



**UBO**  
université de bretagne  
occidentale



**THESE / UNIVERSITE DE BRETAGNE  
OCCIDENTALE**

*sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne  
pour obtenir le titre de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE**

*Mention : Océanographie Physique*

**Ecole Doctorale des Sciences de la Mer**

présentée par

**Guillaume Dencausse**

Préparée au Laboratoire de Physique des Océans UMR 6523  
IFREMER-UBO-CNRS-IRD

**Echanges indo-atlantiques  
d'eau subtropicale en relation aux  
structures frontales et de méso-  
échelle: Utilisation de la série  
temporelle altimétrique de niveau  
de la mer**

**Thèse soutenue le 19/11/2009**  
devant le jury composé de :

**Xavier Carton**

Professeur, Université de Bretagne Occidentale / *président*

**Rosemary Morrow**

Physicienne, Université Paul Sabatier / *rapporteur*

**Silvia Garzoli (absente)**

Chief scientist, AOML / *rapporteur*

**Young-Hyang Park**

Professeur + Museum National d'Histoire Naturelle / *examineur*

**Julien Le Sommer**

Chercheur CNRS, LEGI / *examineur*

**Sabrina SPEICH**

Co-directrice de thèse, Université de Bretagne Occidentale

**Michel ARHAN**

Directeur de thèse, IFREMER



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants de thèse, Michel et Sabrina. Bien que les aléas de mon travail de thèse ont fait que j'ai un peu plus collaboré avec Michel qu'initialement prévu, Sabrina a été une source d'énergie et de motivation très importante tout au long de ces années, et encore plus particulièrement dans la dernière et difficile ligne droite. Je tiens à remercier Michel pour toute la justesse de son encadrement, son aptitude à accompagner, soutenir, appuyer, conforter, voire secouer (!) toujours avec beaucoup d'à propos. De travailler avec lui restera un grand souvenir, dont je lui suis reconnaissant.

Je voudrais ensuite remercier l'ensemble de mon jury de thèse, Xavier Carton, Sabrina, Michel, Julien Le Sommer, Young-Hyang Park, Silvia Garzoli (rapporteur n'ayant malheureusement pas pu être présente) et une mention spéciale pour Rosemary Morrow avec qui je poursuis aujourd'hui l'aventure.

Je voudrais aussi remercier Andrea Doglioli pour sa bonne humeur et le temps consacré à la prise en main de la technique de suivi en ondelettes. Un grand merci également à Ana Rubio dont les contributions ont considérablement accéléré mon travail en fin de thèse. Merci aussi à Bruno Blanke pour sa grande disponibilité lorsque les jours étaient comptés.

Je remercie également mes divers collègues de bureau, Florian Kokoszka pour ses digressions artistiques et un sauvetage pour l'impression de ce document, les deux Claire, Camille Lique, Catherine Guiavarch, Eric Danioux, Eric de Boisseson, et tous les autres trop nombreux pour être cités, mais qui ont rendu le quotidien si agréable.

Enfin, je voudrais tout particulièrement remercier diverses personnes qui auront été importantes tout au long de ces 4 années. Claire et Poullout qui m'ont offert le logis, puis un appui et une amitié en des temps troublés. Nicolas Ducouso et Xavier Perrot pour des raisons similaires et 100 autres, ainsi que Pierre Karleskind, Coralie Perruche, Céline Danilo, Arnaud Le Boyer, Nico Kolo et d'autres pour des virées inoubliables en cette belle région finistérienne.



Introduction .....	8
Caractéristiques principales des échanges.....	8
Branche nord de la connexion du supergyre .....	10
Branche sud de la connexion du supergyre .....	13
Etude de simulations sur modèle régional à haute résolution .....	14
Plan.....	14
1 Etude de la retroflection du Courant des Aiguilles .....	16
1.1 Etat de l'art sur la retroflection et son comportement.....	16
1.1.1 Contexte général de la retroflection du Courant des Aiguilles .....	17
1.1.2 Connaissances du comportement de la retroflection.....	19
1.2 Objectifs .....	21
1.3 Description des produits altimétriques utilisés.....	21
1.4 Caractérisation de la position de la retroflection du courant des Aiguilles..	22
1.4.1 Principe de la méthode de recherche de la position de la retroflection....	23
1.4.2 Détermination de la valeur critique.....	23
1.4.3 Profil de vitesse au point de retroflection.....	26
1.5 Détection des évènements de lâchers de tourbillons .....	27
1.6 Eléments bathymétriques du domaine d'étude.....	29
1.7 Résultats .....	29
1.7.1 Caractéristiques spatiales de l'évolution de la retroflection .....	29
1.7.2 Trajectoires de progression de la retroflection .....	34
1.7.3 Cinématique de la progression de la retroflection.....	36
1.7.4 Variabilité temporelle de la retroflection et lâchers d'anneaux des	
Aiguilles      38	
1.7.5 Variabilité temporelle de la retroflection .....	41
1.8 Conclusion.....	53
2 Etude des anneaux des Aiguilles .....	54
2.1 Etat de l'art sur les anneaux des Aiguilles .....	54
2.1.1 Une forte variabilité de la cinématique et de la population des anneaux .	54
2.1.2 Un transport associé aux anneaux difficilement quantifiable .....	55
2.1.3 Evolution de l'hydrologie et érosion des anneaux .....	56
2.2 Objectifs .....	58
2.3 Outils d'études et méthodes .....	59

2.3.1	Analyse en ondelettes .....	59
2.3.2	Méthode de suivi des anneaux des Aiguilles .....	61
2.4	Résultats .....	67
2.4.1	Etude générale de l'ensemble des tourbillons recensés .....	67
2.4.2	Etude des trajectoires par voies .....	81
2.4.3	Etude spécifique des tourbillons passant au sud de la dorsale .....	112
2.5	Conclusion.....	132
3	Etude de la branche sud du supergyre .....	134
3.1	Etat de l'art .....	135
3.1.1	Le STF est-il mutli-branches en atlantique sud ? La question d'une fermeture partielle du gyre subtropical .....	135
3.1.2	La question de la continuité du supergyre par le biais du STF .....	137
3.1.3	Un STF marqué au sud de l'Afrique dont l'origine et la variabilité sont peu connues	138
3.2	Objectifs .....	139
3.3	Outils d'étude et méthode .....	140
3.3.1	Recherche des fronts moyens .....	140
3.3.2	Mise en évidence des fronts moyens.....	140
3.3.3	Méthodes et critères choisis .....	141
3.3.4	Finesse de recherche en longitude.....	142
3.4	Résultats .....	142
3.4.1	Etude des fronts dans le champ moyen de SSH.....	142
3.4.2	Etude des fronts dans les champs hebdomadaires de SSH.....	148
3.5	Conclusion.....	164
3.6	Annexe .....	166
3.6.1	Etude de sensibilité.....	166
4	Etude de la branche nord du supergyre dans un modèle à haute résolution.....	170
4.1	Description des deux simulations.....	170
4.2	Etude de la retroflexion du courant des Aiguilles .....	171
4.2.1	Première comparaison des sorties de modèles avec les données altimétriques.	171
4.2.2	Adaptations de la méthode .....	174
4.2.3	Résultats .....	178
4.3	Etude des anneaux des Aiguilles.....	185

4.3.1	Choix de la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW .....	186
4.3.2	Adaptations de la méthode d'analyse en ondelettes.....	186
4.3.3	Résultats .....	188
4.4	Analyse lagrangienne .....	199
4.4.1	Principe de l'outil de l'analyse lagrangienne .....	199
4.4.2	Paramètres de l'étude .....	200
4.4.3	Résultats .....	201
4.5	Conclusion.....	204
5	Résultats/Prospective .....	205
5.1	Résultats .....	205
5.1.1	Etude la retroflexion du Courant des Aiguilles .....	205
5.1.2	Etude du comportement des anneaux des Aiguilles.....	205
5.1.3	Etude du Front Subtropical .....	207
5.2	Prospective .....	207
5.2.1	Branche nord du supergyre .....	207
5.2.2	Branche sud du supergyre .....	209
5.2.3	Amélioration attendues du modèle régional.....	210
	Références .....	211

## Introduction

La région océanique au sud de l'Afrique du Sud est au confluent des océans Indien, Atlantique et Austral. Elle est le siège d'échanges entre ces différents océans, lesquels sont intimement liés à la cellule de circulation méridienne (MOC pour *Meridional Overturning Circulation* ; Gordon, 1986 ; Weijer et al., 1999), et ainsi au contrôle du climat global (Knorr et Lohmann, 2003 ; Peeters et al., 2004). La circulation océanique de cette région est cependant complexe, et caractérisée par une dynamique fortement non-linéaire. Le rôle des mécanismes de mésoéchelle y est crucial, et influe sur la circulation méridienne de l'Atlantique (Bjastoch et al., 2008). Cette forte activité de mésoéchelle, ses interactions avec la bathymétrie et l'atmosphère, et ses effets sur les échanges indo-atlantiques restent cependant imparfaitement reproduits dans les modèles de circulation régionale, et a fortiori dans les modèles globaux et de climats. De nombreux travaux d'observations et de modélisation sont consacrés à une meilleure description, compréhension et quantification de ces échanges océaniques au sud de l'Afrique.

### ***Caractéristiques principales des échanges***

Les eaux profondes dans la région située au sud de l'Afrique du Sud correspondent essentiellement aux eaux profondes nord atlantique (NADW pour *North Atlantic Deep Water*). Elles sont associées à la MOC, et contribuent à sa branche dite froide. Formées en Atlantique nord, où elles se densifient et plongent, elles s'écoulent ensuite vers le sud. Au sud du continent africain, ces eaux sont en grande partie intégrées au Courant Circumpolaire Antarctique (ACC pour *Antarctic Circumpolar Current*), qui les redistribue dans les bassins indien et pacifique. Elles pourront s'y alléger et refaire surface.

Les eaux des couches supérieures au voisinage de l'Afrique du Sud ont une dynamique et des caractéristiques principalement associées aux eaux subtropicales et à leur circulation dans les gyres subtropicaux de l'Atlantique sud et de l'Indien. Dans l'Atlantique sud-est, la remontée vers le nord des eaux du gyre subtropical est associée au Courant du Benguela. Au sud-ouest de l'océan Indien s'écoule l'intense et étroit courant de bord ouest du gyre subtropical indien, le Courant des Aiguilles. Prenant naissance à la latitude du sud de Madagascar, il s'intensifie le long du continent africain vers le sud, jusqu'à l'extrémité de ce continent. Le courant effectue alors un demi-tour appelé retroflexion, pour fermer le gyre subtropical de l'océan Indien. Cette branche retour du Courant des Aiguilles est



appelée Courant de Retour des Aiguilles (ARC pour *Agulhas Return Current*). Des tourbillons sont émis de façon intermittente par la retroflexion du Courant des Aiguilles, qui dérivent ensuite dans l'atlantique sud. Ces tourbillons participent à un transfert d'eaux chaudes et salées de la thermocline et des profondeurs intermédiaires de l'océan indien vers l'Atlantique. Ces échanges contribuent en grande partie à la voie dite chaude de la MOC.

Au sud des gyres subtropicaux, l'ACC s'écoule vers l'est sous la forme de courants étroits (*jets*) pour la plupart continus autour de l'océan austral. Ces jets sont associés à des fronts océaniques, caractérisés par de forts gradients méridionaux de densité. Le front subtropical (STF pour *Subtropical Front*) est le front situé le plus au nord de l'ACC, et constitue la frontière entre les eaux intermédiaires et de surface de l'ACC et celle des gyres subtropicaux.

Le projet Goodhope, auquel cette thèse contribue, a pour objectif de mieux comprendre et étudier la variabilité des échanges au sud du continent africain, tant dans la région de passage des tourbillons mentionnés plus haut que plus au sud dans l'ACC. Le projet a débuté en 2004, avec des mesures répétitives le long d'une radiale partant du continent africain et orientée au sud-ouest, puis au sud le long du méridien de Greenwich. Des mesures d'hydrologie et d'XBT ont été effectuées le long de cette ligne, et des flotteurs ARGO déployés dans la région. Parallèlement à l'interprétation des mesures in-situ, des études basées sur des analyses de données de hauteur de mer obtenues par altimétrie satellitaire sont menées, ainsi que des analyses de modèles réalistes d'océan.

Cette thèse vise plus particulièrement à décrire les échanges inter-océaniques des eaux subtropicales de l'atlantique sud et de l'océan indien. Le schéma de circulation actuellement accepté des eaux subtropicales est celui d'un supergyre subtropical (De Ruijter, 1982 ; Speich et al. 2002), tel que représenté sur la Figure 1. Dans cette vision, chacun des gyres subtropicaux n'est pas strictement en circulation fermée dans son bassin océanique, mais les deux gyres sont au moins partiellement reliés au sud de l'Afrique. Ainsi les eaux subtropicales de l'océan indien véhiculées par le Courant des Aiguilles sont transférées en grande partie dans le gyre atlantique, et les eaux au sud du gyre subtropical de l'atlantique sud dérivent partiellement dans le gyre subtropical de l'océan indien. Le transport d'eaux subtropicales de l'océan indien vers l'atlantique se faisant aux latitudes les plus basses (à proximité de la pointe de l'Afrique), est par la suite appelé « branche nord » de la connexion du supergyre subtropical. Le transport de l'atlantique vers l'océan indien est alors dénommé « branche sud » de cette même connexion.

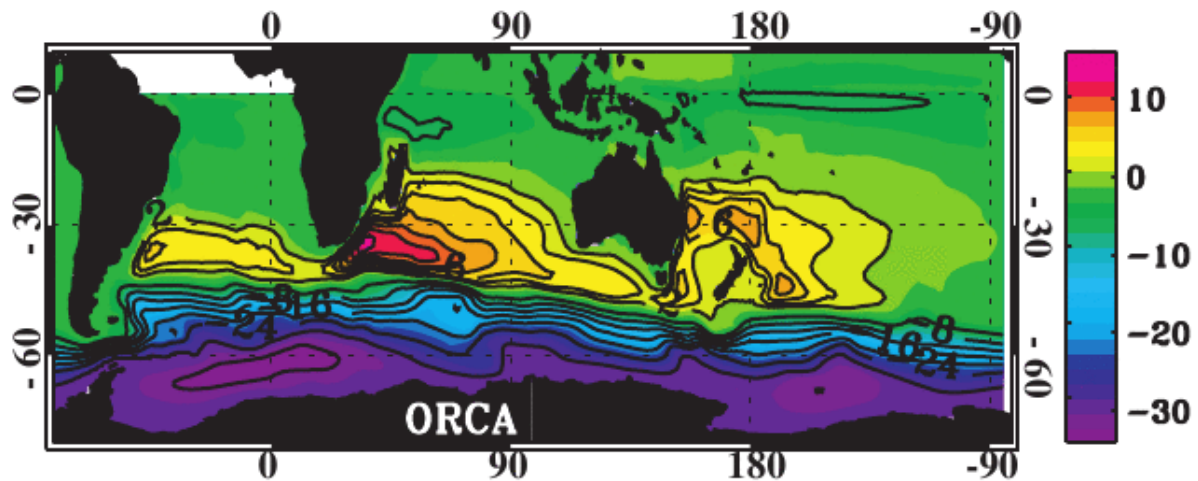


Figure 1. Fonction de courant horizontale issue d'une analyse lagrangienne d'une simulation menée sur un modèle global (ORCA). La fonction de courant est relative au parcours des eaux quittant puis rejoignant l'Atlantique nord. Donnant une vision horizontale de la circulation thermohaline, la fonction de courant fait aussi apparaître une jonction des gyres subtropicaux de l'Atlantique sud, de l'indien, et du Pacifique sud, nommée « supergyre ». Speich et al.(2002).

### **Branche nord de la connexion du supergyre**

L'échange d'eau de l'océan Indien vers l'Atlantique est lié au comportement du courant de bord ouest du gyre subtropical de l'océan Indien sud, le Courant des Aiguilles. Ce gyre est fortement intensifié à l'ouest du bassin, et le Courant des Aiguilles est l'un des plus intenses au monde. Pour cette thèse, une approche de l'étude des échanges de la branche nord, depuis l'amont vers aval, a été adoptée. Des tourbillons libérés par la retroflexion sont le principal vecteur d'échanges inter-gyre de la branche nord. Ainsi, notre intérêt s'est d'abord porté sur la retroflexion, et la libération de ces tourbillons. Puis dans un deuxième temps, sur les tourbillons libérés et leurs comportements.

Le Courant des Aiguilles est assez stable dans sa partie amont en raison de la forte pente du talus continental (De Ruijter et al., 1999), mais se déstabilise et méandre en atteignant le Banc des Aiguilles en formant des tourbillons anticycloniques et des filaments (Lutjeharms et al., 1989). Ces tourbillons sont appelés anneaux des Aiguilles. En s'éloignant au sud-ouest du banc des Aiguilles, le courant effectue une retroflexion resserrée pour retourner vers l'océan Indien. Les anneaux des Aiguilles anticycloniques sont formés lorsque la retroflexion se referme sur elle-même. Ces anneaux contenant ainsi des eaux originaires de l'océan indien dérivent ensuite dans le Bassin du Cap, où règne une intense activité de moyenne échelle et un mélange important. Les eaux de ces anneaux se mêlent ainsi aux eaux du courant du Benguela dont elles modifient les propriétés, et dérivent en direction de

l'Atlantique Sud, contribuant à l'apport d'eaux de l'Indien vers l'Atlantique. Ce mécanisme de détachement et propagation des anneaux des Aiguilles est la principale contribution du transfert d'eau de l'océan Indien vers l'Atlantique.

Les mécanismes à l'origine des formations et lâchers d'anneaux des Aiguilles ont été liés aux passages de cyclones descendant le courant des Aiguilles et le déstabilisant, les Natal Pulses (Van Leeuwen et al., 2000). La libération, ou lâcher, d'un anneau des Aiguilles qui en résulte s'accompagne d'un retrait instantané vers l'est de la retroflexion. Suite à un lâcher, la retroflexion progresse à nouveau lentement vers l'ouest, jusqu'au prochain épisode de lâcher. L'avènement de l'imagerie satellitaire a permis une observation de ce phénomène. Dans un premier temps, s'appuyant sur l'imagerie infrarouge, Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988) ont mis en évidence et décrit le mécanisme. Plus récemment, des études basées sur des données d'altimétrie, telles que celles réalisées par Feron et al. (1992), Schouten et al. (2000), ou Goñi et al. (1997), ont permis de mieux décrire le comportement de la retroflexion, de proposer des explications sur les causes des lâchers, et d'étudier sa variabilité temporelle.

Dans le cadre de cette thèse, l'utilisation de données satellitaires de hauteur de mer, fournies par CLS (CNES/Aviso), a permis en premier lieu d'envisager un approfondissement de nos connaissances sur le comportement et la variabilité de la retroflexion. Le jeu de données exploité pour l'étude réalisée ici couvre près de 13 ans, contre cinq ans au plus dans les études précédentes. Cette durée supérieure permet une meilleure estimation de la variabilité pluriannuelle, et de la variabilité en général. Par ailleurs, les études existantes s'appuient pour la plupart sur des données altimétriques d'anomalies de hauteur de mer, alors que les produits d'altimétrie employés pour cette thèse sont des hauteurs de mer absolues, permettant une caractérisation plus robuste de la retroflexion. Enfin, cette première étude étant poursuivie par celle des anneaux des Aiguilles, l'emploi du même jeu de données altimétriques pour les deux études permet de croiser et d'enrichir les résultats obtenus.

Les anneaux des Aiguilles détachés de la retroflexion se retrouvent généralement dans le Bassin du Cap. Cette région située immédiatement à l'ouest de la position moyenne de la retroflexion est le siège d'une intense activité de moyenne échelle. Ainsi, elle a été baptisée *Cape Cauldron*, ou Chaudron du Cap (Boebel et al., 2003). Les deux à sept anneaux des Aiguilles présents simultanément (Goñi et al., 1997) dans la région sont susceptibles d'interagir entre eux, ou d'interagir avec des cyclones d'origines variées également présents. Des interactions avec divers monts sous-marins ont également été mises en évidence. De plus, les forts échanges air-mer observés dans la région entraînent des modifications importantes

des caractéristiques des masses d’eaux. L’ensemble de ces facteurs rend les écoulements dans cette région et les échanges inter-océaniques associés particulièrement complexes.

De nombreuses études se sont récemment intéressées au comportement des anneaux des Aiguilles dans le Bassin du Cap, et à leur dérive dans l’atlantique sud. Des mesures in-situ ont d’abord permis d’étudier les caractéristiques hydrographiques de ces anneaux et d’estimer les transports de chaleur associés (e.g., Duncombe-Rae et al., 1989 ; McDonagh et Heywood, 1999 ; Garzoli et al., 1999). Puis, l’avènement des observations satellitaires a permis des études plus synthétiques de leurs trajectoires, et de leur dissipation progressive dans le courant du Benguela (e.g., Gordon et Haxby, 1990 ; Byrne et al., 1995 ; Schouten et al., 2000). Il apparaît qu’après une phase de stagnation et d’interactions multiples au voisinage de la retroflexion, les tourbillons dérivent à des vitesses variables, allant de 3 cm/s jusqu’à 16 cm/s (Gründlingh, 1995, et Goñi et al., 1997). Garzoli et Gordon (1996) puis Goñi et al. (1997) ont identifié un corridor de passage des anneaux des Aiguilles, présentant un axe de translation vers le nord-ouest. Schouten et al. (2000) ont constaté une décroissance de 50% des anomalies au cœur des tourbillons au cours de leurs quatre premiers mois d’existence, attestant de l’importance des échanges air-mer dans la région. Arhan et al. (1999) et Gladyshev et al. (2008) ont par ailleurs mis en évidence l’effet de la dorsale des Aiguilles qui interagit parfois avec les anneaux, provoquant une subdivision, et le déplacement vers le sud de la dorsale d’un des tourbillons issus de la subdivision. Ces tourbillons, échantillonnés au cours de campagnes en mer, présentent des caractéristiques très différentes des anneaux ayant une trajectoire nord-ouest plus classique. Leur stagnation au sud de la dorsale dans la zone subantarctique de l’ACC entraîne des échanges air-mer prononcés, lesquels refroidissent les tourbillons et provoquent une convection importante en leur cœur. Les caractéristiques hydrographiques de tels tourbillons étant différentes de celles des tourbillons dérivant directement dans l’Atlantique, leurs contributions en chaleur et sel aux échanges inter-océaniques seront différentes.

On dispose ainsi aujourd’hui de connaissances importantes sur les caractéristiques des anneaux des Aiguilles dans leur dérive dans l’Atlantique sud. Mais le comportement des anneaux dans la partie sud-est du Bassin du Cap a été moins étudié que plus à l’ouest, où la dynamique de moyenne échelle est moins intense. En se basant sur le jeu de données altimétriques déjà utilisé pour l’étude de la retroflexion du Courant des Aiguilles, nous avons cherché à mieux caractériser les comportements des anneaux des Aiguilles dans la région du Bassin du Cap, en identifiant diverses trajectoires et leurs liens probables avec la bathymétrie à l’ouest du bassin. La durée importante du jeu de données a permis une analyse statistique

conduisant, de plus, à une appréciation quantitative de l'importance de chaque type de trajectoires observé, et de l'influence de la bathymétrie.

### ***Branche sud de la connexion du supergyre***

La connexion des gyres subtropicaux de l'Atlantique sud et de l'océan indien par la branche sud, et donc le transport d'eaux intermédiaires et de surface d'ouest en est, ont été moins explorés que leurs équivalents de la branche nord. La zone de convergence subtropicale, correspondant à la ligne de rotationnel de vent nul, contrôle l'extension vers le sud des gyres subtropicaux. Or la ligne de rotationnel de vent nul passe au sud du continent africain (de Ruijter et al., 1999) et permet donc théoriquement une connexion des deux gyres en un supergyre. Diverses études utilisant des données hydrographiques de plusieurs campagnes en mer ont permis d'identifier des fronts océaniques subtropicaux délimitant les eaux de caractéristiques subtropicales au nord des eaux de l'ACC. Le front subtropical (STF pour *Subtropical Front*), tel qu'identifié par Orsi et al. (1995) ou par Stramma et Peterson (1990), est continu entre les deux bassins, indiquant donc une frontière hydrographique au sud du continent africain. Stramma et Peterson (1990) notent cependant l'existence d'une fermeture partielle du gyre subtropical atlantique. Belkin et Gordon (1996) identifient ensuite deux fronts subtropicaux dans le bassin atlantique, l'un s'orientant au nord-est, puis au nord près de la côte ouest africaine correspond à la fermeture du gyre subtropical atlantique, le second se prolongeant jusque dans l'océan indien matérialise une connexion partielle des deux gyres. Des études effectués à partir d'analyses lagrangiennes sur des sorties de modèles globaux de circulation ont par ailleurs montré une circulation des eaux subtropicales au travers des deux gyres, et donc un échange de masses d'eaux par la branche sud de la connexion du supergyre (Speich et al. 2002).

Cependant, des questions demeurent sur la nature de cette connexion par la branche sud. En effet, la forte activité de moyenne échelle au sud de l'Afrique est susceptible de perturber le Front Subtropical dans sa continuité spatiale entre les deux bassins. La continuité apparente d'un front subtropical moyen obtenu à partir des données hydrographiques, est valable en moyenne mais lisse l'effet instantané de la moyenne échelle. Dès lors, la manière dont le transport associé au jet frontal se fait d'un bassin océanique à l'autre n'est toujours pas explicitée. Les analyses lagrangiennes de sorties de modèles indiquent un échange par cette branche, mais la bonne représentation de l'activité de moyenne échelle dans la région par ces modèles peut-être mise en question. De plus, l'analyse ne permet pas de conclure sur la façon dont s'opère ce transport. Afin de mieux comprendre la nature de cette connexion, nous nous

sommes intéressé à l'évolution temporelle du front subtropical au sud du continent africain, et aux effets de la moyenne échelle sur sa continuité. Pour cela, nous nous sommes également appuyés sur le jeu de données altimétriques utilisé pour l'étude de la branche nord.

### ***Etude de simulations sur modèle régional à haute résolution***

L'amélioration constante des performances des modèles numériques de circulation océanique fait de cet outil un élément central d'analyse des mécanismes océaniques du climat mondial. L'importance des échanges océaniques dans la région étudiée dans cette thèse exige des modèles qu'ils parviennent à en reproduire fidèlement la dynamique, et particulièrement l'activité de moyenne échelle (Biaostoch et al., 2008a). Le développement de modèles régionaux à haute résolution permet aujourd'hui de retrouver un comportement adéquat de la retroflexion du Courant des Aiguilles, avec des lâchers d'anneaux des Aiguilles dérivant dans l'atlantique sud (Tréguier et al., 2003 ; Biaostoch et al., 2008b). Cependant, les problèmes de conditions aux frontières du domaine simulé ou encore de simulation des échanges air-mers ne sont à ce jour pas complètement résolus, et un examen plus précis de la dynamique obtenue montre généralement des écarts avec le comportement réel.

L'étude réalisée au cours de cette thèse permet d'envisager une comparaison et une évaluation des performances d'un tel modèle. Les études menées à partir des données altimétriques peuvent ainsi être employées comme étalon dans l'évaluation de l'aptitude d'un modèle à reproduire les aspects dynamiques des échanges inter-gyre qui ont été envisagés. En nous intéressant aux échanges de la branche nord en particulier, nous avons donc travaillé avec deux simulations du modèle ROMS (*Regional Oceanic Modelling System*, Shchepetkin et McWilliams, 2003) sous deux configurations de forçages différentes. Les résultats obtenus permettent une évaluation méthodique des simulations, et une recherche de diagnostics pouvant expliquer les écarts de comportements constatés.

### ***Plan***

Le manuscrit comporte cinq chapitres. Les deux premiers sont consacrés à l'étude de la branche nord de la connexion du supergyre : le premier analyse le comportement de la retroflexion et la génération d'anneaux des Aiguilles à partir des données d'altimétrie, tandis que le second s'intéresse au suivi de ces anneaux et à leur comportement dans la région du Bassin du Cap. Le troisième chapitre traite de la branche sud de la connexion du supergyre, et le quatrième présente la comparaison modèle-observations sur la branche nord (retroflexion et comportement des tourbillons). Un dernier chapitre résume les résultats et discute les

perspectives ouvertes par cette thèse. Chaque chapitre 1 à 4 débutent tous par une présentation des objectifs spécifiques et un état de l'art sur les sujets abordés. Puis, une présentation des méthodes utilisées précède l'exposé des résultats obtenus.

# 1 Etude de la retroflection du Courant des Aiguilles

Nos connaissances du comportement des anneaux des Aiguilles au voisinage immédiat de la retroflection restent assez limitées. Or, des phénomènes tels que la subdivision d'anneaux à la rencontre d'éléments bathymétriques du bassin du Cap (Arhan et al., 1999 ; Schouten et al., 2000), semblent avoir des conséquences importantes sur le mélange régional, la modification des eaux véhiculées par les tourbillons vers l'Atlantique et donc les échanges interocéaniques d'eaux subtropicales. C'est pourquoi l'analyse du comportement des anneaux des Aiguilles dans le bassin du Cap constitue l'objectif principal notre étude de la branche nord du supergyre. Or, ces tourbillons anticycloniques étant générés par la retroflection du courant des Aiguilles, il est apparu approprié de s'intéresser dans un premier temps au comportement de la retroflection du Courant des Aiguilles, ainsi qu'à la formation et au devenir des anneaux des Aiguilles. S'appuyant sur le même jeu de données pour ces études, une longue série temporelle de produits altimétriques, le lien entre les deux études sera facilité.

## 1.1 Etat de l'art sur la retroflection et son comportement

Le mécanisme de formation des anneaux des Aiguilles par la retroflection a pu être correctement observé et décrit pour la première fois à partir de données satellitaire d'imagerie infrarouge. Les eaux du Courant des Aiguilles (noté AC pour *Agulhas Current*), de la retroflection et du gyre subtropical indien, étant plus chaudes que celles du bassin du Cap et de l'ACC, Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988) ont pu observer la configuration de la retroflection et suivre son évolution temporelle (Figure 1.1). Ils ont constaté que la retroflection, démarrant d'une position reculée à l'est, progresse lentement vers l'ouest, jusqu'à ce que l'AC au nord et le Courant de Retour des Aiguilles (noté ARC pour *Agulhas Return Current*) au sud se rejoignent. Il se forme alors à l'ouest de la zone de jonction un tourbillon anticyclonique, et la retroflection se reforme soudainement à l'est du tourbillon. Ainsi, la retroflection effectue un saut discontinu vers l'est lors de la formation du tourbillon appelé anneau des Aiguilles. L'anneau dérive généralement vers l'Atlantique sud, et la retroflection commence une nouvelle progression vers l'ouest, menant à la formation d'un nouvel anneau des Aiguilles.



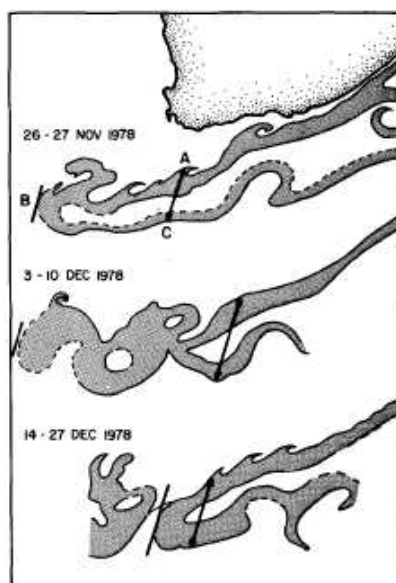


Figure 1.1. Schéma de formation d'un anneau des Aiguilles (Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988)). La retroflexion progresse vers l'ouest jusqu'à ce que l'AC et l'ARC se rejoignent, en libérant un anneau des Aiguilles anticyclonique.

### 1.1.1 Contexte général de la retroflexion du Courant des Aiguilles

La retroflexion de l'AC constitue l'extrémité ouest du gyre subtropical de l'océan Indien. Ce gyre est forcé par le rotationnel des vents au dessus du bassin subtropical indien. Il présente une asymétrie plus marquée que les gyres subtropicaux de la plupart des autres bassins (Stramma et Lutjeharms, 1997). La zone de convergence subtropicale passant au sud du continent africain, vers 45°S, le courant de bord ouest du gyre, le courant des Aiguilles, peut s'écouler au sud du continent africain. Le gyre est alors fermé par la retroflexion et le retour de l'ARC vers l'océan Indien. Un schéma de circulation proposé par Stramma et Lutjeharms (1997) est présenté Figure 1.2. On y observe la présence d'un sous-gyre subtropical allant jusque 60°E, induisant une recirculation forte des eaux vers l'ouest du bassin, estimée à 35 Sv sur les 1000 m supérieurs.

L'AC présente d'autres particularités le distinguant des courants de bord ouest des autres bassins. La présence de l'île de Madagascar à l'est du continent africain perturbe sa formation. Le courant Sud Equatorial (SEC pour *South Equatorial Current*), qui constitue la branche nord du gyre subtropical, voit son écoulement interrompu par l'île. Le SEC se subdivise alors en une branche nord et une branche sud, le Courant Est de Madagascar (EMC pour *East Madagascar Current*) (Wyrтки, 1973). Des tourbillons au sud de Madagascar, détachés de l'EMC lorsqu'il se déstabilise en s'éloignant du talus au sud de l'île (De Ruijter et al., 2004), ou provenant de l'intérieur du bassin plus à l'est (Schouten et al., 2002), se



### 1.1.2 Connaissances du comportement de la retroflexion

Pour étudier plus spécifiquement la retroflexion et les lâchers d'anneaux des Aiguilles, de nombreux auteurs se sont appuyés, depuis une vingtaine d'années, sur des mesures satellitaires d'altimétrie ou infra-rouge. Les tourbillons intenses de cette région provoquent des dénivellations importantes de la hauteur de la mer, ou SSH (*Sea Surface Height* pour hauteur de mer). Les anticyclones (cyclones) provoquent des anomalies positives (négatives). Grâce à cela, des méthodes de détection des instants de lâchers ont été développées. Cependant, comme ces études utilisaient des données d'anomalies de SSH, la détection des instants de lâchers et des positions de la retroflexion restait incertaine. En effet, l'intense circulation du sous-gyre subtropical de l'océan indien entraîne une élévation importante de la hauteur de mer à l'intérieur de ce sous-gyre. Les données d'anomalies ne permettant pas de visualiser cette élévation permanente, la trajectoire variable du courant n'est pas visible, et ses méandres peuvent entraîner dans les cartes d'anomalies de SSH l'apparition de tourbillons sans réalité physique.

Afin de détecter les instants de lâchers, Feron et al. (1992) ont utilisé une méthode de corrélation et d'analyse en composantes principales, qui détecte les périodes de forte variation du champ d'anomalies liée au mécanisme de formation d'un anneau. En analysant des données du satellite Geosat, de novembre 1986 à septembre 1989, ils ont recensés 18 lâchers, dont 11 ou 12 jugés significatifs. Ils constatent un temps moyen de 14 semaines pour le retour de la retroflexion à une configuration identique, soit entre deux cycles de lâchers successifs. Goñi et al (1997) utilisent deux lignes de passages adjacentes du satellite TOPEX/Poseidon à l'ouest de la retroflexion pour détecter le passage d'anneaux, de septembre 1992 à décembre 1995. Ils dénombrent ainsi 17 anneaux (5 en 1993, 4 en 1994 et 6 en 1995), et notent deux périodes sans lâchers, de novembre 1992 à avril 1993 et de septembre à décembre 1994. Schouten et al. (2000) reprennent la méthode utilisée par Feron et al. (1992) sur les données d'anomalies de TOPEX/Poseidon, et dénombrent 21 lâchers entre 1993 et 1996 (4 en 1993, 6 en 1994, 5 en 1995 et 5 en 1996). Ils notent également l'absence de lâchers sur 3 périodes de plus de 4 mois.

Ces études, comme d'autres s'appuyant également sur des données d'altimétrie, concluent à 5 lâchers/an en moyenne, sans qu'aucune fréquence particulière ne soit observée, car de longues périodes sans lâchers sont détectées. Cependant, certaines questions ne peuvent être abordées avec les outils employés pour ces études. D'une part, la durée temporelle des données d'anomalies de SSH (4-5 ans au plus) est trop faible pour affirmer l'absence de

périodicité des lâchers, et pour étudier la saisonnalité des lâchers d'anneaux, et la variabilité inter-annuelle du nombre de lâchers. D'autre part, les études citées sont limitées par l'utilisation de données d'anomalies de SSH plutôt que de SSH intégrant la circulation moyenne de la région. Cela a conduit les auteurs à développer des méthodes indirectes pour détecter les instants de lâchers, qui ne permettent pas d'étudier la réflexion et sa variabilité. Car si le schéma de progression d'est en ouest suivi d'un lâcher a été décrit par Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988), ces études ne nous renseignent pas plus sur le comportement spatio-temporel de la réflexion.

Ainsi, nos connaissances actuelles sur le comportement spatio-temporel de la réflexion (hors périodicité des lâchers d'anneaux) demeurent schématiques, et furent en grande partie établies dès 1988 par Lutjeharms et Van Ballegooyen, à partir d'imagerie infrarouge. Les auteurs ont montré qu'entre deux lâchers, la réflexion progresse vers l'ouest à 10.4 km/jour de moyenne. Feron et al. (1992) trouvent une vitesse de progression moyenne de l'ordre de 7 km/jour. Cette progression s'accélère à mesure que la réflexion avance vers l'ouest (Figure 1.3). Les positions en longitude extrêmes observées par Lutjeharms et Van Ballegooyen entre 1978 et 1983 sont de 9°40'E et 20°30'E, et la réflexion oscille principalement entre 15°E et 20°E. Concernant la saisonnalité de la réflexion, Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984) et Lutjeharms et al. (1992) mentionnent, sur la base de données de mesures infrarouges et de données historiques, une pénétration plus importante vers l'ouest durant l'été Austral.

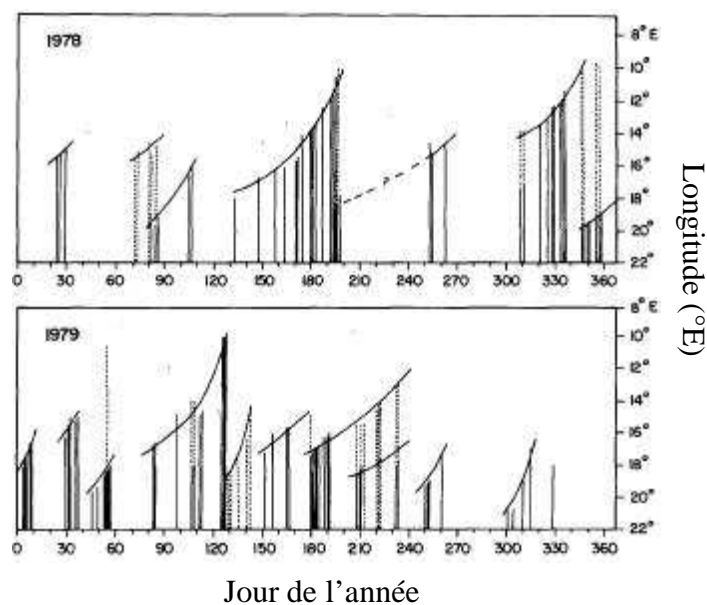


Figure 1.3. Longitude extrême ouest de la réflexion dans le temps, pour 1978 et 1979, obtenue par imagerie infrarouge de METEOSAT (Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988)). On note l'accélération de la progression vers l'ouest à mesure que la réflexion s'avance.

Des positionnements exceptionnels de la retroflexion à l'est du plateau des Aiguilles appelés « retroflexions amont » (*upstream* ou *early retroflexion*), ont été mis en évidence par Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988). Un tel événement, survenu à la fin de l'année 2000, a été analysé par de Ruijter et al. (2004). La progression vers l'ouest de la retroflexion après ce « court-circuit » à l'est du plateau des Aiguilles fut très lente, et un retour à la normale nécessita 6 mois.

## **1.2 Objectifs**

**M'appuyant sur une série temporelle de hauteur de mer absolue, combinaison d'un champ moyen et d'anomalies, qui s'étend sur plus de 12 ans, j'ai cherché à mieux caractériser le comportement statistique de la retroflexion, et les évènements de lâchers d'anneaux. La longueur de ce jeu de données permet d'en étudier les fréquences intra- et inter-annuelles. Pour répondre à ces objectifs, une méthode de caractérisation quantifiée de la position de la retroflexion sur les produits de SSH absolue a été mise en place.**

## **1.3 Description des produits altimétriques utilisés**

Les produits altimétriques employés pour cette thèse sont préparés par Ssalto/Duacs et distribués par Aviso, avec le soutien du CNES. Il s'agit de cartes de hauteurs de mer, comprenant uniquement les anomalies pour certaines applications, mais le plus souvent intégrant un niveau moyen de hauteur de mer représentatif de la circulation moyenne des océans. Les champs d'anomalies sont obtenus par combinaison de mesures de plusieurs satellites (TOPEX/Poseidon, ERS-1 et 2, Jason-1, Geosat, Envisat, GFO). Ainsi, les produits sont construits à partir d'un nombre variable de satellites. Le champ moyen additionné aux anomalies pour obtenir un champ de topographie dynamique absolue (MADT pour *Maps of Absolute Dynamic Topography*) représente le niveau moyen des mers au-dessus du géoïde. Des champs de vitesses géostrophiques de surface ont également été utilisés, qui correspondent aux vitesses géostrophiques associées aux champs de MADT. Le champ moyen employé a été modifié durant cette thèse, passant de Rio03 (Rio, 2003) à Rio05 (Rio et Hernandez, 2005). Ainsi, les produits utilisés pour les différentes études réalisées ne sont pas exactement identiques, puisqu'ils s'appuient sur les données les plus à jour à la date de l'étude. Ceci aura toutefois des conséquences très limitées lorsque nous envisagerons de lier les résultats des différentes études, car les études réalisées sont peu sensibles au choix du champ moyen. L'étendue temporelle des données utilisées dépend également de la date de chaque

étude. Certaines études ont été reprises a posteriori pour permettre des recoupements. Les produits sont hebdomadaires et débutent le 14 octobre 1992. Il s'agit de champs au 1/3° en longitude et latitude. L'étendue temporelle et le champ moyen utilisés pour chaque étude seront précisées en début de chapitres.

#### **1.4 Caractérisation de la position de la retroflexion du courant des Aiguilles**

Les produits altimétriques employés ici utilisent le champ moyen Rio03, et la série temporelle s'étend du 14 octobre 1992 au 18 mai 2005, soit 658 semaines. Nous avons recherché une méthode pour situer géographiquement l'extrémité ouest de la retroflexion sur les champs de ADT (ou SSH) hebdomadaires. Le tracé du champ moyen de SSH sur la période considérée (Figure 1.4) montre que la circulation des gyre et sous-gyre subtropicaux de l'océan indien apparaît clairement, grâce au fait que les hauteurs dynamiques dans l'intérieur du gyre sont plus élevées (de l'ordre du mètre) qu'à l'ouest ou au sud de la retroflexion. L'examen d'un champ de SSH hebdomadaire (Figure 1.6 pour un exemple) montre que le Courant des Aiguilles et le Courant de Retour des Aiguilles sont associés à un gradient transverse important de SSH (et à des vitesses géostrophiques importantes). Ce gradient est plus marqué que sur le champ moyen, traduisant la forte variabilité de la retroflexion. Partant de ce constat, une méthode basée directement sur le champ de SSH a été utilisée.

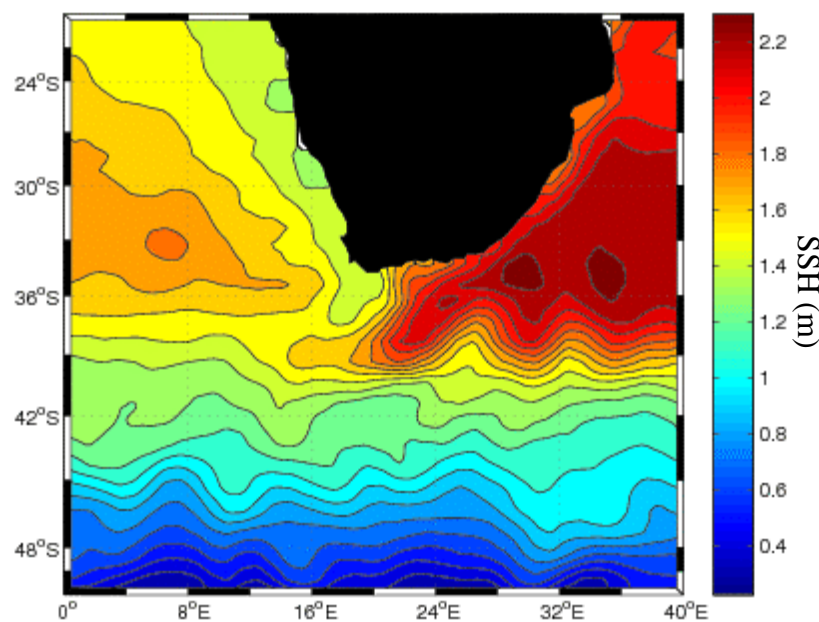


Figure 1.4. Champ de SSH moyen sur la période du 12 octobre 1992 au 18 mai 2005.

