se fait sur la fin de vie du tourbillon car pour les deux configurations, le tourbillon est détecté pour la



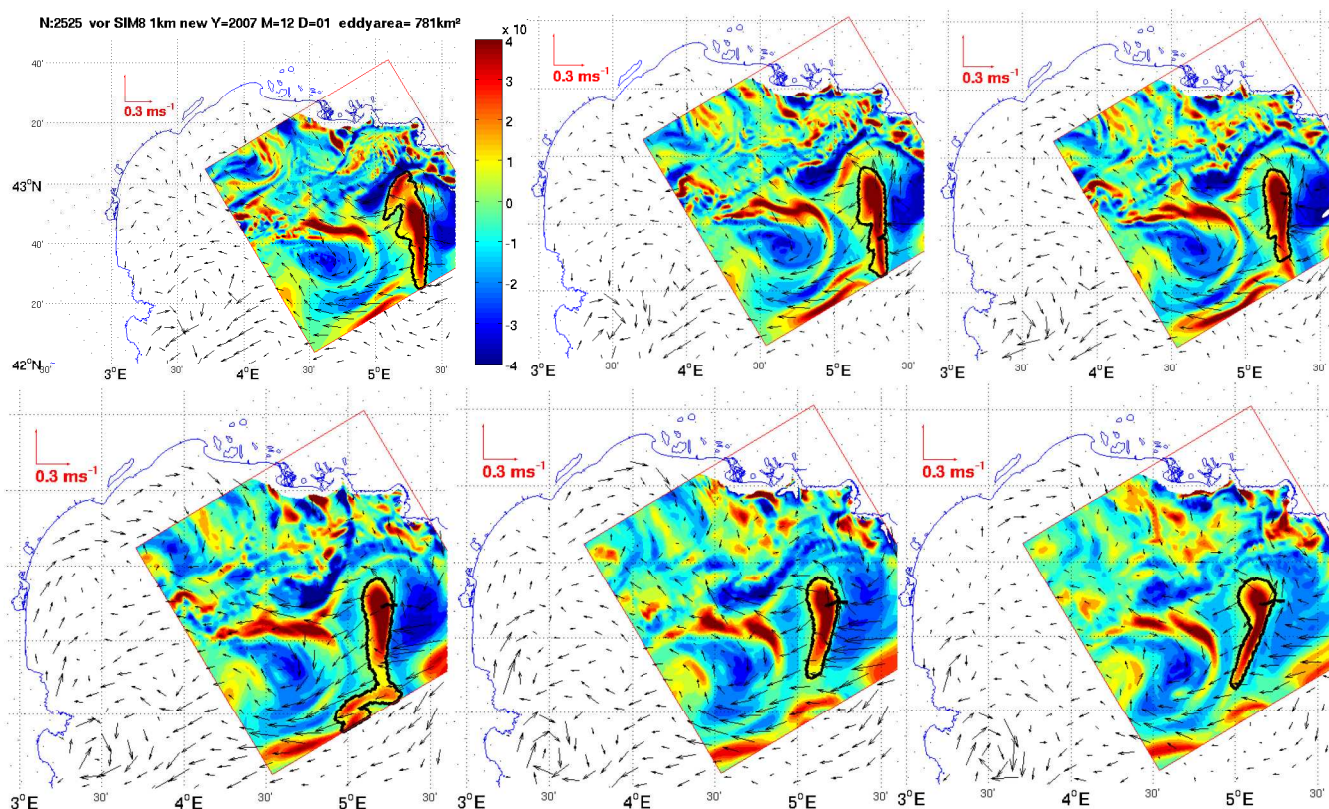


FIGURE 7 – Suivi journalier d'un tourbillon cyclonique dans la configuration Symphonie 1km du 01 décembre 2007 au 06 décembre 2007 (de droite à gauche et de haut en bas). Les cartes représentent la vorticité exprimée en  $s^{-1}$ . La ligne noire que l'on voit sur les cartes des derniers jours correspond au déplacement du centre du tourbillon.

première fois le même jour. On repère aussi une légère différence de taille entre les deux tourbillons, celle-ci étant légèrement plus importante dans la configuration de plus haute résolution (1km) avec une aire moyenne sur toute la durée de vie du tourbillon de  $450 \text{ km}^2$  contre  $420 \text{ km}^2$  pour la configuration à plus faible résolution (3km). J'ai pu observer ce type de différence de durée et de taille sur trois autres tourbillons présents à deux autres périodes, en Juin 2007 et Juin 2008. On obtient les mêmes tendances que pour le tourbillon de décembre 2007 présenté plus haut, avec une durée de vie inférieure de 15% à 20% et une aire inférieure de 5% à 10% pour la version basse résolution (3km) par rapport à la version haute résolution (1km).