### **1.4.1 Principe de la méthode de recherche de la position de la retroflexion**

A 35°E, l'ensemble des points de grille (distribués en latitude avec un pas de 1/3°) dont la valeur de SSH excède une certaine valeur critique, caractéristique de l'AC et de l'ARC, est déterminé. La longitude 35°E se situant toujours à l'est de la retroflexion, on obtient ainsi un intervalle en latitude compris entre le courant des Aiguilles au nord et l'ARC au sud. En progressant vers l'ouest par pas de longitude de la grille (1/3°), la même recherche est menée. Afin de tenir compte des méandres de l'AC et de l'ARC, la gamme de latitude de recherche est celle obtenue au point de longitude précédent, mais légèrement étendue au nord et au sud. Le sous-gyre subtropical ayant un axe général sud-ouest/nord-est, la gamme de recherche est augmentée de 2 points de grille au nord (soit 0.66° de latitude), et de 5 points de grille au sud (soit 1.66° de latitude). Les résultats montrent que cet élargissement est à la fois suffisamment grand pour suivre les méandres des 2 courants, et suffisamment faible pour ne pas intercepter des anticyclones présents aux abords de ces courants. Ainsi, une gamme de latitude variable est obtenue de proche en proche en se déplaçant vers l'ouest, qui délimite l'étendue en latitude du sous-gyre entre AC et ARC. A mesure que l'on s'approche du point de retroflexion, la gamme de latitude diminue, jusqu'à ce qu'aucun point de latitude ne présente de valeurs de SSH supérieures à la valeur critique. La longitude attribuée à la limite de la retroflexion est alors la dernière pour laquelle l'intervalle de latitude n'est pas vide. Ensuite, une latitude doit être attribuée au point de retroflexion. L'approche de ce point étant parfois caractérisée par un tracé quasi-méridien du courant, la position du ou des derniers points de latitude au-dessus de la valeur critique peut présenter des sauts importants d'un pas de temps au suivant, sans que la configuration du courant n'évolue beaucoup. Pour pallier à de telles discontinuités apparentes, la latitude du point de retroflexion est définie comme la latitude du barycentre des points au-dessus de la valeur critique sur les trois points de grille de longitude précédant la longitude du point de retroflexion. Cette définition est un peu arbitraire mais permet de situer convenablement la position du cœur de la retroflexion. Un critère supplémentaire dans la recherche du point de retroflexion a été de se limiter à l'océan profond.

### **1.4.2 Détermination de la valeur critique**

Le choix de la valeur critique de SSH employée dans cette méthode est basé sur la signature dynamique du courant de la retroflexion. Cette valeur est choisie de telle sorte

qu'elle corresponde à la position du noyau de courant, soit aux vitesses géostrophiques les plus élevées dans cette région. Ce choix est donc fait en étudiant la relation entre vitesses géostrophiques et SSH.

La position de la retroflexion est hautement variable, et de nombreux anneaux sont présents dans ses environs. Une étude directe de la relation entre vitesse géostrophique et SSH au point de retroflexion n'est donc pas simple à réaliser. En revanche, cette relation peut être étudiée plus aisément pour l'AC et l'ARC, à l'est de la retroflexion. La retroflexion connectant ces deux courants, nous faisons l'hypothèse que la relation obtenue est valable au point de retroflexion. Cette hypothèse est validée a posteriori. La retroflexion se trouvant toujours à l'ouest de 23°E, cette longitude a été retenue pour déterminer cette relation, représentée Figure 1.5. Comme indiqué plus haut, elle n'a été calculée que dans l'océan profond, soit au sud de 35.5°S. Deux courbes sont tracées sur la Figure 1.5, en fonction de la valeur de la composante zonale de la vitesse géostrophique. Cela permet de distinguer l'AC de l'ARC, caractérisés par les valeurs de vitesses importantes. La symétrie des deux tracés indique que la relation obtenue est représentative de la retroflexion. Ces tracés montrent que le noyau du courant se trouve entre les valeurs de SSH de 1.6 m et 1.8 m. Afin d'adopter un critère caractérisant le cœur de la retroflexion, la valeur de 1.7 m est choisie.

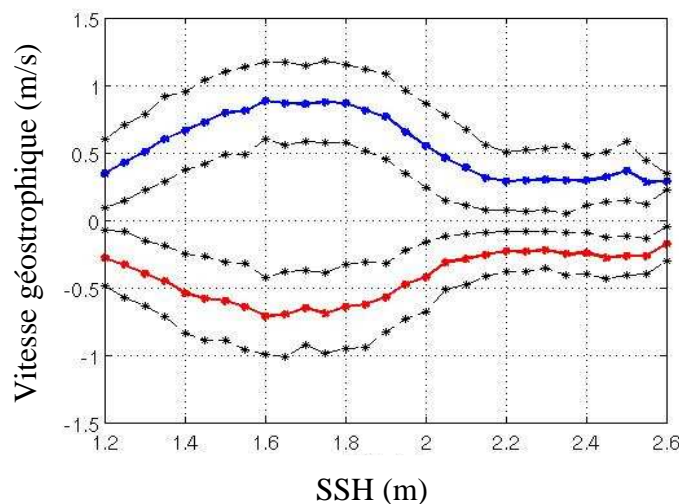


Figure 1.5. Relation entre vitesse géostrophique et hauteur dynamique le long du méridien 23°E. En bleu les valeurs dont la composante de vitesse zonale est dirigée vers l'Est (positive), et en rouge vers l'Ouest (négative). En noir, l'écart type de chacune des courbes.

#### 1.4.2.1 Amélioration du critère

Les résultats de la recherche du point de retroflexion à l'aide de la valeur critique 1.7 m montrent que des tourbillons anticycloniques parfois proches de la retroflexion, peuvent



entraîner cette recherche trop à l'ouest (Figure 1.6). Lorsque cela se produit, et afin de pallier à cet effet, la méthode est appliquée en utilisant une valeur critique plus élevée, donc associée à une position plus à l'est dans le noyau de la retroflexion. La valeur choisie est 1.9 m, car elle correspond à la valeur au-delà de laquelle la vitesse décroît rapidement avec la SSH. Elle est donc représentative de la partie Est (interne) du courant de retroflexion.

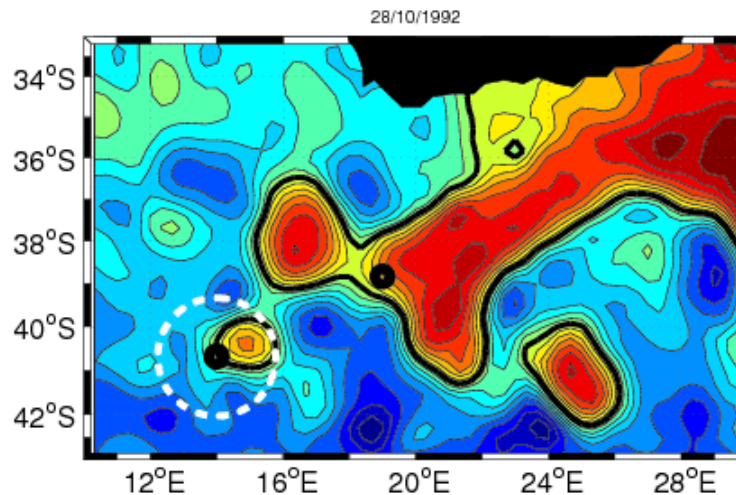


Figure 1.6. En ronds noirs sont représentées les positions de la limite de la retroflexion selon les deux valeurs critiques, superposées au champ de SSH, pour le 28 octobre 1992. Le point le plus à l'ouest est obtenu avec le critère principal à 1.7m, le second avec un critère à 1.9 m. Le contour de SSH à 1.7 m est tracé en trait épais. En trait blanc discontinu est tracé un cercle de rayon 150 km, centré sur la position de la limite obtenue avec 1.7 m en valeur critique.

Afin de déterminer quand utiliser cette deuxième valeur critique, la répartition des distances entre les positions de retroflexion obtenues par chaque critère a été calculée (Figure 1.7). Il apparaît que pour 50% des champs hebdomadaires, les positions obtenues par chaque critère sont distantes de moins de 80 km. La distance de 150 km correspond à un minimum local dans cette répartition, et peut s'interpréter comme délimitant deux types de configurations. Pour les distances plus faibles, la répartition est décroissante, et la distance entre les deux positions est inférieure au diamètre typique des anneaux se détachant de la retroflexion. Aucun tourbillon n'est alors intercalé entre les deux positions obtenues. Il convient dans ce cas donc de conserver la position obtenue par le premier critère. Au-delà de 150 km, la répartition est quasi-uniforme. Cette uniformité peut s'expliquer par la présence d'un ou plusieurs tourbillons entre les points de retroflexion déterminés par chaque critère, la position réaliste étant obtenue par le critère 1.9 m. D'autre part, des anticyclones situés à proximité de la retroflexion, au nord ou au sud, peuvent entraîner la recherche au-delà de la retroflexion, comme c'est le cas sur la Figure 1.6. Ceci est provoqué par l'élargissement de  $0.66^\circ$  ( $1.66^\circ$ ) de latitude au nord (resp. au sud) de la gamme de recherche d'un pas de

longitude au suivant. La distance de 150 km a ainsi semblé appropriée comme critère d'utilisation de la valeur critique à adopter: 1.7 m lorsque la distance est inférieure à 150 km, 1.9 m dans le cas contraire. On trouve alors que le critère principal à 1.7 m est retenu dans 70.4% des cas.

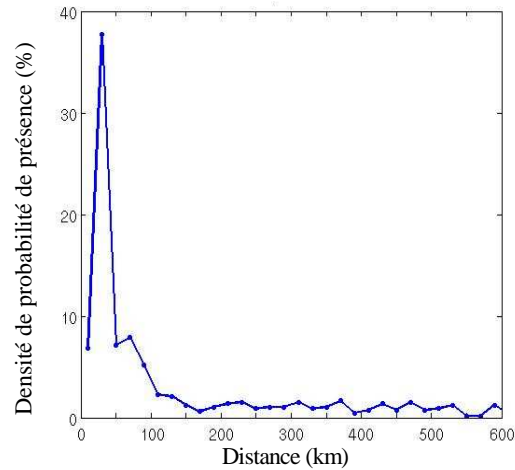


Figure 1.7. Répartition de distances entre limites de la retroflection obtenues avec les critères à 1.7 m et 1.9 m.

### 1.4.3 Profil de vitesse au point de retroflection

La série temporelle de position du point de retroflection ainsi obtenue permet d'envisager le calcul du profil de vitesses géostrophiques autour de ce point. L'allure moyenne et la variabilité de ce profil nous renseigne sur la répartition des vitesses au sein du courant de retroflection, et permet de confirmer que la méthode mise en place positionne le point de retroflection au cœur du courant. Le calcul de ce profil de vitesses est brièvement présenté ici. Il sera plus amplement étudié par la suite, notamment vis à vis de la question de la variabilité temporelle des caractéristiques de la retroflection et du Courant des Aiguilles.

A partir des positions hebdomadaires obtenues du point de retroflection, on peut donc calculer les vitesses géostrophiques au point de grille de la retroflection, ainsi qu'aux points de grille adjacents. Le courant au point de retroflection ne peut être que méridien, et orienté au sud. Ainsi, le profil de vitesse pour chaque carte hebdomadaire est représenté par le profil de vitesse des points de grille successifs en longitude, centré sur le point de retroflection. Le profil obtenu peut être moyenné sur l'ensemble des cartes hebdomadaires, donnant le profil moyen tracé sur la Figure 1.8. Comme la latitude du point de retroflection varie d'une semaine à l'autre, la distance zonale entre points de grille voisins (distants de  $1/3^\circ$ ) varie donc légèrement. Les points d'abscisse de ce tracé ne correspondent ainsi pas à une distance fixe.

Cependant, la gamme de latitude du point de retroflexion est suffisamment faible, comme on le verra plus loin, pour que cet effet ne perturbe pas trop le calcul de ce profil moyen.

Le profil moyen obtenu présente un maximum centré sur la position de la limite de la retroflexion. Ceci montre que la méthode et les critères choisis pour déterminer le point de la retroflexion le situent bien au coeur de la retroflexion. La vitesse moyenne au coeur est de 0.78 m/s et l'écart type de 0.37 m/s. On note la présence de vitesses moyennes positives, donc orientées au nord, au-delà de  $7/6^\circ$  à l'ouest du point de retroflexion. Cela traduit la présence fréquente d'anneaux des Aiguilles adjacents à la retroflexion, induisant des vitesses orientées au nord sur leur flanc est, du fait de leur rotation anticyclonique. Ceci est par exemple visible sur la Figure 1.6, où un anneau se situe très proche à l'ouest du point de retroflexion.

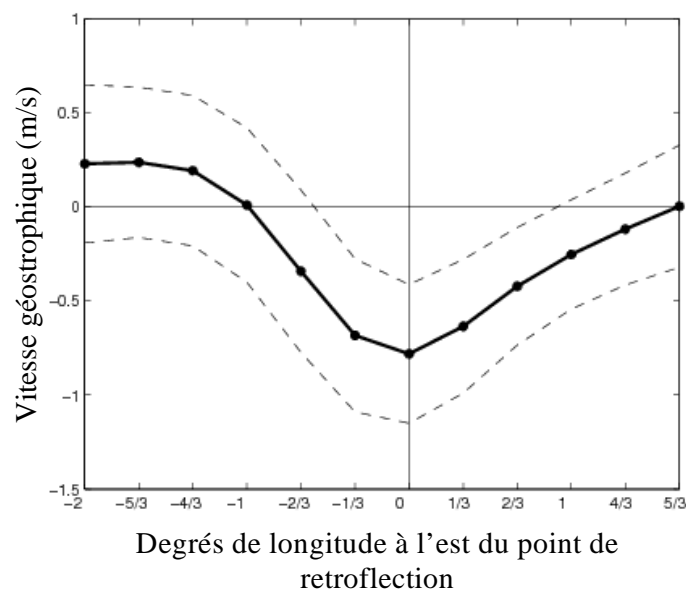


Figure 1.8. Vitesse géostrophique moyenne sur une section longitudinale centrée sur la position du point de retroflexion. Les traits discontinus représentent l'écart type de part et d'autre de la moyenne, calculés sur les 658 cartes hebdomadaires.

## 1.5 Détection des événements de lâchers de tourbillons

Afin de détecter les événements de lâchers, j'ai défini une méthode basée sur un examen visuel des séries temporelles de SSH. Les anticyclones sont repérables par les anomalies positives de SSH et, en s'appuyant sur les tracés de contour de SSH, il est possible de suivre leurs déplacements, subdivisions, jonctions à d'autres tourbillons ou à la retroflexion, ou encore leurs dissipations. La série temporelle de positions de la limite de la retroflexion issue de la méthode décrite plus haut, est utilisée pour lever l'ambiguïté de certains lâchers, et a posteriori pour discuter de la méthode employée.

Un examen visuel des champs de SSH permet le plus souvent de distinguer sans ambiguïté les détachements de masses anticycloniques de la retroflexion. Celles-ci dérivent ensuite dans l'Atlantique sud, se subdivisent, ou subissent diverses transformations. Parfois, les masses ainsi libérées sont partiellement ou entièrement réintégrées dans le sous-gyre. La principale difficulté est d'identifier les lâchers dans les cas de ce type. Pour ce faire, des critères conventionnels sont adoptés, qui sont basés sur la série temporelle de position du point de retroflexion.

Tout d'abord, des lâchers « définitifs » sont définis lorsqu'une partie au moins de la masse anticyclonique libérée n'est pas réabsorbée par la retroflexion. Avec cette convention, si une masse libérée par la retroflexion se subdivise en deux tourbillons, l'un des tourbillons formés peut être repris par la retroflexion. Dès lors que deuxième tourbillon issu de la subdivision s'éloigne de la retroflexion, nous parlons encore d'un lâcher définitif. Par ailleurs, des masses anticycloniques libérées sont parfois temporairement réabsorbées par la retroflexion, mais libérées à nouveau ultérieurement. Dans ce cas, seul le deuxième détachement est considéré comme un lâcher définitif. La durée et la nature de tels rattachements temporaires étant trop subjectives pour être évaluées par un simple examen visuel des champs de SSH, nous utilisons la série temporelle du point de retroflexion : si le point de retroflexion ne se situe à pas l'ouest de la masse anticyclonique libérée une première fois sur au moins deux fichiers hebdomadaires consécutifs, le premier lâcher est considéré définitif ; en revanche, si la masse anticyclonique est reprise durant au moins deux semaines consécutivement, au sens où le point de retroflexion se situe à l'ouest du tourbillon, le deuxième lâcher est considéré définitif.

Par ailleurs, lorsque la masse libérée est entièrement reprise pour au moins deux semaines (toujours au sens de la position du point de retroflexion), le lâcher initial est comptabilisé comme lâcher "temporaire". Les lâchers temporaires sont souvent suivi d'un lâcher définitif.

Sur la base de ces critères, nous choisissons par convention, pour l'attribution des date et position du point de retroflexion lors des lâchers, la date et la position qui précède le détachement de la masse d'eau et le saut vers l'est du point de retroflexion.

Un choix conventionnel supplémentaire est fait concernant les lâchers. L'examen de la série temporelle de carte de SSH montre que si un tourbillon unique est parfois libéré par la retroflexion, il arrive que ce tourbillon subisse une subdivision dès la semaine suivant son détachement, ou que deux ou plusieurs tourbillons soient libérés simultanément. Afin d'éliminer toute ambiguïté sur la comptabilisation des lâchers, de tels évènements sont ici

associés à un lâcher unique. Ainsi un lâcher peut-être associé à la formation immédiate ou quasi-immédiate de plusieurs tourbillons anticycloniques. L'analyse du devenir des tourbillons émis lors des lâchers est l'objet de l'étude des anneaux des Aiguilles présentée plus loin.

## 1.6 *Éléments bathymétriques du domaine d'étude*

Dans ce chapitre, comme dans les études présentées dans les chapitres suivants, le rôle de la bathymétrie dans les mécanismes liés aux échanges indo-atlantiques sera envisagé. Les principaux éléments de bathymétrie auxquels il sera fait référence sont représentés sur la Figure 1.9. Le bassin des Aiguilles, domaine de présence de la retroflexion du Courant des Aiguilles, est délimité à l'ouest par trois reliefs sous-marins : le Mont Erica, le Mont Schmidt-Ott, et la dorsale des Aiguilles. A l'ouest de ces monts se trouve le bassin du Cap.

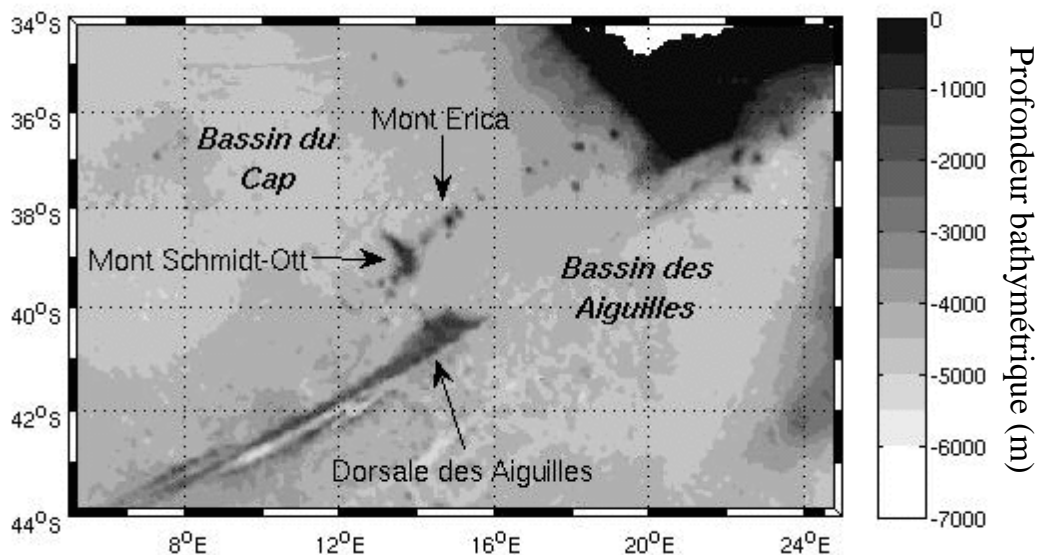


Figure 1.9. Tracé de la bathymétrie de la région d'étude, et nom des bassins et reliefs sous-marins principaux.

## 1.7 *Résultats*

### 1.7.1 *Caractéristiques spatiales de l'évolution de la retroflexion*

L'application de la méthode de recherche du point de retroflexion fournit une série temporelle de l'évolution de sa position géographique. Le tracé de la longitude du point de retroflexion dans le temps (Figure 1.10) met en évidence le schéma d'évolution décrit par Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988). On distingue en effet des phases de progressions continues vers l'ouest, suivi de sauts abrupts vers l'est. Ces sauts sont associés à la libération de masses anticycloniques, comme démontré plus loin. Une illustration de ce schéma est

donné Figure 1.11, où l'on observe une progression initiée le 25 juin 1997 à 21.66°E, et s'achevant le 17 septembre 1997 à 16.33°E.

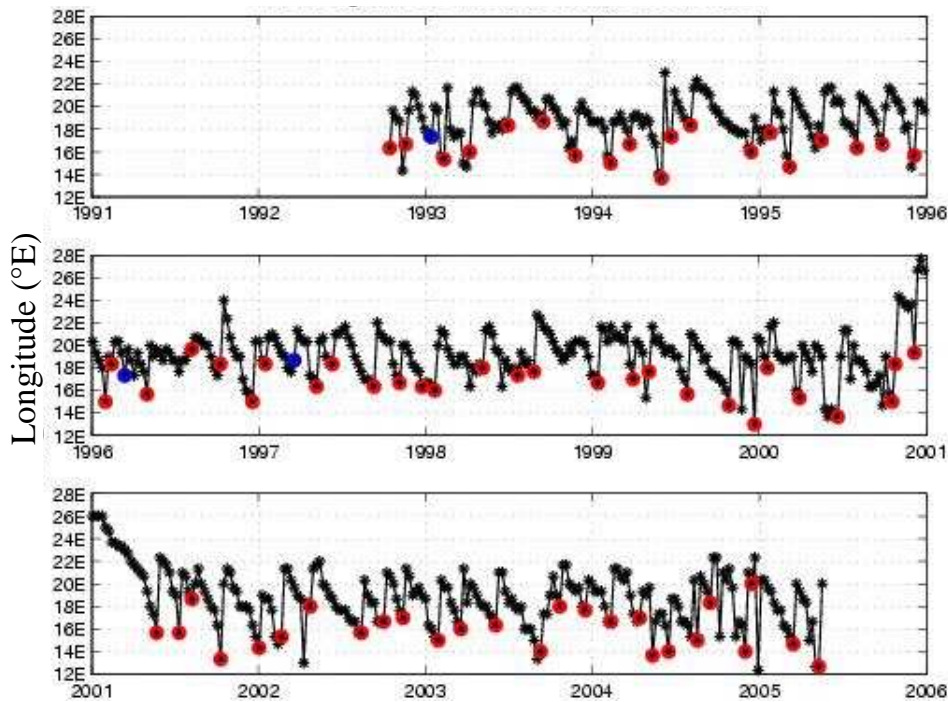


Figure 1.10. Longitude du point de retroflexion dans le temps. En rouge (bleu) les positions aux dates des lâchers définitifs (temporaires)

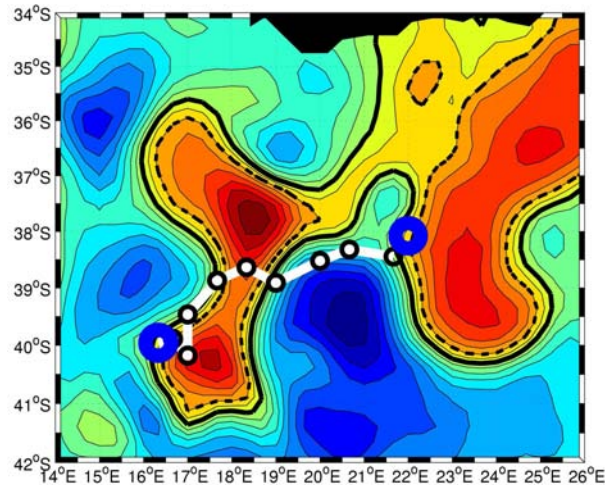


Figure 1.11. Illustration de la progression de la retroflexion. En ronds noirs reliés par un trait blanc, les positions hebdomadaires de la limite de la retroflexion. En rond bleu à l'ouest, position précédant la libération d'un anneau. La semaine suivante, le rond bleu à l'est indique la position pour la semaine suivante, soit le 17 septembre 1997. En fond, le champ de SSH à cette même date. On distingue ainsi le schéma de progression continue de la retroflexion, puis le saut vers l'est. En trait noir épais continu (discontinu), le contour de SSH correspondant à la valeur critique principale à 1.7 m (secondaire à 1.9 m). On constate que le critère secondaire est ici appliqué, le tourbillon se détachant étant continûment relié à la retroflexion par des hauteurs dynamiques supérieures à 1.7 m.

La densité de probabilité de présence spatiale du point de retroflexion est représentée Figure 1.12, de même qu'un tracé des latitudes moyennes par intervalle de longitude. On constate que la retroflexion se situe toujours à proximité du talus continental lorsqu'elle se trouve à l'est, mais présente une variabilité latitudinale plus importante à l'ouest. Les caractéristiques de la distribution en longitude sont données dans le Tableau 1.1. La longitude moyenne du point de retroflexion est de 18.85°E, pour un écart type de 2.24° de longitude (voir Figure 1.13). L'obliquité de la distribution en longitude est faible (0.104) indiquant une forte symétrie. Le kurtosis, de 3.95 est assez élevé (3 pour une distribution normale), signe d'un étalement important. La retroflexion se situe à l'extrême entre 12°E et 27°E (voir Figure 1.13). Cette gamme de variation est plus élevée que celle proposée par Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988), mais ces auteurs mentionnent que la retroflexion a été observée jusqu'à 9°40'E en 1978, et 20°30'E en 1983. On peut noter que les longitudes observées au-delà de 25°E correspondent à l'incursion exceptionnelle à l'est au début de 2001, une retroflexion amont décrite par de Ruijter et al. (2004). Si l'on retire le cycle de « progression vers l'ouest/retour vers l'est » associé à cet événement (du 13 décembre 2000 au 16 mai 2001), on obtient une distribution plus représentative de la variabilité habituelle de la retroflexion. La nouvelle distribution (Figure 1.13) présente alors une longitude moyenne de 18.67°E et un écart type moins important de 1.99°. On constate surtout une obliquité plus importante, de -0.499. Son signe indique un étalement plus important de la distribution à l'ouest. Ainsi, la progression vers l'ouest semble se faire jusqu'à des valeurs aléatoires, proches d'une distribution normale, mais les longitudes extrêmes vers l'est semblent limitées, chutant fortement vers 22°E.

	Série de longitudes complète	Série de longitudes hors cycle exceptionnel de 2000/2001
Longitude moyenne	18.85°E	18.67°E
Écart type en longitude	2.235°	1.99°
Obliquité	0.104°	-0.499°
Kurtosis	3.950°	3.032°

Tableau 1.1. Statistiques sur la série de longitude de la limite de la retroflexion du courant des Aiguilles, avec ou sans l'événement de 2000/2001.



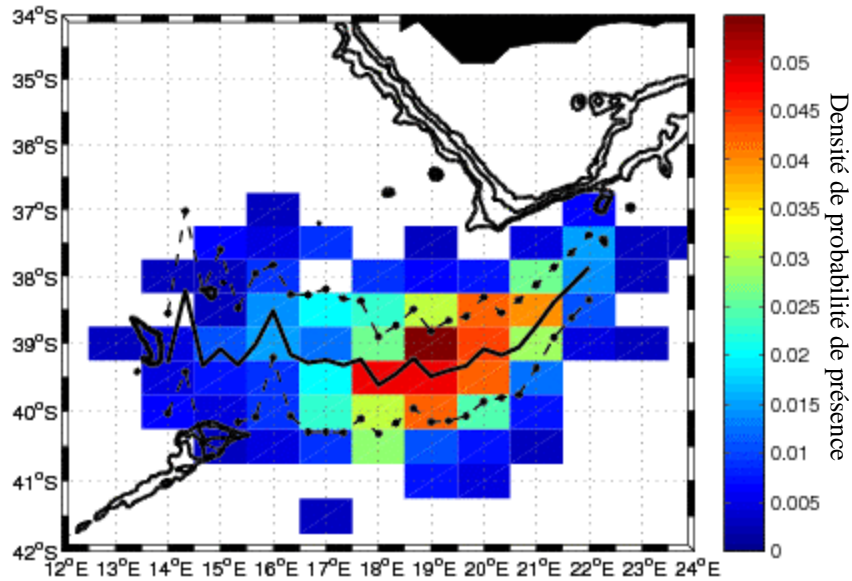


Figure 1.12. Densité de probabilité de présence de la limite de la retroflection, représentée sur contour bathymétrique. En trait blanc (jaune), trajectoire moyenne de la retroflection, pour les avancées de plus de trois semaines, lorsque la progression se termine à l'est (l'ouest) de 16.1°E.

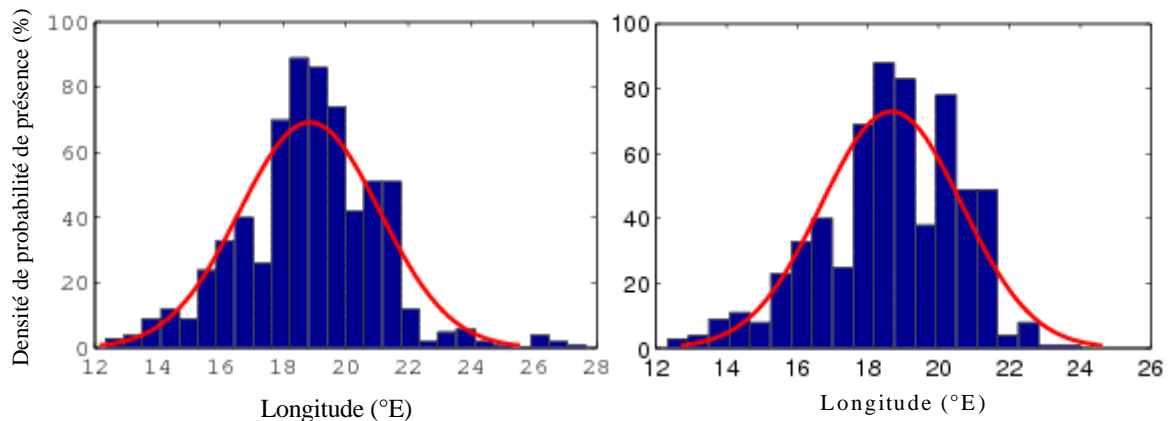


Figure 1.13. Répartition en longitude de la limite de la retroflection (en nombre d'occurrences hebdomadaires, par 1/2 degré de longitude). A gauche, pour l'ensemble de la série temporelle; à droite, sans l'événement de 2000/2001.

Un tracé des cartes de SSH moyenne pour 5% des dates correspondant aux positions les plus à l'ouest et à l'est du point de retroflection est présenté Figure 1.14. Cependant, la retroflection amont de début 2001, avec une retroflection très reculée à l'est, influe fortement sur la carte de SSH moyenne pour la position la plus à l'est de la retroflection (voir Figure 1.10). Pour retirer l'effet de cet événement, les dates allant de début septembre 2000 à fin avril 2001 n'ont pas été pris en compte. En comparant ces cartes de SSH avec la carte moyenne pour l'ensemble des dates de l'étude (Figure 1.4), on constate que la moyenne extrême ouest fait apparaître une retroflection très étirée zonalement. On note également la présence d'un cyclone moyen au nord de la retroflection. N'apparaissant pas sur le champ



moyen total, ce cyclone est donc associé à une configuration avancée de la retroflexion. Il pourrait interagir avec la retroflexion et contribuer à son entraînement vers l'ouest, la partie sud du cyclone étant associée à un écoulement géostrophique dirigé vers l'ouest. La configuration moyenne extrême Est fait en revanche apparaître une retroflexion très reculée à l'est, et l'on distingue la présence d'un anticyclone à l'ouest de la retroflexion, correspondant à la masse d'eau lâchée par la retroflexion.

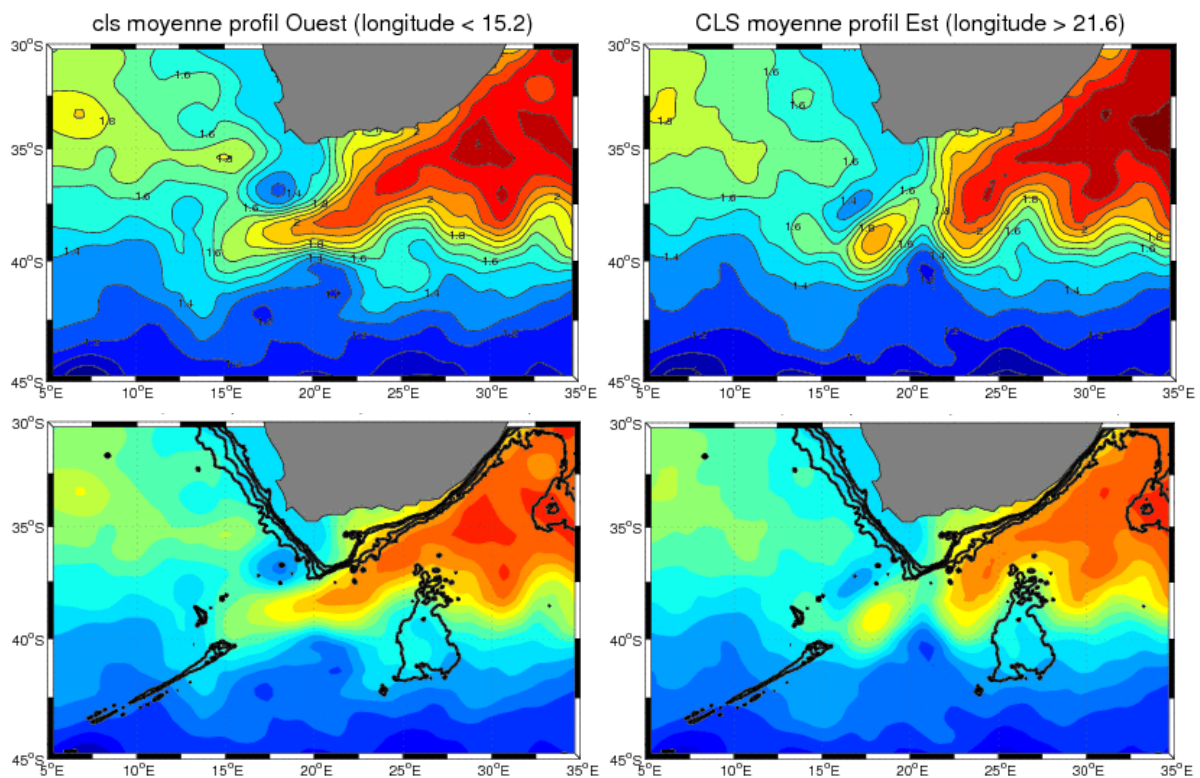


Figure 1.14. Champ de SSH moyens pour les 5% des positions de la limite de la retroflexion les plus à l'ouest (est) à gauche (à droite). En bas, les champs représentés sur contour bathymétrique.

### 1.7.1.1 Analyse onde par onde

Afin d'étudier les trajectoires et la cinématique du point de retroflexion, une analyse dite « onde par onde » (*wave by wave*) a été menée sur la série temporelle de longitude de ce point. Cette analyse consiste à décomposer la série en une suite d'ondes qui seront ensuite analysées. Pour cela, on repère dans la série temporelle de longitude du point de retroflexion les maxima et minima successifs. Dans le cas où plusieurs dates successives indiquent une même valeur d'extremum, la date la plus tardive est conventionnellement retenue comme maximum ou minimum. La suite d'extremums est et ouest ainsi obtenue définit une succession d'ondes. La phase de déplacement vers l'ouest (vers les faibles longitudes) est ici

appelée « montée » de l'onde, en rapport à la vision d'un mécanisme de préparation au lâcher de tourbillons des Aiguilles.

L'analyse dénombre 124 ondes sur l'ensemble de la série temporelle. Certaines correspondent à l'image idéalisée d'une progression monotone de la retroflexion vers l'ouest, précédant le lâcher d'un tourbillon (Lutjeharms et Van Ballegooyen, 1988a). Cependant, cette progression n'est souvent pas monotone, du fait de perturbations ayant principalement trois origines : i) des incertitudes sur la position du point de retroflexion dues à la méthode (notamment lors du basculement d'une valeur critique à l'autre, pouvant entraîner des sauts en longitudes lorsqu'un tourbillon est à proximité de la retroflexion) ; ii) des perturbations de la configuration spatiale de la retroflexion d'une semaine sur l'autre entraînant un recul temporaire réel (non-monotonie réelle) ; iii) des incertitudes sur la position de la retroflexion liées à la méthode d'interpolation dans le calcul des champs de SSH, à partir des mesures satellitaires. Dans tous les cas, ces reculs temporaires sont associés à des extremums dans la série temporelle de longitude, et divisent une onde de progression est-ouest en plusieurs ondes correspondant à des tronçons de progressions. Cet effet doit être pris en compte dans l'analyse de ces ondes.

## **1.7.2 Trajectoires de progression de la retroflexion**

La trajectoire moyenne de la retroflexion dans sa progression vers l'ouest semble présenter deux domaines principaux. La Figure 1.12 montre une trajectoire du nord-est vers le sud-ouest à l'est de 19°E environ, puis une trajectoire essentiellement zonale à l'ouest de 19°E. La variabilité importante en latitude à l'ouest de 19°E ne permet cependant pas de conclure à des progressions purement zonales. De plus, le tracé de densité de probabilité de présence de la limite de la retroflexion (Figure 1.12) semble indiquer une divergence nord/sud de trajectoire à partir de 18°E. Cela se traduit par 2 pics de présence en latitude dans ce domaine. La probabilité de présence chutant par ailleurs plus rapidement vers l'ouest pour les latitudes les plus au sud, il semblerait que la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles joue un rôle de blocage dans l'avancée de la retroflexion.

### ***1.7.2.1 Divergence de trajectoires à l'ouest de 19°E et effet bathymétriques sur la retroflexion***

Afin d'étudier la possible influence de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles sur la trajectoire d'avancée de la retroflexion à l'ouest de 19°E, une étude a été menée à partir de l'analyse onde par onde.

L'effet possible de la bathymétrie sur la retroflexion est une interruption de sa progression, éventuellement suivie d'un lâcher. Nous examinons donc les ondes s'achevant au voisinage de ces éléments bathymétriques. Pour cela, deux critères de sélection parmi les 124 ondes identifiées sont adoptés. Les avancées recherchées correspondent à des incursions importantes de la retroflexion vers l'ouest. Un premier critère consiste alors à ne considérer que les ondes de périodes de montée d'au moins 4 semaines. Un second critère consiste à ne considérer que les ondes dont la progression s'achève à l'ouest  $18^{\circ}\text{E}$ , donc à proximité de la bathymétrie. Un total de 41 ondes répondent à ces deux critères, soit 33% des ondes et 43% de la durée de la série temporelle. Les positions du point de retroflexion en fin de chaque onde sont représentées sur la Figure 1.15. En distinguant alors les progressions selon qu'elles s'achèvent à l'ouest ou à l'est de  $16.1^{\circ}\text{E}$ , on obtient deux trajectoires de progression moyennes représentées sur la figure. On constate que les progressions s'achevant à l'ouest de  $16.1^{\circ}\text{E}$  se trouvent à environ  $1^{\circ}$  de latitude au nord de la seconde famille. Les progressions moyennes de chacune des deux familles sont similaires jusque  $18^{\circ}\text{E}$ , mais divergent ensuite. Ce constat ne permet pas de conclure à deux types de progressions distincts. Il semble cependant que la retroflexion puisse emprunter une trajectoire plus ou moins orientée au nord ou au sud, à partir de  $18^{\circ}\text{E}$ , et que les trajectoires les plus au sud ne permettent pas une avancée vers l'ouest aussi importante que celles orientées au nord.

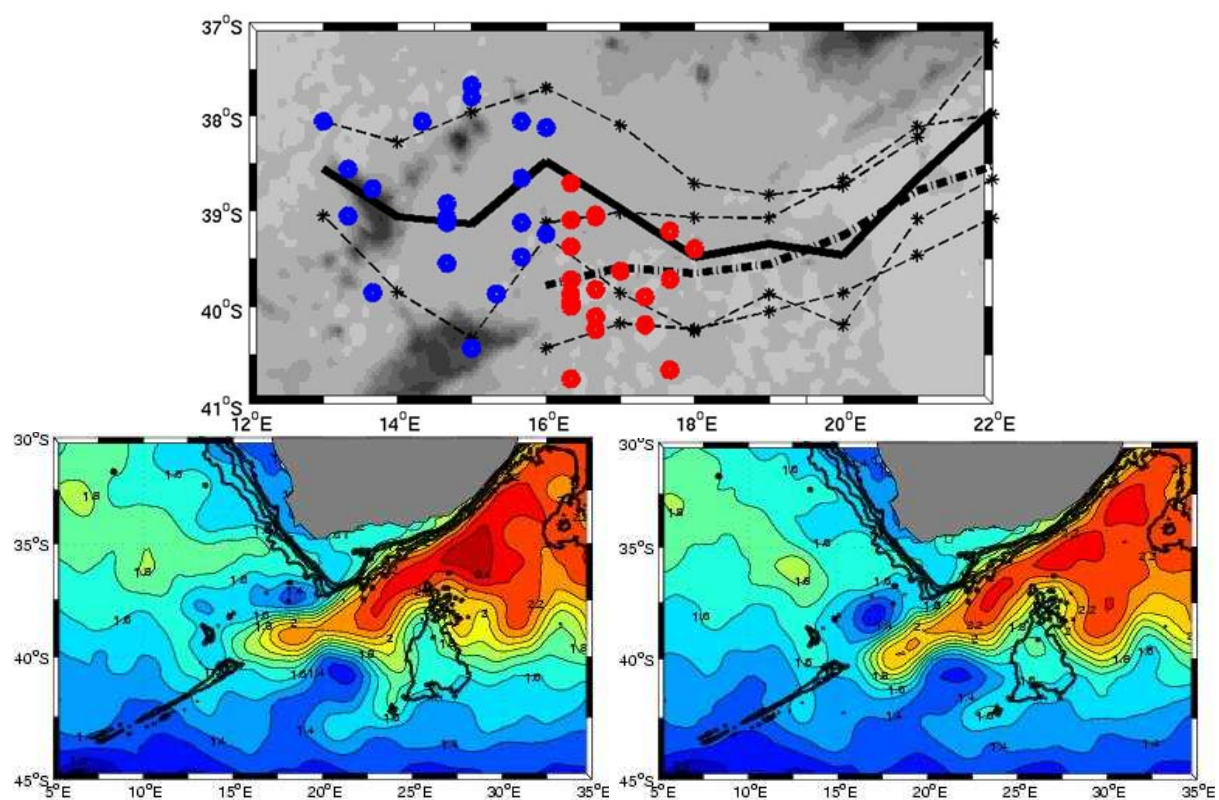


Figure 1.15. En haut : Les 41 points rouges et bleus indiquent la position de la limite de la

*retroflexion en fin de progressions monotones vers l'ouest d'au moins 4 semaines. Leur couleur est fonction de leur longitude par rapport à 16.1°E. En trait épais continu (discontinu) la trajectoire moyenne pour les progressions s'interrompant à l'ouest (à l'est) de 16.1°E, obtenue par calcul de la latitude moyenne par degré de longitude. En traits fins discontinus, écart type en latitude de part et d'autre de chaque trajectoire. En bas : à gauche (droite), configuration moyenne de SSH en fins de progressions dans les deux cas considérés.*

Cette constatation, alliée au tracé de la densité de probabilité de présence du point de retroflexion, semble indiquer que la dorsale des Aiguilles et les monts Erica et Schmidt-Ott peuvent dévier ou interrompre la progression de la retroflexion vers l'ouest.

Les progressions orientées vers le sud seraient limitées par la dorsale des Aiguilles. La carte de SSH moyenne pour ces configurations (Figure 1.15, en bas à droite) montre une retroflexion étirée et chevauchant effectivement la pointe de la dorsale.

Les progressions orientées vers le nord, moins influencées par la dorsale, semblent permettre une avancée plus grande vers l'ouest. La carte moyenne de SSH associée (Figure 1.15, en bas à gauche) montre une retroflexion orientée plus au nord et étirée zonalement, s'avancant entre la dorsale des Aiguilles et le mont Erica au nord. Ensuite, la trajectoire moyenne des progressions s'achevant à l'ouest de 16.1°E (Figure 1.15, en haut) semble s'infléchir vers le sud entre 15°E et 16°E. Ceci pourrait être liée à une influence du mont Erica. Enfin, la progression est limitée à l'ouest par le mont Schmidt-Ott, comme le montre cette même figure, ou encore le tracé Figure 1.19 des positions du point de retroflexion lors des 73 lâchers définitifs (résultats présentés plus loin). Cette figure suggère que ces trois reliefs bathymétriques guident et limitent les progressions extrêmes de la retroflexion.

### **1.7.3 Cinématique de la progression de la retroflexion**

L'analyse onde par onde permet d'étudier la cinématique de progression de la retroflexion. A partir des intervalles de temps entre crêtes et creux des ondes, et des longitudes correspondantes, il est possible d'étudier les périodes associées au schéma de progression est-ouest et les vitesses de progression de la retroflexion.

Un histogramme des périodes associées aux 124 ondes est présenté (Figure 1.16). La période de « montée » correspond à l'intervalle de temps entre son creux (début de l'onde à l'est) et sa crête (point le plus à l'ouest), et la période de « descente » correspond à l'intervalle de temps entre la crête (à l'ouest) et le creux de l'onde suivante (retour à l'est).

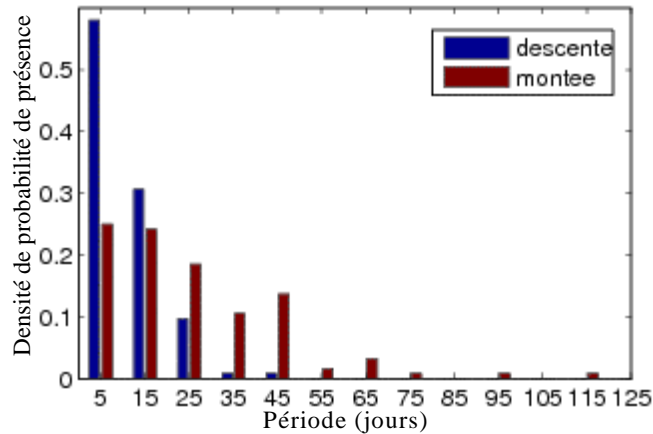


Figure 1.16. Répartition des périodes de montée et descente des ondes de l'analyse onde par onde.

La période de descente moyenne est de 11.2 jours. Mais, près de 60% des périodes de descente (basculement ouest-est de la retroflexion) ne sont que d'une semaine. Seules 3% sont supérieures à 3 semaines. Le retour vers l'est de la retroflexion semble donc suivi d'une progression quasi-immédiate de la retroflexion vers l'ouest. En cela, les périodes de descente d'une semaine sont probablement liées à l'échantillonnage temporel, et la reprise de la progression vers l'ouest, suite au saut discontinu vers l'est de la retroflexion provoqué par la formation d'un tourbillon, se fait peut-être plus rapidement que le pas de temps d'une semaine entre cartes de SSH. La période moyenne de 11.2 jours est donc certainement trop importante.

La période de montée moyenne est de 25.7 jours, et la répartition des périodes assez étalée (Figure 1.16). Mais cette moyenne est inférieure à l'intervalle de temps moyens entre deux lâchers (entre 4 et 6 par an), attestant de ce que certaines ondes ne correspondent pas à un cycle complet de progression et de lâcher.

L'analyse onde par onde permet de calculer les vitesses de progressions de la retroflexion vers l'ouest, à partir des périodes de montée des ondes, et des positions du point de retroflexion en début et fin de montée. A partir de la latitude moyenne entre les deux positions extrêmes, on calcule ainsi des vitesses de progression zonales. Leur répartition est présentée sur la Figure 1.17. La vitesse zonale moyenne est de 18.3 cm/s (15.6 km/jour). Mais cette valeur est surestimée, en raison de la présence occasionnelle de tourbillons au voisinage de la retroflexion. Ces tourbillons sont parfois détachés puis réintégrés temporairement dans la retroflexion, le point de retroflexion basculant subitement à l'est puis à l'ouest du tourbillon. Cela crée des ondes associées à des avancées discontinues très importantes de la retroflexion, qui ne sont pas représentative de son avancée progressive vers l'ouest. Ces ondes de courtes durées sont donc associées à de forts déplacements du point de retroflexion, et à des vitesses importantes. En ne considérant que les progressions d'au moins 4 semaines,

nous filtrons ces ondes courtes, comme le montre la nouvelle répartition des vitesses de progression présentée Figure 1.17, où les vitesses importantes ont disparues. La vitesse moyenne est alors de 11.05 cm/s (soit 9.55 km/jour). Cette valeur est en accord avec Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988) qui trouvaient des valeurs allant de 7 cm/s à 15 cm/s pour 12 cm/s en moyenne (soit 10.4 km/jour), ou avec Feron et al. (1992) qui trouvaient une vitesse de progression moyenne de l'ordre de 7 km/jour.

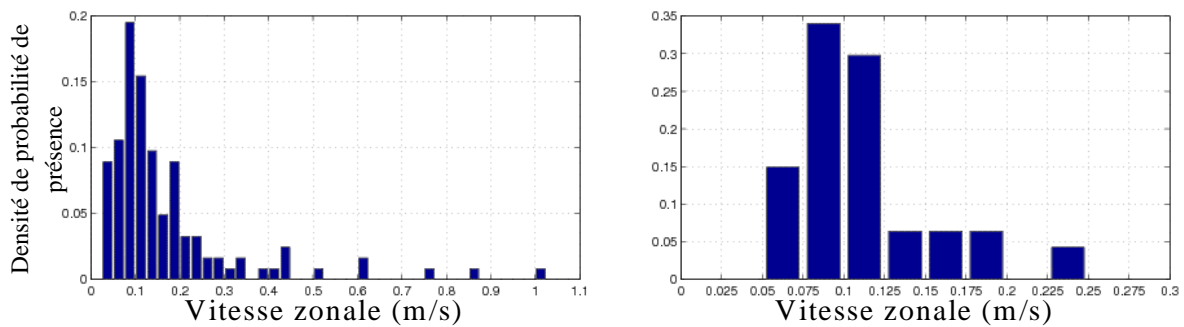


Figure 1.17. Répartition des vitesses de montée déduite de l'analyse onde par onde (vitesses zonales moyennes de progression de la retroflexion). A gauche, pour l'ensemble des 124 ondes ; à droite, pour les 41 ondes de périodes de montée d'au moins 4 semaines.

## 1.7.4 Variabilité temporelle de la retroflexion et lâchers d'anneaux des Aiguilles

### 1.7.4.1 Lâchers d'anneaux des Aiguilles

Notre méthode de détection de lâchers permet d'identifier 73 lâchers définitifs, et 3 lâchers temporaires. Ils sont représentés sur la série temporelle de longitude du point de retroflexion (Figure 1.10). Cela correspond à 5.8 lâchers définitifs en moyenne annuelle, et une période moyenne de 63.3 jours entre lâchers. L'écart type sur la période entre lâchers est de 31 jours, attestant de la forte variabilité temporelle des lâchers (voir Figure 1.18). Ces valeurs sont en accord avec des résultats antérieurs. Feron et al. (1992) ont identifié entre 4 et 8 lâchers par an entre novembre 1986 et septembre 1989, pour 6 en moyenne annuelle. Goñi et al. (1997) dénombrent 17 anneaux des Aiguilles quittant la région de retroflexion sur leur période d'étude, dont 15 entre début 1993 et fin 1995, soit 5 par an. Ce chiffre est cependant difficilement comparable aux 5.8 lâchers par an obtenus ici, car les lâchers évoqués dans notre étude peuvent concerner des anneaux qui se subdivisent rapidement. Ainsi deux anneaux issus d'un seul lâcher peuvent aborder la région dans laquelle Goñi et al. (1997) ont comptabilisé les anneaux. De même certains anneaux issus de lâchers peuvent stagner à proximité de la retroflexion, et se dissiper localement, s'adjoindre à d'autres anticyclones présents, ou encore

dérivée plusieurs mois plus tard dans l'Atlantique sud. Ils ne sont donc pas interceptés, ou le sont beaucoup plus tard, par les lignes de passages à l'ouest de la retroflexion utilisées par Goñi et al. pour repérer les anneaux. Schouten et al. (2000) dénombrent 21 lâchers entre 1993 et 1996. Le Tableau 1.2 reprend les résultats de ces études, et compare les lâchers dénombrés par Schouten et al. avec ceux de cette étude. L'examen des correspondances entre nombre et dates des lâchers sur ces 4 années indique des divergences. Sur 20 lâchers identifiés par les auteurs, seuls 13 peuvent être rapprochés de lâchers identifiés ici. De plus, nous identifions plus de lâchers dans notre étude. Selon que l'on considère les lâchers temporaires ou non, 24 ou 22 lâchers sont identifiés contre 20 selon les auteurs. Ces divergences sont probablement imputables aux méthodes mises en place par les auteurs pour la détection des lâchers à partir de mesures d'anomalies de SSH et non de hauteur dynamique absolue.

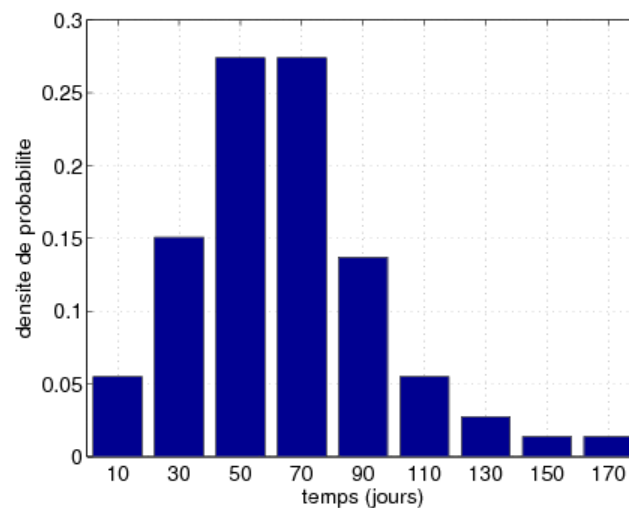


Figure 1.18. Répartition des intervalles de temps entre lâchers successifs, par intervalle de 20 jours.

Deux périodes sans anneaux des Aiguilles sont répertoriées par Goñi et al. (1997), de novembre 1992 à avril 1993 et de septembre à décembre 1994. Or, un lâcher définitif et un temporaire sont répertoriés dans notre étude durant la première période. En revanche aucun lâcher n'est identifié durant la seconde. Schouten et al. (2000) notent l'absence de lâchers sur 3 périodes de plus de 4 mois (en fin 1993, d'août 1995 à janvier 1996 et de février à juin 1996). Cela se retrouve dans notre étude uniquement pour la dernière période évoquée. En revanche, les auteurs détectent des lâchers à la fin de 1994, alors que Goñi et al. ne détectent pas d'anneaux durant cette période. Nous ne détectons aucun lâcher durant cette période dans notre étude. Nous identifions d'autres périodes longues sans lâchers plus tard dans la série temporelle d'étude (voir Figure 1.10), la plus importante étant durant la retroflexion amont de début 2001, qui dure 6 mois en accord avec de Ruijter et al. (2004).



	<i>Lâchers définitifs CLS</i>	<i>Lâchers CLS (définitifs et temporaires)</i>	<i>Lâchers Schouten et al. (2000)</i>	<i>Correspondance CLS/Schouten et al. (2000)</i>	<i>Anneaux Goñi et al. (1997)</i>
1993	5	6	4	3	5
1994	6	6	6	4	4
1995	6	6	5	4	6
1996	5	6	5	2	
lâchers/an (1993-1996)	5.5	6	5		5

Tableau 1.2. Comparaison de l'étude de lâchers (notée CLS) avec les études de Schouten et al. (2000) et Goñi et al. (1997). Le nombre de correspondances de lâchers identifiés avec Schouten et al. (2000) est également indiqué.

Les positions du point de retroflexion à l'instant des 73 lâchers définitifs (donc la semaine précédant le retour à l'est de la retroflexion) sont représentées sur la Figure 1.19. La longitude moyenne lors des lâchers est de 16.3°E, pour un écart type de 1.7°. La plupart de ces positions extrêmes de la retroflexion sont assez proches de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles. Les plus à l'ouest sont concentrés entre la dorsale des Aiguilles et le mont Erica, tandis qu'une plus grande dispersion en latitude est observée pour les retroflexions précoces. Cette observation conforte l'idée évoquée plus haut d'une contrainte de cette bathymétrie sur la retroflexion. Par ailleurs, on observe une concentration de positions extrêmes avant lâcher sur le mont Schmidt-Ott, vers 13.5°E. Cela confirme le rôle canalisant du mont Erica et de la dorsale, et enfin l'interruption de l'avancée vers l'ouest par le mont Schmidt-Ott.

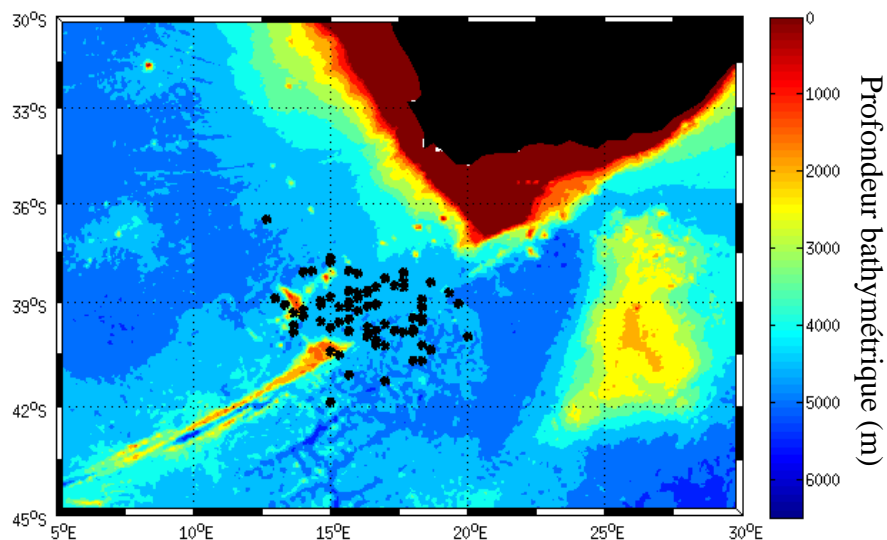


Figure 1.19. Position de la limite de la retroflexion à l'instant des 73 lâchers définitifs, soit la semaine précédant le retour à l'est de la retroflexion.

### Saisonnalité des lâchers

Profitant de la longueur importante de la série temporelle de lâchers obtenus, qui recouvre près de 13 ans, il est possible de rechercher un possible caractère saisonnier des



lâchers, qui n'a jamais été observé jusqu'ici sur des périodes de mesures cependant plus courtes. L'étude confirme l'absence de périodes de lâchers préférentielles.

### 1.7.5 Variabilité temporelle de la retroflection

Une analyse spectrale de la série temporelle de longitude du point de retroflection met en évidence un pic principal à  $5 \text{ an}^{-1}$  (Figure 1.20). Ce pic correspond à la fréquence moyenne des lâchers, et son étalement s'explique par la variabilité des périodes entre lâchers. Mais le périodogramme de type « *variance preserving form* », (pour lequel l'énergie par gamme de fréquence correspond à l'aire sous la courbe) montre qu'une part importante d'énergie est contenue dans des fréquences plus élevées. La série temporelle étant fortement marquée par l'évènement exceptionnel de 2000/2001 (Figure 1.10), avec des longitudes très importantes atteintes pendant plusieurs mois, le spectre a été recalculé en interrompant la série au 18 octobre 2000, date de l'avancée vers l'ouest précédant l'évènement (Figure 1.20). Celui-ci est donc plus représentatif du comportement typique de la retroflection. Le pic à  $5 \text{ an}^{-1}$  y est nettement plus marqué, et l'importance d'un pic secondaire vers la fréquence  $12 \text{ an}^{-1}$  y est plus évidente. Ce second pic pourrait être lié au caractère dissymétrique du signal en longitude principal. Le signal en longitude idéal associé à la progression continue de la retroflection vers l'ouest puis à son saut vers l'est lors du décrochement d'un tourbillon, est un signal en dent de scie. Or une composante de Fourier de fréquence double de la principale est nécessaire à la reconstitution d'un tel signal. Ce second pic n'est pas tout à fait de fréquence double, mais l'étalement des 2 pics, et donc la non-périodicité de la fréquence principale associée aux lâchers, pourrait expliquer le décalage apparent. Cette deuxième fréquence ne peut donc pas être directement associée à un phénomène distinct intervenant dans le comportement de la retroflection.

Le spectre de puissance de la série temporelle complète montre l'importance des basses fréquences, annuelles à pluriannuelles. La présence éventuelle d'un signal saisonnier pourrait être attribuée à deux causes : i) une saisonnalité réelle de la longitude de la retroflection, et ii) une saisonnalité « artificielle », résultant de la méthode de recherche du point de retroflection. Pour expliquer la seconde, il faut considérer que le critère en hauteur dynamique choisi dans la recherche du point de retroflection (1.7 m ou 1.9 m) ne tient pas compte d'une possible correction saisonnière. En effet, il se pourrait que la valeur de SSH associée au maximum de vitesse dans le courant de retroflection varie au cours de la saison. L'utilisation d'un critère unique pourrait alors créer artificiellement une saisonnalité en positionnant la retroflection trop à l'ouest ou trop à l'est selon la saison. Or, un examen de la

variabilité de la relation entre vitesses géostrophiques et SSH (non détaillée ici) n'indique pas de saisonnalité notable. Donc, seule une saisonnalité réelle de la longitude de la retroflexion expliquerait une fréquence annuelle dans le spectre de puissance. Or, les moyennes mensuelles de la longitude du point de retroflexion, sur la durée de la série temporelle, n'indiquent aucune saisonnalité. Les basses fréquences du spectre de puissance traduisent donc une variabilité pluriannuelle, et non saisonnière.

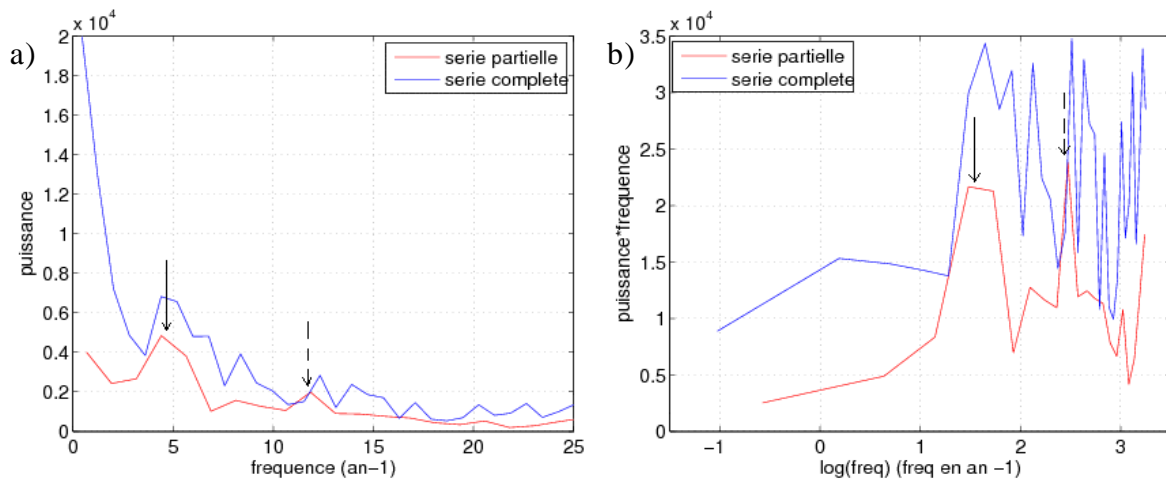


Figure 1.20. a) Spectres de puissance des séries temporelles complètes et partielles (avant le 18 octobre 2000) de la longitude du point de retroflexion. b) Spectres de type « variance preserving form » des mêmes séries temporelles. La flèche continue (discontinue) indique la position de la fréquence  $5 \text{ an}^{-1}$  ( $12 \text{ an}^{-1}$ ) dans les deux types de périodogrammes.

Le spectre associé à la série partielle (jusqu'au 18 octobre 2000) montre une contribution plus faible des basses fréquences. La basse fréquence semble donc liée à l'évènement de 2000/2001, plus qu'à un signal périodique.

### 1.7.5.1 Analyse SSA

L'analyse spectrale de la série temporelle de longitude de la retroflexion n'a pas permis de dégager de fréquence particulière dans le domaine annuel à pluriannuel. De plus, la présence d'un pic secondaire dans le spectre de la série temporelle liée au caractère non-sinusoidal du signal principal de la série (signal en dents de scie), indique que l'analyse spectrale n'est pas adaptée à la recherche de périodicité dans cette série temporelle. Ces constats nous incitent à envisager l'utilisation d'une analyse de type SSA (*Singular Spectrum Analysis*), plus apte à étudier la périodicité d'un signal non-sinusoidal, et permettant une étude plus fine de la basse fréquence.

## Principe de l'analyse SSA

L'analyse SSA est un outil d'étude de séries temporelles. Elle consiste en un traitement analogue à la recherche d'EOF spatiaux (*Empirical Orthogonal Function*), par une diagonalisation de matrice de covariance ou de corrélation. Cette analyse permet de dégager d'une série temporelle des signaux périodiques non-linéaire, à l'inverse d'une analyse spectrale simple. A partir d'une série temporelle bruitée, l'analyse fournit une décomposition du signal en composantes décorrélées, triées par ordre de variance décroissante, et correspondant à des tendances, du bruit, ou des signaux périodiques non-linéaires présents dans la série. Cette méthode est donc adaptée à la recherche d'un signal périodique non-linéaire, de type dent de scie, associé au mécanisme de lâcher de la retroflexion. De plus, l'analyse permet de rechercher des signaux périodiques modulés en amplitude et en phase. Cela offre la possibilité d'extraire de la série complète le signal lié à l'évènement de 2000/2001, sans réduire la durée de la série. Plus généralement, cette méthode permet la recherche de comportements de basses fréquences avec une précision supérieure à ce que permet l'analyse spectrale de la série partielle. Pour une description plus approfondie, on pourra se référer à Vautard et Ghil (1989) et Vautard et al. (1992).

## Paramètres de l'analyse pour étude des basses fréquences

Le paramètre principal de l'analyse SSA est la fenêtre d'analyse  $M$ , qui doit être de longueur au moins égale à la période du signal périodique de plus basse fréquence recherché. Les éventuels signaux de fréquences plus basses se retrouvent alors dans le vecteur propre contenant la tendance du signal. Ce paramètre ne doit pas excéder  $N/5$ , où  $N$  est la longueur totale de la série temporelle, soit 658 valeurs hebdomadaires, et les signaux périodiques correctement résolus sont de périodes comprises entre  $M$  et  $M/5$ . Des essais sur la série complète ont conduit à un premier choix de  $M=111$  semaines. Cette fenêtre permet de dégager un signal périodique de période environ 2 ans (104 semaines) associé à l'évènement de 2000/2001, et sans que le vecteur propre associé à la tendance ne prenne en compte cet évènement. Mais les fréquences les plus hautes résolues sont de période 22 semaines ( $M/5$ ), soit  $2.3 \text{ an}^{-1}$  environ. Ainsi, si ce choix de  $M$  est adapté à l'étude de la basse fréquence, on s'attend à ce qu'il soit moins utile à l'étude des lâchers d'anneaux des Aiguilles dont la périodicité est de 2 mois environ. Les autres paramètres de l'analyse sont un test de type Monte-Carlo, et une covariance calculée selon la méthode de Vautard et Ghil (1989).

### **1.7.5.2 Résultats**

L'analyse fournit des vecteurs propres, numérotés par ordre de pourcentage décroissant de la variance de la série temporelle qu'ils expliquent (Figure 1.21). Les signaux périodiques sont associés à des paires de vecteurs propres de variance voisines. Il est possible à partir d'un ou plusieurs vecteurs propres de reconstruire le signal qu'ils expliquent, ce qui permet de vérifier la nature oscillatoire d'une paire de vecteurs propres, ou encore de filtrer certaines composantes du signal, notamment le bruit (vecteurs propres d'ordre élevé).

#### **Vecteurs propres 1 à 7 : basse fréquence**

On obtient deux paires de vecteurs principales de basses fréquences. La première paire, associée à un signal de période environ 2 ans, semble fortement liée à l'évènement de 2000/2001. La deuxième paire, de période annuelle, est également intensifiée sur l'évènement 2000/2001, mais est aussi présente avant et après cet évènement. Un cinquième vecteur contient la tendance du signal, et une troisième paire assez bruitée (variances expliquées relativement éloignées), est également de période quasi-annuelle. Ces vecteurs traduisent 30.4% de la variance du signal.

L'examen des signaux reconstitués (Figure 1.22e) des deux premières paires oscillantes de basse fréquence, les plus énergétiques du signal, révèle plusieurs périodes : Avant la semaine 200 (août 1996) et après la semaine 500 (mai 2002), le signal bisannuel est quasi-nul et les basses fréquences sont dominées par un signal annuel relativement constant. De la semaine 200 à la semaine 350 (juillet 1999) le signal annuel diminue jusqu'à disparaître, et le signal bisannuel croît. Cette croissance se poursuit jusqu'à la semaine 430 (décembre 2000), date de la retroflexion amont à l'est du banc des Aiguilles, avant la diminution menant à l'annulation du signal bisannuel à la semaine 500. Ce pic d'influence du signal bisannuel centré sur l'évènement de 2000/2001 s'accompagne d'une recrudescence soudaine du signal annuel, et d'un maximum de ce dernier également phasé sur décembre 2000.

Ce phasage du signal annuel sur le signal bisannuel pendant la retroflexion amont traduit le tracé en « dents de scie » (décrochage soudain du point de retroflexion vers l'est suivi d'une remontée lente vers l'ouest) de cet évènement (comme des ondes de retroflexion habituelles). Ce couplage, la grande amplitude atteinte par le signal annuel en 2000/2001, et son annulation avant cette période, suggèrent une absence de relation entre les signaux annuels observés avant et après la semaine 350. Ceci est confirmé dans l'examen qui suit des phases du signal annuel.

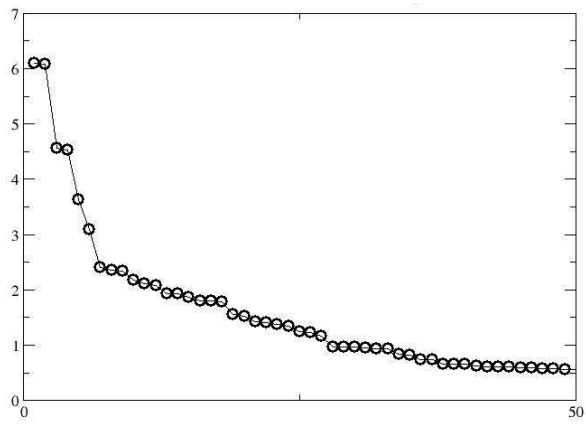
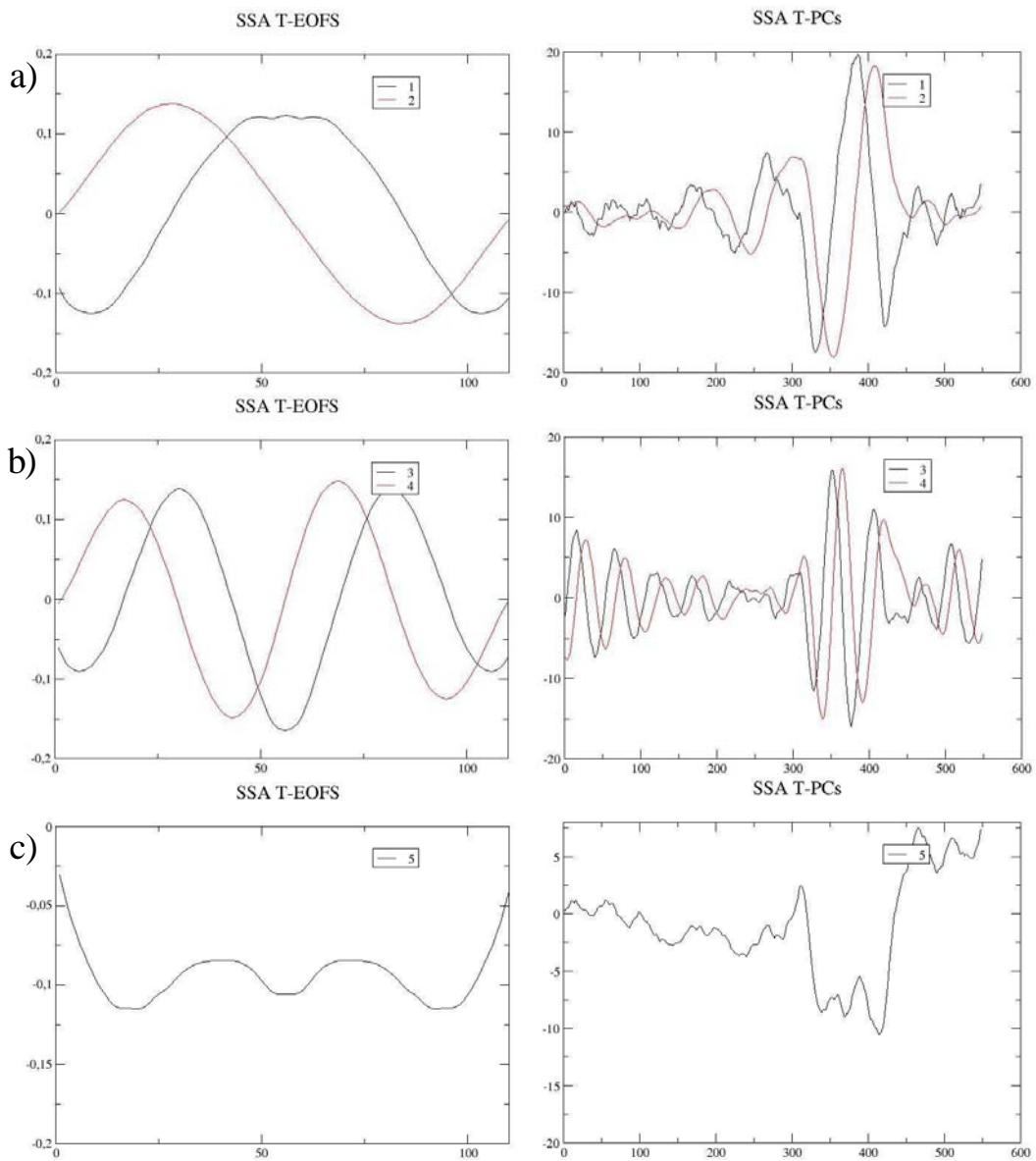


Figure 1.21. Variance normalisée des valeurs propres associées aux vecteurs propres de l'analyse SSA de la série de longitude de la retroflection.



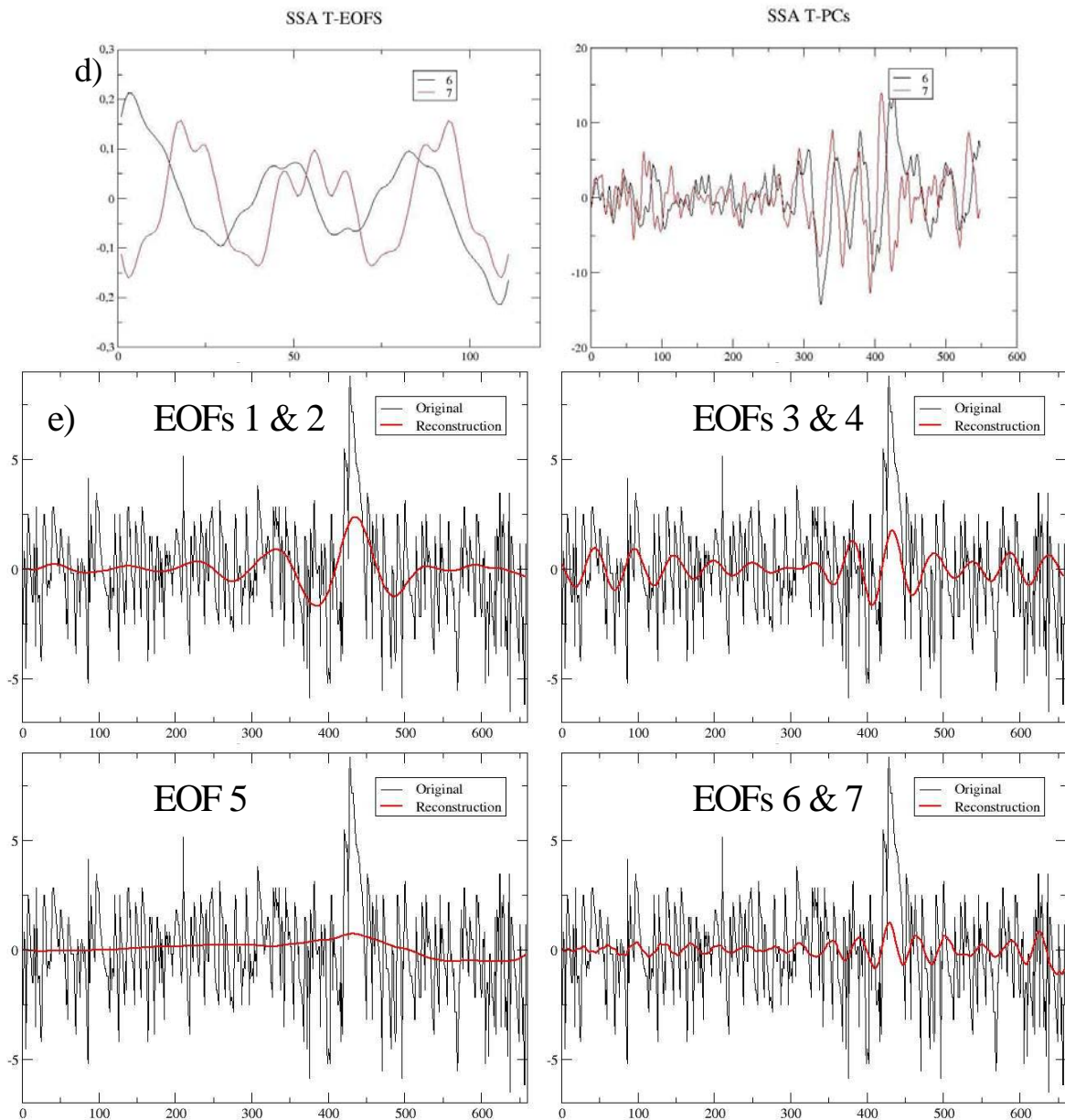


Figure 1.22. a) à d) A gauche sont représentés les T-EOFs (temporal empirical orthogonal functions) d'indices 1 à 7. Ces sont les vecteurs propres, de dimension  $M=111$  semaines. A droite sont représentés les T-PCs (temporal principal components) pour les T-EOFs correspondants. Ce sont les projections du signal initial sur ces T-EOFs, de dimension  $N-M$ , où est la longueur du signal. e) En rouge sont tracés les signaux reconstitués à partir des vecteurs propres correspondant aux vecteurs propres de la paire 1 et 2, la paire 3 et 4, le vecteur propre d'indice 5, et la paire 6 et 7. En trait noir est représenté le signal d'origine.

### Analyse du signal annuel

Si l'analyse spectrale n'a pas permis de dégager de fréquence annuelle significative, et si la position moyenne en longitude de la retroflection ne montre pas de dépendance saisonnière sur l'ensemble de la série, l'analyse SSA indique cependant la présence d'un signal de fréquence annuelle comptant pour 9.08% de la variance du signal complet (voir la

reconstitution du signal associée à la paire 3&4 sur la Figure 1.22e). On constate que du 14 octobre 1992 à fin 1997, soit pendant cinq ans, la retroflection est plus à l'ouest en été austral, et à l'est en hiver austral (voir Figure 1.23, en haut à gauche). Cette observation est en accord avec Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984) et Lutjeharms et al. (1992). Puis, comme décrit précédemment, le signal s'atténue en 1998, pour reprendre une très forte amplitude en 1999, mais se trouve alors quasiment en opposition de phase avec le cycle annuel de la période précédente. A partir de 2001, l'amplitude se stabilise à environ un degré de longitude, mais la phase demeure inversée. La phase semble cependant moins fixée et dérive lentement sur les trois dernières années, tendant peut-être à reprendre son cycle saisonnier précédent. Ainsi, un signal saisonnier semble exister pour la longitude de la retroflection, mais il voit sa phase perturbée et inversée durablement suite à l'évènement de 2000/2001. L'étendue comparable des durées de données avant et après l'évènement expliquerait ainsi l'absence de signal saisonnier moyen significatif, tel que calculé sur l'ensemble de la série, ou apparaissant dans le spectre de puissance du signal.

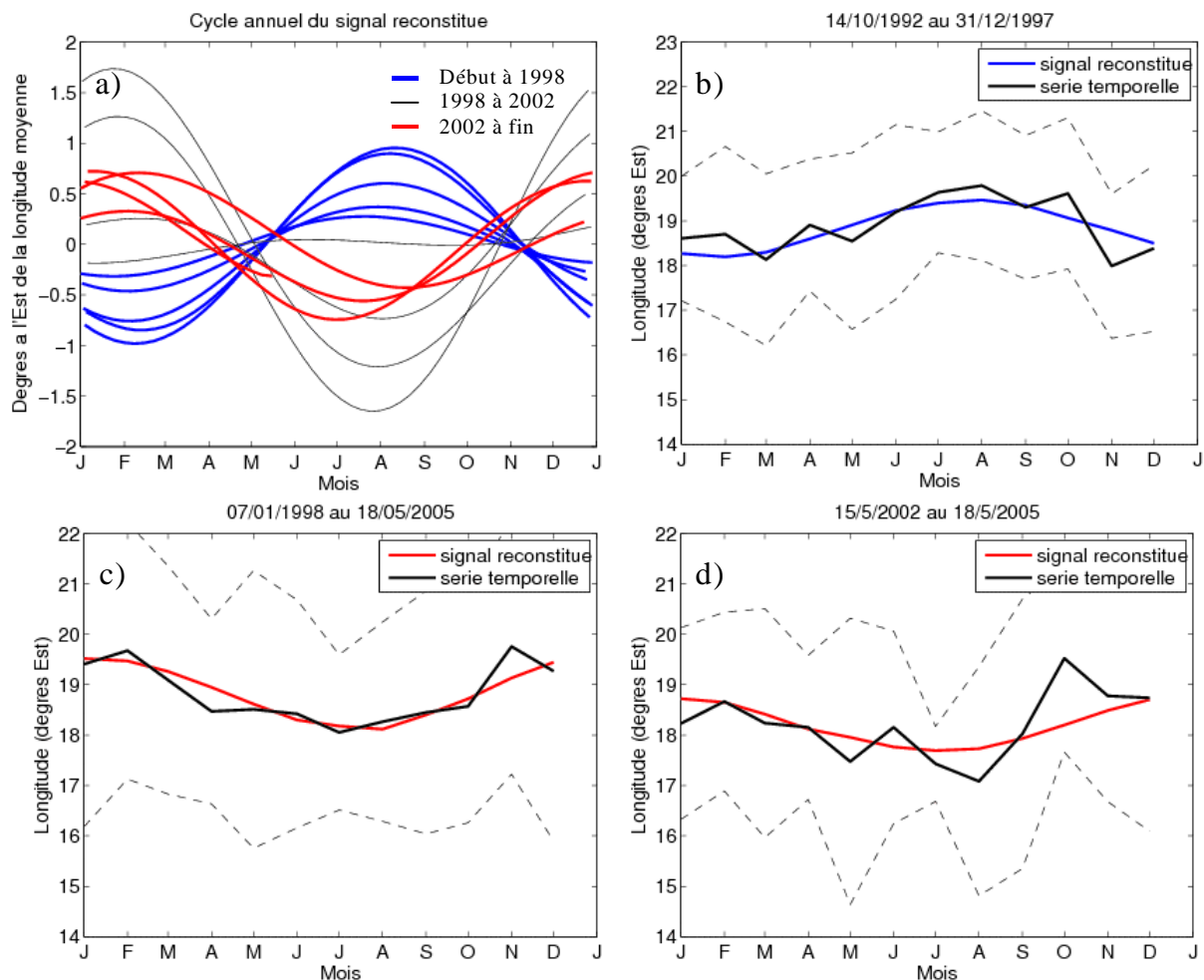


Figure 1.23. a) Variations annuelles du signal reconstitué (paire de vecteurs propres 3 et 4). En bleu, signal du 14 octobre 1992 à fin 1997; en noir, de début 1998 à fin 2001; en rouge, de

début 2002 au 18 mai 2005. b) à d) Pour les périodes indiquées, en trait noir continu est tracé la longitude moyenne par mois de l'année. Les traits noirs discontinus indiquent l'écart type, de part et d'autre de la moyenne, des longitudes de la retroflexion par mois correspondant. Les traits de couleurs correspondent au cycle mensuel moyen du signal reconstitué de la paire de vecteurs propres 3 et 4, pour par la période équivalente. La couleur de ce trait, bleu ou rouge, est en accord avec la figure a), pour la période correspondante.

Afin de s'assurer de cette observation, on peut comparer les moyennes des cycles annuels, sur ces différentes périodes, du signal reconstitué de la paire de vecteurs 3&4 et de la série temporelle de longitude (Figure 1.23). Or, on retrouve dans les données les cycles annuels moyens déphasés entre chaque période. Les amplitudes saisonnières sont de l'ordre de 1 à 1.3 degré de longitude selon la période, donc significatives puisque l'écart type en longitude est de  $2.24^\circ$  sur toute la série, et seulement de  $1.99^\circ$  (voir calculs plus haut) sur la série hors retroflexion amont.

Au vu de cette analyse et des précédents résultats de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984), un cycle annuel de la position de la retroflexion semble exister, caractérisé par une extension accentuée vers l'ouest durant l'été austral, de l'ordre de  $1^\circ$  de longitude. Les événements de « retroflexion amont », tels que celui de 2000/2001, en imposant un phasage du signal annuel sur le signal dominant de basse fréquence, peuvent cependant perturber le rythme saisonnier normal jusqu'à causer une totale inversion de phase. Après la fin de l'événement, un retour progressif sur plusieurs années du cycle saisonnier vers le cycle « normal » semble se produire.

### **Vecteurs propres d'ordre supérieurs: haute fréquence**

Sur la courbe des variances associées aux valeurs propres (Figure 1.21), on trouve deux paires principales de fréquences voisines de celle des lâchers d'anneaux (8&9, et 10&11), et qui traduisent 8.98% de la variance totale du signal. Puis, on constate l'absence de palier net dans la variance associée aux vecteurs propres suivants. On trouve ensuite une quinzaine de vecteurs propres oscillant (jusqu'au vecteur propre d'indice 27) à des fréquences comprises entre 4 et  $8 \text{ an}^{-1}$ , puis des signaux plus hautes fréquences imputables au bruit.

Le grand nombre de paire oscillantes de fréquences voisines de celles des lâchers, et l'absence de palier de variance expliquée entre elles et les signaux de fréquences supérieures associées au bruit, attestent de la forte variabilité dans la périodicité des lâchers.

Cependant, le choix de M ne permet pas une résolution optimale de ces fréquences. Des analyses avec des valeurs de M plus adaptées ont donc été menées (valeurs entre 50 et 80 semaines), sur la série complète ou interrompue avant l'événement de 2000/2001. Celles-ci donnent cependant des résultats similaires, soit un grand nombre de paires oscillantes de



fréquences comprises entre 4 et 8 an<sup>-1</sup> nécessaires à décrire la variabilité temporelle associée aux lâchers. Leurs résultats, qui ne sont pas présentés ici, confirment la forte variabilité temporelle de ce mécanisme.

Les vecteurs propres 1 à 27 (en terme de variance expliquée) contiennent donc la variabilité du signal de basse fréquence et de fréquences proches de celle des lâchers. Les rangs plus élevés contiennent la plus haute fréquence. Cela est visible Figure 1.24a, sur le signal reconstitué des vecteurs propres 1 à 27 pour lequel la variabilité haute fréquence est ainsi filtrée, et sur le périodogramme associé à ces fréquences (Figure 1.24b). Sur ce périodogramme est également représenté le spectre associé au signal reconstitué des vecteurs 8 à 27, tenant compte uniquement des fréquences associées aux lâchers.

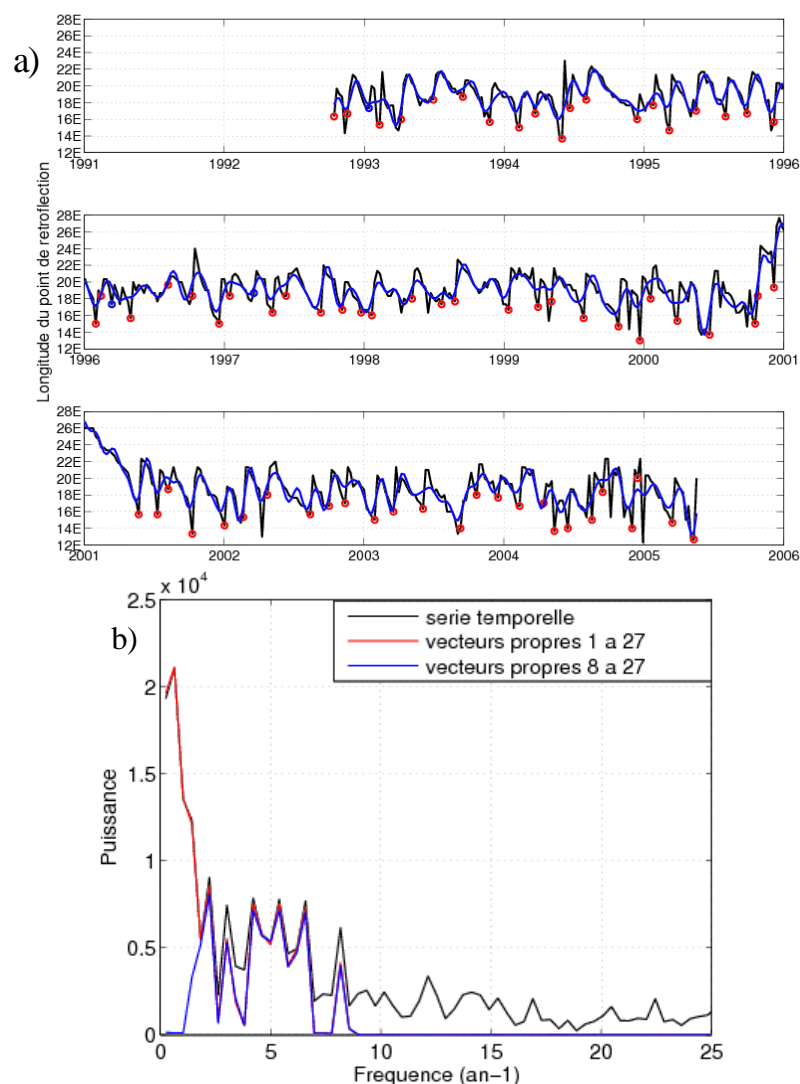


Figure 1.24. a) En bleu : le signal reconstitué de la série de longitude de la limite de la réflexion ; en noir : la série temporelle d'origine de la longitude du point de réflexion. Les ronds rouges indiquent les événements de lâchers. b) Les périodogrammes de la série temporelle d'origine et des signaux reconstitués à partir des vecteurs propres 1 à 27 et 8 à 27.