Ainsi, il apparaît qu'au sein du même modèle, pour deux configurations différentes, les mêmes structures tourbillonnaires sont reproduites selon les mêmes processus. En revanche, on remarque que la configuration possédant la meilleure résolution va produire une structure ayant une durée de vie plus longue et une aire légèrement plus importante.

On notera en dernier lieu que pour cette période d'étude, malgré une observation minutieuse sur l'autre configuration disponible à cette date et à ce lieu, c'est-à-dire MENOR, on n'arrive pas à distinguer de tourbillon correspondant au niveau temporel, spatial et du processus de formation. Ce qui nous amène au deuxième résultat de cette étude.

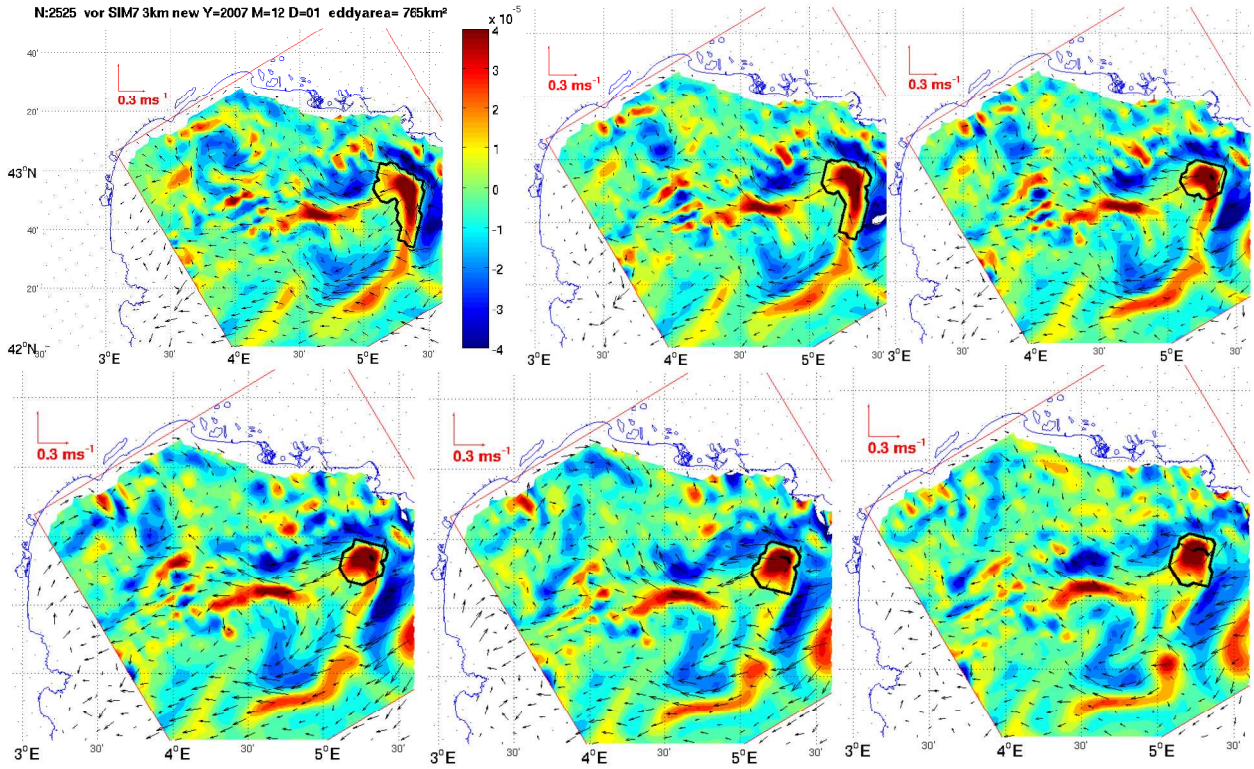


FIGURE 8 – Suivi journalier d'un tourbillon cyclonique dans la configuration Symphonie 3km du 01 décembre 2007 au 06 décembre 2007 (de droite à gauche et de haut en bas). Les cartes représentent la vorticité exprimée en  $s^{-1}$ . La ligne noire que l'on voit sur les cartes des derniers jours correspond au déplacement du centre du tourbillon.