### **1.7.5.3 Variabilité du transport du courant de la retroflexion**

L'étude menée sur la variabilité temporelle de la longitude de la retroflexion met en évidence plusieurs fréquences. La longitude de la retroflexion varie au gré des lâchers successifs d'anneaux, phénomène classé ici dans la haute fréquence. A une fréquence annuelle (basse fréquence), la longitude de la retroflexion semble également variable. Des auteurs tels que Van Leeuwen et de Ruijter (2000) ou Schouten et al. (2002) proposent des explications à la part de variabilité liée au phénomène de lâchers d'anneaux. Nous n'avons en revanche pas d'explication à la variabilité annuelle de la longitude de la retroflexion. Pour tenter d'expliquer cette variabilité basse fréquence, et son déphasage suite à l'événement de retroflexion amont de la fin 2000, on peut envisager d'étudier l'intensité du courant ou du transport associé au courant des Aiguilles ou à la retroflexion. En effet, Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984) ont montré, à partir d'un modèle assez simple, que la retroflexion tend à être d'autant plus avancée vers l'ouest que le transport du Courant des Aiguilles est faible. On peut donc se demander si la variabilité basse fréquence ne serait pas dépendante de l'intensité de ce transport. Pour ce faire, nous avons mis en place une méthode d'estimation du transport au niveau de la retroflexion, afin d'obtenir une série temporelle qui puisse être comparée à celle de la longitude de la retroflexion.

#### **Méthode de calcul**

Pour tenter d'évaluer le transport au niveau de la retroflexion, nous nous sommes appuyé sur l'étude du profil zonal de composante méridienne de vitesse géostrophique autour du point de retroflexion, présentée en 1.4.3. Le calcul d'un transport, à partir des profils de vitesses, nécessite d'attribuer une largeur zonale et une profondeur au courant. Ne connaissant pas la profondeur du courant, une profondeur de 1000 m est adoptée pour calculer le transport. Le transport obtenu sera donc entaché d'une incertitude significative, et pourra être considéré plutôt comme un transport linéique. Pour choisir la largeur du noyau de courant, nous étudions le profil moyen de vitesse géostrophique (Figure 1.8). Nous choisissons de prendre en compte dans le calcul de transport les 2 premiers points de longitude à l'ouest de la longitude de la retroflexion, et les 3 premiers à l'est. En ces points-ci, la vitesse moyenne, réduite de l'écart type sur la vitesse en ce point, est proche de 0. Ceci permet de considérer que l'essentiel du transport est contenu dans cet intervalle de longitude. Ce choix permet également de s'assurer que des anneaux des Aiguilles à l'ouest de la retroflexion ne contribuent pas à diminuer le transport du courant, car ces anneaux induisent des vitesses orientées au nord sur leur flanc est, le plus proche de la retroflexion. Ce choix d'une bande

méridienne fixe pour le calcul du transport méridien ne permet pas de prendre en compte une possible variabilité de la largeur du courant. Cette incertitude s'ajoute à celle sur la profondeur du courant.

### **Absence de corrélation basse fréquence avec la longitude de la retroflection**

La série temporelle de transport obtenue indique un transport moyen de 70.2 Sv, pour un écart type de 42.4 Sv. Cette valeur est très proche des 70 Sv calculés par Gordon et al. (1987), à partir d'une radiale échantillonnant la retroflection, pour le transport au-dessus de 1500 m. Les auteurs trouvent un transport de 95 Sv par rapport au fond.

Afin de rechercher une éventuelle corrélation basse fréquence entre les séries temporelles de transport et de longitude de la retroflection, celles-ci sont filtrés. En opérant une simple moyenne glissante sur une fenêtre de 70 jours, on élimine la variabilité liée aux lâchers d'anneaux. La corrélation entre les deux signaux filtrés, représentés sur la Figure 1.25, n'est que de 0.29 (avec une avance de trois semaines du signal en longitude), est n'est donc pas significative. Ainsi la longitude de la retroflection ne semble pas être fortement liée à l'intensité du transport au sein de la retroflection, contrairement aux résultats de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984) ou de Biastoch et al. (2008).

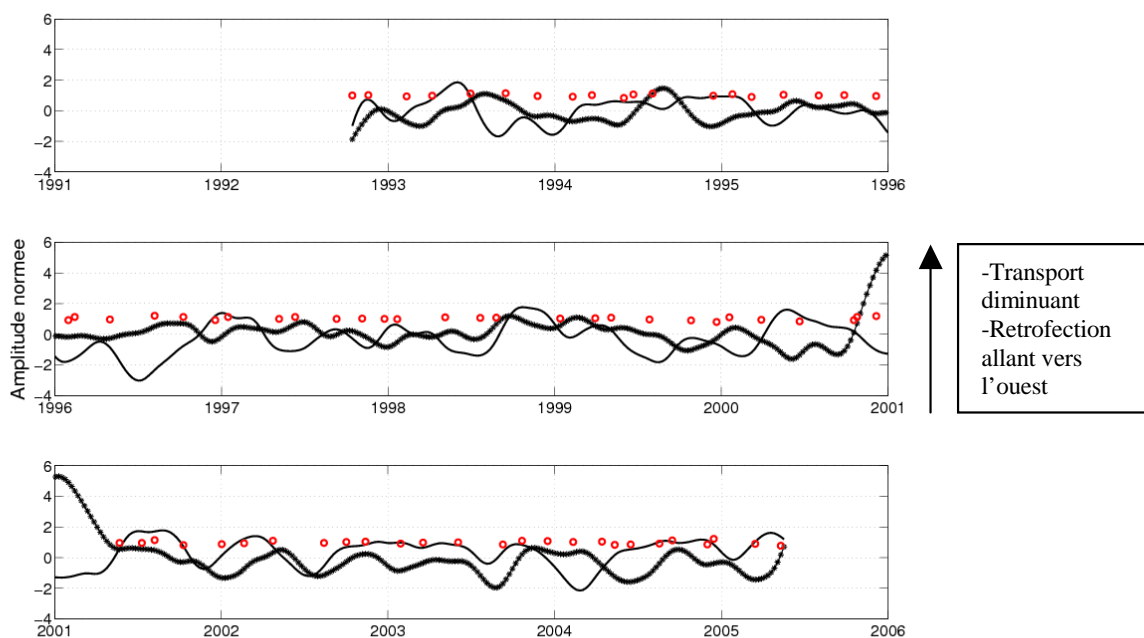


Figure 1.25. Comparaison des signaux filtrés (à 70 jours) du transport de la retroflection (trait noir fin) et de la longitude de la limite (trait noir étoilé). Le filtrage permet d'éliminer la variabilité du signal en longitude liée aux lâchers. Les 2 signaux sont normés pour comparaison. En ronds rouge (bleu), les instants de lâchers définitifs (temporaires) de masses d'eaux par la retroflection.

## Bisannualité du transport

L'absence de corrélation entre les deux signaux filtrés est confirmée par l'absence de signal annuel dans le transport du courant de la retroflexion. Le tracé du cycle annuel moyen de la série temporelle filtrée du transport, représenté sur la Figure 1.26a, montre en revanche un comportement bisannuel, les transports les plus importants étant observés en janvier et juillet. La variation maximale de transport a lieu entre juillet et octobre, avec une différence de transport de 12.6 Sv. L'écart type en transport pour la série temporelle filtrée du transport étant de 38.0 Sv, l'amplitude du signal bisannuel est significative. Une fréquence bisannuelle a également été observée par Ffield et al. (1997) dans l'intensité du gyre subtropical de l'océan indien et dans sa position moyenne en latitude. Les auteurs lient cette variabilité bisannuelle à celle présente dans le rotationnel de vent. Résolvant la relation de Sverdrup à partir de données de vent pour les années 1991 à 1995, ils calculent le transport de l'ARC à 32.5°E et obtiennent un cycle annuel moyen représenté sur la Figure 1.26b. On constate cependant un déphasage important entre ce transport et celui calculé ici pour le courant de la retroflexion. En effet, les transports les plus importants au niveau de la retroflexion ont lieu en janvier et en juillet, alors qu'on les trouve en mars et septembre dans le courant de retour des Aiguilles.

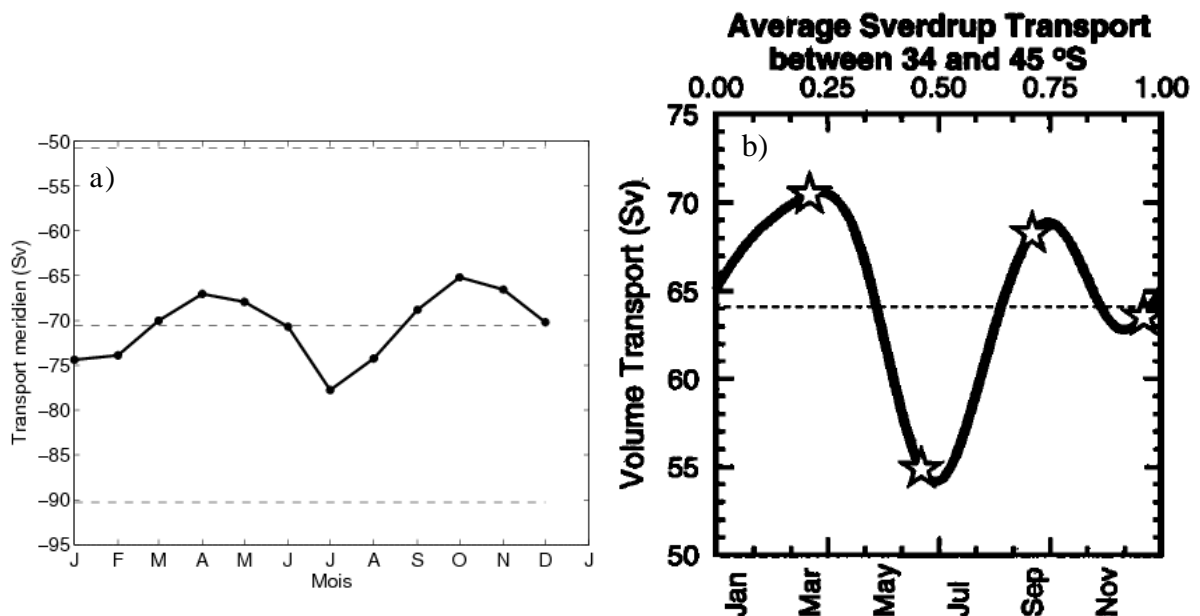


Figure 1.26. a) Cycle annuel moyen du transport du Courant des Aiguilles au niveau de la retroflexion. La série temporelle de transport a été filtrée à 70 jours. Les traits discontinus représentent la valeur annuelle moyenne (trait central) et un écart type de part et d'autre de cette moyenne (2 autres traits). b) Transport du courant de retour des Aiguilles à 32.5°E (Ffield et al., 1997). Les 2 signaux présentent des fréquences bisannuelles, mais fortement déphasées.

## **1.8 Conclusion**

L'étude faite de la retroflection du courant des Aiguilles permet d'approfondir la caractérisation de son comportement, et apporte des éléments de réponses aux questions envisagées. Ces dernières ont pu être abordées grâce aux données altimétriques employées, qui se distinguent de deux façons de celles utilisées par différents auteurs. D'une part la longueur importante de la série temporelle a permis un traitement statistique plus fin de la variabilité de haute fréquence, ainsi que l'étude de la variabilité de basse fréquence saisonnière et pluriannuelle. D'autre part, les produits altimétriques utilisés représentent la hauteur dynamique et non les anomalies de hauteurs de mer, ce qui a permis une caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de la retroflection.

**L'étude a permis de caractériser de façon détaillée la variabilité spatiale du point de retroflection et son schéma de progression vers l'ouest. Elle suggère un rôle perturbateur de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles, qui semble parfois limiter et orienter l'avancée vers l'ouest de la retroflection.**

**L'étude des lâchers confirme l'absence de saisonnalité pour la formation d'anneaux. On dénombre 5.8 lâchers/an, en accord avec la plupart des études précédentes. La méthode de détection des lâchers s'avère plus fiable que les études basées sur des champs d'anomalies de SSH, et permet de mieux les situer dans le temps.**

**Les analyses temporelles de la longitude de la retroflection confirment une forte irrégularité de la fréquence des lâchers. On détecte un signal saisonnier, d'amplitude  $1^\circ$  de longitude, en accord avec Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984) et Lutjeharms et al. (1992). Un événement de fréquence pluriannuelle, la retroflection amont de la fin de l'année 2000, semble cependant perturber ce signal, induisant un retournement de phase du cycle saisonnier. Le phase du signal semble ensuite amorcer un retour à la normale.**

## **2 Etude des anneaux des Aiguilles**

Ayant étudié le comportement de la retroflexion et des lâchers de tourbillons anticycloniques, nous nous sommes ensuite intéressé au devenir de ces tourbillons. Ceux-ci véhiculent l'essentiel des eaux subtropicales indiennes vers l'océan atlantique, et prolongent ainsi la branche nord du supergyre indo-atlantique. C'est pourquoi une bonne connaissance de leurs comportements est nécessaire dans la perspective d'une estimation correcte des échanges indo-atlantiques. De nombreuses études ont été menées à partir de mesures hydrologiques et plus récemment grâce aux mesures d'altimétrie satellitaire, qui se sont intéressées aux trajectoires et à l'évolution des anneaux des Aiguilles dans leur dérive dans l'Atlantique sud. Cependant, leur comportement initial dans le voisinage immédiat de la retroflexion, où sont libérés ces tourbillons, n'a été que peu étudié, et de façon ponctuelle lorsqu'ils ont été échantillonnés lors de campagnes en mer. Cette région a été baptisée « Chaudron du Cap » (Boebel et al., 2003), du fait du comportement apparemment chaotique de la moyenne échelle dans cette région, les tourbillons étant susceptibles de s'y subdiviser, s'y dissiper, interagir entre eux pour se regrouper, ou encore d'interagir avec des cyclones également présents dans cette région.

### **2.1 Etat de l'art sur les anneaux des Aiguilles**

#### **2.1.1 Une forte variabilité de la cinématique et de la population des anneaux**

La dynamique des anneaux des Aiguilles se caractérise par sa très grande variabilité, liée aux multiples interactions évoquées plus haut, que peuvent subir les tourbillons. Ainsi, si Garzoli et Gordon (1996) puis Goñi et al. (1997) ont identifié un corridor orienté vers le nord-ouest qu'empruntent les anneaux des Aiguilles (Figure 2.1), leurs cinématique et caractéristiques hydrographiques peuvent être extrêmement variées. Les vitesses de translation instantanées observées vont de 3 cm/s à 16 cm/s selon Gründlingh (1995), et Goñi et al. (1997). Schmid et al. (2003) ont suivi un anneau pendant 7 mois, à partir de données de flotteurs et de données d'altimétrie, et observé que sa vitesse de translation vers le nord-ouest variait de 3 cm/s à 20 cm/s. Garzoli et al. (1999) trouvent des vitesses de 5.5 à 6.5 cm/s, à partir de données de flotteurs RAFOS.

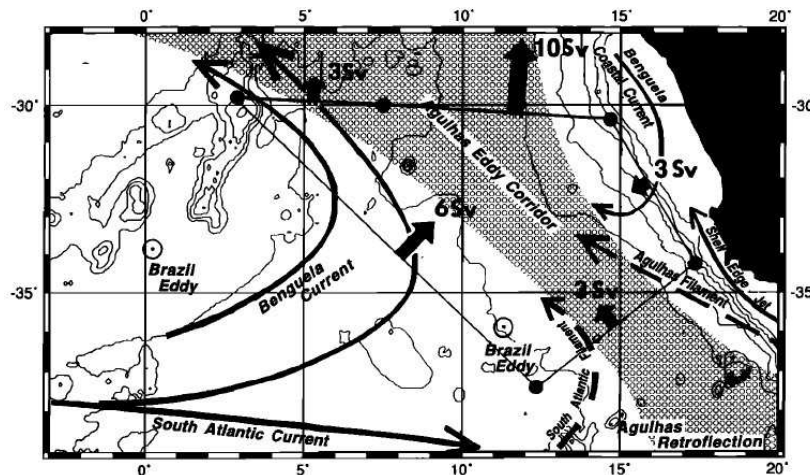


Figure 2.1. En grisé, le corridor des Aiguilles emprunté par les anneaux dans leur dérive dans l'atlantique sud (Garzoli et Gordon, 1996).

Le nombre de tourbillons simultanément observés dans le bassin du Cap et l'Atlantique sud-est varie entre 2 et 7 selon Goñi et al. (1997), qui ont travaillé à partir de données d'anomalies de hauteur de mer. Ces chiffres sont en accord avec les études similaires de Schouten et al. (2000) ou Richardson et al. (2003), mais Boebel et al. (2003) en dénombrent jusqu'à 12 durant l'expérience KAPEX de 1997.

Une variabilité importante est également observée dans les dimensions spatiales des anneaux. Lutjeharms (1981) observe un diamètre moyen de 324 km pour un écart type de 97 km, à partir de données d'imagerie infrarouge Meteosat. Plus récemment Duncombe Rae (1991) trouve un diamètre moyen de 240 km pour un écart type de 40 km. Mais des observations récentes montrent des gammes de variations très larges. Leur profondeur est par ailleurs peu connue, autour de 2000 à 2500 m au départ, mais variant ensuite fortement au gré des interactions subies avec la bathymétrie et des trajectoires particulières à chaque tourbillon.

### 2.1.2 Un transport associé aux anneaux difficilement quantifiable

La quantification des échanges indo-atlantiques imputables aux anneaux des Aiguilles nécessite de connaître la quantité d'eau advectée dans les tourbillons. Or, la forte variabilité des dimensions spatiales des anneaux rend une telle estimation difficile. Les dimensions spatiales du tourbillon seraient par ailleurs dépendantes de la vitesse de translation du tourbillon. En effet, Flierl (1981) a montré que le contour des eaux emprisonnées dans un tourbillon, à toute profondeur, correspond au contour pour lequel la vitesse azimutale des eaux en rotation dans le tourbillon est égale à la vitesse de translation du tourbillon. Ainsi, la profondeur d'emprisonnement des eaux du tourbillon est variable, comme son diamètre à toute profondeur. Duncombe Rae (1981) estime que la profondeur des anneaux des Aiguilles

varie entre 670 m et 1100 m. Mais les fortes variations de vitesses de translation observées impliquent une profondeur d'emprisonnement variable dans le temps, ce qui rend toute quantification du transport associé à un anneau difficile. De plus, la façon dont se fait le mélange des eaux des anneaux avec le milieu ambiant reste mal connue. Cependant, le courant du Benguela dans lequel dérivent les tourbillons anticycloniques constitue la branche est du gyre subtropical de l'Atlantique sud. Une dissipation partielle ou totale des anneaux en son sein contribue donc à un apport d'eaux indiennes vers l'atlantique. Plusieurs études proposent des estimations de transports. Le bilan estimé de quantité d'eaux transférées du courant des Aiguilles vers l'Atlantique sud varie entre 2 Sv (Gordon et Haxby, 1990) et 15 Sv (Gordon, 1985). La part de ce transport assurée par les anneaux des Aiguilles est située entre 3 Sv et 9 Sv dans les diverses études réalisées, pour un transport individuel allant de 0.5 Sv à 1.5 Sv par anneau et une moyenne de 6 anneaux par an issus de la retroflexion (de Ruijter et al., 1999). La disparité des valeurs de transports associées à un tourbillon selon les auteurs provient de ce qu'ils ont été observés à des distances variables de la retroflexion (donc à un degré de dissipation plus ou moins avancé), de la variabilité d'un tourbillon à l'autre, ou encore de conventions différentes quant aux choix du diamètre et de la profondeur d'eau emprisonnée dans les anneaux.

### **2.1.3 Evolution de l'hydrologie et érosion des anneaux**

L'évolution temporelle des caractéristiques des eaux déplacées par les anneaux est mal connue, du fait du peu de mesures in-situ à disposition, en particulier de mesures hydrologiques d'un même anneau au cours de son évolution. Van Aken et al. (2003) ont néanmoins étudié un tourbillon suivi 7 mois durant, en 2000, par des mesures in-situ et d'altimétrie. Ils concluent à une perte de chaleur vers l'atmosphère par l'anneau de  $54 \text{ W/m}^2$ , et ce durant l'été austral quand ces échanges sont les moins intenses. Ces forts échanges de chaleur ont eu pour conséquence une chute de température de plus de  $2^\circ\text{C}$  dans le cœur du tourbillon, responsable d'un approfondissement significatif de la couche de mélange. Ces modifications hydrologiques impliquent une modification des contenus en chaleur et sel des anneaux, et impactent donc sur les échanges indo-atlantiques de ces grandeurs.

Les interactions des tourbillons avec la moyenne échelle voisine de la retroflexion, ou avec la bathymétrie, pourraient également influencer sur ces échanges. Arhan et al. (1999) ont étudié deux anneaux des Aiguilles aux caractéristiques hydrologiques très différentes, échantillonnés au cours d'une même campagne en mer. L'un, beaucoup plus froid en surface et possédant une thermocline plus froide et plus profonde, avait subi une convection hivernale



intense. Or, les deux tourbillons étaient issus d'un même anneau qui s'était subdivisé plusieurs mois auparavant. Un examen de données d'altimétrie a montré que le tourbillon refroidi avait stagné pendant les mois d'hiver à des latitudes élevées, tandis que le second s'était échappé plus rapidement vers le nord-ouest. Ce résultat atteste de l'importance des échanges air-mer dans les modifications des propriétés des anneaux. Mais cela révèle aussi l'importance d'une compréhension des interactions de la moyenne échelle dans le Chaudron du Cap. La subdivision en cause résulterait de l'interaction entre l'anneau d'origine et l'extrémité nord-est de la dorsale des Aiguilles. Ainsi, la dorsale et les monts sous-marins de l'ouest du bassin des Aiguilles semblent pouvoir jouer un rôle dans le comportement des anneaux dans cette région, dont les conséquences peuvent être significatives sur le devenir des masses d'eau qu'ils véhiculent.

Les interactions subies par les anneaux au voisinage de la retroflexion, notamment avec la bathymétrie de l'est du bassin du Cap, pourraient provoquer des trajectoires très diverses, menant à des échanges avec l'atmosphère tout aussi variables. Ces échanges, modifiant les caractéristiques hydrologiques des anneaux, influeraient alors sur les transferts indo-atlantiques.

Les données satellitaires permettent une évaluation statistique de l'érosion des tourbillons au cours de leur déplacement. Byrne et al. (1995) ont montré, à partir de données altimétriques combinées à des données hydrologiques, une décroissance de l'anomalie de SSH associée aux anneaux d'un facteur e (2.7) sur 1700 km à 3000 km, et un profil de décroissance exponentiel. Schouten et al. (2000), se basant sur des données d'anomalies de SSH entre 1993 et 1996, constatent une décroissance de 50% des anomalies en 4 mois (Figure 2.2).

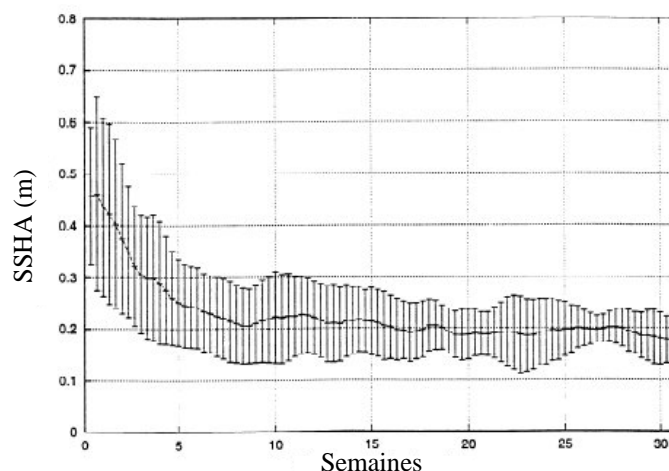


Figure 2.2. Décroissance temporelle moyenne de l'anomalie de SSH des anneaux des Aiguilles depuis leur détachement de la retroflexion entre 1993 et 1996. Obtenu à partir de

*données altimétriques, et uniquement pour les anneaux ne se dissipant dans le bassin du Cap (Schouten et al., 2000).*

## **2.2 Objectifs**

Une meilleure description et compréhension du comportement des anneaux des Aiguilles semble nécessaire à une analyse qualitative et quantitative des échanges par la branche nord du supergyre subtropical indo-atlantique. La forte variabilité des caractéristiques hydrologiques des anneaux, combinée à la difficulté de mesures in-situ contribue à une disparité dans les résultats de transports proposés à ce jour. Concernant les trajectoires d'anneaux, on est passé de l'idée d'une dérive le long d'un « corridor » orienté au nord-ouest (Garzoli et Gordon, 1996) au schéma extrême opposé d'un « chaudron du Cap » (Boebel et al., 2003) très turbulent. La réalité océanique alliant un transport net vers le nord-ouest à une forte variabilité, est certainement intermédiaire. La connaissance imparfaite des trajectoires des anneaux explique également en partie la disparité des résultats à ce jour, les caractéristiques des tourbillons utilisées par les différents auteurs étant fonction de leurs âges aux instants de mesures, et de leurs historique et trajectoire individuels. Pour l'ensemble de ces raisons, une analyse statistique de l'évolution des anneaux des Aiguilles, depuis leur détachement de la retroflexion jusque dans leur dérive dans l'Atlantique semble essentielle.

En se basant sur les mêmes produits altimétriques que pour l'étude de la retroflexion, nous avons tenté de pallier en partie à ces lacunes dans la connaissance du comportement des anneaux des Aiguilles. **L'objectif principal est d'étudier le comportement des anneaux depuis leur détachement de la retroflexion, en s'appuyant sur l'identification des dates de lâchers réalisée précédemment (chapitre I). Pour cela, les anneaux libérés durant la période des données ont été identifiés, et leurs trajectoires, subdivisions ou jonctions répertoriées. Dans la recherche de comportements types des tourbillons, le rôle de la bathymétrie a été particulièrement examiné. Nous avons recherché des trajectoires types, et déterminé leur poids statistique grâce à la longueur de la série temporelle et donc au grand nombre de tourbillons identifiés. Outre cette analyse du comportement des anneaux au voisinage de la retroflexion, un autre objectif était d'étudier l'évolution de leurs caractéristiques physiques extractibles des champs altimétriques, tels que l'anomalie de SSH ou le diamètre. Cette étude améliore nos connaissances de ces évolutions pour deux raisons. D'une part, la longueur de la période d'étude permet une analyse statistique plus fiable que les études existantes. D'autre part, les instants de formation des tourbillons étant déterminés plus précisément que lors d'études**

**précédentes, les erreurs sur évolutions temporelles obtenues sont plus faibles. A la lumière des familles de trajectoires identifiées, les évolutions de grandeurs physiques caractéristiques de chacune de ces familles ont été calculées, afin de les caractériser et d'évaluer leurs contributions relatives dans les échanges indo-atlantiques.**

## **2.3 Outils d'études et méthodes**

Afin d'atteindre ces objectifs, il fallait effectuer un recensement exhaustif des anneaux au sud du continent africain, et un suivi de leurs trajectoires prenant en compte les interactions de moyenne échelle. L'outil de suivi à employer devait tenir compte des éventuelles subdivisions ou regroupements d'anneaux, à partir des produits d'altimétrie CLS. En réalisant un tel suivi sur une période de 14 ans environ, il devenait possible de dégager des résultats statistiques sur les trajectoires des anneaux, leurs interactions avec la bathymétrie, ou l'évolution spatio-temporelle des propriétés des tourbillons contenues dans les données altimétriques. La période de données altimétriques utilisée est plus étendue pour cette seconde étude, qui a été réalisée à la suite de la première. Les produits hebdomadaires s'étendent du 14 octobre 1992 au 3 janvier 2007, soit sur 743 semaines. Le champ moyen Rio05 avait remplacé le champ Rio03 dans les produits altimétriques au moment de cette étude. Cependant, l'étude présentée ici s'appuie principalement sur des champs d'anomalies de SSH, n'incluant pas de champ moyen. Par conséquent, les données sont homogènes avec celles employées au chapitre I, permettant d'établir des correspondances entre ces études.

### **2.3.1 Analyse en ondelettes**

L'outil utilisé pour identifier et suivre les anticyclones est basé sur une analyse en ondelettes. A partir de champs successifs d'une grandeur physique, l'analyse en ondelettes effectue une décomposition du signal en paquets d'ondes orthogonaux, à la manière d'une décomposition de Fourier. L'intérêt de l'analyse en ondelettes est qu'elle permet d'identifier des paquets d'ondes associés à une position et une fréquence, alors que la décomposition en série de Fourier ne fournit que des informations en fréquence. Ainsi, ce type d'analyse a été largement employé dans le suivi temporel de structures décelables sur divers champs de données. Doglioli et al. (2007), par exemple, l'ont appliquée à des champs de vorticité pour suivre des tourbillons au sud de l'Afrique, dans un modèle 3D de haute résolution. Une version 2D de cet outil a été employée ici, permettant de détecter et suivre des structures tourbillonnaires présentes dans les champs altimétriques CLS.

Appliqué à un champ de SSH, d'anomalie de SSH (SSHA), ou encore de vorticité, l'outil d'analyse en ondelettes repère ainsi des structures, qui sont ici associées à des tourbillons. Un ensemble de points de grille est associé à chacune des structures, et celles-ci sont ordonnées selon l'importance de leurs coefficients spectraux. Un centre est également attribué à chaque structure, au point de grille présentant l'extremum du champ considéré. Une surface est donc attribuée à chaque tourbillon, en fonction du nombre de points de grille qui lui sont associés. Par la suite, cette surface sera utilisée pour représenter la dimension horizontale du tourbillon. Afin de se ramener à une grandeur plus couramment utilisée dans la littérature, un diamètre moyen sera calculé, en ramenant la surface obtenue au diamètre d'un tourbillon de contour circulaire de même surface, pour la latitude considérée.

La détermination des points de grille appartenant à une structure identifiée par l'analyse résulte uniquement de l'outil mathématique. Ainsi, le contour attribué à un tourbillon détecté est indépendant de la dynamique du tourbillon. Cette donnée ne reflète donc pas l'étendue latérale du tourbillon, ni le contour des eaux emprisonnées et advectées par le tourbillon. Un tel contour pourrait être supérieur ou inférieur à celui fourni par l'analyse. Car comme l'ont montré Flierl et al. (1981), le contour spatial des eaux solidaires du tourbillon dans son déplacement, varie avec la vitesse de translation du tourbillon, ce qui n'est pas pris en compte par l'analyse en ondelettes. Néanmoins, un examen visuel des structures obtenues montre que le nombre de points de grille associés aux structures varie manifestement comme l'étendue spatiale du signal du tourbillon, visible sur un tracé de champ de SSH ou de SSHA. C'est pourquoi la surface, ou le diamètre moyen, d'un tourbillon obtenu par l'analyse en ondelettes sera utilisé comme un indicateur de son étendue spatiale, et sera employé dans un calcul simplifié de transport associé au tourbillon. Ce calcul sera présenté plus loin.

L'outil d'analyse en ondelettes permet un suivi des structures tourbillonnaire, à partir d'une méthode simple. Après lancement de l'analyse sur un champ quelconque, pour une date  $t_0$ , l'une des structures identifiées par l'analyse est choisie par l'utilisateur afin d'être suivie dans le temps. Ensuite, l'analyse est lancée à l'instant  $t_1$  suivant. Si une structure est détectée, dont le contour englobe la position du centre du tourbillon à l'instant  $t_0$ , l'outil considère que la structure identifiée à  $t_1$  est la même que celle identifiée à  $t_0$ . L'analyse est alors reproduite par pas de temps successifs, le contour et le centre du tourbillon étant redéfini à chaque pas de temps, jusqu'à ce que le centre du tourbillon ne se situe plus dans aucune structure. Le suivi est alors interrompu.

Quelques paramètres de réglage de l'analyse en ondelettes sont à déterminer. L'un d'entre eux permet de limiter le nombre de structures identifiées, par ordre décroissant de

coefficients spectraux associés aux structures. En prenant une valeur trop faible, certaines structures tourbillonnaires ne sont parfois pas retenues, selon l'intensité de l'activité tourbillonnaire voisine. Le suivi de certains tourbillons peut alors être interrompu lorsque leurs signatures dans le champ employé (SSH, SSHA ou vorticité le plus souvent) deviennent trop faible. Or, l'emploi d'une valeur plus élevée permet souvent de détecter et suivre la structure plus longtemps. Inversement, si l'on prend une valeur trop forte, outre les anticyclones présents dans le bassin du Cap, des structures de dimensions faibles et ne correspondant pas aux anneaux des Aiguilles, tel que des filaments au voisinage des tourbillons, sont retenues par l'analyse. Ces structures présentent un inconvénient majeur en fin de suivi de tourbillon. En effet, lorsque le signal associé à un tourbillon n'est plus détecté par l'analyse, et que le tourbillon s'est donc estompé au sens de l'analyse en ondelettes, une de ces structures est souvent détectée, dont le contour englobe la position du centre du tourbillon suivi à la date précédente. Le suivi se poursuit alors parfois sur une longue période, sans qu'il s'agisse du tourbillon initial. Le choix de ce paramètre s'est fait par différents essais de suivi. La valeur choisie est suffisamment élevée pour s'assurer qu'aucune structure pouvant correspondre à un anneau des Aiguilles ne soit filtrée par l'analyse. Mais elle est choisie de façon à limiter le plus possible le nombre de structures parasites détectées. Un examen visuel, a posteriori, des trajectoires et contours des tourbillons, superposés aux champs physique correspondant, permet de s'assurer que seul le tourbillon a été suivi. Le cas échéant, le suivi est modifié manuellement et interrompu lorsque le signal associé au tourbillon a disparu.

### **2.3.2 Méthode de suivi des anneaux des Aiguilles**

Le domaine de suivi des tourbillons est carré (en longitude et latitude), allant de 0°E à environ 28.5°E et de 50°S à environ 26°S. Il englobe donc largement le domaine principal de propagation des anneaux des Aiguilles, si ce n'est que les tourbillons allant au-delà de ces limites (surtout au nord et à l'ouest) ne sont pas suivis jusqu'à leur fin. Cette restriction tient à l'outil d'analyse en ondelettes, mais également à l'objectif principal qui est l'étude du comportement des anneaux des Aiguilles au voisinage de la retroflexion et dans la région du chaudron du Cap.

#### **2.3.2.1 Choix des champs d'anomalies pour l'analyse en ondelettes**

Les données fournies par CLS étant des champs altimétriques, il a d'abord été envisagé d'effectuer l'analyse en ondelettes sur ces champs, avant de calculer les champs de vorticité

qui leurs sont associés pour les utiliser dans l'analyse. Les essais effectués, décrits plus bas, ayant donné satisfaction, le suivi s'est fait directement sur ces champs altimétriques. Il est alors possible d'effectuer l'analyse sur les champs de topographie dynamique ou d'anomalies de hauteur de mer. Afin de choisir, des comparaisons de suivis de tourbillons ont été menées. La Figure 2.3 montre le tracé de la trajectoire d'un tourbillon obtenu pour chacun des champs. On constate que les trajectoires sont très proches l'une de l'autre. En effet, le champ Rio05 ne présente de gradients de SSH significatifs que le long de la position moyenne de la retroflexion. Plus à l'ouest, ces gradients sont faibles devant ceux associés aux anomalies de SSH dans le cœur du tourbillon. Ainsi, le centre du tourbillon, qui est défini dans l'analyse comme le point du maximum de SSHA ou SSH dans son contour, ne peut être que faiblement décalé dans les deux cas. En revanche, les essais montrent (voir Figure 2.3) que les trajectoires obtenues à partir des champs de topographie dynamique sont souvent plus longues. Mais un examen des champs de SSH montre que le signal du tourbillon s'est en réalité dissipé dans les champs d'anomalies, et que le suivi se poursuit en raison de structures détectées dans le champ moyen. Les contours des anneaux, aux formes très étirées, ne correspondent alors pas à des tourbillons. En conséquence, les trajectoires obtenues sur les champs de topographie dynamique tendent à se poursuivre au-delà de la dissipation des tourbillons, induisant des déplacements parfois abrupts (voir Figure 2.3) n'ayant plus de signification physique. C'est pourquoi le suivi a été conduit sur les champs d'anomalies.

Au niveau de la retroflexion, et à l'est de celle-ci, les champs d'anomalies font apparaître un grand nombre de tourbillons cycloniques et anti-cycloniques. Mais un examen des champs de SSH correspondant montre qu'il s'agit rarement de tourbillons détachés de la retroflexion. En effet, le champ moyen Rio05 fait apparaître des gradients importants le long du cheminement moyen du courant des Aiguilles, de sa retroflexion, et de son courant de retour. Or, pour faire apparaître les forts déplacements de ces courants, les champs d'anomalies contiennent des cyclones ou anti-anticyclones apparents qui, additionnés au champ moyen, permettent de modifier le cheminement du courant. Ces tourbillons n'ont donc pas toujours de réalité physique. C'est pourquoi il est difficile, en ne travaillant qu'avec les champs d'anomalies, d'identifier quels tourbillons, et à quels instants, sont effectivement des anneaux des Aiguilles libérés par la retroflexion.

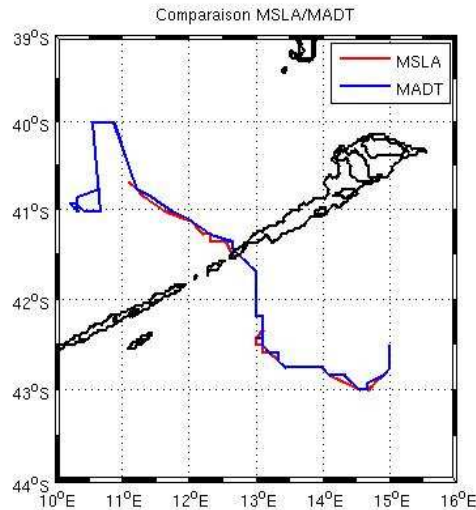


Figure 2.3. Trajectoires comparées d'un anneau des Aiguilles en 1998 sur les champs de SSH et d'anomalies de SSH, interpolés au  $1/9^\circ$ . On constate des écarts de trajectoires très faibles. L'anticyclone est suivi plus longtemps sur les champs de SSH, mais un examen visuel montre que le tourbillon s'est en réalité dissipé. L'analyse en ondelettes détecte ensuite des structures liées au champ moyen lui-même, entraînant des déplacements importants d'une semaine sur l'autre.

En conséquence, le choix a été fait de détecter visuellement l'instant de formation d'un tourbillon à partir du champ de SSH, en distinguant son détachement de la retroflexion (quand c'est le cas, car ils peuvent être issus d'une subdivision d'anneaux existants). Pour cela, je me suis appuyé sur l'étude de la position de la retroflexion réalisée préalablement. Celle-ci a permis d'identifier les événements de lâchers de masses d'eaux, qu'il s'agisse d'un détachement unique ou multiple de tourbillons. Puis, le suivi ultérieur du tourbillon est réalisé sur les champs de SSHA.

### 2.3.2.2 Raffinement de la résolution du champ de données pour analyse en ondelettes

Le grillage des produits d'altimétrie au  $1/3$  de degré s'est rapidement avéré insuffisant vis à vis de l'analyse en ondelettes et de l'échelle spatiale des structures tourbillonnaires qu'elle doit déceler. Plusieurs problèmes sont observés, qui sont liés au fait que les tourbillons identifiés sont de formes souvent très distordues (voir Figure 2.4a), induisant des erreurs dans le suivi d'une semaine à l'autre, qui nécessite que le centre du tourbillon, pour une semaine donnée, soit contenu dans le contour du même tourbillon la semaine précédente. Cela entraîne parfois le saut d'un tourbillon à un autre en cours de suivi lorsque le centre d'un tourbillon voisin se retrouve inscrit dans le contour mal défini du tourbillon suivi à l'instant précédent. Le suivi d'un tourbillon est également régulièrement interrompu lorsque le centre du

tourbillon n'est pas contenu dans le contour distordu obtenu du même tourbillon la semaine précédente. Par ailleurs, plusieurs tourbillons sont souvent regroupés en un seul.

Une interpolation des données, au 1/9 de degré (basée sur une triangulation de Delaunay de type cubique), permet alors d'obtenir des tourbillons aux contours beaucoup plus réalistes (voir Figure 2.4), et de surfaces (à l'intérieur du contour) équivalentes. Cela permet un meilleur suivi, limitant les problèmes de sauts de tourbillons, et d'interruptions du suivi. L'analyse est donc faite sur le champ de SSHA interpolé.

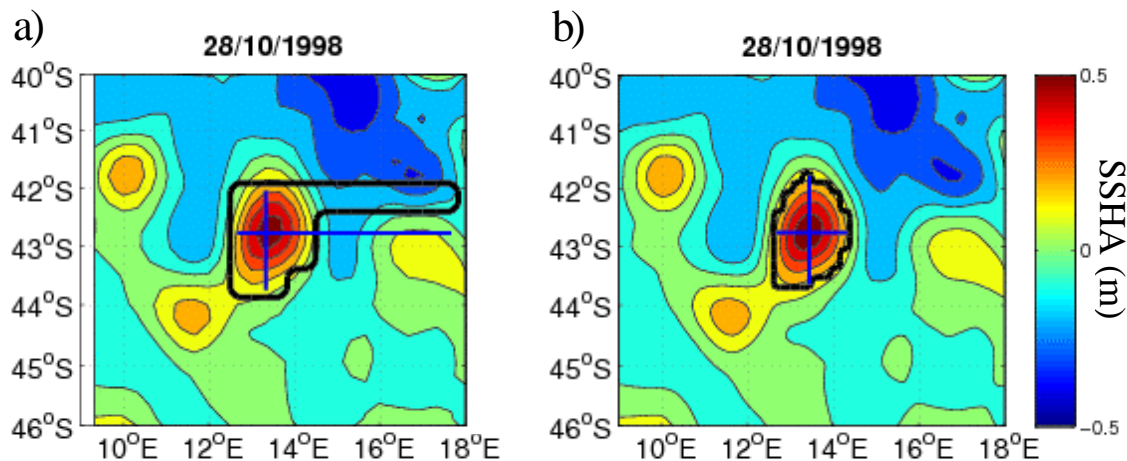


Figure 2.4. Identification d'un tourbillon et de son contour par l'analyse en ondelettes : a) sur le champ d'anomalies au 1/3° et b) sur le champ interpolé au 1/9°. On constate une définition beaucoup plus réaliste du contour du tourbillon sur le champ interpolé.

### 2.3.2.3 Méthode

#### Détection et suivi

Les anneaux des Aiguilles sont détectés à partir d'un examen des tracés des champs de SSH et de la position de la limite de la retroflexion dans le temps. Cela permet de repérer les détachements d'anneaux de la retroflexion, lesquels s'accompagnent le plus souvent d'un saut vers l'est de la position de la limite de la retroflexion, et coïncident avec les lâchers répertoriés dans l'étude précédente. Lorsqu'un anneau se détache de la retroflexion, son suivi a conventionnellement été effectué à partir de la date précédant le saut vers l'est de la limite de la retroflexion.

Le tourbillon est alors suivi dans le temps par l'analyse en ondelettes depuis son apparition jusqu'à sa disparition, sur les champs d'anomalies de SSH. Les date et position de fin de suivi du tourbillon sont celles précédant la perte du tourbillon par l'analyse en ondelettes. Cependant, les dimensions spatiales du tourbillon tendant à se réduire dans le temps, il arrive que le tourbillon se soit simplement déplacé trop vite pour être suivi par



l'analyse. C'est pourquoi, à chaque interruption de suivi, une analyse est initiée à la date suivante. Lorsque le tourbillon n'est effectivement plus identifié, le suivi est considéré comme achevé et le tourbillon jugé s'être dissipé. Si le tourbillon est à nouveau détecté, la suite du suivi est adjointe au suivi initial, prolongeant le suivi du tourbillon. Cela a parfois été répété au cours d'un même suivi.

On peut noter que lorsque le suivi d'un tourbillon est interrompu, sa signature en anomalie est souvent visible durant parfois plusieurs semaines avant de s'estomper définitivement. Mais l'analyse ne parvient pas à le détecter, son signal étant devenu trop faible. Ainsi, la progression des tourbillons dans l'atlantique avant leur dissipation, ainsi que leur durée de vie, sont en moyenne un peu sous-estimées. Cependant, cela n'a pas d'effets significatifs sur l'étude du comportement au voisinage de la retroflexion, le sujet d'étude principal, dans la mesure où les trajectoires s'achèvent majoritairement plus à l'ouest. De plus, les signatures d'anomalies des tourbillons ne demeurent visibles que 3 ou 4 semaines au plus au-delà de leurs périodes de suivis. Le tourbillon étant alors souvent proche de sa dissipation, il n'est plus très mobile. Ainsi, l'erreur attendue sur la position finale obtenue d'un tourbillon est faible. Enfin, la perte du signal altimétrique d'un anneau ne signifie pas nécessairement qu'il s'est dissipé dans le milieu ambiant. La convection dans la couche de mélange suite aux échanges océan/atmosphère, et le refroidissement du noyau de l'anticyclone, pourraient contribuer à atténuer sa signature en SSH. De plus, à mesure que ces anneaux refroidis pénètrent dans le gyre subtropical de l'atlantique sud, ils sont susceptibles de subduer sous la thermocline plus chaude et de perdre ainsi leur signature d'anomalie en surface.

Lorsqu'un tourbillon se subdivise, il donne naissance à deux ou plusieurs sous-tourbillons. La trajectoire du sous-tourbillon de plus grande taille est alors conventionnellement considérée comme la poursuite de celle du tourbillon d'origine, tandis que le ou les autres sous-tourbillons sont considérés comme de nouveaux tourbillons. Pour ces derniers, les dates de première apparition et les caractéristiques de surfaces et d'anomalies correspondantes, sont définies comme celles du tourbillon d'origine lors de la semaine précédant la subdivision.

De même, des jonctions de tourbillons sont observées. Elles peuvent résulter directement de l'analyse en ondelettes, lorsque deux suivis de tourbillons se rejoignent sur une même structure. Parfois, le suivi d'un des tourbillons s'interrompt avant une possible jonction, mais une jonction est diagnostiquée après examen visuel de la série temporelle des tracés de SSHA. Cette interruption du suivi tient au fait que les jonctions semblent se réaliser sur des

temps de l'ordre la semaine, et sont donc mal résolus dans les champs hebdomadaires d'anomalies. Un examen visuel permet alors de déterminer s'il s'agit effectivement d'une jonction, ou plutôt d'une dissipation du tourbillon. La trajectoire du tourbillon issu de la jonction est ensuite considérée comme la poursuite du plus grand tourbillon, bien qu'elle ait été parfois attribuée à un tourbillon qui n'était pas le plus grand. Cela aura également des conséquences dans l'interprétation des résultats.

### **Limitation aux anneaux de dimensions significatives**

Quelques limitations de l'étude sont à noter. Le suivi des tourbillons ne peut tout d'abord pas être totalement exhaustif. Les tourbillons de dimensions spatiales les plus faibles ne peuvent être correctement suivis, pour plusieurs raisons. L'analyse en ondelettes ne parvient pas à détecter les signaux d'amplitudes trop faibles, à moins de retenir un très grand nombre de structures dans l'analyse. Mais un tel choix conduit à une densité extrêmement élevée de structures détectées, du fait de l'intense activité de moyenne échelle de la région, lesquelles ne sont pas toujours représentatives d'un tourbillon et sont de formes très éloignées du cercle ou de l'ellipse. Cela tend à multiplier les problèmes de suivi tels que le saut d'une structure tourbillonnaire à une autre en cours de suivi. De plus, les vitesses de déplacement des petites structures, a priori du même ordre que celles des anneaux de taille moyenne, sont telles que le centre d'un tourbillon pour une semaine donnée ne se retrouve plus dans le contour du tourbillon obtenu une semaine plus tôt. Le suivi est donc fréquemment interrompu. C'est pourquoi une limitation sur les dimensions des tourbillons à prendre en compte par l'analyse en ondelettes a été fixée. Pour cela, quelques tests ont permis d'établir qu'une limitation aux structures comprenant au moins 24 points de grille permettait le suivi de l'ensemble des tourbillons de taille significative, et un filtrage des plus petites structures.

Cette restriction de l'étude aux structures importantes, qui tient à l'outil d'analyse en ondelettes mais également à la résolution spatio-temporelle des champs d'anomalies de SSH, a toutefois des conséquences limitées vis à vis des objectifs de l'étude. Les tourbillons de faibles dimensions semblant être résolus dans les produits altimétriques, sont relativement peu nombreux. Un examen des masses anticycloniques libérées par la retroflexion indique qu'elles sont le plus souvent de taille importante, et les subdivisions qu'elles subissent donnent le plus souvent naissance à des tourbillons de dimensions comparables, donc considérés dans l'analyse. De plus, les tourbillons les plus petits semblent se dissiper très rapidement dans le milieu ambiant ne contribuant ainsi que peu aux échanges indo-

atlantiques. D'autant plus que, du fait de leurs faibles dimensions, le transport qui leur est associé est relativement peu significatif devant celui des anneaux de grandes tailles.

## 2.4 Résultats

### 2.4.1 Etude générale de l'ensemble des tourbillons recensés

#### 2.4.1.1 Caractéristiques spatio-temporelles générales

Un total de 199 trajectoires de tourbillons, représentées sur la Figure 2.5, sont identifiées sur la période allant du 14/10/1992 au 03/01/2007. Seuls les tourbillons initiaux se détachant de la retroflexion après le 14/10/1992 sont comptabilisés, et non ceux déjà présents à l'ouest. Par ailleurs, 6 tourbillons identifiés sont toujours présents dans le domaine d'étude en fin de période d'étude. Parmi ces 199 trajectoires figurent celles des sous-tourbillons. Pour rappel, lors d'un événement de subdivision d'un tourbillon, la trajectoire du tourbillon de plus grande surface ainsi formé est considéré comme la poursuite de la trajectoire du tourbillon d'origine ; les autres tourbillons formés sont considérés comme de nouvelles structures, nommées « sous-tourbillons ».

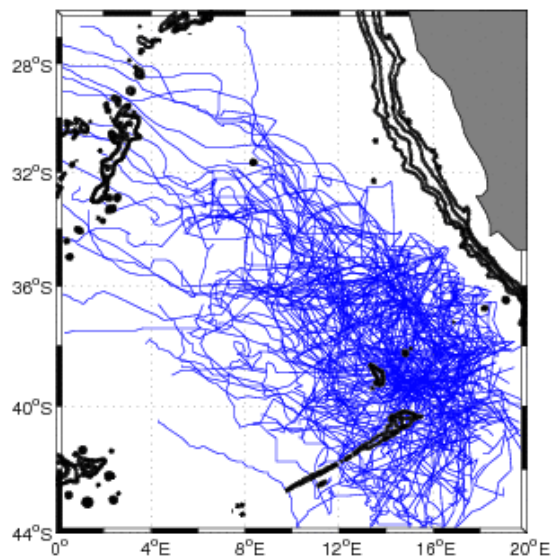


Figure 2.5. Tracé des trajectoires des 199 anticyclones identifiés entre le 14 octobre 1992 et le 3 janvier 2007.

Le fait que l'on ne puisse tenir compte des tourbillons préexistants provient de ce que, dans la méthode mise en place, les tourbillons sont repérés à leur détachement de la retroflexion. Il n'est donc pas possible de savoir si les anticyclones présents le 14/10/1992 sont directement issus de la retroflexion.

Les trajectoires obtenues montrent une variabilité spatiale importante, notamment entre 10°E et 18°E, alors que le tracé schématique du corridor des Aiguilles proposé par Garzoli et Gordon (1996) emprunte une gamme de latitude beaucoup moins importante (Figure 2.1). Leur corridor passe entre le mont sous-marin Erica et la côte africaine, alors que la présente analyse montre que des anticyclones passent régulièrement plus au sud.

Le temps de suivi cumulé des 199 trajectoires est de 4342 semaines, soit 83.2 ans. Le temps moyen de suivi d'une trajectoire est donc de 21.8 semaines, soit 5 mois. A noter que pour ce calcul l'âge des subdivisions n'est pas « corrigé ». C'est à dire que lorsqu'un sous-tourbillon naît d'une subdivision, la date de la subdivision est considérée comme celle de naissance du tourbillon. Ainsi son âge n'est que d'une semaine.

Par la suite, l'âge des sous-tourbillons est souvent augmenté du temps de propagation du tourbillon d'origine, depuis sa naissance jusqu'à la date précédant la subdivision. Cet âge, dit « corrigé », est plus adapté à l'analyse de l'avancée des masses d'eau associées aux tourbillons dans l'océan Atlantique et de l'évolution de leurs propriétés depuis leur détachement de la retroflexion. L'âge corrigé moyen de tous les tourbillons est de 26.1 semaines, soit près de 6 mois, pour un écart type de 19.4 semaines. La répartition des durées de vies des tourbillons, et le tracé du nombre de tourbillons présents en fonction de l'âge, sont représentés Figure 2.6. Les chiffres donnés ici sont repris dans un tableau récapitulatif (Tableau 2.1), ainsi que la plupart des valeurs données par la suite.

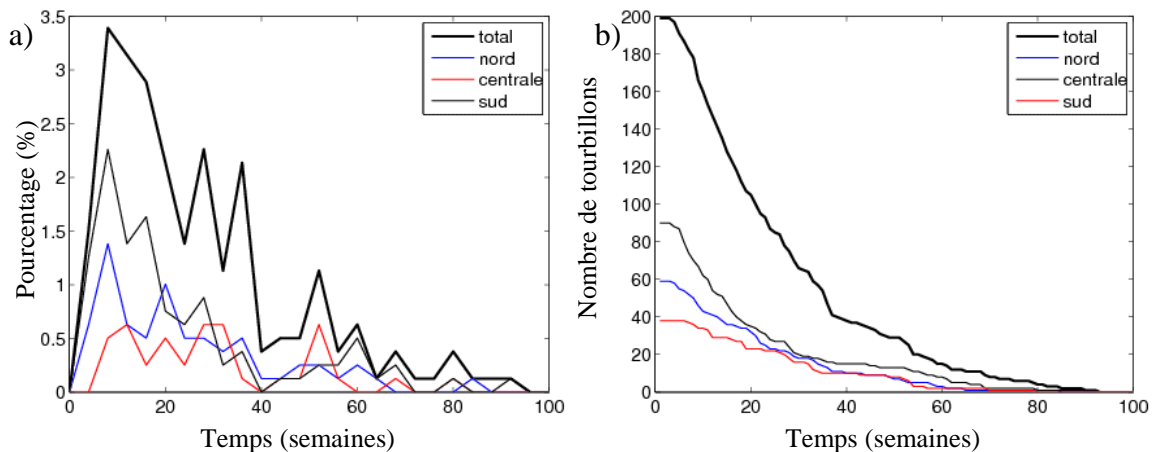


Figure 2.6. a) Tracé du nombre de tourbillons en fonction de la durée de vie, pour l'ensemble des tourbillons (total) et pour chaque voie (nord, centrale et sud). La notion de voie est introduite plus bas. La durée de vie d'un tourbillon issu d'une subdivision est augmentée de la valeur de l'âge du tourbillon d'origine à la date de la subdivision. En conséquence, un tourbillon menant à une subdivision est ainsi comptabilisé comme deux tourbillons avant sa subdivision. b) Tracé de répartition de la durée de vie des tourbillons, exprimée en pourcentage du nombre total de tourbillons, pour l'ensemble des tourbillons et pour chaque voie (tracé moyenné par intervalles de 2 semaines).

Le temps de suivi total, permet de déduire qu'en moyenne 6.6 tourbillons sont présents simultanément dans le domaine d'étude. Goñi et al. (1997) ont proposé un nombre d'anneaux des Aiguilles présents dans le bassin du Cap et l'atlantique sud-est, variant entre 2 et 7. Cette fourchette correspond donc à une moyenne probablement inférieure à 6.6, ce qui tient certainement au fait que les produits altimétriques employées par les auteurs étaient de moins bonne résolution spatio-temporelles.

		Total	Par an	
Correspondance entre lâchers, tourbillons initiaux, et sous-tourbillons	Nbre de lâchers	86 (dont 3 temporaires)	6.1	
	Nbre de tourb. initiaux	102	7.2	
	Nbre de sous-tourb.	97	6.8	
Caractéristiques générales des 199 trajectoires recensés	Nbre de traj. de tourb. (total)	199 (102+97)	14.0	
	Temps total de suivi (sem)	4342		
	Durée de vie des tourb. (âge corrigé, sem)	26.1 (écart type=19.4)		
Caractéristiques des 102 tourbillons initiaux (issus de la retroflection)	Tourb. initiaux ne subissant pas de subd.	Nbre / % tourb. initiaux	47 / 46.1%	3.3
		% du tps de suivi global	18.9%	
		Durée de vie (sem)	17,5 (écart type=15.95)	
	Tourb. se subd. (statistiques jusqu'à la date de subdivision)	Nbre / % tourb. initiaux	55 / 53.9%	3.9
		% du tps de suivi global	9.8%	
		Durée de vie (sem)	7.7 (écart type=7.0)	
Caractéristiques des 97 sous-tourbillons (issus de subdivisions de tourbillons initiaux)	Nbre	152 (199-47)	10.7	
	Tps de suivi (semaines)	3098 (71.35% du temps de suivi total).		
	Durée de vie des tourb. après subdivision (semaines)	20.4		

Tableau 2.1. Caractéristiques principales de l'étude des trajectoires issues de l'analyse en ondelettes, sur la période allant du 14 octobre 1992 au 3 janvier 2007. La partie haute reprend les nombres de lâchers, tourbillons initiaux, et sous-tourbillons, et donne les résultats principaux de l'étude de l'ensemble des tourbillons. La partie basse (2 ligne grisées) donne les caractéristiques principales des tourbillons initiaux et des sous-tourbillons. Les valeurs cumulées sur la durée d'étude sont données dans la colonne 3, tandis que certaines grandeurs sont ramenées à un taux annuel dans la dernière colonne.

#### 2.4.1.2 Correspondance des tourbillons avec les lâchers de la retroflection

Dans un souci de clarification, nous rappelons que le terme « lâcher de masse d'eau », ou « lâcher », tel que défini dans l'étude de la retroflection, correspond à un événement de détachement d'eaux subtropicales de la retroflection. Le terme de « tourbillon initial » est ici réservé aux structures anticycloniques détectées et suivies par l'analyse en ondelettes, lorsqu'elles se détachent de la retroflection. Enfin, le terme de « sous-tourbillon » correspond aux anticyclones suivis dans l'analyse, qui sont issus de tourbillon s'étant subdivisés.

Parmi les 199 trajectoires identifiées, 102 sont directement issues de la retroflection, et correspondent donc à des tourbillons initiaux. Les 97 autres trajectoires sont celles de sous-tourbillons, formés lors de la subdivision d'un tourbillon initial ou d'un sous-tourbillon. En ne considérant que les 102 départs de tourbillons initiaux on constate Figure 2.7 la correspondance fréquente entre un lâcher de masse d'eau anticyclonique, et la formation d'un tourbillon initial. Dans la plupart des cas, le centre du tourbillon se situe à l'est de la limite de la retroflection. Ceci est cohérent avec la convention adoptée pour définir la date de début de suivi d'un tourbillon, c'est à dire avant son détachement de la retroflection au sens du recul à l'est de la limite de la retroflection. Une illustration en est donnée Figure 2.8 (gauche), pour le tourbillon 75a, généré le 16 juin 2004.

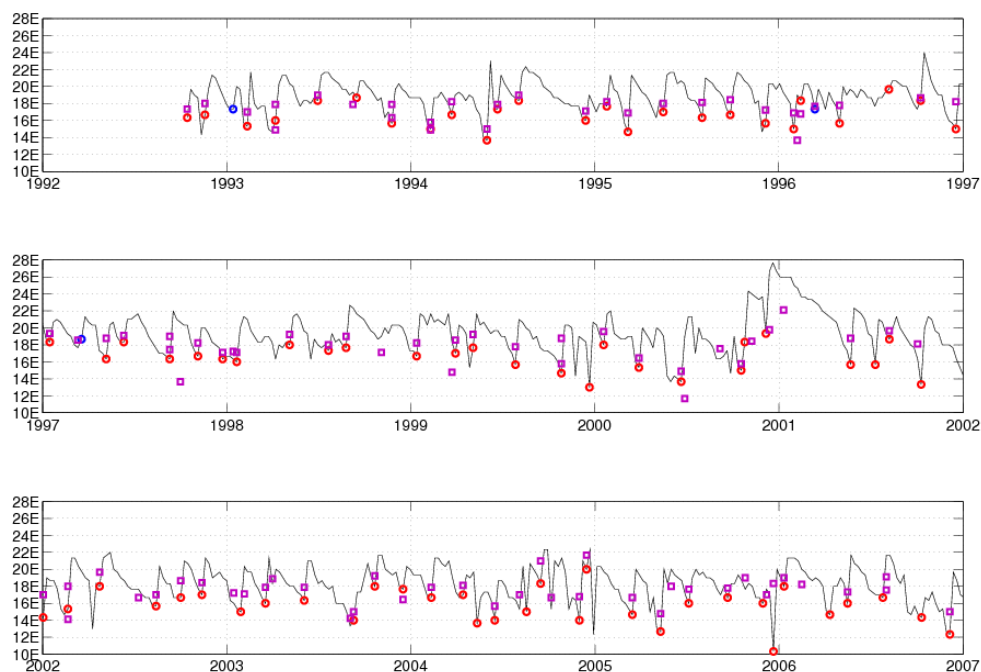


Figure 2.7. En trait noir, l'évolution hebdomadaire de la longitude du point de retroflection trouvée dans l'étude de la retroflection. En ronds rouges (bleus) les positions pour les dates de lâchers de masses d'eaux définitifs (temporaires) définis dans cette même étude. En carrés violets, les positions des 102 départs de tourbillons initiaux.

L'étude de la retroflection présentée au chapitre précédent n'a été réalisée que jusque mai 2005. L'identification des lâchers (définitifs et temporaires) a été poursuivie jusque fin 2006, afin de pouvoir comparer les deux études. On constate que pour les 102 tourbillons initiaux identifiés, on comptabilise 86 lâchers (dont 3 temporaires). Ce constat tient aux raisons mêmes qui ont justifiées l'emploi de l'expression « lâcher de masses d'eau » plutôt que de parler de formation d'anneaux des Aiguilles lors de l'étude de la retroflection. Dans cette étude, avaient été répertoriés les évènements de détachements de la retroflection. Mais dans

certains cas, plusieurs structures tourbillonnaires peuvent être simultanément détachées lors d'un lâcher unique. Une illustration en est donné Figure 2.8 (droite).

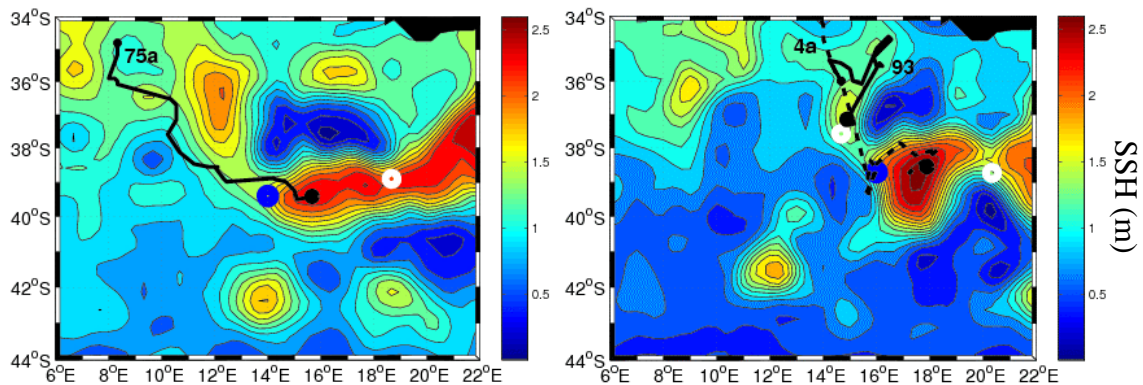


Figure 2.8. A gauche : Schéma de lâcher classique d'un anticyclone (75a). En bleu, la position de la limite de la retroflection lors du début de suivi du tourbillon initial, le 16 juin 2004, dont la position est indiquée en rond noir. Le champ de SSH correspond à cette même date. La trajectoire ultérieure du tourbillon est représentée, ainsi que la position de la limite de la retroflection la semaine suivante (rond blanc). A droite : Lâcher associé à deux tourbillons initiaux, 4a et 93, dont l'un se situe à l'ouest de la retroflection, le 7 avril 1993. Les ronds blancs donnent la position de la retroflection pour la semaine précédente (à l'ouest) et la semaine suivante (à l'est).

La Figure 2.7 permet d'étudier la correspondance entre les lâchers identifiés dans l'étude de la retroflection et les départs de tourbillons initiaux. On constate 63 correspondances univoques entre un lâcher et un unique tourbillon initial sur les 86 lâchers recensés, soit pour 73% des lâchers. Ainsi, un lâcher est le plus souvent associé à la libération d'un unique anticyclone. Ensuite, 16 lâchers sont associés à la libération quasi-simultanée de 2 tourbillons initiaux. Enfin, 7 lâchers ne sont associés à aucun tourbillon initial, tandis que 7 tourbillons initiaux sont libérés sans qu'aucun lâcher ne leurs soit associé. Ces résultats sont repris dans le Tableau 2.2.

Correspondances entre lâchers et tourbillons initiaux	1 lâcher / 1 tourbillon	1 lâcher / 2 tourbillon	1 lâcher / 0 tourbillon	0 lâcher / 1 tourbillon
Nombre	63	16	7	7
% des 86 lâchers	73%	19%	8%	8%

Tableau 2.2. Correspondances entre tourbillons initiaux et évènements de lâchers de la retroflection.

On observe donc 7 évènements de lâchers ne s'accompagnant pas de tourbillons initiaux. Cette apparente incohérence provient du mécanisme accompagnant ces lâchers. Ceux-ci se sont généralement fait progressivement sur les semaines précédentes, par l'alimentation d'un tourbillon déjà détaché (et donc déjà en cours de suivi par l'analyse en ondelettes), et sans qu'une discontinuité dans la longitude de la limite de la retroflection

n'apparaisse. Ainsi, si une masse anticyclonique se sépare effectivement de la retroflexion, aucun nouveau tourbillon initial n'est répertorié.

7 tourbillons initiaux sont formés en l'absence de lâcher. Cela vient de la méthode de détermination des lâchers dans l'étude la retroflexion. Des masses détachées de la retroflexion lors d'un lâcher peuvent en effet être temporairement réintégrées dans la retroflexion, auquel cas le point de retroflexion rebascule sur leur flanc ouest. Lorsque cette réabsorption ne dure pas plus d'une semaine, aucun nouveau lâcher n'est répertorié. En revanche, dans l'analyse en ondelettes, le suivi du tourbillon est interrompu lorsqu'il est réabsorbé par la retroflexion. Le détachement de la masse d'eau la semaine suivante donne alors lieu à la formation d'un nouveau tourbillon initial, qui n'est donc pas associé à un lâcher.

Les différences constatées entre le nombre de lâchers comptabilisés au niveau de la retroflexion (86 dont 3 temporaires), le nombre de tourbillons initiaux détachés de la retroflexion (102), et le nombre total de trajectoires (199, en incluant les sous-tourbillons), montrent la difficulté de définir et dénombrer les anneaux des Aiguilles échangés par an. Comme indiqué plus haut, beaucoup d'études se sont basées sur un nombre fixé d'anneaux des Aiguilles libérés par an et des caractéristiques types associées à ces anneaux pour tenter d'évaluer leurs évolutions temporelles ou les transports qu'ils véhiculent vers l'Atlantique. Or, le nombre important de subdivisions ou de jonctions, entraîne un nombre moyen d'anneaux par an qui est variable selon la façon dont on les définit, et l'endroit où l'on choisit de les compter. A mesure que l'on pénètre dans l'atlantique, leur nombre croît du fait des subdivisions, puis décroît suite aux jonctions de tourbillons ou à leur dissipation dans le milieu ambiant.

#### ***2.4.1.3 Tourbillons initiaux et détachement de la retroflexion***

##### **Positions de départs des tourbillons initiaux**

La Figure 2.9 présente les positions initiales des 102 tourbillons issus de la retroflexion. Pour rappel, il s'agit des positions du centre des tourbillons telles que déterminées par l'analyse en ondelettes. Comme indiqué plus haut, ces positions sont donc légèrement à l'est de la position de la limite de la retroflexion au moment du lâcher correspondant (d'une distance représentative du rayon du tourbillon). On constate à nouveau que les centres des tourbillons sont situés très majoritairement à l'est de la bathymétrie de la dorsale des Aiguilles et des monts sous-marins voisins. Seuls quelques tourbillons semblent



se former à l'ouest de 16°E. Cette longitude semble constituer une limite ouest pour la libération de tourbillons, la distribution chutant fortement plus à l'ouest. Les 3 positions de départ de tourbillons situées au sud la dorsale correspondent à des situations exceptionnelles, au cours desquelles la retroflexion était très avancée vers l'ouest, au-dessus ou au sud de la dorsale des Aiguilles, au moment du détachement du tourbillon.

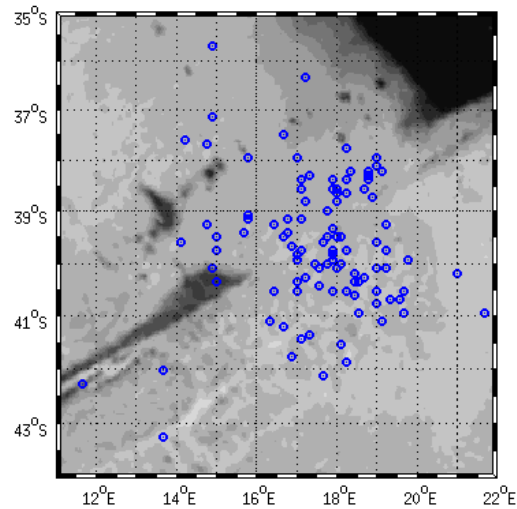


Figure 2.9. Positions de départ des 102 tourbillons émis par la retroflexion.

### Caractéristiques des trajectoires des tourbillons initiaux

Une fois détachés de la retroflexion, les 102 tourbillons initiaux subissent de multiples interactions. Certains se subdivisent, tandis que d'autres se déplacent sans jamais se subdiviser jusque leur fin de suivi. Ainsi (voir Tableau 2.1), 47 tourbillons initiaux se propagent sans jamais se subdiviser. Leur temps de suivi cumulé est de 820 semaines, soit 18.9% du temps de suivi total. Ainsi, 18.9% en moyenne des tourbillons observés dans le domaine d'étude, à un instant donné, n'ont pas subi et ne subiront pas de subdivision. Ils représentent 23.6% du nombre total de tourbillons recensés, et présentent une durée de vie moyenne de 17,4 semaines (écart type de 15.9 semaines), soit 10 semaines de moins que l'âge corrigé moyen de l'ensemble des tourbillons. Il semblerait donc que le fait qu'un tourbillon se subdivise n'induit pas une érosion plus rapide, mais plutôt l'inverse. Une explication possible serait que les tourbillons ne se subdivisant pas sont probablement peu profonds, donc peu sensibles à la bathymétrie mais aussi moins durables dynamiquement. Cela semble probable au vu de leurs trajectoires (Figure 2.10), qui ne semblent pas éviter la dorsale des Aiguilles ou les monts Schmidt-Ott et Erica.

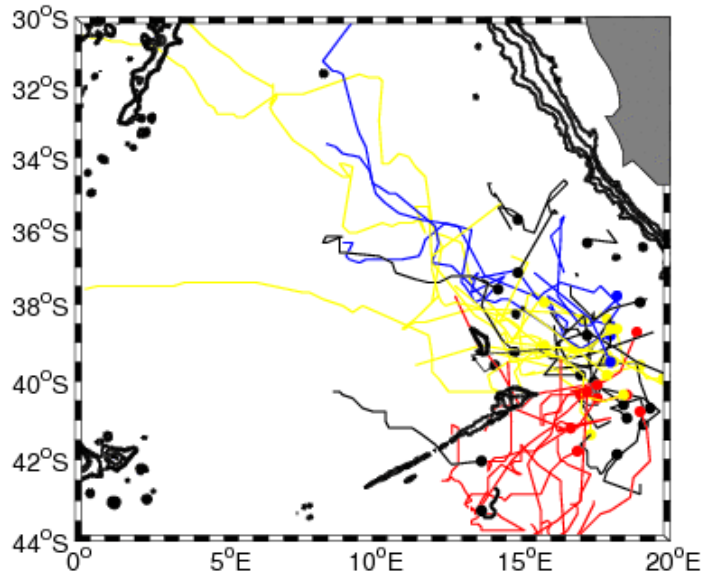


Figure 2.10. Trajectoires des tourbillons issus de la retroflexion, et ne subissant jamais de subdivisions. En bleu ceux de la voie nord, en jaune la voie centrale, en rouge la voie sud, et en noir ceux n'appartenant à aucune voie.

Une part relativement faible de ces tourbillons circule entre le talus continental et le mont Erica, en comparaison de la proportion de l'ensemble des tourbillons empruntant un tel chemin (voir plus loin pour l'analyse des « voies »). Or cette région semblerait pourtant plus propice à une dérive sans subdivision, la bathymétrie y étant moins marquée. Le nombre de ces tourbillons dérivant au sud de la dorsale est en revanche en proportion plus grande que sur l'ensemble des tourbillons. Comme la durée de vie de ces tourbillons est nettement plus faible que les autres tourbillons (voir plus bas), cela peut également expliquer en partie la durée de vie moyenne faible des tourbillons ne se subdivisant pas.

Des 102 tourbillons initialement émis par la retroflexion, 47 ne se subdivisent pas. Les 55 autres conduisent à une subdivision (au moins). Ainsi, 54% des tourbillons issus de la retroflexion sont sujets à subdivision. Leur durée de vie cumulée avant leur première subdivision (il arrive qu'un tourbillon se subdivise plusieurs fois) est de 424 semaines, soit 9.8% du temps de suivi total (les sous-tourbillons issus des subdivisions ne sont pas comptabilisés). Leur temps de propagation avant subdivision est donc en moyenne de 7.7 semaines (écart type de 7.0 semaines).

#### **2.4.1.4 Subdivisions et sous-tourbillons**

Les tourbillons initiaux qui se subdivisent peuvent mener à la formation de plusieurs sous-tourbillons, au cours d'une ou plusieurs subdivisions. L'ensemble des lieux de subdivisions est représenté Figure 2.11a. Ces subdivisions concernent des tourbillons initiaux,

comme des sous-tourbillons. Les tourbillons semblent se subdiviser majoritairement à l'est et au voisinage de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles, qui semble ainsi jouer un rôle déclencheur. Des subdivisions sont également recensées au sud-est du bassin du Cap, au cours de la dérive des tourbillons dans le courant du Benguela.

Pour caractériser le comportement des tourbillons après subdivisions, les 97 sous-tourbillons sont considérés. Mais il faut également prendre en compte les tronçons de trajectoires des tourbillons d'origine après subdivision. Ainsi, seuls sont exclus les 47 tourbillons initiaux ne subissant jamais de subdivisions, et les trajectoires des 55 autres tourbillons initiaux avant leur première subdivision. Cela concerne donc 152 trajectoires de tourbillons (199-47). Leur temps de suivi cumulé est de 3098 semaines, soit 71.35% du temps de suivi total. Leur durée de vie moyenne est de 20.4 semaines. Cela permet de conclure qu'en moyenne 71.35% des tourbillons observés dans la région d'étude, à un instant donné, ont connu une subdivision depuis leur détachement de la retroflexion.

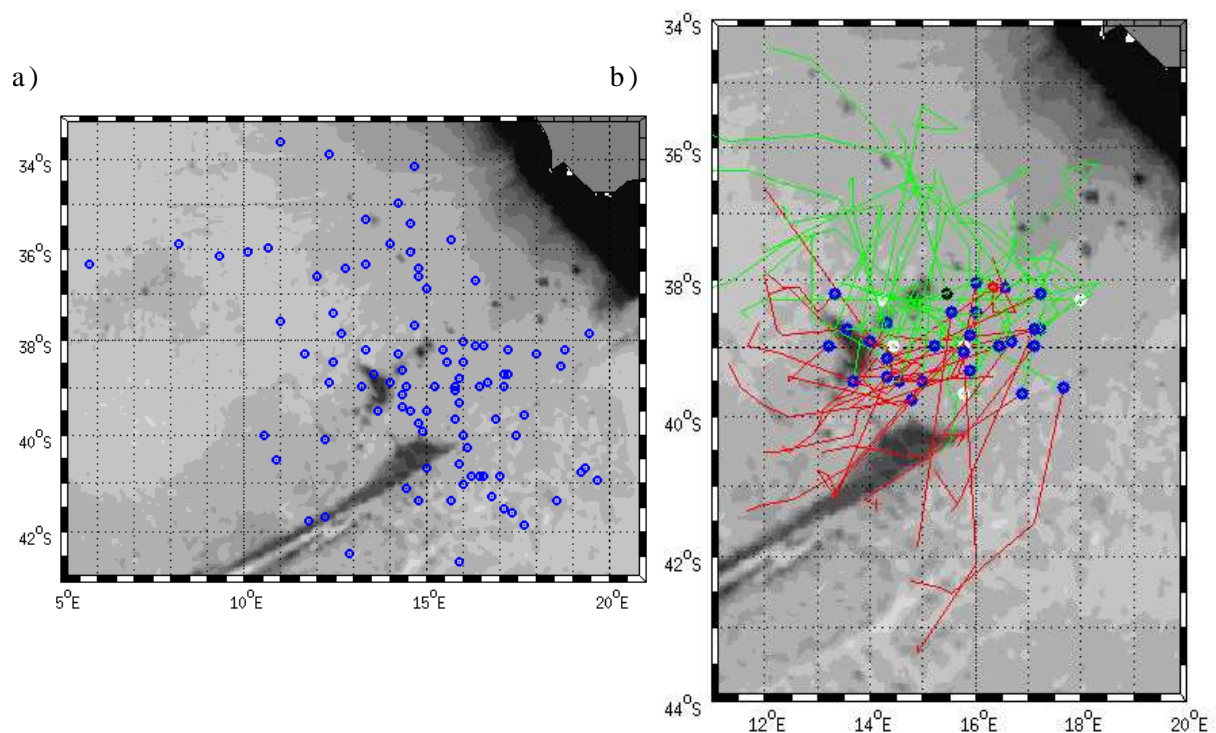


Figure 2.11. a) Positions de départ des 97 sous-tourbillons, la semaine précédant chaque subdivision. b) Trajectoires des tourbillons et sous-tourbillons après subdivisions, en ne considérant que les 34 subdivisions ayant lieu entre 13°E et 18°E, et 40°S et 38°S. 82% de ces 34 subdivisions conduisent à la formation de tourbillons dont les trajectoires divergent, l'une contournant la bathymétrie par le nord, une autre par le sud (se référer au texte pour plus de détails sur le tracé).

## **Divergence de trajectoires après subdivision au voisinage de la dorsale des Aiguilles**

Afin de mieux comprendre l'influence de cette bathymétrie sur le mécanisme de subdivision, les trajectoires des tourbillons s'étant subdivisés, et des sous-tourbillons issus des subdivisions, sont tracés Figure 2.11b. Sur cette figure, sont seulement considérées les 34 subdivisions ayant lieu près de la bathymétrie, entre 13°E et 18°E, et 40°S et 38°S. Les trajectoires ne sont ensuite tracées que pour les 5 semaines suivant chaque subdivision. Lorsqu'un des tourbillons se trouve, la première semaine suivant la date de la subdivision, au nord du lieu de la subdivision, sa trajectoire est tracée en vert. Si elle se trouve au sud, elle est tracée en rouge. On constate alors une répartition équilibrée de trajectoires vers le nord et vers le sud, tendant à contourner la bathymétrie. Par ailleurs, les trajectoires des tourbillons issus de chacune des subdivisions présente presque toujours une divergence nord/sud. Ainsi, sur la figure, les lieux des subdivisions pour lesquelles les trajectoires divergent après subdivision sont représentés en bleu. On en dénombre 28, soit 82% des subdivisions considérées ici. Seules 5 subdivisions conduisent à la formation de tourbillons dérivant tous vers le nord (lieux de subdivisions représentés en blanc), et une seule conduit à des tourbillons dérivant au sud (lieu de subdivision représenté en rouge). Ce type de divergence nord/sud de trajectoires, après subdivision au voisinage de la dorsale des Aiguilles, a été observé pour des tourbillons échantillonnés en mer (Arhan et al. (1999)).

### **2.4.1.5 Fin de vies des tourbillons**

La fin du suivi d'une trajectoire par l'analyse en ondelettes peut correspondre à 2 situations. L'analyse peut être interrompue en raison d'un signal trop faible, ce qui correspond à sa dissipation ou du moins à la perte de l'essentiel de sa signature en anomalie de SSH. Par ailleurs, un tourbillon peut opérer une jonction avec un autre tourbillon de taille plus importante. Dans ce cas le suivi en est interrompu, et la trajectoire ultérieure est attribuée au second tourbillon en raison de sa taille.

Sur les 199 trajectoires identifiées, 38 s'achèvent sur des jonctions de tourbillons, dont 2 concernent simultanément 3 tourbillons. Les positions des tourbillons à la première date de regroupement en un seul tourbillon sont représentées Figure 2.12a. Leur distribution spatiale est assez proche de celle des subdivisions, avec une concentration plus forte à proximité de la bathymétrie. Ceci s'explique probablement par les nombreuses subdivisions ayant lieu à cet endroit. Lors d'une subdivision, les tourbillons formés sont souvent « expulsés » à grande vitesse, ce qui pourrait faciliter des jonctions avec des tourbillons voisins.

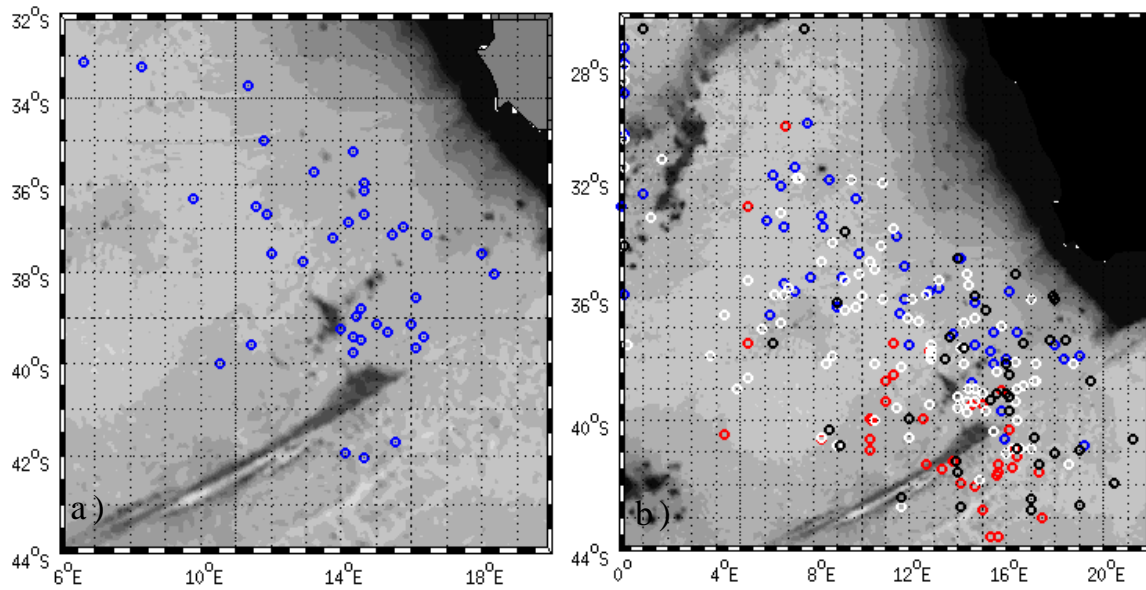


Figure 2.12. a) Positions des 38 jonctions de tourbillons. b) Positions finales de l'ensemble des tourbillons en fonctions des voies empruntées (voir plus bas). En bleu pour la voie nord, blanc la voie centrale, rouge la voie sud, et noir les 43 tourbillons n'appartenant pas intégralement à l'une des voie (voir plus bas l'étude des voies). Seuls 18 de ces 43 tourbillons ne contribuent effectivement à aucune voie.

La Figure 2.12a illustre enfin les positions finales de l'ensemble des 199 tourbillons de l'étude, dont celles des 38 tourbillons dont les trajectoires s'achèvent lors de jonctions. Les couleurs correspondent aux différentes voies empruntées par les tourbillons (voir plus bas). On note que plusieurs positions finales sont situées le long de la longitude 0°E. Il s'agit de tourbillons dont le suivi a été interrompu du fait de la limitation du domaine d'étude, alors qu'ils poursuivaient leurs propagations vers l'ouest. On remarque une proportion importante de trajectoires s'interrompant au voisinage de la retroflexion et de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles, attestant des nombreuses influences subies par les tourbillons dans cette région (jonctions, dissipations, ou réabsorption par la retroflexion). A l'ouest du bassin des Aiguilles, la répartition des positions de fin de suivi est assez uniforme le long de la direction générale de propagation vers le nord-ouest. Cependant, cette répartition chute fortement à l'ouest de 6°E. Tous les tourbillons parvenant à se propager plus loin parviennent à atteindre la dorsale de Walvis, et pour la majorité d'entre eux, à la franchir.

#### 2.4.1.6 Statistiques sur les trajectoires et propriétés des tourbillons

Sur la Figure 2.13 est représentée la densité de probabilité de présence spatiale des positions des centres des tourbillons, calculée sur des carrés de 1°x1°. Ce diagramme combine deux types d'informations, qui doivent être toutes deux considérées dans l'interprétation du diagramme. En effet, une région de densité de probabilité forte peut correspondre à une

trajectoire fréquemment empruntée par les tourbillons et/ou une région de vitesse de déplacement faible, voir de stagnation, des tourbillons. Sur la Figure 2.14 (première ligne) est représentée la vitesse moyenne sur cette même grille spatiale, et l'écart type en cette vitesse. Les échelles de couleurs pour la représentation des vitesses moyennes et de leurs écarts types sont différentes, les moyennes étant nettement plus faibles.

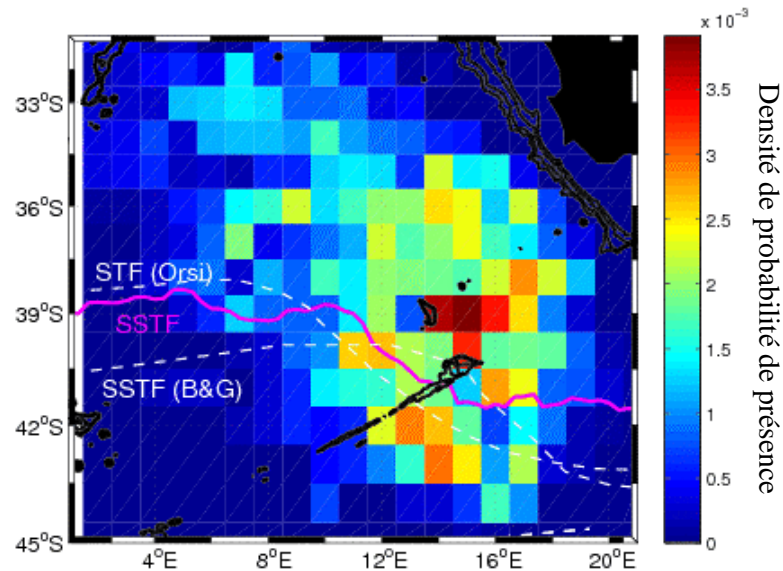


Figure 2.13. Densité de probabilité de présence des tourbillons par  $1^\circ \times 1^\circ$  (ramenée aux 4342 semaines de suivi cumulées). Les fronts subtropicaux de Orsi et al. (1995) et sud-subtropicaux de Belkin et Gordon (1996), sont représentés, ainsi que le front SSTF moyen calculé dans l'étude ultérieure de la branche sud de la connexion supergyre.

On constate une forte présence de tourbillons à l'est de la bathymétrie principale (dorsale et mont sous-marins). Cette bathymétrie semble donc gêner la progression des tourbillons vers l'Atlantique, et provoquer leur stagnation temporaire.

On constate également une présence assez marquée au sud de la dorsale, entre  $12^\circ\text{E}$  et  $15^\circ\text{E}$ . De plus, les moyennes et écarts types des vitesses des tourbillons sont très faibles à cet endroit. Ainsi, la forte probabilité de présence au sud de la dorsale traduit plus une stagnation des tourbillons qu'un passage fréquent de tourbillons. Ce constat nous a conduit par la suite à étudier plus spécifiquement les tourbillons se dirigeant au sud de la dorsale.

Les tracés de moyennes et d'écarts types pour les diamètres des tourbillons et les anomalies de SSH en leur centre sont représentés Figure 2.14 (lignes 2 et 3). On remarque une érosion des 2 grandeurs à mesure que l'on progresse vers le nord-ouest. Cependant, l'érosion est plus marquée sur les anomalies, alors que les diamètres des tourbillons le long du talus continental sont sensiblement identiques à ceux de la région de la réflexion.

Sur la Figure 2.14 (dernière ligne) est représenté l'âge corrigé moyen des tourbillons, en semaines. On constate un vieillissement vers le nord-ouest, la direction de propagation

principale des tourbillons. Le vieillissement est graduel au nord de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles, en direction du nord-ouest, attestant d'une dérive facilitée dans l'Atlantique. En revanche, l'âge moyen des tourbillons est élevé à l'ouest du mont Schmidt-Ott. Ceci s'explique par i) des tourbillons ayant été ralentis lors de leur franchissement d'est en ouest de ce mont sous-marin (entre 38°S et 40.5°S) et ii) des tourbillons ayant stagné au sud de la dorsale avant de franchir vers le nord.

Les évolutions des diamètres moyens et des anomalies moyennes de SSH au centre des tourbillons, en fonction de leur âge corrigé, sont tracées sur la Figure 2.15. En accord avec les observations des évolutions spatiales de ces grandeurs évoquées plus haut, on constate une érosion plus rapide de l'anomalie au centre des tourbillons que de leur diamètre. L'allure du profil de décroissance des anomalies associées aux anneaux est en assez bon accord avec celle trouvée par Schouten et al. (2000) et reproduite sur la Figure 2.2. Cependant les valeurs d'anomalies sont ici plus fortes, avec 0.73 m en moyenne en début de vie (contre environ 0.45 m), et une décroissance stagnant vers 0.3 m (contre 0.2 m). L'amplitude de la décroissance obtenue, de 0.43 m environ, est donc également plus importante. Une première explication des valeurs plus faibles de Schouten et al. (2000) tient aux données altimétriques qu'ils utilisent. Ne disposant que des mesures de TOPEX/Poseidon, les valeurs d'anomalies de SSH qu'ils obtiennent sont fortement interpolées, ce qui pourrait lisser les anomalies et fournir des valeurs plus faibles que dans notre jeu de données. Cet effet peut également expliquer l'amplitude plus faible de la décroissance observée par Schouten et al., les anomalies importantes des tourbillons en début de vie pouvant subir une sous-évaluation plus importante au cours de cette interpolation. Une seconde explication aux plus fortes anomalies initiales obtenues dans notre étude tient au fait que les tourbillons sont suivis de façon plus certaine depuis l'instant de leur détachement de la retroflexion. La décroissance étant la plus rapide en début de vie, une détection tardive de certains tourbillons, dans l'étude de Schouten et al., diminuerait fortement la valeur moyenne de début de vie des tourbillons.