#### 4.3 Une activité tourbillonnaire propre à chaque modèle

Une caractéristique qui se dégage de l'étude réalisée est qu'il est très difficile de retrouver les mêmes tourbillons dans des modèles différents.

A ce stade, il faut bien définir ce que l'on entend par "même tourbillon". En effet, les modèles étant différents, il peut se trouver qu'il y ait un décalage temporel de l'ordre de la journée, et un décalage spatial de l'ordre de la dizaine de kilomètres entre deux d'entre eux. Aussi, il est nécessaire de s'intéresser à d'autres paramètres comme le processus de formation ou le déplacement du centre du tourbillon.

Si on s'intéresse à la période de Juin 2008 pour laquelle on possède les données pour les trois modèles dans cinq configurations, on s'aperçoit que les sorties de modèles présentent des activités tourbillonnaires difficilement comparables.

Sur la figure 9, les sorties MENOR et RHOMA présentent toutes les deux un tourbillon anticyclonique de taille comparable et de position identique dont on peut raisonnablement affirmer qu'il s'agit du même tourbillon. Or ce tourbillon n'est pas présent sur les sorties Symphonie et Mercator représentées sur les figures 10 et 11.

De même, les sorties Symphonie laissent apparaître toutes les deux un méandre du CN qui se referme en tourbillon anticyclonique et que l'on ne retrouve pas sur les sorties MENOR et Mercator.

Enfin, le modèle Mercator ne présente aucune activité tourbillonnaire significative à cette période.

Ainsi, il ressort de l'étude sur cette période que pour un même modèle on retrouve les mêmes structures, mais pour deux modèles différents, il est impossible de trouver deux tourbillons que l'on pourrait qualifier d'identiques. Ce résultat n'est pas choquant au regard du fait que l'activité mésoéchelle est régie par des lois hautement non-linéaires qui peuvent posséder une forte sensibilité aux conditions initiales et conditions aux limites dont on a vu qu'elles diff  rent d'un modèle à l'autre.



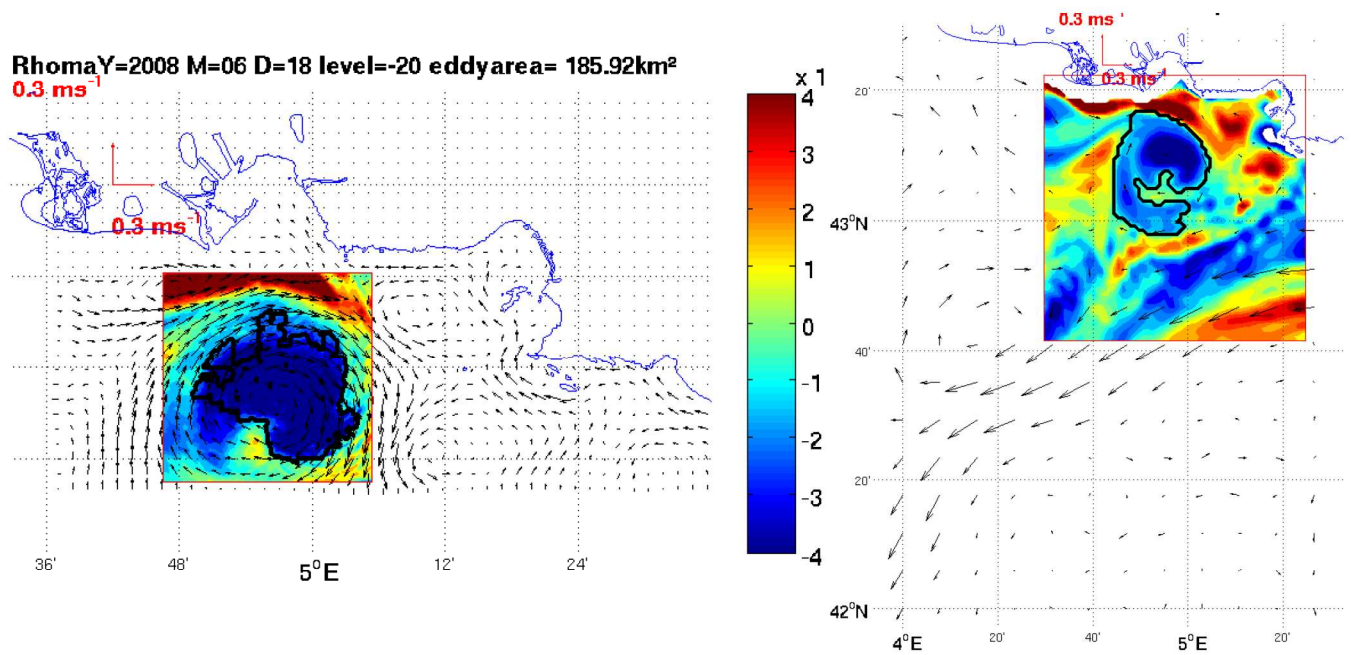


FIGURE 9 – Cartes de la vorticité (en  $s^{-1}$ ) pour les configurations MENOR et RHOMA. On remarque que les deux tourbillons détectés par WATERS sont très similaires et on peut dire qu'il s'agit bien du même tourbillon.

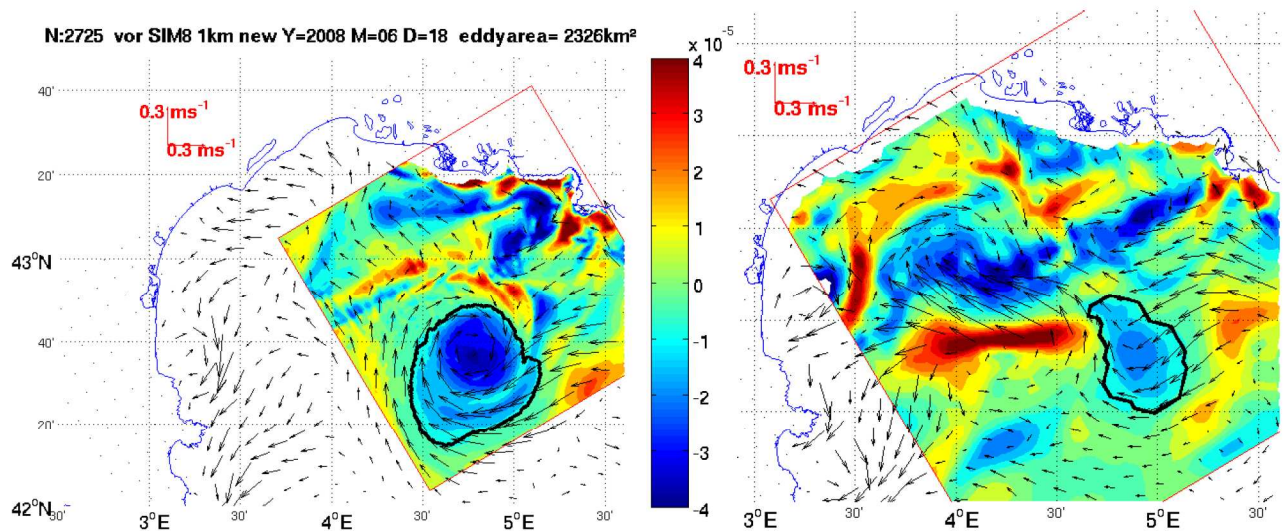


FIGURE 10 – Carte de la vorticité (en  $s^{-1}$ ) pour les configurations Symphonie 1km et 3km. Les deux cartes présentent le même méandre du CN mais avec une signature plus faible pour la résolution 3km.