La décroissance observée ici est plus rapide que celle calculée par Schouten et al. (2000), puisque 50% de la perte du signal d'anomalie a lieu au cours des 2,5 premiers mois, contre 4 mois selon l'étude précédente. L'amplitude de la décroissance étant par ailleurs plus élevée, les taux de décroissance sont plus forts, de 8,5 cm/mois pour les 2,5 premiers mois contre 5 cm/mois pour les 4 premiers mois.



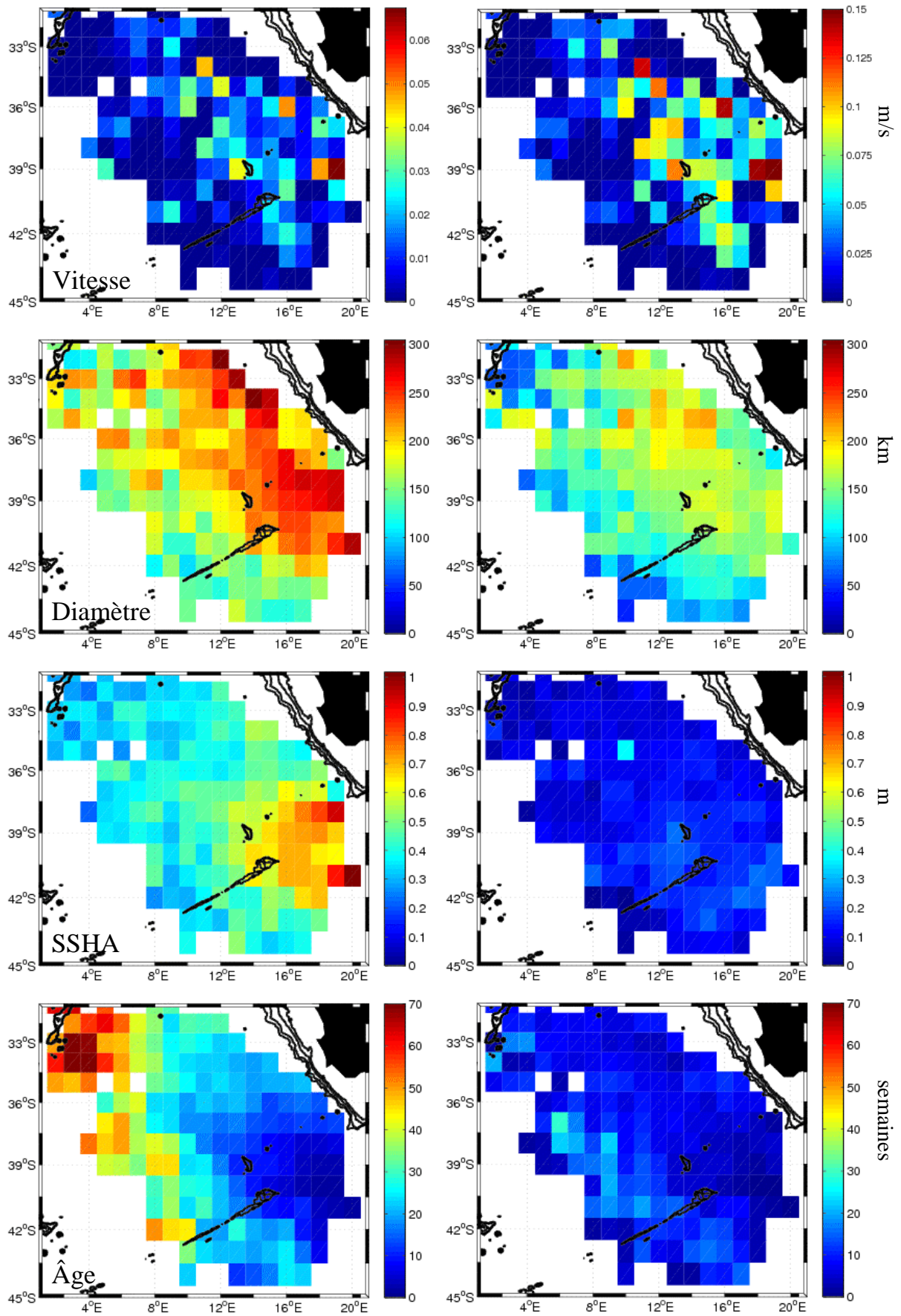


Figure 2.14. Première ligne : à gauche, vitesse moyenne (m/s) des tourbillons par région de



$1^\circ \times 1^\circ$  ; à droite, écart type sur cette valeur. Les valeurs sont affichées lorsqu'un minimum de 5 tourbillons sont comptabilisés sur l'ensemble de la série temporelle. Deuxième ligne, idem pour les diamètres des tourbillons (km). Troisième ligne : anomalies de SSH au centre des tourbillons (m). Dernière ligne : âge corrigé des tourbillons (semaines), prenant en compte l'âge des tourbillons d'origine pour les sous-tourbillons.

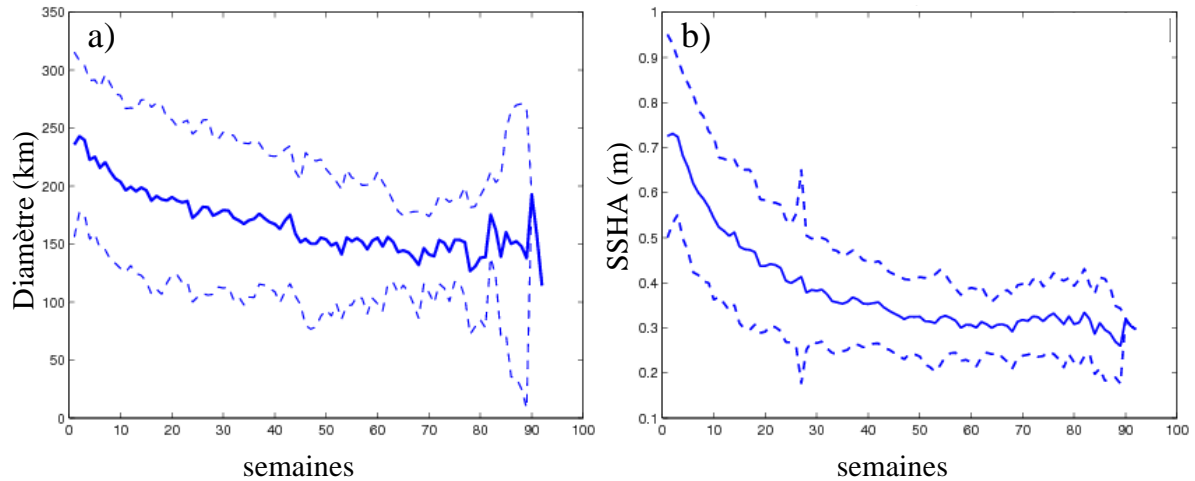


Figure 2.15. a) évolution du diamètre moyen et de l'écart type (en km) de l'ensemble des tourbillons en fonction de l'âge corrigé (en semaines). b) idem pour l'anomalie moyenne (en m) au centre des tourbillons.

Le diamètre moyen initial est d'environ 240 km, et la décroissance se fait jusqu'à un palier voisin de 150 km, approché au bout d'environ 50 semaines. Ces valeurs sont plus faibles que les diamètres moyens de 324 km proposés par Lutjeharms (1981), et en accord avec les 240 km proposés par Duncombe Rae (1991). Cependant, leurs valeurs ne tiennent pas compte de l'âge des anneaux, qui influe pourtant sur leur diamètre. La meilleure résolution des produits d'altimétrie de notre étude permet probablement de recenser des tourbillons de faibles dimensions non identifiés par ces auteurs, expliquant que le diamètre moyen que nous obtenons est plus faible que celui proposé par Lutjeharms (1981).

## 2.4.2 Etude des trajectoires par voies

L'analyse de l'ensemble des trajectoires présentée ci-dessus a permis quelques constatations quant au comportement des anticyclones, en particulier dans le voisinage de la retroflexion. Les multiples interactions d'anneaux diagnostiquées avec la bathymétrie ou la mésoéchelle permettent de dégager des schémas de trajectoires et d'interactions récurrents (notamment en lien avec la dorsale des Aiguilles). Cela donne une image moins chaotique que celle suggérée par l'appellation de « Chaudron du Cap » (Boebel et al. (2003)). Le domaine de propagation des tourbillons est cependant plus étalé que celui proposé schématiquement par Garzoli et Gordon (1996), et recouvre largement la bathymétrie de l'ouest du Bassin des

Aiguilles. La cinématique de tourbillons individuels est loin de correspondre à une dérive uniforme le long de ce « corridor », bien que l'évolution spatiale des âges corrigés des tourbillons montre un vieillissement progressif vers l'Atlantique.

La région immédiatement à l'est de la bathymétrie évoquée plus haut (Mont Erica, Mont Schmidt-Ott, pointe nord-est de la dorsale des Aiguilles) s'avère être un lieu privilégié de subdivisions, de jonctions, et de stagnation des tourbillons avant leur dérive dans l'Atlantique. Cette bathymétrie a donc un rôle perturbateur sur l'avancée des tourbillons. De nombreuses trajectoires ont été diagnostiquées au sud de la dorsale des Aiguilles. D'autres la contournent par le nord, en longeant le continent africain. Ces tourbillons, évitant la bathymétrie, pourraient présenter des modifications hydrologiques et une cinématique différentes de ceux passant par le sud, et jouer un rôle distinctif dans les échanges interocéaniques. Ces constats conduisent à envisager des voies privilégiées de propagation des tourbillons, dont la caractérisation permettrait une évaluation plus fine des échanges indo-atlantiques par la branche nord du supergyre. Une première famille de tourbillons semble ainsi s'échapper par le passage situé entre le Mont Erica et le talus continental. Une seconde famille est constituée par des tourbillons s'échappant au sud de la dorsale des Aiguilles avant de dériver plus ou moins loin dans l'Atlantique. Enfin, une troisième famille est constituée de tourbillons dérivant d'est en ouest entre le Mont Erica et l'extrémité nord de la dorsale, et interagissant donc fortement avec ces 2 reliefs sous-marins ainsi qu'avec le Mont Schmidt-Ott plus à l'ouest.

#### **2.4.2.1 Méthode de détermination des voies**

Afin de définir les trois voies évoquées ci-dessus, et les familles de tourbillons qui les empruntent, la méthode suivante est mise en place. Trois sections sont définies telles que représentées sur la Figure 2.16, définissant les voies baptisées « nord », « centrale » et « sud ». Pour chacune des sections, on recherche les tourbillons se trouvant initialement à l'est de la section et parvenant à la franchir. L'ensemble des tourbillons satisfaisant cette condition appartient alors à la famille de la voie considérée. De plus, lorsqu'une trajectoire franchissant ainsi une section est celle d'un sous-tourbillon, le tronçon de trajectoire du tourbillon initial dont il est issu, jusqu'à la date de la subdivision ayant formé le sous-tourbillon, est intégré dans la trajectoire du sous-tourbillon. Le tourbillon initial est donc pris en compte dans le décompte des tourbillons attribué à la voie concernée. Enfin, lorsqu'un tourbillon empruntant une des voies se subdivise après franchissement de la section définissant la voie, les sous-tourbillons formés sont comptabilisés dans cette même voie. Cela revient à considérer que les

eaux véhiculées par les sous-tourbillons sont également issues de la voie concernée. L'ensemble de ces trajectoires constitue la famille de tourbillons associés à chaque voie.

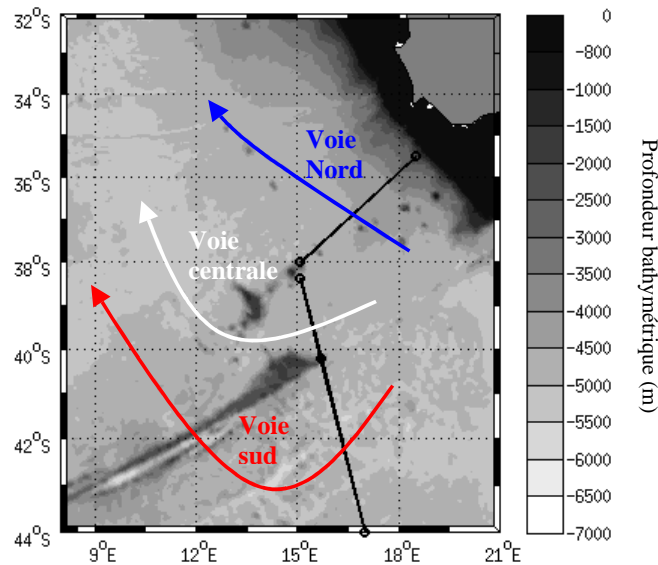


Figure 2.16. Schéma de définition des voies nord, centrale, et sud. Les tourbillons de chaque voie sont déterminés par le franchissement du segment correspondant représenté en noir. Le mode d'attribution des trajectoires par voie est présenté plus haut.

Les extrémités des sections sont placées au niveau des éléments bathymétriques que l'on suppose encadrer les diverses voies. Si la position de l'une des extrémités des sections nord et sud est dictée par la bathymétrie, leur deuxième extrémité peut être choisie plus librement. Celles-ci sont alors placées suffisamment à l'ouest, de sorte que la majorité des trajectoires des tourbillons initiaux débutent à l'est des sections. Ainsi, un nombre maximal de franchissements peut être comptabilisé, ce qui permet d'attribuer le plus de trajectoires possible à l'une des voies.

Ce mode de détermination des voies a des conséquences à prendre en compte dans l'analyse et l'interprétation des résultats. D'une part, le regroupement des tourbillons des 3 voies ne recouvre pas l'ensemble des tourbillons recensés dans l'analyse en ondelettes. En effet, les tourbillons initiaux dont la position initiale est à l'ouest des trois sections n'appartiennent à aucune des voies, ne croisant aucune des trois sections dans leurs trajectoires (voir Figure 2.9). Ces tourbillons étant libérés au-delà des 3 sections, leurs trajectoires n'ont certainement pas subi la même influence de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles que les tourbillons libérés plus à l'est. Pour cette raison, ils ne peuvent être classés parmi l'une des trois familles, lesquelles sont définies dans le souci d'évaluer l'effet de cette bathymétrie sur les trajectoires des tourbillons. Les 3 voies ne peuvent donc être considérées comme complémentaires.

Outre leur non-complémentarité, les 3 voies ne sont pas non plus entièrement dissociées. Lorsqu'un tourbillon initial libéré par la retroflexion se subdivise avant franchissement d'une des sections de définition des voies, les 2 tourbillons formés peuvent emprunter des voies différentes (un des tourbillons est considéré comme la poursuite du tourbillon initial, l'autre comme un sous-tourbillon). Dans un tel cas, le tronçon de trajectoire du tourbillon initial, jusqu'à la date de la subdivision, a été ajouté à la voie empruntée par le sous-tourbillon. Le tourbillon initial participe alors aux 2 voies, dans l'intégralité de sa trajectoire pour l'une, et uniquement jusqu'à la formation du sous-tourbillon pour l'autre. Ainsi, un même tronçon de trajectoire peut être attribué à plusieurs voies. Dans l'exploitation des résultats, on ne peut donc considérer les 3 voies comme totalement indépendantes, ni que leur regroupement est représentatif des 199 tourbillons de l'analyse.

#### **2.4.2.2 Etude des voies**

##### **Statistiques générales**

En identifiant les tourbillons de chaque voie, un total de 186 trajectoires sont impliqués dans l'une ou l'autre des voies. 59 d'entre eux (31.7%) empruntent la voie nord, 90 (48.4%) la voie centrale, et 37 (19.9%) la voie sud. Cependant, certains de ces tourbillons sont des tourbillons initiaux impliqués dans plusieurs voies, pour les raisons indiquées plus haut. Ainsi, le nombre de tourbillon non impliqués dans les voies est supérieur à la différence entre le nombre de tourbillons identifiés dans l'étude (199), et le nombre de trajectoires attribuées à l'une ou l'autre des voies (186), soit 13. On comptabilise en effet 18 tourbillons, tous initiaux, non impliqués dans les différentes voies (représentés en noir sur la Figure 2.10). On constate par ailleurs que 25 trajectoires de tourbillons, tous initiaux également, ne participent aux voies que pour un tronçon de leur trajectoire. Ils se sont subdivisés avant de franchir une section, mais n'en ont pas franchies par la suite, alors qu'un des sous-tourbillons générés est parvenu à franchir une section. La plupart des résultats quantitatifs importants exposés par la suite, concernant les 3 voies, sont repris dans le Tableau 2.3.

Les 3 voies identifiées vont être abordées ici. Les tracés des évolutions spatiales et temporelles de diverses grandeurs, présentés plus haut pour l'ensemble des tourbillons (Figure 2.14 et Figure 2.15), sont repris pour chacune des voies. Ils sont ici présentés et discutés, avant une présentation d'études spécifiques liées au comportement des tourbillons de chaque voie. Une évaluation du transport associé aux tourbillons de chaque voie, ainsi qu'à l'ensemble des tourbillons de l'étude, est ensuite présentée. Enfin une analyse comparative

des voies est réalisée, en revenant plus amplement sur les tracés d'évolutions spécifiques à chaque voie.

## **Voie Nord**

### **Caractérisation des trajectoires : une voie propice aux subdivisions**

Les trajectoires de tourbillons de la voie nord sont représentées Figure 2.17 (à gauche). Les tourbillons se propagent vers l'Atlantique sud en passant entre la côte africaine et le mont sous-marin Erica. Le diagramme de densité de probabilité de présence associé à la position des centres des tourbillons est représenté sur la même figure (à droite). Les tracés d'évolutions spatiales moyennes des âges corrigés, des diamètres, des anomalies de SSH aux centres des tourbillons, et de leurs vitesses de déplacement sont tracés Figure 2.18. On retrouve une érosion plus rapide de l'anomalie de SSH au centre des tourbillons que de leur surface, qui avait déjà été constatée sur l'étude de l'ensemble des tourbillons.

31 trajectoires de tourbillons franchissent la section de définition de la voie nord (représentées en bleu Figure 2.17). 17 d'entre elles, soit 55%, sont celles de tourbillons initiaux libérés par la retroflexion, qui n'ont donc pas subi de subdivision avant de franchir la section. Ce chiffre est seulement de 37.5% si l'on considère l'ensemble des 3 voies. Cela montre la relative facilité pour les tourbillons de cette voie à franchir la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles.

24 sous-tourbillons sont formés par subdivision de certains des 31 tourbillons, après leur franchissement de la section de définition de la voie nord (représentés en vert Figure 2.17). On peut évoquer un « taux de subdivision après franchissement », rapport du nombre de sous-tourbillons formés après franchissement, et du nombre de franchissements. Ce taux est de 0.77, ce qui signifie que plus de 3 tourbillons sur 4 franchissant la section de définition de la voie se subdivisent (en admettant une unique subdivision par tourbillon, donnant lieu à la formation de 2 tourbillons). Le taux moyen pour l'ensemble des voies n'étant que de 0.47, les tourbillons de la voie nord ont donc une propension comparativement très forte à se subdiviser au cours de leur dérive dans l'Atlantique. On constate effectivement sur la Figure 2.11 (à gauche) que de nombreuses subdivisions ont lieu au nord-ouest de la section de définition de la voie nord. Le bassin du Cap, dans cette zone, n'est pas aussi profond que plus à l'ouest, et la proximité du talus continental pourrait aussi jouer un rôle dans la subdivision des tourbillons.

Le temps de suivi cumulé des trajectoires de cette voie est de 1385 semaines, soit 31.90% des 4342 semaines de suivi global de l'étude. La famille associée à cette voie représente donc environ un tiers du temps de suivi global, ce qui en fait une voie importante. Il s'en suit que 31.90% des tourbillons détectés à un instant donné, avec l'outil d'analyse en ondelettes, appartient statistiquement à cette voie. La durée de vie moyenne des tourbillons de cette voie est de 24.3 semaines (écart type de 18.1 semaines) en âge corrigé, soit moins de 2 semaines de moins que la moyenne pour l'ensemble des tourbillons de l'étude. Cette moyenne est certainement sous-évaluée du fait de l'interruption du suivi de 6 tourbillons sortant du domaine d'analyse (positions finales situées à 0°E sur la Figure 2.12). Cette observation vaut également pour la moyenne globale, mais dans une moindre mesure du fait qu'aucun tourbillon de la voie sud ne souffre de ce problème de suivi (voir positions finales des tourbillons de la voie sud, Figure 2.12).

Les positions de fin de suivi des tourbillons de la voie nord s'étalent de façon assez homogène le long de leur couloir de dérive, avec une concentration près du mont sous-marin Erica légèrement plus élevée que plus à l'ouest, du fait de l'étalement plus grand des trajectoires à l'ouest.

Des 31 tourbillons franchissant la section de définition de la voie nord, 5 ne subissent jamais de subdivisions (représentés Figure 2.10). Ils ont une durée de vie moyenne de 15.6 semaines (écart type de 13.3 semaines), soit environ 9 semaines de moins que la moyenne globale pour cette voie. Le faible nombre de tels tourbillons ne permet cependant pas d'accorder un poids important à cette valeur moyenne. L'écart type important, de 13.3 semaines, indique d'ailleurs des durées de vies très variables.

### **Ralentissement et renforcement des anneaux proche du talus continental**

A proximité du talus continental et entre 33°S et 35°S environ, on constate des valeurs importantes de diamètres et d'anomalies de SSH des tourbillons (Figure 2.18, lignes 2 et 3), alors que l'on s'attend à une érosion graduelle au cours de la dérive des anneaux vers le nord-ouest. L'âge moyen des tourbillons dans cette région (Figure 2.18, dernière ligne), indique que les tourbillons concernés sont plus jeunes que ceux présents au sud-ouest de cette région, soit à distance équivalente de la retroflexion. Ces anneaux se sont donc déplacés rapidement jusqu'à cette position, et sont donc probablement peu érodés. Cela ne suffit cependant pas à expliquer des valeurs aussi importantes, notamment de diamètres. Or, on constate également que les anneaux ont tendance à stagner dans cette région, comme en atteste les faibles vitesses moyennes observées, ainsi que les écarts types très faibles sur ces vitesses (Figure 2.18,

première ligne). Ce ralentissement pourrait être causé par l'extension marquée vers le large du talus continental à ce niveau de la côte africaine. Cette extension du talus pourrait gêner les anneaux dans leur dérive nord-ouest (voir Figure 2.16, pour un tracé fin de la bathymétrie de la région). Le ralentissement pourrait alors être à l'origine d'une augmentation du diamètre des tourbillons, tel que déterminé par les critères de Flierl (1981), selon lequel une vitesse faible de propagation élargit le contour des eaux emprisonnées dans le tourbillon. Cependant, l'outil d'analyse en ondelettes utilisé ne prend pas en compte cet effet. Les valeurs importantes trouvées correspondent donc à une augmentation du signal de SSH associée aux anneaux, et pourraient être liées au ralentissement constaté.

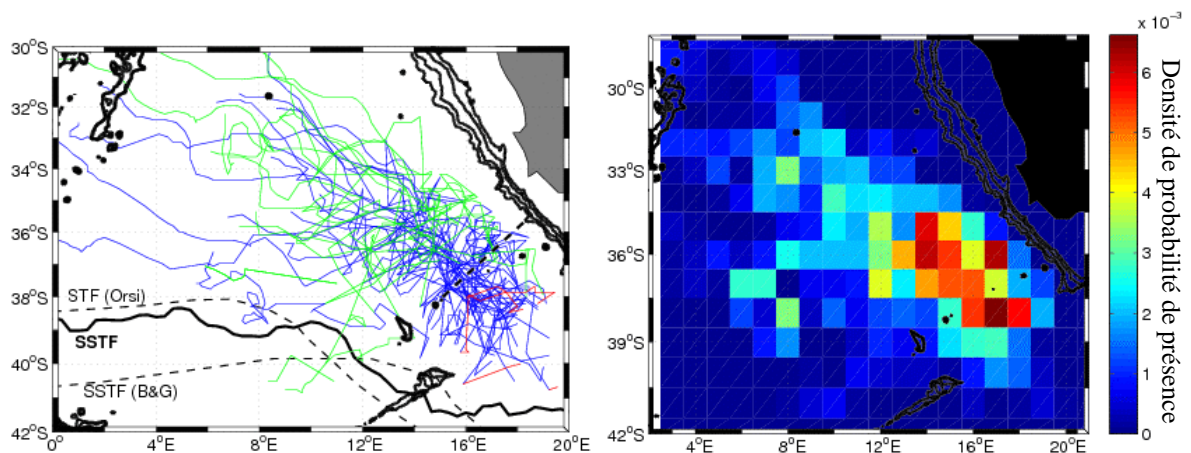


Figure 2.17. Voie Nord. A gauche, trajectoires des tourbillons de la voie nord. En bleu les trajectoires franchissant la section de définition de la voie. En vert les sous-tourbillons issus de subdivisions ultérieures au franchissement, et en rouge les tronçons de trajectoires des tourbillons initiaux lorsqu'une subdivision a lieu avant franchissement par un sous-tourbillon. A droite, densité de probabilité de présence des tourbillons par  $1^\circ \times 1^\circ$ .

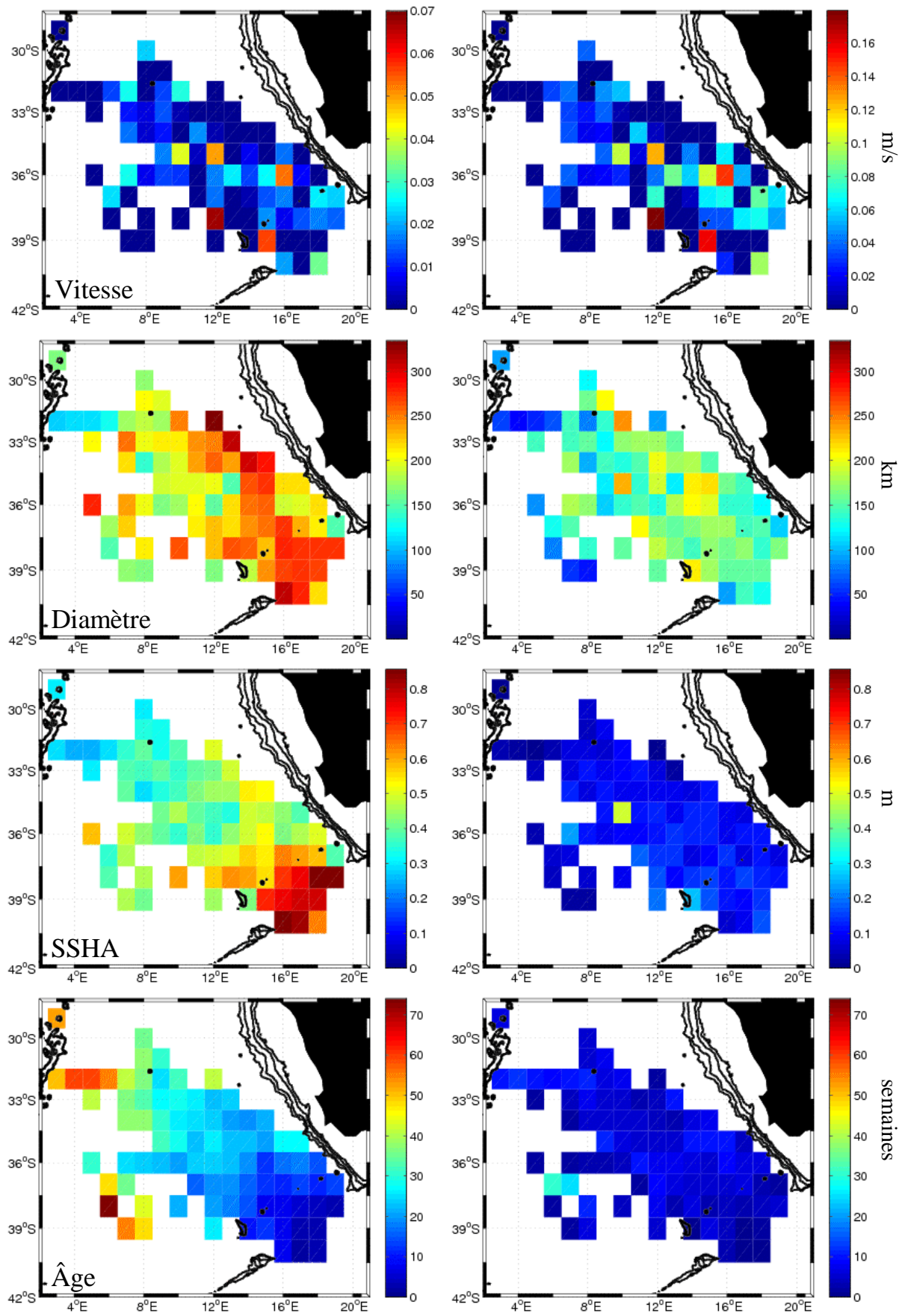


Figure 2.18. Voie Nord. Première ligne : à gauche, vitesse moyenne (m/s) des tourbillons par



région de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  ; à droite, écart type sur cette valeur. Les valeurs sont affichées lorsqu'un minimum de 5 tourbillons sont comptabilisés sur l'ensemble de la série temporelle. Deuxième ligne, idem pour les diamètres des tourbillons (km). Troisième ligne : anomalies de SSH au centre des tourbillons (m). Dernière ligne : âge corrigé des tourbillons (semaines), prenant en compte l'âge des tourbillons d'origine pour les sous-tourbillons.

	Voie Nord		Voie Centrale		Voie Sud		Cumul des voies		
Nombre de franchissements de la section de définition de la voie / % des franchissements cumulés des voies	31	27.7%	55	49.1%	26	23.2%	112		
Temps de suivi par voie (semaines) / % des 4342 semaines de suivi global	1385	31.9%	1720	39.6%	984	22.7%			
Durée de vie des tourbillons (âge corrigé, en semaines)	24.3 (écart type=18.1)		22.3 (écart type=18.9)		29.4 (écart type=18.5)		24.4 (écart type=19.1)		
Nombre de franchissements par des tourbillons initiaux / % des franchissements par voie	17	55%	13	24%	12	46%	42	37.5%	
Taux de subdivision après franchissement	0.77		0.40		0.31		0.47		
Tourbillons ne subissant pas de subdivision	Nombre / % des franchissements par voie	5	16%	15	27%	7	27%	27	24%
	Durée de vie (semaines)	15.6 (écart type=13.3)		21.5 (écart type=22.0)		34.6 (écart type=14.5)		23.8	

Tableau 2.3. Récapitulatif des caractéristiques principales des trajectoires des trois voies, et valeurs cumulées pour les trois voies.

### Interaction de tourbillons avec côte sud-africaine

Le tracé des trajectoires de la voie nord (Figure 2.17) indique que certains tourbillons passent à proximité du talus continental, en particulier au sud de  $34^{\circ}\text{S}$ . Ce constat nous mène à nous interroger sur les interactions possibles entre les anneaux des Aiguilles et les eaux côtières.

Tout d'abord, Duncombe Rae et al. (1992) et Lutjeharms et al. (1991) ont observés en 1989 qu'un anneau situé près du talus continental pouvait entraîner dans sa périphérie des filaments d'eaux froides provenant du système d'upwelling du Benguela (voir Figure 2.19a). Cependant, cet anneau situé à  $29^{\circ}\text{S}$  et  $9^{\circ}\text{E}$  au moment de son observation par imagerie infra-rouge, est passé bien plus au large du talus continental que les trajectoires de la voie nord les plus proches du talus (Figure 2.19b). Cet effet d'entraînement d'eaux côtières vers le large pourrait donc a fortiori concerner de nombreuses trajectoires de la voie nord, lorsque les conditions d'upwelling côtier sont présentes. La fréquence et l'importance de ce phénomène est d'une grande importance du fait de son impact sur les échanges entre le plateau continental et le domaine hauturier, et sur la biologie côtière.

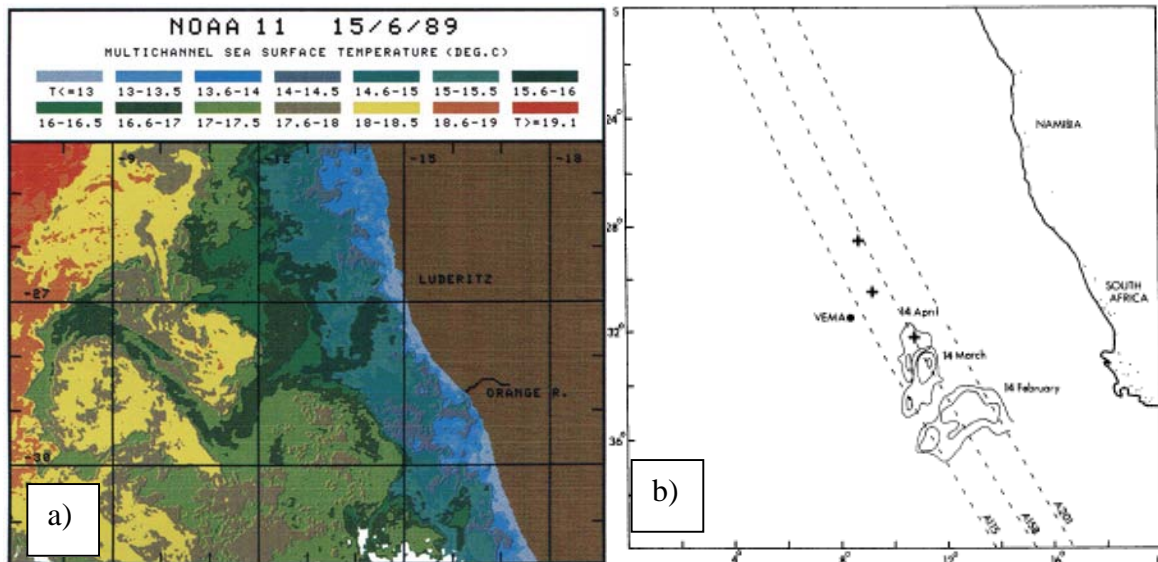


Figure 2.19. Duncombe Rae et al. (1992). a) Tracé du champ de SST, le 15 juin 1989, au large de la côte africaine. On note la présence d'un filament d'eaux froides (en vert) provenant du système d'upwelling du Benguela, et entraîné au large par un anneau des Aiguilles. b) Tracé de hauteur de mer de mi-février à mi-avril. Les contours inférieurs à 20 cm et aux alentours de l'anneau des Aiguilles, dont on perçoit ainsi le déplacement vers le nord-ouest, ne sont pas représentés. Les trajectoires utilisées du satellite GEOSAT pour le calcul de la SSH sont représentés en traits discontinus.

D'autre part, des mesures effectuées le long du talus ouest-africain montrent la présence fréquente d'un courant de pente, dirigé vers le nord (ex : Gladyshev et al. , 2008). Ce courant est cependant mal connu, et notamment à sa variabilité. Dans ce contexte, on peut se demander si ce courant ne serait pas lié au passage intermittent des anneaux le long du talus. En effet, dans leur rotation anticyclonique, et durant le temps de leur passage, ces anneaux pourraient induire un tel écoulement le long du talus. Ce courant serait alors lié à la rotation propre du tourbillon, et à son advection moyenne vers le nord, sans qu'il y ait d'écoulement permanent en dehors des périodes de passages des tourbillons.

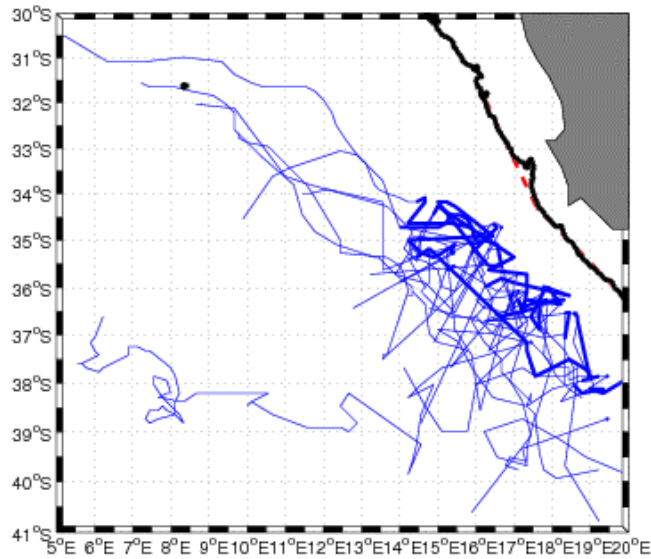
La fréquence des phénomènes d'entraînement de filaments d'upwelling vers le large, et la possible existence d'un courant permanent le long du talus continental, sont tout deux dépendant d'un « taux de présence » d'anneaux des Aiguilles le long du talus continental, en définissant ce taux de présence comme le rapport du temps cumulé passé par des anneaux le long du talus, à la durée total de l'étude.

Pour déterminer ce taux de présence, l'analyse suivante est menée pour chaque semaine et chaque tourbillon de la voie nord. On calcule la distance du centre du tourbillon au contour bathymétrique à 500 m du talus continental, pour la comparer au rayon moyen du tourbillon. Lorsque la distance du contour bathymétrique au centre du tourbillon est inférieure au rayon moyen du tourbillon, on considère que le tourbillon se trouve en interaction avec la

côte, et fait probablement apparaître un pseudo-courant de pente le long du talus du fait de sa circulation anti-cyclonique. Le choix du contour bathymétrique à 500 m est arbitraire, mais la forte pente du talus continental rend ce choix peu critique.

Seules 4 trajectoires de tourbillons satisfont au critère recherché à un moment donné de leur période de suivi pour un temps d'interaction cumulé de 9 semaines. Le taux de présence de tourbillons le long du talus n'est alors que de 1.2%. Ce taux étant très faible, on peut penser que la détection répétée d'un courant de bord n'est pas uniquement liée à la présence de ces tourbillons. Cependant, comme indiqué plus haut, la surface attribuée à un tourbillon dans l'analyse en ondelettes n'est pas exactement représentative de sa rotation. De plus, au-delà du tourbillon lui-même, une circulation d'eaux périphériques entraînées par la rotation est souvent constatée. Il est probable que cet effet d'entraînement contribue néanmoins à faire apparaître un courant le long du talus, pour un tourbillon situé un peu plus au large. Cet effet pourrait d'ailleurs expliquer l'entraînement d'eaux froides d'upwelling côtier, dans le cas du tourbillon observé par Lutjeharms et al. (1991), celui-ci ayant une trajectoire assez éloignée des côtes. Pour tenter de prendre en compte cet effet, on peut par exemple augmenter de 50% le rayon des tourbillons tels que calculés par l'analyse en ondelettes, et le comparer à la distance entre le talus et le centre du tourbillon. En appliquant cette majoration, on trouve que 13 tourbillons interagissent avec le contour à 500 m du talus continental, pour un temps d'interaction cumulé de 110 semaines. Ces 13 tourbillons interagissent donc en moyenne 8.5 semaines avec le talus. Le taux de présence d'anneaux le long du talus est alors de 14.8%, contre 1.2% hors majoration du rayon moyen des tourbillons. Les trajectoires de ces tourbillons sont représentées sur la Figure 2.20, ainsi que les tronçons de leur trajectoire concernés par cette interaction. On constate que la région d'interaction se situe effectivement entre la pointe sud du talus continental de l'Afrique du Sud et 34°S.

Ce taux de présence, s'il n'est qu'un indicateur des interactions entre anneaux des Aiguilles et domaine côtier, semble cependant suffisamment élevé pour penser que l'entraînement d'eaux froides d'upwelling côtier observé par le passé n'est pas exceptionnel. En revanche, ce taux paraît trop faible pour que le passage d'anneaux à proximité du talus soit considéré comme seul responsable de l'existence d'un courant vers le nord, en dehors de tout écoulement permanent.



*Figure 2.20. Trajectoires des tourbillons interagissant avec le talus continental. Utilisation du contour bathymétrique à 500 m, et majoration de 50% du diamètre moyen des tourbillons. La partie des trajectoires durant laquelle l'interaction a lieu est en trait gras.*

L'entraînement d'eaux du système d'upwelling côtier par un anneau des Aiguilles, observé par Lutjeharms et al. (1991) et Duncombe Rae et al. (1992), a eu lieu plus au nord et au large que le domaine d'interaction observé ici. Cependant, la trajectoire d'un flotteur PROVOR, fin 2006, atteste de l'entraînement possible d'eaux voisines du talus continental par un anneau, et donc de possibilités d'échanges entre côtier et large par ces anticyclones. La trajectoire de ce flotteur est tracée Figure 2.21. Le flotteur, dérivant vers le sud en longeant le continent africain, a été entraîné et advecté en direction du talus continental par un anneau des Aiguilles situé près du talus. Cet anneau fait d'ailleurs partie des 13 anneaux interagissant avec le talus dans l'étude présentée ici (dans le calcul avec majoration de 50% du rayon moyen). La trajectoire ultérieure du flotteur, représentée en trait noir discontinu Figure 2.21b, montre que le flotteur a effectué deux boucles anticycloniques adjacentes au talus continental avant de poursuivre sa trajectoire vers le sud.

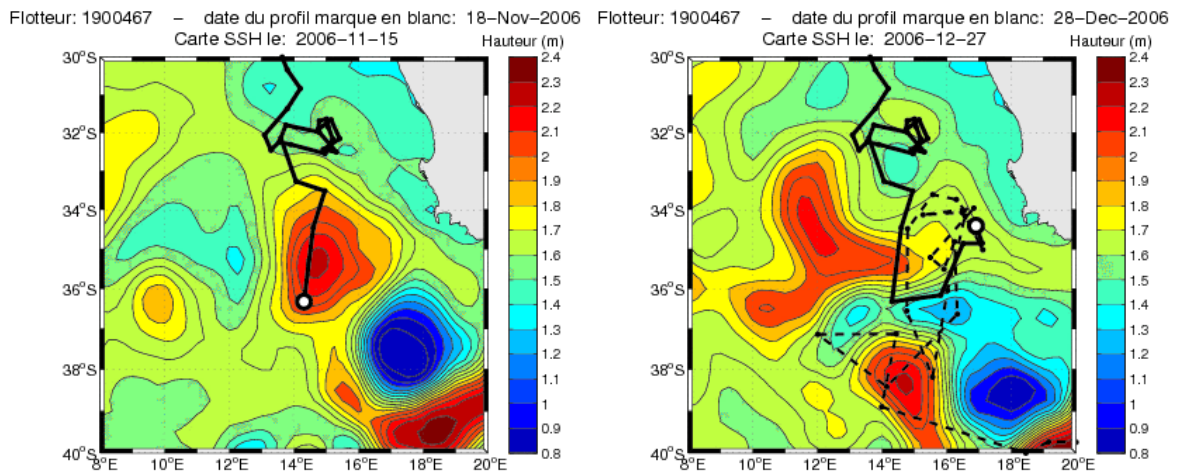


Figure 2.21. Les deux figures représentent les cartes de SSH au 15/11/2006 et au 27/12/2006, soit à un mois et demi d'intervalle. A ces cartes sont superposés le tracé de la trajectoire d'un flotteur, venant du nord, dont la position à la date correspondante est marquée en blanc. Sur la première carte, la trajectoire n'est tracée que jusqu'à la date correspondante, tandis que la trajectoire ultérieure est représentée en trait discontinu sur la deuxième carte. Le flotteur effectue une boucle par entraînement dans le tourbillon présent près du talus à la première date, et qui se déplace vers l'ouest par la suite. Ce tourbillon de taille importante fait partie de ceux interagissant avec le talus, au sens de l'étude réalisée ici.

## Voie Centrale

### Rôle perturbateur de la bathymétrie et divergence nord/sud des trajectoires

Les trajectoires de la voie centrale sont représentées Figure 2.22 (à gauche). Cette voie est caractérisée par le passage des centres de tourbillons initiaux ou de sous-tourbillons par la section allant du Mont Erica à l'extrémité nord de la dorsale des Aiguilles. Le diagramme de probabilité de présence des centres de tourbillons de la voie est représenté sur la même figure, à droite, tandis que les tracés d'évolutions spatiales moyennes des âges corrigés, des diamètres, des anomalies de SSH aux centres des tourbillons, et de leurs vitesses de déplacement sont tracés Figure 2.23. Le diagramme de densité de probabilité de présence montre un taux de présence très élevé dans la région délimitée par les trois éléments bathymétriques que sont le Mont Erica au nord, le Mont Schmidt-Ott à l'ouest, et l'extrémité nord de la dorsale des Aiguilles au sud. Cela semble mettre en évidence un blocage des tourbillons par la bathymétrie, et une stagnation temporaire des anneaux. Cependant, le tracé de l'évolution spatiale de l'âge corrigé des tourbillons n'indique pas de vieillissement marqué d'est en ouest du Mont Schmidt-Ott. Le fort taux de présence dans cette région est donc plutôt expliqué par une concentration forte des trajectoires dans cette région, avant un étalement méridien des trajectoires plus important à l'ouest.

Le diagramme de densité de probabilité de présence montre également une divergence nord/sud des trajectoires des tourbillons au franchissement de la longitude du Mont Schmidt-Ott, avec un taux de présence très faible à l'aplomb et à l'ouest immédiat du mont. Ce mont semble donc dévier les tourbillons dans leur progression vers l'ouest, les forçant à le contourner par le nord ou par le sud. Ce contournement apparent résulte cependant en partie des nombreuses subdivisions qui ont lieu à proximité du mont sous-marin (voir Figure 2.11, à gauche), et qui entraînent la formation de deux tourbillons dont les trajectoires s'infléchissent vers le nord pour l'une, vers le sud pour l'autre. Cet effet a été démontré plus haut pour les subdivisions ayant lieu au voisinage de ces trois éléments bathymétriques (voir Figure 2.11, à droite).

#### **Caractérisation de la famille de trajectoires : la voie la plus empruntée**

55 trajectoires de tourbillons franchissent la section de définition de la voie centrale (représentées en bleu Figure 2.22, à gauche). Cela correspond à 49.1% des franchissements cumulés des trois voies, et fait de cette voie la plus empruntée (ces valeurs, et les principales valeurs données ici sont reportées dans le Tableau 2.3). 13 de ces franchissements, soit 24% d'entre eux, sont ceux de tourbillons initiaux n'ayant pas subi de subdivision depuis leur détachement de la retroflexion. Ce chiffre étant de 37.5% sur l'ensemble des 3 voies, la voie centrale est celle qui est la plus empruntée par des tourbillons déjà subdivisés. Ce constat est cohérent avec la Figure 2.11a, qui montre la densité importante de subdivisions à l'est de la section de définition de la voie, donc en amont de son franchissement par les tourbillons dérivant vers l'ouest.

22 sous-tourbillons sont formés par subdivision de certains des 55 tourbillons, après leur franchissement de la section de définition de la voie centrale (représentés en vert Figure 2.17). Le taux de subdivision de la voie est donc de 0.40, proche de la moyenne pour les 3 voies, qui est de 0.47.

Le temps de suivi cumulé des trajectoires de cette voie est de 1720 semaines, soit 39.6% du temps de suivi global de l'étude. Ce pourcentage représente la probabilité pour qu'un tourbillon observé à un instant donné appartienne à la voie centrale. Le nombre de franchissements de cette voie représentant 49.1% du nombre de franchissements des 3 voies, il s'en suit que la durée de vie des tourbillons de cette famille centrale est plus faible que la durée de vie moyenne des tourbillons. En effet, la durée de vie moyenne (en âge corrigé) pour cette voie est de 22.3 semaines, (écart type de 18.9 semaines), soit près de 4 semaines de moins que pour l'ensemble des tourbillons. Cela provient peut-être de ce que beaucoup de

tourbillons déjà subdivisés empruntent la voie centrale, lesquels sont probablement moins durables que des tourbillons initiaux non-subdivisés. De plus, le franchissement de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles entraîne certainement une érosion des couches profondes des tourbillons de tailles importantes, qui pourrait conduire à une érosion accélérée. De même que pour la voie nord, cette moyenne est certainement sous-évaluée du fait de l'interruption du suivi de 5 tourbillons sortant du domaine d'analyse (positions finales en blanc situées à 0°E sur la Figure 2.12, à droite).

Les positions de fin de vie des tourbillons, à l'ouest de la bathymétrie du bassin du Cap, présentent un étalement homogène, semblable à celui obtenu pour les tourbillons de la voie nord. La capacité de survie des tourbillons dans leur dérive semble donc comparable une fois cette bathymétrie franchie. En revanche, on constate une concentration plus élevée, pour la voie centrale, des positions de fin de suivi de tourbillons à l'est de cette bathymétrie, et particulièrement dans le triangle formé par les trois reliefs sous-marins. Un nombre important de ces interruptions de suivi correspond à des jonctions de ces tourbillons avec d'autres tourbillons présents dans la région, comme cela est visible sur cette même Figure 2.12, à gauche. D'autres interruptions de suivi sont liées à un rattachement de ces tourbillons à la retroflexion, favorisé par un blocage de l'avancée vers l'ouest des tourbillons par cette bathymétrie. Enfin, certains suivis sont interrompus par dissipation du signal en anomalie de SSH du tourbillon, qui est lié à une fragmentation et des interactions complexes de ces tourbillons emprisonnés par la bathymétrie avec des tourbillons voisins.

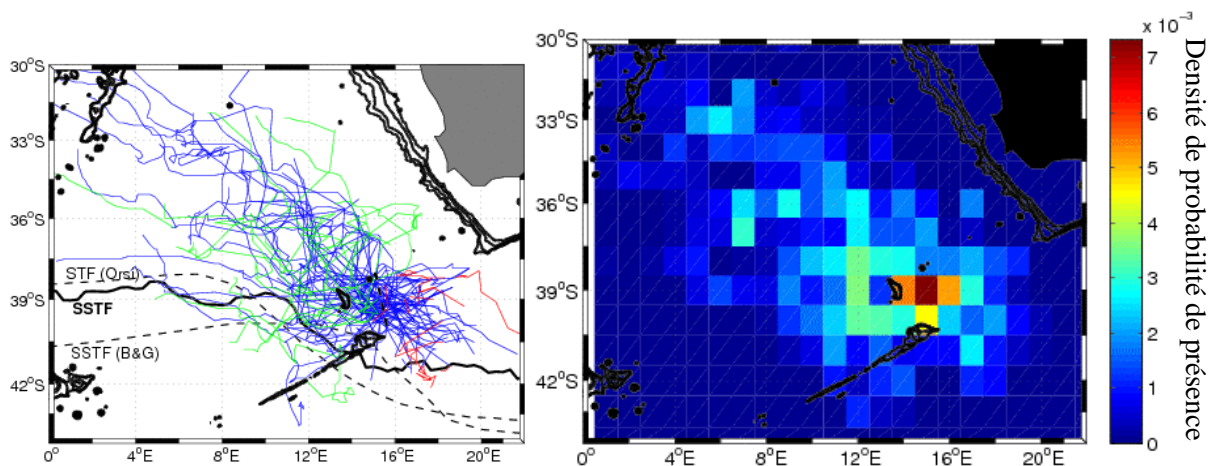


Figure 2.22. Voie Centrale. A gauche, trajectoires des tourbillons de la voie centrale. En bleu les trajectoires franchissant la section de définition de la voie. En vert les sous-tourbillons issus de subdivisions ultérieures au franchissement, et en rouge les tronçons de trajectoires des tourbillons initiaux lorsqu'une subdivision a lieu avant franchissement par un sous-tourbillon. A droite, densité de probabilité de présence des tourbillons par  $1^\circ \times 1^\circ$ .



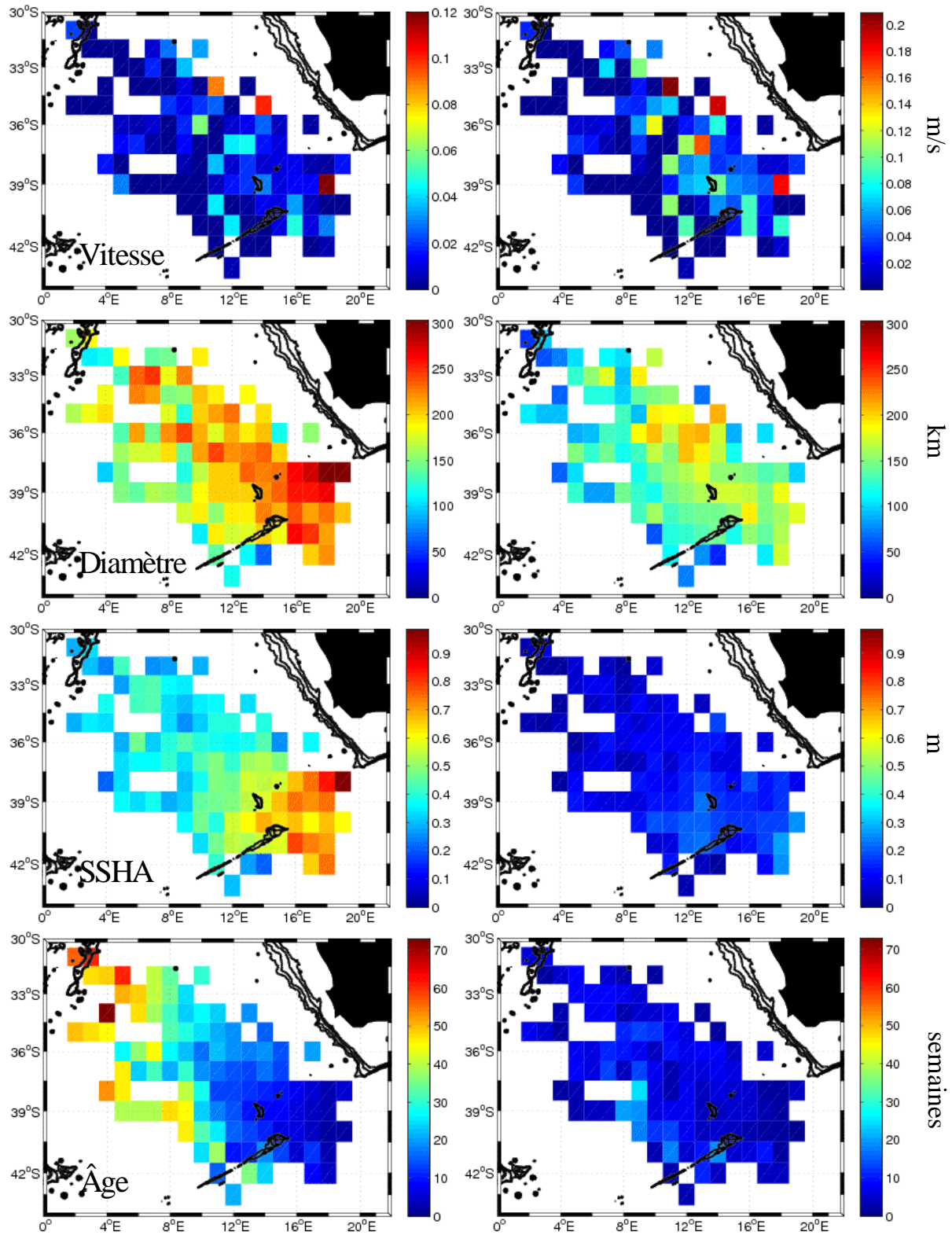


Figure 2.23. Voie Centrale. Première ligne : à gauche, vitesse moyenne (m/s) des tourbillons par région de  $1^\circ \times 1^\circ$  ; à droite, écart type sur cette valeur. Les valeurs sont affichées lorsqu'un minimum de 5 tourbillons sont comptabilisés sur l'ensemble de la série temporelle. Deuxième ligne, idem pour les diamètres des tourbillons (km). Troisième ligne : anomalies de SSH au centre des tourbillons (m). Dernière ligne : âge corrigé des tourbillons (semaines), prenant en compte l'âge des tourbillons d'origine pour les sous-tourbillons.



Des 55 tourbillons franchissant la section de définition de la voie centrale, 15 ne subissent jamais de subdivisions (représentés Figure 2.10). Ils ont une durée de vie moyenne de 21.5 semaines (écart type de 22.0 semaines), voisine la moyenne globale pour cette voie, mais l'écart type important rend l'interprétation de cette valeur difficile.

Les évolutions spatiales de l'anomalie aux centres des tourbillons et de leur surface sont assez similaires aux évolutions obtenues pour l'étude globale des tourbillons (Figure 2.14). On constate néanmoins une décroissance un peu moins marquée de l'anomalie au sud-ouest du mont Schmidt-Ott pour les tourbillons de la voie centrale. La décroissance plus marquée, sur le tracé équivalent pour l'ensemble des tourbillons, provient du passage, dans cette même région, de tourbillons de la voie sud dont l'anomalie est plus faible.

### **Voie centrale et front subtropical STF**

Dans le chapitre suivant sera présentée une étude du Front Subtropical (STF pour *Subtropical Front*), qui délimite le domaine austral de celui des bassins subtropicaux de l'indien et de l'atlantique. Un examen approfondi de sa structure dans la région inter-bassin, au sud du continent africain, montre que des anneaux des Aiguilles pourraient jouer un rôle dynamique dans la constitution de ce front, et que ces anneaux proviendraient plus particulièrement de la voie centrale. L'étude détaillée de ce lien entre le STF et les anneaux des Aiguilles sera présentée de façon complète dans le chapitre suivant. Cependant, nous pouvons ici la mettre en évidence.

Sur la Figure 2.22 (à gauche), représentant les trajectoires des tourbillons de la voie centrale, sont tracées les positions moyennes de 2 fronts. D'une part, le front subtropical (STF) de Orsi et al. (1995), et d'autre part le front sud subtropical (SSTF) tel que proposé par Belkin et Gordon (1999) mais aussi tel que calculé dans l'étude de la branche sud du supergyre subtropical indo-atlantique (voir chapitre suivant pour des précisions sur le SSTF). Il apparaît sur ce tracé que les trajectoires les plus au sud de la voie centrale, dans leurs parties comprises entre 10°E et 15°E, longent, par le nord, la position de ces fronts moyens. En traçant, pour le 31 décembre 2003, la position du front SSTF (tel qu'obtenu dans l'étude présentée plus bas, et représenté en ronds rouges), superposé au champ de SSH correspondant, on constate que le front s'appuie sur le pourtour sud du tourbillon 71a, qui appartient à la famille de tourbillons de la voie centrale (Figure 2.24). Cet exemple illustre la participation de ces tourbillons de la voie centrale à la constitution du front STF. L'importance de ce phénomène sera évalué plus précisément dans le chapitre suivant.

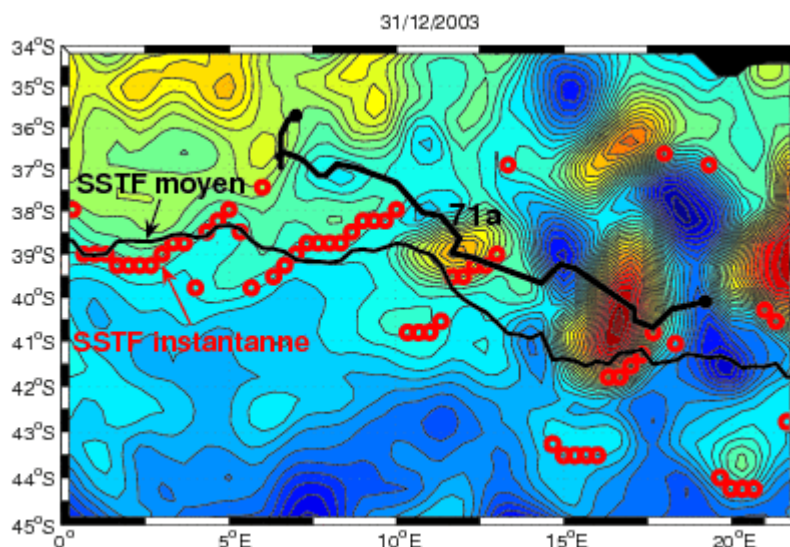


Figure 2.24. Les contours colorés représentent la SSH au 31 décembre 2003. En trait noir épais est représentée la trajectoire complète du tourbillon 71a, appartenant à la voie centrale, dont la position à la date concernée est centrée sur l'anticyclone située vers 12°E. En trait noir fin est représenté le front SSTF moyen obtenu dans l'étude de la branche sud du supergyre, et en ronds rouge la position du front pour cette semaine-ci. On constate que le front obtenu pour cette semaine s'appuie sur le pourtour sud du tourbillon. Les tourbillons de la voie centrale pourraient ainsi participer à la constitution du front SSTF.

## Voie sud

### Des trajectoires et propriétés hydrologiques atypiques

Les anneaux empruntant la voie sud contournent la dorsale des Aiguilles par le sud. Ils constituent une famille dont les propriétés dynamiques et hydrologiques semblent être très différentes des familles nord et centrale. Les tourbillons des 2 premières voies se propagent en effet essentiellement au nord du front subtropical (ou sud subtropical, la différenciation étant plus amplement abordé dans le chapitre suivant), ceux de la voie centrale participant d'ailleurs activement à la dynamique du front. Les tourbillons de ces 2 voies se propagent donc dans le domaine subtropical de l'atlantique sud. En revanche, les tourbillons de la voie sud, comme cela est visible sur la Figure 2.26 (à gauche) représentant leurs trajectoires, se propagent au sud de ce front, pénétrant le domaine subantarctique du courant circumpolaire. Les échanges air-mers importants dans cette région, et les propriétés très différentes des eaux ambiantes, sont alors susceptibles de modifier fortement les propriétés hydrologiques des anticyclones. Par conséquent, ceux d'entre eux qui pénètrent par la suite l'atlantique sud contribuent de façon distincte des 2 autres voies aux échanges de masses d'eau par la branche nord du supergyre subtropical indo-atlantique. Comme indiqué plus haut, cela a été observé et décrit par Arhan et al. (1999), à partir d'un tourbillon échantillonné en mer en 1995 et ayant

séjourné longtemps au sud de la dorsale des Aiguilles. La trajectoire de ce même tourbillon telle qu'obtenue par l'analyse en ondelettes, et les profils hydrologiques relevés sont représentés Figure 2.25. Un autre échantillonnage de tourbillon, en 2004, ayant connu une trajectoire similaire, et présentant une couche de mélange profonde et relativement froide, a également été décrit par Gladyshev et al. (2008).

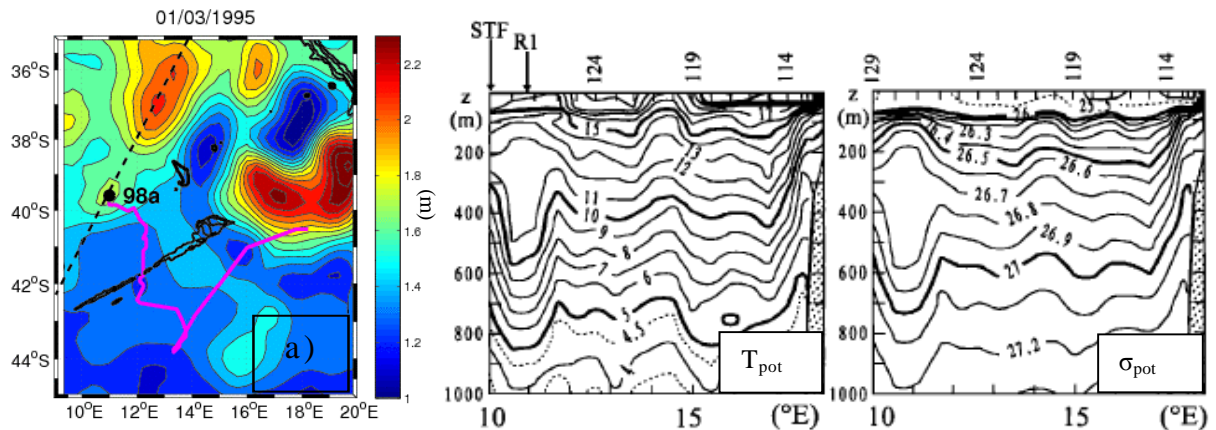


Figure 2.25. a) Position du tourbillon 98 le 1<sup>er</sup> mars 1995, et trajectoire antérieure. Le trait noir discontinu représente le tracé de la radiale de mesure. b) et c) Température potentielle et la densité potentielle sont représentées (Arhan et al., 1999) lors de l'échantillonnage du tourbillon, à une date voisine du champ représenté en a). On constate que le tourbillon se situe au nord du front SSTF, et que le cœur du tourbillon est fortement homogénéisé en profondeur. La température du cœur, voisine de 11.5°C, est de plus de 2°C inférieure au plus froid des 2 autres anneaux échantillonnés lors de cette même campagne. On remarque également que ce tourbillon a subducté de 200 m, sous une couche d'eau subantarctique de surface (SAASW). Cette subduction peut expliquer la faiblesse du signal d'anomalie de SSH, rendant son suivi par l'analyse en ondelettes difficile. L'analyse ne le détectera en effet que durant un mois supplémentaire.

Etant donné les particularités hydrologiques des tourbillons dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles, et par conséquent leur apport distinct aux échanges indo-atlantiques, une étude plus spécifique de leur comportement a été réalisée, et est présentée à la suite de la présentation de l'étude des voies. Cette étude spécifique s'intéressera aux anneaux pouvant contribuer aux échanges inter-bassins subtropicaux, qui ne correspondent pas à l'ensemble des tourbillons de la voie sud.

Les anticyclones de la voie sud, comme le montre la Figure 2.26, ont des trajectoires assez éloignées des tourbillons des autres voies, leur intrusion à des hautes latitudes s'écartant de l'image classique d'une dérive nord-ouest dans le corridor des Aiguilles (Garzoli et Gordon, 1996). On peut noter que Lutjeharms et Valentine (1988) se sont intéressés à des anticyclones présents au voisinage du courant de Retour des Aiguilles (ARC), les classant en différentes catégories. Certains séjournent également plusieurs mois dans la zone subantarctique de l'ACC, et s'y dissipent ou sont repris par l'ARC. Les tourbillons envisagés

ici dans la voie sud sont à rapprocher des « warm eddies » décrits par les auteurs, qui sont lâchés au voisinage de la retroflection. Tandis que Lutjeharms et Valentine (1988) distinguent ces derniers des anneaux des Aiguilles, le mode de formation et le déplacement vers le nord-ouest des tourbillons envisagés ici nous fait les considérer comme une famille particulière d'anneaux.

#### **Caractérisation des trajectoires : des anneaux durables stagnant au sud de la dorsale**

La probabilité de présence spatiale des tourbillons de la voie sud est représentée sur la Figure 2.26 (à droite). On constate un taux de présence fort au sud de la dorsale des Aiguilles, qui résulte, notamment, d'une concentration des trajectoires dans cette région. Cependant, le tracé de l'évolution spatiale de l'âge corrigé des tourbillons montre un vieillissement rapide des tourbillons au sud de la dorsale, leur âge moyen y étant compris entre 20 et 25 semaines. (ce tracé est présenté sur la Figure 2.27 de même que les tracés d'évolutions spatiales des anomalies aux centres des tourbillons, de leurs surfaces, et de leurs vitesses de déplacement). Ce vieillissement traduit la stagnation des tourbillons au sud de la dorsale, observé par Arhan et al. (1999), et explique principalement le taux de présence élevé dans cette région. Les vitesses moyennes, hormis au voisinage de la pointe de la dorsale sont extrêmement faibles, confirmant la stagnation des anneaux dans cette région.

26 tourbillons franchissent d'est en ouest la section de définition de la voie sud. Leurs trajectoires sont représentées en bleu sur la Figure 2.26 (à gauche). Cela représente 23.3% des franchissements cumulés des 3 voies, faisant de cette voie la moins empruntée des 3 (ces valeurs et l'essentiel des suivantes sont reportées dans le Tableau 2.3). 12 de ces franchissements, soit 46% d'entre eux, sont ceux de tourbillons initiaux n'ayant pas subi de subdivision depuis leur détachement de la retroflection, contre seulement 37.5% en moyenne sur les 3 voies. Ainsi, près d'un tourbillon sur deux empruntant cette voie n'est pas issu d'une subdivision, mais provient directement de la retroflection. Les autres sont issus d'une subdivision d'un tourbillon, ayant le plus souvent lieu lors de l'interaction entre un anneau initial et l'extrémité nord de la dorsale des Aiguilles, comme cela fut le cas du tourbillon étudié par Arhan et al. (1999). Les mécanismes de formation de ces anneaux sont étudiés plus bas, dans une étude plus spécifique de la voie sud.

8 sous-tourbillons sont formés par subdivision de certains des 26 tourbillons ayant franchi la section de définition de la voie sud (représentés en vert Figure 2.17). Le taux de subdivision de la voie est donc de 0.31, et est significativement plus faible que le taux moyen

de 0.47 pour l'ensemble des voies. Moins d'un tiers des tourbillons empruntant cette voie est donc susceptible de se subdiviser ultérieurement.

Le temps de suivi cumulé des trajectoires de cette voie est de 984 semaines, soit 22.7% du temps de suivi de l'ensemble des tourbillons recensés dans l'étude. Ce pourcentage représente la probabilité pour qu'un tourbillon observé à un instant donné appartienne à la voie sud. Ce pourcentage est le plus faible des 3 voies. La durée de vie moyenne (en âge corrigé) pour cette voie est de 29.4 semaines, (écart type de 18.5 semaines), soit 5 semaines de plus que pour l'ensemble des tourbillons. Cette durabilité semble étonnante si l'on considère le temps passé par les tourbillons au sud de la dorsale des Aiguilles, dans le domaine de l'ACC, et qui provoque un refroidissement important, notamment par des échanges air-mer importants. Cependant, le faible taux de subdivision peut contribuer à la durabilité de ces tourbillons. Mais surtout, la région au sud de la dorsale des Aiguilles, où stagnent ces tourbillons, ne présente pas d'activité mésoéchelle aussi intense que le Chaudron du Cap où les tourbillons des autres voies sont engagés. Or, les interactions entre structures de mésoéchelle accélèrent probablement leur dissipation. De plus, le refroidissement des tourbillons au sud de la dorsale entraîne une atténuation de leur signature en anomalie de SSH, qui contribue à la perte de leur suivi, en particulier lorsqu'ils pénètrent par la suite le domaine subtropical. Cet effet, discuté plus amplement plus bas, contribue à réduire le temps de suivi des tourbillons par l'analyse en ondelettes, alors que les tourbillons ne sont pas encore dissipés, et laisse penser que la durée de vie moyenne des tourbillons de la voie sud est encore plus élevée.

Des 26 tourbillons franchissant la section de définition de la voie sud, 7 ne subissent jamais de subdivisions (représentés sur la Figure 2.10). Ils ont une durée de vie moyenne très importante de 34.6 semaines (écart type de 14.5 semaines). Leurs trajectoires sont confinées au sud de la dorsale des Aiguilles, donc leur signal en anomalie de SSH ne s'estompe pas en remontant vers le nord, ce qui permet un suivi plus long par l'analyse en ondelettes.

### **Subduction des anneaux à l'approche du STF**

Les positions finales de suivi des tourbillons de la voie sud (Figure 2.12, à droite) sont souvent trouvées au sud de la dorsale des Aiguilles. Cela témoigne d'une difficulté des tourbillons à franchir la dorsale, et confirmé par l'évolution spatiale de l'âge des tourbillons (Figure 2.27, dernière ligne), qui montre un fort vieillissement entre la région de formation (à l'est de la section de définition de la voie) et la région au sud de la dorsale. Les positions finales de tourbillons situées au nord de la dorsale sont concentrées au sud de 38°S. Or, les

travaux de Herbette et al. (2004) ont montré que des tourbillons de caractéristiques similaires seraient susceptibles de subduire lorsqu'ils pénètrent dans les eaux plus chaudes du domaine subtropical, après avoir subi un refroidissement significatif en surface. La perte de suivi des tourbillons au nord de 38°S pourrait ainsi correspondre à une perte de signature en anomalie de SSH des anneaux à l'approche du front STF (délimitant au sud le domaine subtropical du domaine de l'ACC), liée à une subduction des anneaux, plutôt qu'à leur dissipation. Cet effet est également visible Figure 2.26, où l'on constate que la plupart des trajectoires au nord de la dorsale tendent à longer le front SSTF par le sud (son tracé étant issu de l'étude présentée au chapitre suivant), mais ne parviennent que rarement à le franchir. On peut noter que les quelques franchissements du SSTF observés ne correspondent d'ailleurs pas nécessairement au suivi du tourbillon dans le domaine subtropical. En effet, dans la méthode de suivi des anneaux adoptée dans cette étude, il est possible qu'un des anneaux franchissant la dorsale opère une jonction avec un anneau plus classique. Si celui est de diamètre inférieur, le tourbillon formé par jonction est considéré comme la poursuite du tourbillon de la voie sud. Or, le tourbillon avec lequel il s'est joint n'ayant pas subi de refroidissement au sud de la dorsale, sa signature en anomalie est susceptible de perdurer plus au cours de la dérive dans l'atlantique, alors que les eaux du tourbillons de la voie sud se sont effectivement approfondie. Les questions de la poursuite de la trajectoire des anneaux dans le domaine subtropical et de leur subduction à l'abord du front SSTF, sont essentielles à une l'évaluation des échanges indo-atlantiques assurés par la voie sud. C'est pourquoi une analyse plus fine de ces questions est envisagée dans l'étude ultérieure des anneaux dérivant au sud de la dorsale.

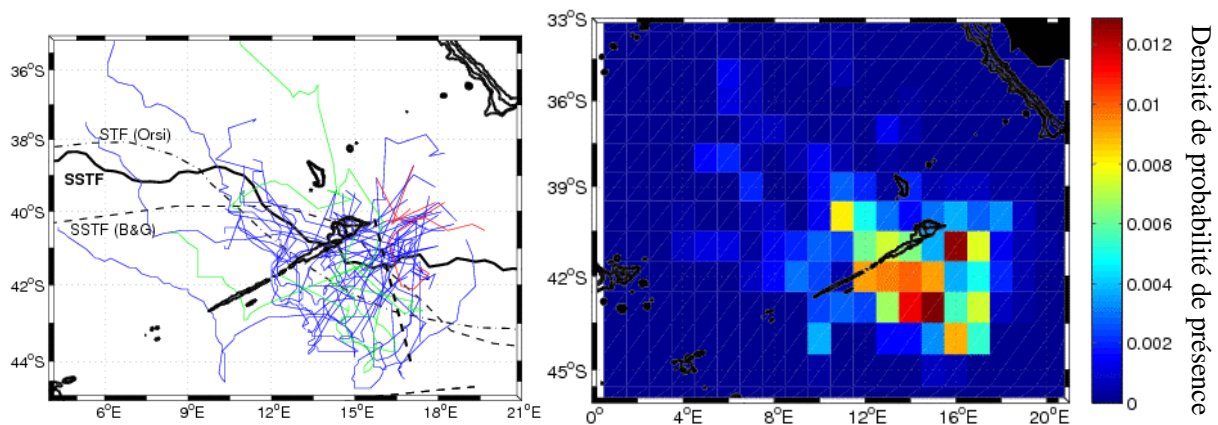


Figure 2.26. Voie Sud. A gauche, trajectoires des tourbillons de la voie sud. En bleu les trajectoires franchissant la section de définition de la voie. En vert les sous-tourbillons issus de subdivisions ultérieures au franchissement, et en rouge les tronçons de trajectoires des tourbillons initiaux lorsqu'une subdivision a lieu avant franchissement par un sous-tourbillon. A droite, densité de probabilité de présence des tourbillons par  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ .



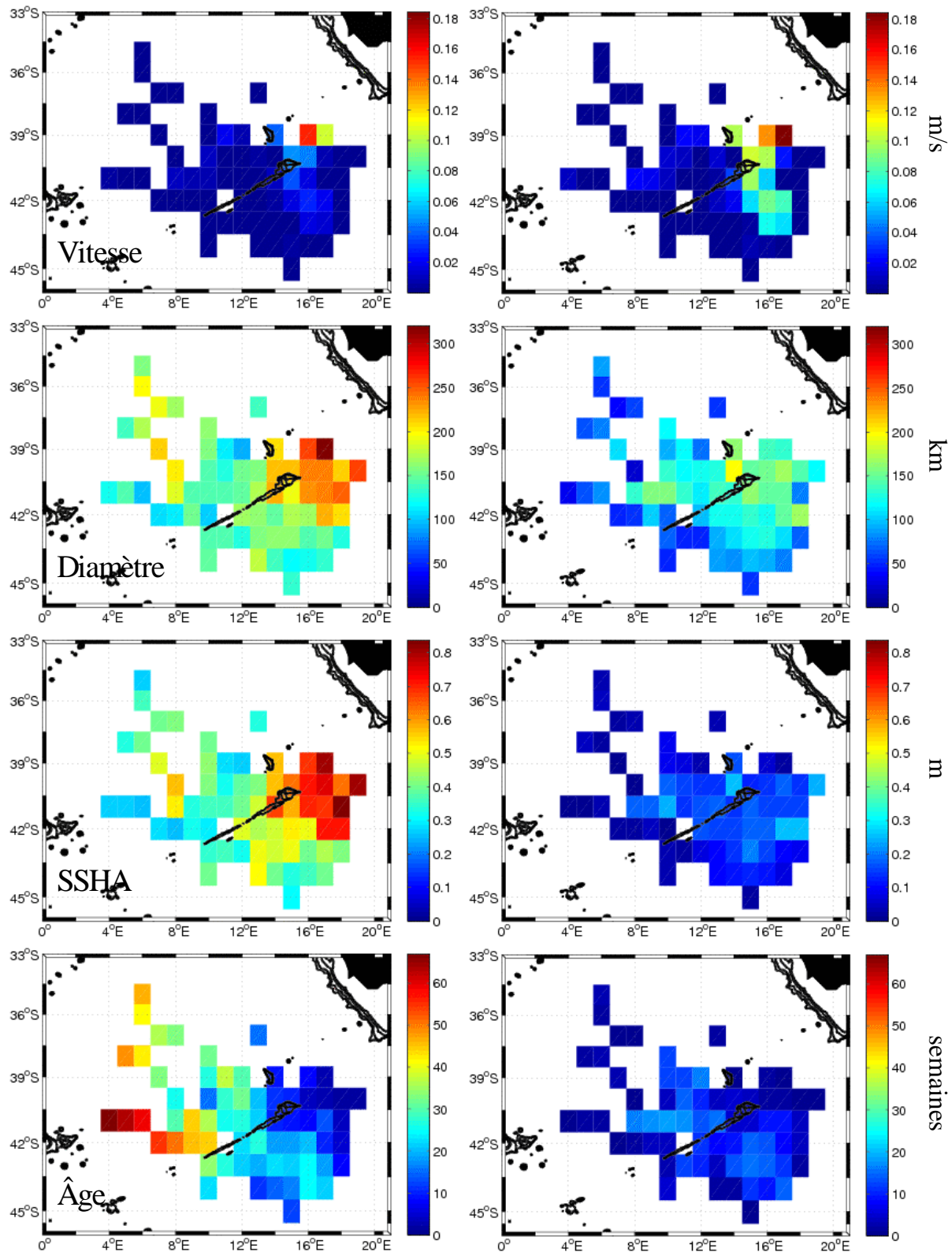


Figure 2.27. Voie Sud. Première ligne : à gauche, vitesse moyenne (m/s) des tourbillons par région de  $1^\circ \times 1^\circ$  ; à droite, écart type sur cette valeur. Les valeurs sont affichées lorsqu'un minimum de 3 tourbillons sont comptabilisés sur l'ensemble de la série temporelle. Deuxième ligne, idem pour les diamètres des tourbillons (km). Troisième ligne : anomalies de SSH au centre des tourbillons (m). Dernière ligne : âge corrigé des tourbillons (semaines), prenant en compte l'âge des tourbillons d'origine pour les sous-tourbillons.

## Analyse comparative des voies : observations complémentaires

Les voies nord et centrale présentent quelques différences, dont certaines ont été évoqués dans l'étude de la voie centrale présentée plus haut, et sont ici évoquées plus en détail. Mais les comportements des tourbillons de ces deux voies présentent entre eux plus de similitudes qu'avec la voie sud, qui est le sujet d'une étude plus approfondie présentée plus loin.

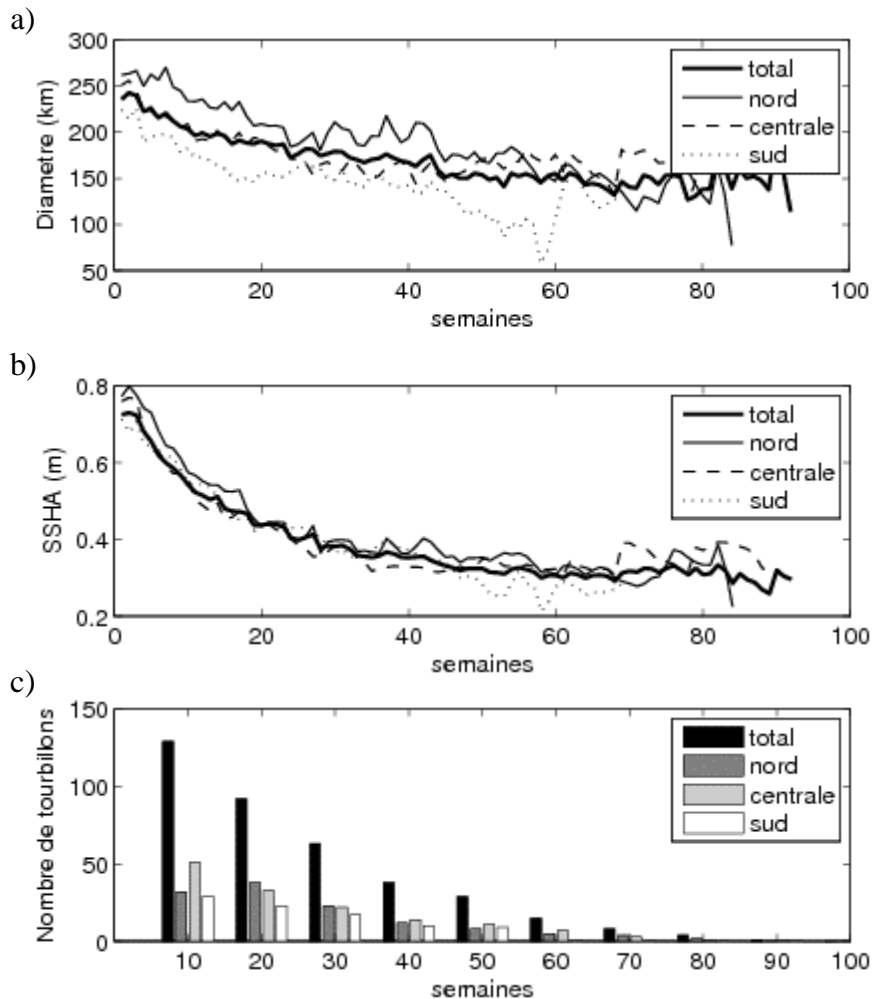


Figure 2.28. a) Comparaison des évolutions temporelles du diamètre moyen (km), pour l'ensemble des tourbillons et par voie. Le calcul est fait à partir de l'âge corrigé des tourbillons. b) Idem pour l'anomalie de SSH au centre des tourbillons. c) Indication du nombre de tourbillons de durée de vie supérieure au nombre de semaines reporté en abscisse, pour l'ensemble des tourbillons et par voie.

### Voies nord et centrale

Outre les différences de trajectoires au départ des tourbillons, et le blocage plus important des tourbillons de la voie centrale par la bathymétrie, les voies nord et centrale présentent des allures relativement comparables, avec une dérive nord-ouest vers l'atlantique



assez marquée. Les axes des trajectoires sont dans chaque cas situés très majoritairement au nord du front SSTF, bien que la position moyenne des trajectoires soit légèrement plus au sud pour les tourbillons de la voie centrale.

#### Dérive plus rapide par la voie centrale à l'ouest de la bathymétrie

Une comparaison des âges des tourbillons, en moyenne spatiale, de chacune des voies montre que, passés les monts sous-marins, la progression vers l'atlantique des tourbillons de la voie centrale est nettement plus rapide que ceux de la voie nord, avec des tourbillons jeunes jusque 10°E environ (voir Figure 2.18, et Figure 2.23). Cela est confirmé par un diagramme de densité de probabilité de présence présentant un domaine de forte présence beaucoup plus resserré à l'est de 11°E pour la voie nord, qu'il ne l'est pour la voie centrale. Il semble donc que les tourbillons de la voie centrale contournent puis s'éloignent assez rapidement de la bathymétrie des monts sous-marins et de la dorsale, alors que les tourbillons de la voie nord dérivent plus lentement.

Décroissance plus rapide des diamètres par la voie centrale, en raison des nombreuses subdivisions

La Figure 2.28 représente, pour les 3 voies ainsi que pour l'ensemble des tourbillons, les évolutions temporelles des diamètres moyens des tourbillons et des anomalies en leur centre. Les tourbillons de la voie nord sont en moyenne plus gros que ceux de la voie centrale, et d'anomalie de SSH légèrement plus forte également. Les diamètres initiaux des deux voies sont du même ordre de grandeur, entre 250 km et 260 km. Mais au bout de 5 semaines environ, le diamètre moyen pour la voie centrale a chuté plus fortement, et un écart de 50 km est ensuite maintenu. Cette chute brutale est certainement liée au grand nombre de subdivisions subies par les tourbillons de la voie centrale dans leurs interactions avec la bathymétrie. Au-delà des 50 semaines d'âge, les diamètres des tourbillons sont plus comparables.

Cette figure montre également une érosion plus rapide de l'anomalie de SSH que du diamètre.

#### **Une décroissance forte des diamètres par la voie sud**

La Figure 2.28 montre une décroissance plus marquée des diamètres des tourbillons de la voie sud. D'environ 220 km initialement, ils ne sont plus que de 150 km après 17 semaines. Puis, on constate que le diamètre moyen se rapproche de la moyenne de l'ensemble des tourbillons, ce qui s'explique en partie par le taux de subdivision le plus faible des 3 voies

(0.31 contre 0.47 de moyenne pour les 3 voies, voir Tableau 2.3). Les tourbillons des autres voies se subdivisant plus, leurs diamètres sont plus faibles. Cependant, l'évolution temporelle de l'anomalie au centre des tourbillons varie sensiblement comme les autres voies. Ainsi, si les subdivisions semblent engendrer des tourbillons de diamètres plus faibles, les valeurs d'anomalies associées au centre des tourbillons ne semblent pas être affectées. L'anomalie de surface d'un tourbillon semble donc être un indicateur fiable de l'âge d'un anneau des Aiguilles, quelle que soit la voie qu'il a emprunté et son historique particulier.

#### **2.4.2.3 Estimation du transport des tourbillons par voie**

L'analyse en ondelettes a permis de caractériser statistiquement les évolutions spatio-temporelles des différentes grandeurs associées aux anneaux des Aiguilles, dans leur ensemble et en fonction de voies privilégiées définies relativement à la bathymétrie de l'ouest du bassin du Cap. Mais, la question de la quantification des échanges inter-bassins reste en suspens. La part de transport assurée par les anneaux des Aiguilles varie de 3 Sv à 9 Sv selon les auteurs (de Ruijter et al., 1999), et dépend entre autres de la section à travers laquelle le transport est calculé, du volume d'eau véhiculé par chaque tourbillon, et du nombre de tourbillons recensés. Or, l'étude réalisée ici permet d'envisager une nouvelle estimation de ce transport, basée sur une caractérisation plus fine de certains de ces paramètres, et de caractériser les différentes voies définies ci-dessus vis à vis des échanges indo-atlantique.

L'étude générale des tourbillons recensés dans cette étude a montré la difficulté de dénombrer les anneaux des Aiguilles libérés annuellement. En effet, pour 102 anticyclones libérés par la retroflexion sur la période d'étude, pas moins de 199 trajectoires sont identifiées au total, du fait des multiples subdivisions ou regroupements observés. La distance de progression dans l'atlantique est également fortement variable, de nombreux tourbillons se dissipant à proximité de la retroflexion (voir Figure 2.12a). Ainsi, la position de la section de calcul d'un transport associé aux tourbillons, ainsi que le nombre de tourbillons traversant la section, sont variables et interdépendants. Ceci explique en partie la disparité des valeurs trouvées dans la littérature. Or, l'analyse en ondelettes a fourni un recensement complet des trajectoires de ces tourbillons. Cela permet d'envisager un calcul de transport à travers diverses sections, et ainsi d'en évaluer la décroissance à mesure que les anneaux progressent dans l'atlantique et se dissipent dans le milieu ambiant. De plus, profitant de la connaissance des trajectoires des tourbillons, une méthode de calcul du transport à travers plusieurs sections peut être mise en place, qui ne nécessite pas d'effectuer d'hypothèse sur un nombre de

tourbillons issus de la retroflexion, comme cela est fait dans les différentes études existantes. Le croisement d'une section par une trajectoire de tourbillon permet en effet d'identifier une contribution au transport, sans hypothèse préalable sur le nombre de croisements par section.

Pour évaluer un transport lorsqu'un tourbillon croise une section de calcul de transport, il est possible d'attribuer un transport empirique, allant de 0.5 Sv à 1.5 Sv comme cela est fait dans la plupart des études existantes. Cela ne permet cependant pas de prendre en compte la dissipation progressive des anneaux au cours de leur trajectoire, qui entraîne nécessairement une décroissance progressive du volume d'eau véhiculé. Or, l'analyse en ondelettes a permis d'obtenir une évaluation de la surface des anneaux. On peut donc utiliser cette donnée, et chercher à la lier au volume instantané d'un tourbillon. Ce volume est lié au profil du tourbillon en profondeur. Cependant, nous ne connaissons pas la façon dont varie la profondeur des tourbillons dans le temps. L'historique spécifique des tourbillons, notamment vis à vis des interactions avec la bathymétrie, influe certainement de façon très variable sur l'évolution de la profondeur d'un anneau. Une hypothèse simplificatrice doit donc être faite dans l'estimation du volume d'un anneau.

### **Sections et méthode de calcul du transport**

Afin d'évaluer la probable décroissance du transport volumique associé aux tourbillons, plusieurs sections de calcul sont définies (voir Figure 2.29). Elles sont choisies perpendiculaires à l'axe principal de progression vers le nord-ouest des tourbillons, à l'exception de la première section, la plus à l'est. Celle-ci est choisie de façon à correspondre aux sections de définition des voies, avec une distinction pour la voie sud. Pour cette voie, des sections (a) et (b) sont définies qui ne diffèrent que sur leur tronçon sud. La première s'aligne sur ce tronçon avec la section de définition de la voie sud, alors que la seconde s'aligne sur la crête de la dorsale des Aiguilles. Cette différenciation est introduite pour tenir compte du rôle de barrière joué par la dorsale vis à vis de la progression des tourbillons de cette voie. La comparaison des transports par la voie sud au travers des sections (a) et (b) permettra ainsi de quantifier ce rôle de barrière en terme de réduction de transport par les tourbillons d'une section à l'autre.