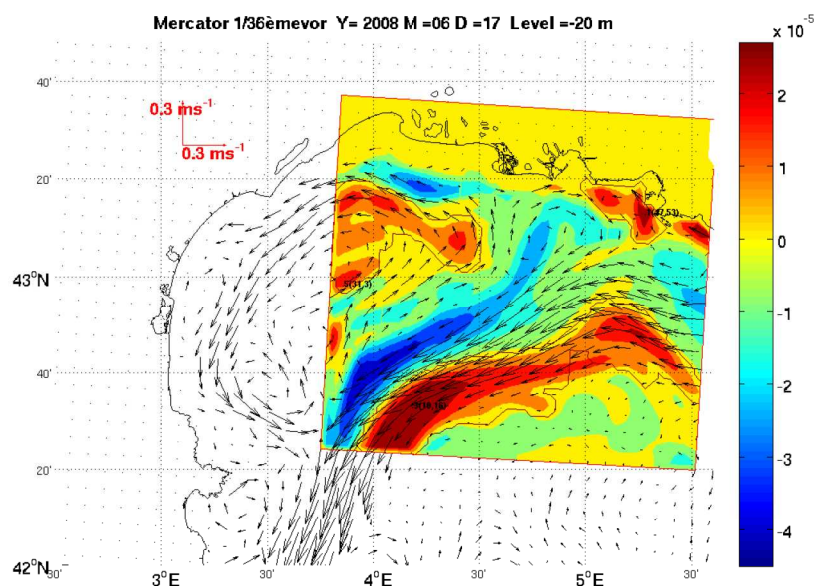


FIGURE 11 – Carte de la vorticité (en  $s^{-1}$ ) pour la configuration Mercator. Aucun tourbillon n'est représenté car aucune structure ne répond aux critères de pérennité exprimés plus haut.

## 5 Conclusion et perspectives

Dans le domaine de l'océanographie et dans la science en général, les modèles numériques sont aujourd'hui utilisés quotidiennement et ils apportent une véritable plus-value dans la compréhension des phénomènes physiques ou biologiques mis en jeu. Cependant, il convient de connaître les limites de cet outil. L'étude que j'ai menée durant ce stage laisse voir une limite de la modélisation numérique dans la reproduction des phénomènes tourbillonnaires de mésoéchelle en océanographie côtière. En effet, il semble très difficile d'obtenir des activités tourbillonnaires semblables avec des hypothèses légèrement différentes au niveau de la fermeture turbulente ou encore pour les forçages atmosphériques, ce qui tendrait à montrer le caractère chaotique de l'activité tourbillonnaire de mésoéchelle. Cependant, nous avons pu montrer que l'on peut d'ores et déjà dégager une première tendance quant à la sensibilité des structures tourbillonnaires de mésoéchelle vis-à-vis de la résolution. En effet, les différents exemples observés laissent à penser que les résolutions plus élevées tendent à reproduire des tourbillons légèrement plus étendus, sur des périodes plus longues.

Toutefois, il faut noter que ce travail est en grande partie exploratoire et il serait très intéressant de pouvoir mener une véritable étude statistique sur des durées beaucoup plus longues et sur un nombre de tourbillons côtiers plus important afin de vérifier les premières conclusions que j'ai pu établir et de dégager des nouvelles pistes d'étude.

## Bibliographie

### Références

- [1] Doglioli, A.M., Blanke, B., Speich, S., Lapeyre, G. (2007), Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis : application to Cape Basin Eddies. *J. Geophys. Res.*, 112, C05043, doi :10.1029/2006JC003952
- [2] Millot, C., 1990. The Gulf of Lions' hydrodynamics. *Cont. Shelf Res.* 10, 885-894.
- [3] Hu, Z.H., Petrenko, A.A., Doglioli, A.M., Dekeyser, I., Numerical study of eddy generation in the western part of the Gulf of Lion. *J. Geophys. Res.*, submitted after revision.
- [4] C. Estournel, 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). *Journal of Geophysical Research*, 108 (C3) :8059, 2003.
- [5] A. Rubio, P.A. Arnau, M. Espino, M.D. Flexas, G. Jorda, J. Salat, J. Puigdefabregas, et A.S. Arcilla. A field study of the behaviour of an anticyclonic eddy on the Catalan continental shelf (NW Mediterranean). *Progress in Oceanography*, 66(2-4) :142-156, 2005.
- [6] Z. Y. Hu, A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, P. Marsaleix, et I. Dekeyser. Numerical simulations of eddies in the Gulf of Lion. *Ocean Modelling*, 28(4) :203-208, 2009.
- [7] P. Forget, Y. Barbin, et Andre G. Monitoring of surface ocean circulation in the gulf of Lions (North-West Mediterranean Sea) using WERA HF radars. *Proceedings IGARSS, Boston, USA*, 7-11 JUL 2008.
- [8] Amandine Schaeffer, Phd. Thesis, Impact du vent sur la circulation hydrodynamique dans le Golfe du Lion : modélisation haute résolution, Université du Sud Toulon-Var, 2010.