Pour estimer le transport d'un tourbillon à travers une section, on effectue le produit de la surface du tourbillon (calculée en moyennant sa valeur pour les semaines précédant et suivant le franchissement de la section), avec une profondeur fixée à 1000 m. Cette appréciation grossière de la profondeur introduit une incertitude importante sur le volume déplacé par les tourbillons. Cependant, le volume des tourbillons, en moyenne, varie

certainement de la même manière que leurs surfaces. Si cette relation n'est probablement pas celle d'une simple proportionnalité, et varie, de plus, d'un tourbillon à l'autre, on peut malgré tout supposer que ce mode de calcul du volume donne une tendance correcte. La variabilité des profils, d'un tourbillon à l'autre, sera par ailleurs lissée en moyenne grâce au nombre important de trajectoires identifiées dans l'étude. Selon le sens de passage, d'est en ouest ou inversement, le transport est comptabilisé positivement ou négativement par section. Le transport dit « net » correspond au transport est-ouest, vers l'atlantique, réduit du transport ouest-est, dirigé vers la retroflexion. Ce calcul est effectué d'une part sur l'ensemble des tourbillons de l'étude, et d'autre part sur les tourbillons de chacune des voies.

## Résultats

### Transport de l'ensemble des tourbillons

Le Tableau 2.4 indique les transports d'est en ouest, d'ouest en est et net au travers de chaque section; cela pour l'ensemble des tourbillons, pour chaque voie, ainsi que pour le cumul des voies. Les valeurs des transports net sont également reportées sur la Figure 2.29. La Figure 2.30 montre l'évolution des transports d'une section sur l'autre, ainsi que le taux de décroissance du transport depuis sa valeur pour la section (a). On constate alors une décroissance du transport de l'ensemble des tourbillons, depuis une valeur maximale de 8.54 Sv de moyenne pour la section (a), jusque 1.44 Sv pour la section (f). La décroissance n'est que de 30% entre la section (a) et la section (d), alors qu'elle est de 50% entre la section (d) et la section (f). Le plus fort de la décroissance du transport total se fait donc à l'ouest de la section (d). Les valeurs obtenues se trouvent donc dans la gamme de valeurs allant de 3 Sv à 9 Sv acceptée jusqu'ici (de Ruijter et al., 1999). La décroissance rapide du transport des tourbillons montre par ailleurs combien le choix de la section de calcul du transport, et les conventions sur le nombre de tourbillons et le volume qu'ils véhiculent, peuvent influencer sur le transport obtenu.

	Ensemble des tourbillons			Voie Nord			Voie Centrale			Voie Sud			Cumul des voies		
	<-	->	net	<-	->	net	<-	->	net	<-	->	net	<-	->	net
Section (a)	12.00	2.96	<b>8.54</b>	4.40	1.33	<b>3.07</b>	4.92	1.03	<b>3.89</b>	2.06	0.40	<b>1.66</b>	11.38	2.76	<b>8.62</b>
Section (b)	11.23	2.88	<b>8.35</b>	4.40	1.33	<b>3.07</b>	4.92	1.03	<b>3.89</b>	1.22	0.22	<b>1.00</b>	10.54	2.58	<b>7.96</b>
Section (c)	8.63	1.71	<b>6.92</b>	2.86	1.14	<b>1.72</b>	3.44	0.62	<b>2.82</b>	1.08	0.56	<b>0.52</b>	7.38	2.32	<b>5.06</b>
Section (d)	6.39	0.37	<b>6.02</b>	1.18	0.29	<b>0.89</b>	2.73	0	<b>2.73</b>	0.61	0.31	<b>0.30</b>	4.52	0.60	<b>3.92</b>
Section (e)	3.21	0	<b>3.21</b>	0.19	0.02	<b>0.17</b>	1.13	0	<b>1.13</b>	0.26	0.11	<b>0.15</b>	1.58	0.13	<b>1.45</b>
Section (f)	1.58	0.14	<b>1.44</b>	0.25	0	<b>0.25</b>	0.73	0.14	<b>0.59</b>	0	0	<b>0</b>	0.98	0.14	<b>0.84</b>

Tableau 2.4. Transport (Sv) moyen des tourbillons au travers des sections de calcul (a) à (f). La première colonne indique les valeurs pour l'ensemble des 199 trajectoires issues de l'analyse en ondelettes. La distinction est faite entre le transport d'est en ouest (<-), d'ouest

*en est (->), et le transport net vers l'ouest. Les 3 colonnes suivantes correspondent uniquement aux anneaux de chaque voie, tandis que la dernière colonne indique les valeurs cumulées des 3 voies.*

Cependant, outre l'hypothèse forte d'une profondeur unique et invariante des tourbillons, qui à elle seule entache ces valeurs d'une incertitude significative (mais difficile à estimer), quelques remarques supplémentaires sont à noter.

Tout d'abord, les sections les plus à l'ouest affichent un transport sous-estimé, du fait de la méthode employée pour l'application de l'analyse en ondelettes. En ne suivant les tourbillons que depuis leur détachement de la retroflexion, aucun des tourbillons déjà présents dans le Chaudron du Cap aux premières semaines de données n'a été comptabilisé. Ainsi, les premiers tourbillons recensés dans l'étude ne franchissent les sections les plus à l'ouest qu'au bout de quelques semaines de dérive. D'où une sous-estimation du transport, en moyenne, au travers de ces sections. L'étendue importante de la période d'étude permet cependant de limiter cet effet.

Ensuite, pour des raisons discutées plus haut, et qui sont liées à l'outil d'analyse en ondelettes et à son paramétrage dans cette étude, les tourbillons ne sont pas suivis jusqu'à leur dissipation réelle. Cela contribue probablement à sous-estimer le transport des anneaux, surtout au travers des sections les plus à l'ouest.

Inversement, l'emploi d'une profondeur unique de 1000 m pour le calcul du volume des tourbillons contribue peut-être à une sur-estimation du transport au travers des sections les plus avancées dans l'atlantique. Car si la surface des tourbillons, décroissante dans le temps, introduit effectivement une diminution du volume tel que calculé ici, les tourbillons en fin de vie sont probablement moins profonds et donc moins volumineux.

### **Transports par voie**

La somme des transports par voies ne donne pas exactement le transport de tous les tourbillons pour diverses raisons. D'une part, certaines branches de départ de tourbillons sont comptabilisées dans plusieurs voies, selon qu'elles mènent à des subdivisions empruntant différentes voies. Cela a pour effet de surévaluer le transport vers l'ouest par voie, dans la mesure où l'ensemble des eaux piégées dans le tourbillon de départ ne sera pas réellement véhiculées par la voie considérée. Mais cet effet n'est observé que pour la première section (a), du fait que les subdivisions sont largement concentrées à l'est et au voisinage de la dorsale et des monts sous-marins voisins, et que les tronçons de trajectoires doublement comptabilisés rejoignent des tourbillons démarrant à l'est des sections de définition des voies.

En revanche, les transports cumulés des différentes voies sont inférieurs au transport de l'ensemble des tourbillons, pour la section (b) et celles plus à l'ouest. Cela provient du fait que toutes les trajectoires identifiées dans l'étude ne sont pas attribuées à une des voies (43 trajectoires ne sont que partiellement, ou ne sont pas du tout, comptabilisées dans les voies).

Les voies ont des contributions assez différentes en terme de transport estimé à partir des surfaces des tourbillons. Sur la plupart des sections, près de la moitié du transport est assuré par la voie centrale (Figure 2.30a). Ceci provient de ce que cette voie est la plus empruntée, avec 49.1% des franchissements de la section de définition de voie (pourcentage ramené au total de franchissements pour les 3 voies). La voie sud contribue le moins au transport, étant par ailleurs la moins empruntée des voies.

On constate de plus que la voie centrale subit le moins d'érosion du transport d'une section à la suivante (Figure 2.30b). En effet, 70.2% du transport initial à travers la section (a) est conservé au niveau de la section (d), contre 29.0% pour la voie nord, et 18% ou 30% pour la voie sud selon que l'on prenne la section (a) ou (b) comme origine. Ce constat paraît surprenant au regard de l'évolution temporelle des diamètres des voies (voir Figure 2.28). En effet, le profil de décroissance des diamètres pour la voie est semblable à celui de l'ensemble des tourbillons, hormis au-delà de 25 semaines, âge à partir duquel la décroissance est plus rapide. L'explication principale de cette érosion plus lente du transport par la voie centrale vient de ce que la progression vers l'ouest des tourbillons de la voie centrale, une fois la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles franchie, se fait plus rapidement jusque 10°E que pour les autres voies, comme cela a été remarqué plus haut. Ainsi, les tourbillons de la voie centrale arrivent plus jeunes aux sections les plus à l'ouest, et n'ont donc pas encore vu leurs diamètres réduits de façon significative.

La voie sud assure la plus faible partie du transport, avec 1.66 Sv à la section (a). Elle subit de plus la plus forte diminution de transport d'une section à la suivante. En prenant en compte le transport par la section (b), cette décroissance est un peu moins marquée, mais le transport à travers cette section est plus faible encore, avec seulement 1.00 Sv. Cette érosion rapide provient de la faible pénétration à l'ouest des anneaux, évoquée plus haut, avec une part importante des trajectoires s'achevant au sud de la dorsale, donc en amont de la section (b). Cependant, les tourbillons de cette voie ayant été refroidis au sud de la dorsale, ils pourraient subduire à l'approche du front sud subtropical (voir Figure 2.25, le cas d'un tourbillon de cette voie échantillonné en mer et étudié par Arhan et al., 1999). Leur signal en anomalie de SSH pourrait alors s'estomper bien qu'ils poursuivent leur trajectoire vers le

nord-ouest. Le transport associé à cette voie est donc probablement fortement sous-évalué au-delà de la section (a).

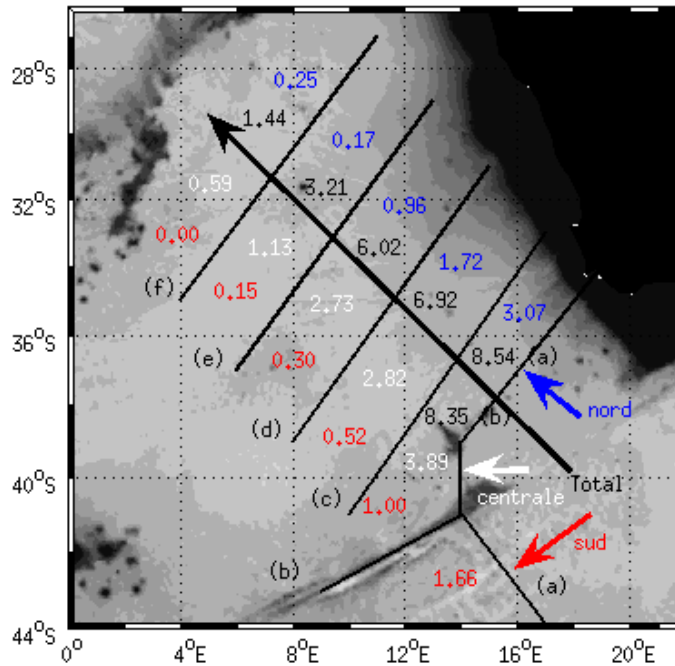


Figure 2.29. En traits noirs libellés de (a) à (f), sont représentées les sections de calcul du transport volumique par les anneaux des Aiguilles. Les valeurs indiquées représentent le transport moyen (Sv) au travers des sections : en noir, le transport de l'ensemble des tourbillons, et en bleu, blanc, et rouge, ceux des voies nord, centrale, et sud respectivement.

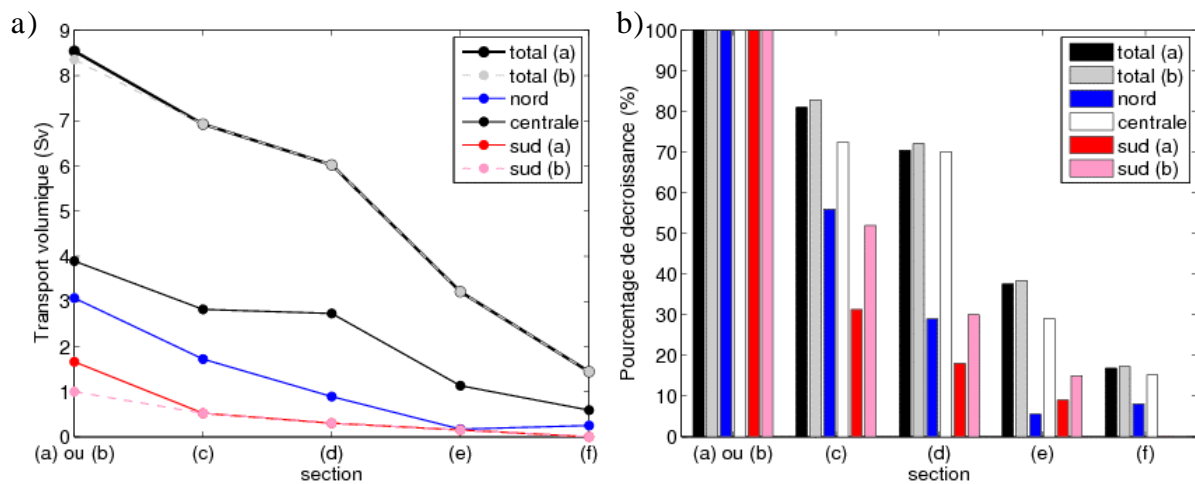


Figure 2.30. a) Transport moyen (en Sv) des tourbillons à travers chacune des sections, pour chacune des voies et pour l'ensemble des tourbillons. b) Taux de décroissance du transport des tourbillons à travers chacune des sections, pour chacune des voies et pour l'ensemble des tourbillons, calculé à partir du transport à travers la section (a) ou (b). Pour chaque tracé, deux courbes sont représentées, pour la voie sud et pour l'ensemble des tourbillons, selon que la section (a) ou (b) soit considérée comme première section de passage. Ce choix n'a aucune influence sur les transports des voies nord et centrale.

### **2.4.3 Etude spécifique des tourbillons passant au sud de la dorsale**

L'étude précédente a permis une première caractérisation du comportement des tourbillons de la voie sud, qui se démarque fortement de celui des anneaux des autres voies. Nos connaissances actuelles sur le comportement de ces tourbillons se limite essentiellement aux quelques échantillonnages réalisés au cours de campagnes en mer (Arhan et al., 1999, Gladyshev et al., 2008). Les profils hydrologiques du tourbillon échantillonné par Arhan et al. (1999) sont représentés Figure 2.25. Or, les caractéristiques hydrologiques atypiques qu'ils présentent, pour des anneaux des Aiguilles, leurs confèrent certainement un rôle particulier dans le bilan des échanges indo-atlantiques. L'étude par voie a permis une étude comparative des contributions de chacune des voies, basée sur un choix de sections de définition et de mode d'attribution de tourbillons aux différentes voies. Celle-ci a notamment montré une contribution en transport assez faible de la voie sud, du fait d'une pénétration vers l'ouest des anneaux assez limitée. Cette pénétration est cependant sous-évaluée par la perte du signal d'anomalie de SSH des tourbillons, en raison de leur subduction lorsqu'ils parviennent à pénétrer dans le domaine subtropical. Ces anneaux qui dérivent au sud de la dorsale des Aiguilles, ont été beaucoup moins étudiés que les anneaux adoptant une dérive nord-ouest plus classique. Afin de mieux caractériser leur comportement, une étude plus approfondie a été réalisée. Celle-ci vise notamment à expliciter le mode de formation de ces anneaux, leur comportement au cours de leur séjour dans la zone subantarctique, et la façon dont ils parviennent ou non à franchir la dorsale pour dériver dans l'atlantique et contribuer aux échanges de la branche nord du supergyre indo-atlantique.

#### **2.4.3.1 Observations de sous-familles de la voie sud**

Un examen des trajectoires des tourbillons de la voie sud fait apparaître 4 sous-familles de trajectoires principales associées aux anneaux. Elles sont représentées sur la Figure 2.31. Parmi elles, une seule est d'un intérêt particulier dans les échanges indo-atlantiques, et sera étudiée dans cette partie. Le décompte effectué ne prend pas en compte l'origine des tourbillons, qui peuvent être directement issu de la retroflexion, ou bien d'une subdivision ayant le plus souvent lieu à proximité de la pointe nord-est de la dorsale de Aiguilles. Seules les trajectoires sont ici prises en compte, les mécanismes de formation étant abordés par la suite.

Tout d'abord, 7 tourbillons franchissent la section de définition de la voie, puis franchissent rapidement la dorsale pour pénétrer dans le chaudron du Cap. Cette sous-famille



de tourbillons (notée (a) sur la Figure 2.31) ne subit donc pas de modifications hydrologiques importantes, si ce n'est une possible érosion dynamique lors du franchissement de la bathymétrie. La contribution de ces anneaux aux échanges indo-atlantiques est donc probablement assez proche de celle des anneaux des autres voies.

Ensuite, 9 tourbillons de la voie sud, après une dérive vers le sud de la dorsale, ne parviennent pas à franchir vers l'ouest la longitude 15°E, et finissent le plus souvent par remonter vers la retroflexion pour y être réintégré (famille (b) de la Figure 2.31). Ces anneaux ne contribuent donc pas directement aux échanges indo-atlantiques. Ils constituent une sous-famille qui est un cas limite entre les anneaux des Aiguilles dérivant vers l'ouest, et les warm eddies décrits par Lutjeharms et Valentine (1988) qui dérivent avant d'être repris plus à l'est dans le courant de retour des Aiguilles.

Une troisième sous-famille est constituée d'anneaux des Aiguilles dérivant vers le sud-ouest, et stagnant dans cette région jusqu'à perte de suivi par l'analyse en ondelettes (famille (c) de la Figure 2.31). Ces tourbillons, au nombre de 5, qui ne sont en général pas les plus gros de la voie sud, se dissipent probablement dans cette région. Si certains parviennent à conserver une dynamique profonde et à dériver par la suite dans l'atlantique, il n'est pas possible de le vérifier avec l'outil d'analyse en ondelettes. Cependant, leur nombre étant relativement faible, ainsi que leurs dimensions spatiales initiales, leur éventuelle contribution aux échanges indo-atlantique est certainement limitée.

La dernière sous-famille de tourbillons observée concerne une dizaine d'anneaux. Il s'agit de tourbillons dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles, pour y stationner pendant un temps variable avant d'amorcer une remontée vers la dorsale des Aiguilles (famille (d) de la Figure 2.31). Si certains sont ensuite suivis dans leur trajectoire au nord de la dorsale, d'autres ne sont plus détectés par l'outil d'analyse à l'approche du relief sous-marin. Cependant, un examen des cartes d'anomalies de SSH indique qu'un signal parfois très faible perdure en se propageant vers le nord, signe que le tourbillon, fortement refroidi par un séjour dans l'ACC, a probablement subducté en pénétrant les eaux plus chaudes du domaine subtropical de l'Atlantique sud. Ces anneaux, de par leur stationnement au sud la dorsale, ont subi des modifications hydrologiques analogues à celles constatées par Arhan et al. (1999) puis Gladyshev et al. (2008), et ont contribué à véhiculer ces eaux vers l'Atlantique sud en pénétrant dans le domaine subtropical. L'attention s'est donc portée spécifiquement sur cette sous-famille de tourbillons.

31 tourbillons peuvent ainsi être classifiés dans l'une des 4 sous-familles définies. Ce chiffre, ramené au 38 tourbillons empruntant la voie sud (26 franchissements de la section de

définition de la voie, et 12 sous-tourbillons issus de subdivisions ayant lieu après franchissement), indique que 7 trajectoires n'ont pas été classifiées, car elles correspondent chacune à des cas limites entre sous-familles. Cette classification n'a pas été définie par des critères rigides, mais se base simplement sur une appréciation des trajectoires, de l'historique, et des possibles contributions des tourbillons aux échanges inter-gyre.

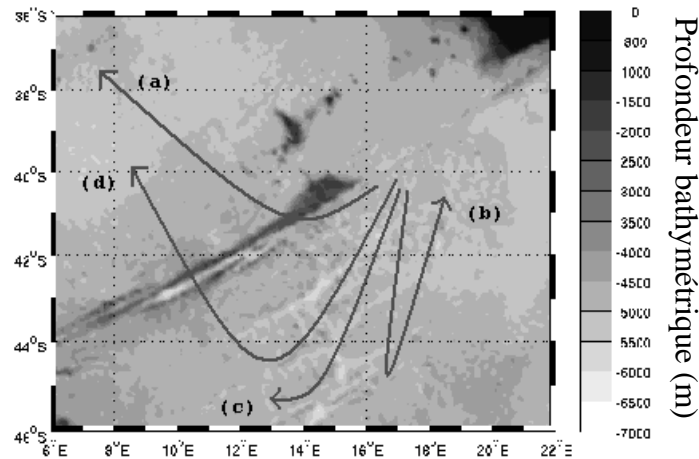
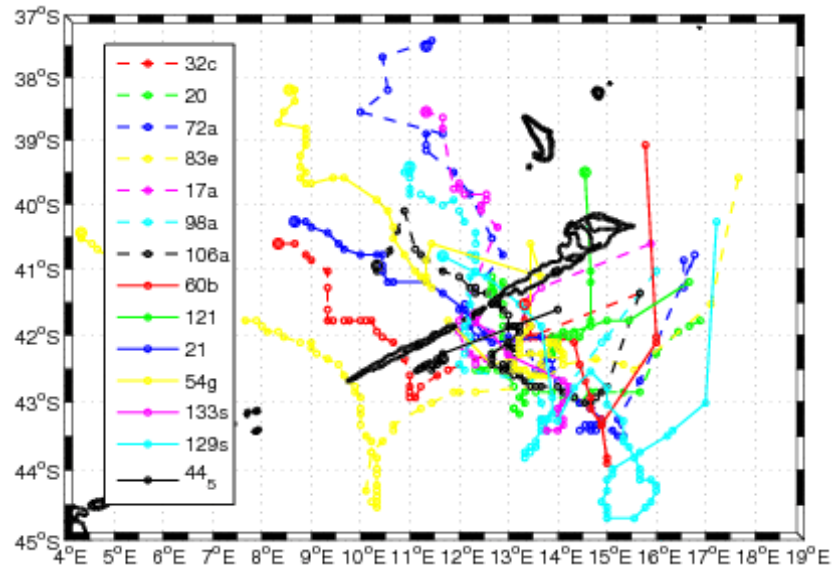


Figure 2.31. Trajectoires schématisées des 4 sous-familles de tourbillons de la voie sud. La famille (d) sera étudiée, car elle concerne des tourbillons ayant séjournés longuement sous la dorsale, et parvenant à franchir la dorsale des Aiguilles et contribuer aux échanges indo-atlantiques.

#### 2.4.3.2 Détermination des trajectoires de l'étude

Les caractéristiques hydrologiques acquises par les tourbillons de cette sous-famille de la voie sud proviennent de leur séjour prolongé au sud de la dorsale. C'est pourquoi, en nous basant sur le diagnostic de trajectoires réalisé avec l'analyse en ondelettes, nous avons identifié l'ensemble des anneaux dont une partie significative de la trajectoire se situe dans cette région, et qui parviennent à franchir la dorsale vers le nord. L'ensemble ainsi défini est sensiblement plus grand que la sous-famille définie à partir de l'étude de la voie sud. En effet, si l'ensemble des tourbillons de la voie sud passent nécessairement au sud de la dorsale, de par le choix de la section de définition de la voie sud, certains tourbillons passant au sud de la dorsale ne sont pas pris en compte dans la voie sud. Il s'agit principalement de tourbillons dont le suivi débute au sud-ouest de cette section de définition, ne la franchissant donc jamais. Le suivi des tourbillons débutant lors de leur détachement de la retroflexion, cela signifie que ces tourbillons ont été générés lors d'une avancée exceptionnellement forte vers le sud-ouest de la retroflexion. Cela concerne 2 tourbillons. Une autre possibilité, qui n'est rencontré qu'à deux occasions également, est qu'un tourbillon franchisse la dorsale du nord vers le sud, sans franchir la section de définition de la voie sud. Les 2 tourbillons concernés proviennent de la

voie centrale et leurs trajectoires sont donc visibles sur la Figure 2.22. Ainsi, un total de 14 trajectoires de tourbillons, tracées sur la Figure 2.32, présentent des trajectoires telles que les tourbillons sont susceptibles de véhiculer vers l'atlantique des eaux aux propriétés distinctes des anneaux des Aiguilles classiques.



*Figure 2.32. Trajectoires des 14 tourbillons étudiés ici. A noter que les tronçons de tourbillons d'origine, lorsqu'il s'agit de sous-tourbillons, ne sont pas représentés. Certaines des trajectoires sont donc celles de tourbillons d'origine (issu de la réflexion), tandis que d'autres débutent lors de subdivisions.*

A titre d'exemple, la trajectoire du tourbillon 129s est représentée sur la Figure 2.33, ainsi que l'évolution de différentes grandeurs au cours de sa trajectoire curviligne. Si l'évolution de ces grandeurs est variable d'un tourbillon à l'autre, plusieurs caractéristiques présentées par ce tourbillon se retrouvent sur d'autres tourbillons et illustrent des propriétés qui sont abordés plus bas.

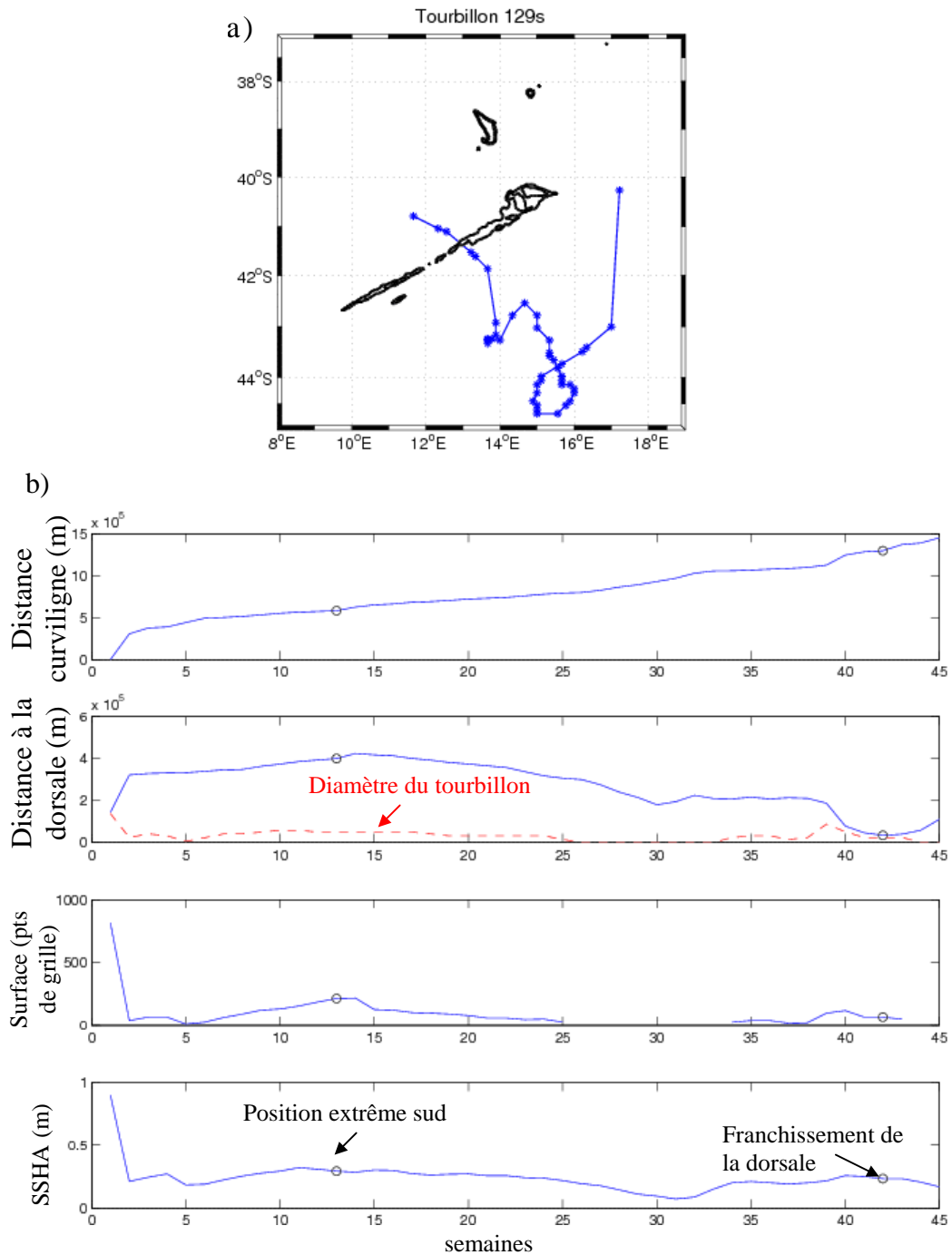


Figure 2.33. En haut, tracé de la trajectoire du tourbillons 129s. En bas, évolutions pour le tourbillon 129s dans le temps (en semaines) de: (a) la distance curviligne parcourue; (b) la distance à la dorsale (avec représenté en trait rouge discontinu le rayon moyen du tourbillon à chaque instant; (c) la surface du tourbillon, avec la position extrême sud indiquée en rond noir; (d) idem (c) pour l'anomalie au centre du tourbillon.

### **2.4.3.3 Formation des tourbillons**

#### **Subdivision sur la dorsale des Aiguilles**

Un examen visuel des champs de SSH aux dates de formation des tourbillons montre que ceux-ci sont souvent formés par subdivision d'un anneau des Aiguilles se dirigeant vers la pointe nord-est de la dorsale des Aiguilles. Les 2 anneaux ainsi formés prennent alors des trajectoires nord-ouest pour l'un et sud-ouest pour l'autre, de part et d'autre de la dorsale. Le tourbillon se déplaçant vers le sud est celui suivi dans cette étude. Ce mécanisme est à l'origine de 6 des tourbillons suivis (72a, 83e, 98a, 106a, 60b et 121). La Figure 2.34 représente les champs moyennés de SSH pour ces 6 tourbillons, pour 8 semaines successives. Pour le calcul de ces champs moyens, les dates sont calées visuellement sur la semaine d'amorce de la subdivision. On distingue un schéma moyen d'avancée de la retroflexion, depuis une position assez reculée vers l'est, suivi d'un détachement d'un anneau des Aiguilles (4<sup>ème</sup> semaine). Cet anneau vient ensuite rencontrer la pointe de la dorsale et amorce sa subdivision (6<sup>ème</sup> semaine). Une partie en est alors rapidement expulsée au sud de la dorsale.

On note dans ce mécanisme la présence d'un tourbillon cyclonique sur l'extrémité de la dorsale. L'origine de ce cyclone pourrait être antérieure à la subdivision. On constate en effet sur la Figure 2.34 que l'avancée de la retroflexion, puis du tourbillon qui s'en détache, est accompagnée au nord d'un cyclone se déplaçant conjointement avec le tourbillon anticyclonique. Ce cyclone semble ensuite se scinder en deux cyclones lorsque l'anneau des Aiguilles approche de la dorsale, l'un se retrouvant au sud-ouest du talus continental sud-africain, et le second à l'aplomb de l'extrémité de la dorsale. Cette scission du cyclone semble résulter de l'étirement méridional de l'anneau à l'amorce de la subdivision de ce dernier. La présence du cyclone au-dessus de la dorsale pourrait alors jouer un rôle dans la poursuite du mécanisme de subdivision de l'anticyclone.

Mais ce tourbillon pourrait aussi être engendré par la rencontre de l'anticyclone et de la pointe de la dorsale des Aiguilles. Un tel mécanisme a été étudié et reproduit dans des études théoriques (Herbette et al., 2004), qui ont mis en évidence l'apparition de tourbillons topographiques de sens de rotation opposés, lors de la rencontre entre un mont sous-marin et un anticyclone, pouvant mener à une subdivision de l'anticyclone.

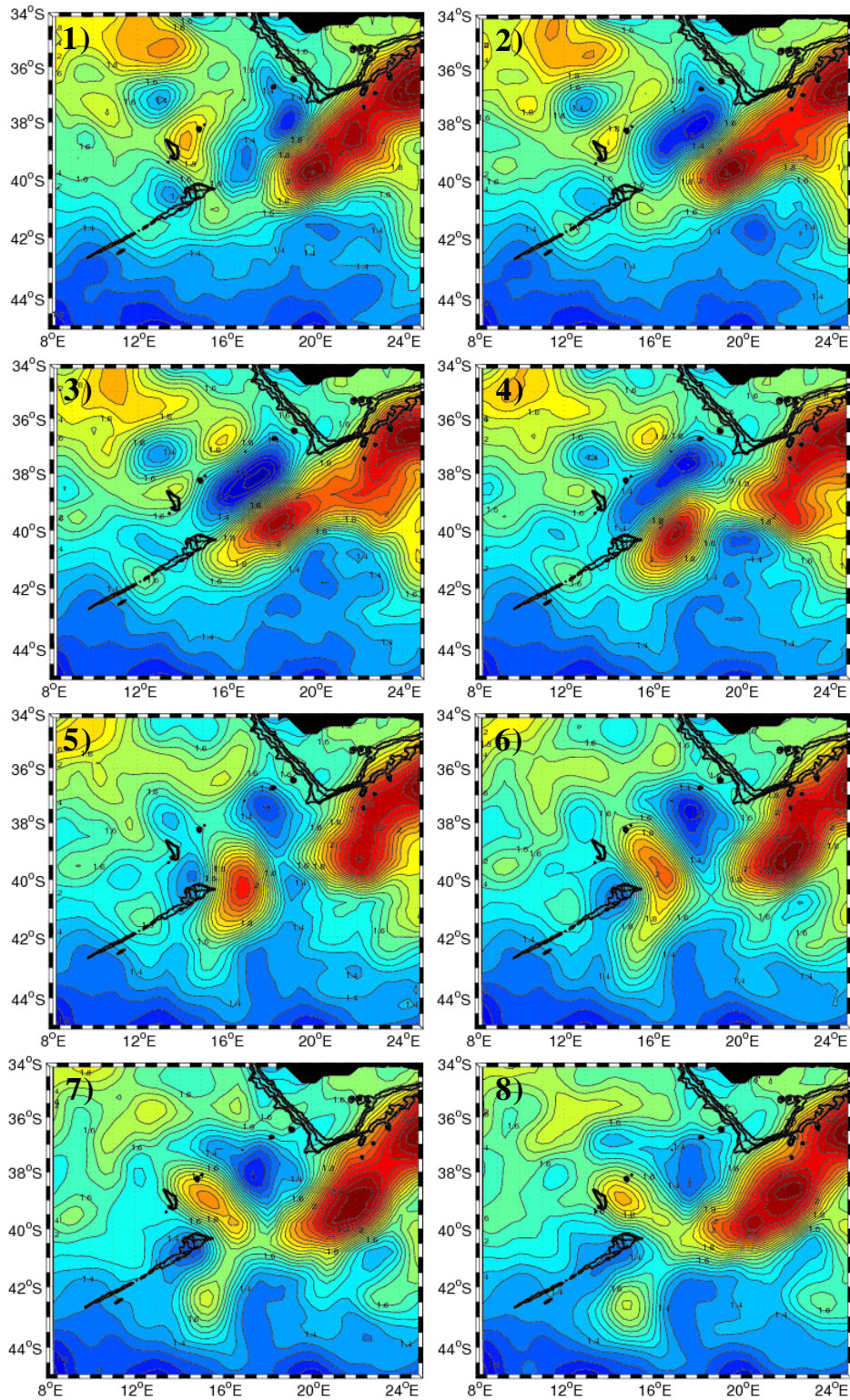


Figure 2.34. Série temporelle des champs moyens hebdomadaires de SSH, pour les 6 tourbillons formés par subdivision d'un anneau sur la pointe de la dorsale des Aiguilles. Ce mécanisme semble s'accompagner de la présence d'un cyclone situé à l'aplomb de cette pointe et pouvant contribuer à l'advection du tourbillon généré vers le sud de la dorsale.

Quelque soit l'origine du cyclone situé à l'aplomb de la pointe de la dorsale lors de la subdivision de l'anneau des Aiguilles, celui-ci semble contribuer à l'advection vers le sud du

sous-tourbillon suivi dans cette étude. Suite à la subdivision, le tourbillon se déplace vers le sud à une vitesse particulièrement forte. Cela pourrait être lié à la présence du cyclone, dont la rotation propre pourrait accélérer l'advection de l'anneau vers le sud. Ces vitesses élevées étaient déjà mises en évidence sur le tracé des répartitions spatiales des vitesses moyennes de la voie sud (Figure 2.27, première ligne).

### **Dérive depuis la retroflexion**

Six autres tourbillons semblent formés de façon différente, sans l'interaction directe d'un tourbillon ou de la retroflexion avec la dorsale de Aiguilles. Leurs trajectoires initiales passent plus largement au sud de la dorsale, et sont généralement formées par détachement de la retroflexion alors que celle-ci se trouve plus au sud qu'elle ne l'est en général. Certains sont également issus de tourbillons déjà détachés de la retroflexion, mais se trouvant également à une latitude sud assez élevée. Les six tourbillons concernés ont été désignés 32c, 20, 17a, 21, 133s et 129s. Une illustration de ce mécanisme de formation est donnée sur la Figure 2.35, avec le cas du tourbillon 20. Le tracé d'une série temporelle de SSH moyenne pour la formation de ces tourbillons n'est pas adapté ici, du fait de la variabilité spatiale et temporelle du mécanisme d'un cas sur l'autre. On constate, comme dans le cas des tourbillons formés par subdivision sur la dorsale, que ces tourbillons sont souvent advectés très rapidement au sud. Cela est visible dans le cas du tourbillon 129s, dont la distance curviligne parcourue est très importante au cours des 3 ou 4 premières semaines (voir Figure 2.33).

Enfin, les tourbillons 44\_5 et 54g ont des modes de formation uniques. Le 54g provient du nord de la dorsale, la franchissant vers le sud pour la franchir à nouveau plus tard. Le tourbillon 44\_5 est quant à lui issu du détachement d'un tourbillon situé à l'ouest de la pointe nord-est de la dorsale, et à cheval sur celle-ci.



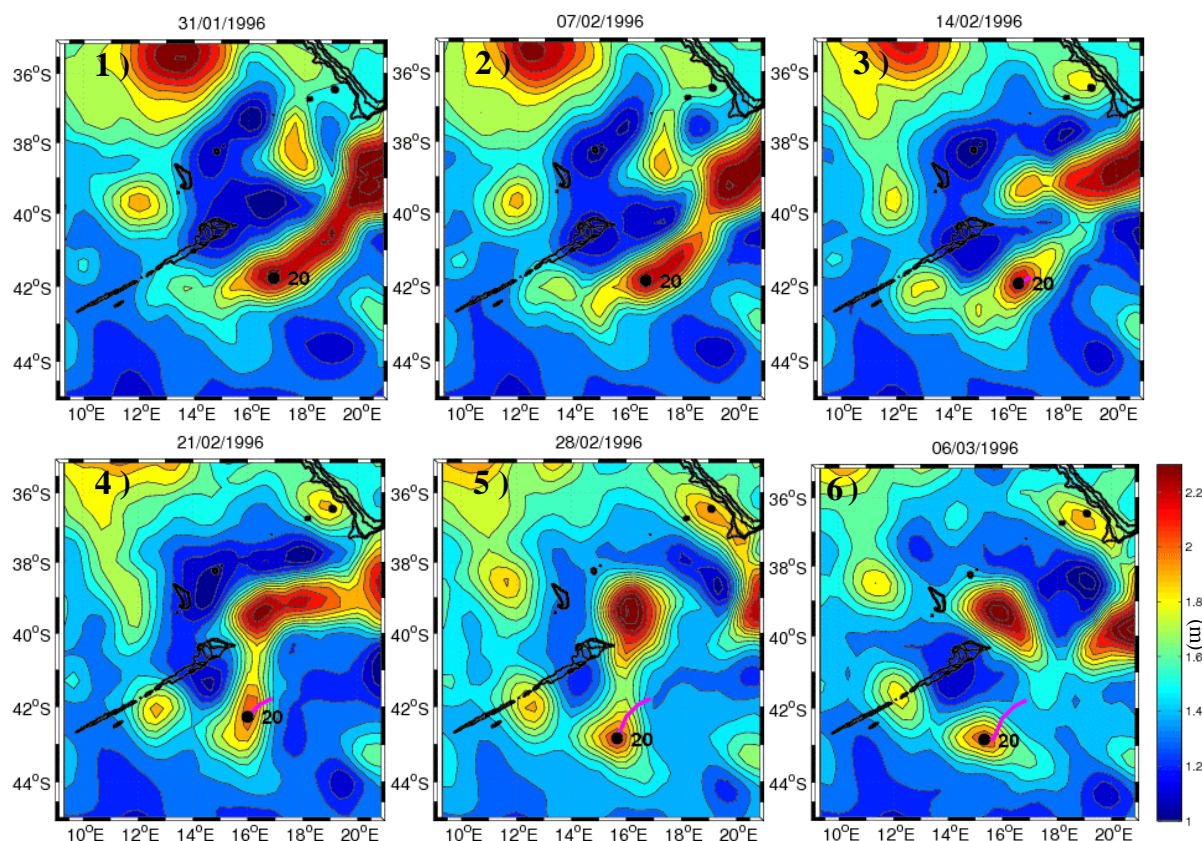


Figure 2.35. Formation du tourbillon 20. Il se détache de la retroflection, alors que celle-ci se trouve très au sud, pour dériver sous la dorsale des Aiguilles, sans interagir avec la pointe de la dorsale des Aiguilles.

### Correspondance des tourbillons avec les lâchers répertoriés dans l'étude de la retroflection

Les tourbillons étudiés ici peuvent être reliés aux lâchers de masses d'eau dont ils sont issus (lâchers définis dans l'étude de la retroflection présentée au premier chapitre). Il est possible d'identifier les lâchers générant 11 des 14 tourbillons étudiés. Les 3 autres ne peuvent être attribués à un lâcher pour des raisons diverses : les tourbillons 44\_5 et 32c ont subi l'influence de nombreuses structures mésoéchelles avant de dériver au sud de la dorsale, de sorte que les eaux qu'ils véhiculent sont certainement très différentes de celles du lâcher d'origine ; le tourbillon 129s s'étant quant à lui détaché au sud de la retroflection, et étant de diamètre faible, aucun recul vers l'est de la retroflection n'a résulté de sa formation. C'est pourquoi aucun lâcher n'a été répertorié lors de sa formation.

Les positions des lâchers associés aux 11 tourbillons associés à un lâcher sont représentées sur la Figure 2.36, ainsi que les positions des 73 lâchers de l'étude. On constate que les lâchers menant à la formation de tourbillons dérivant au sud sont parmi les plus au sud-est des 73 lâchers. Qu'il s'agisse donc de tourbillons libérés directement au sud de la



dorsale, ou de tourbillons issus d'une subdivision d'anneau sur son extrémité nord, la retroflection se trouve toujours dans une configuration orientée très au sud.

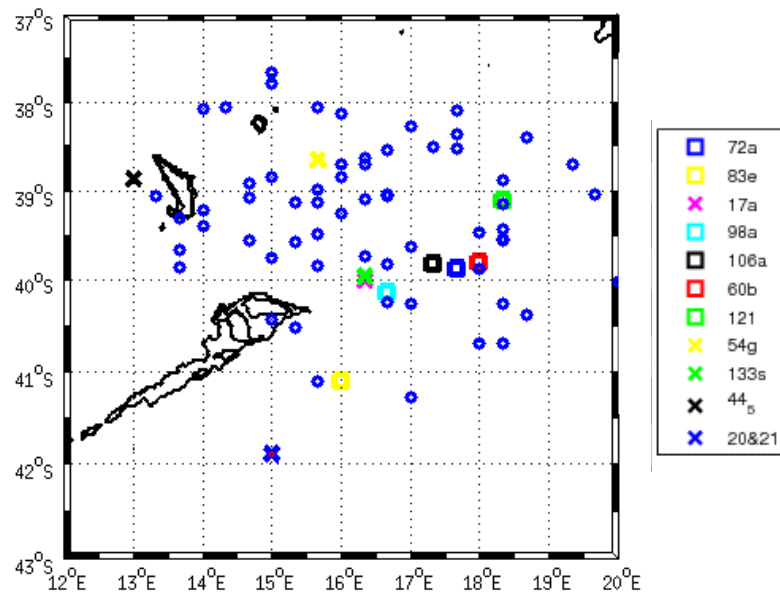


Figure 2.36. Positions du point de retroflection avant les lâchers des masses d'eaux à l'origine des tourbillons étudiés. Carrés pour les anneaux produits par subdivision sur la dorsale, et croix pour les autres. Les positions des autres lâchers, déterminés au premier chapitre, sont représentés en ronds bleus.

7 des 11 tourbillons sont formés moins d'une semaine après l'événement de lâcher auquel ils sont associés. Parmi ceux-ci figurent 4 des 6 tourbillons formés par subdivision sur la dorsale, ce qui nous renseigne sur le mécanisme de formation de ces tourbillons. En effet, dans ces 4 cas, il ne s'agissait ainsi pas d'un anneau des Aiguilles préexistant venant rencontrer la dorsale, mais plutôt d'une avancée de la retroflection à la rencontre de la dorsale, puisque le lâcher et la naissance du tourbillon sont quasi-simultanés. On constate sur la Figure 2.36 qu'il s'agit des 4 positions de la retroflection lors de lâchers (parmi les 6 associées à des subdivisions, et représentés en carrés sur la figure), qui sont les plus à l'ouest, donc proche de la dorsale des Aiguilles. On peut ainsi envisager dans ces 4 cas que la pointe de la dorsale a joué un rôle de barrière dans l'avancée vers l'ouest de la retroflection. Et le délai très court entre le lâcher et la formation des tourbillons par subdivision sur la dorsale montre la rapidité du mécanisme de subdivision lorsque la retroflection ou un anneau récemment formé aborde l'extrémité de la dorsale.

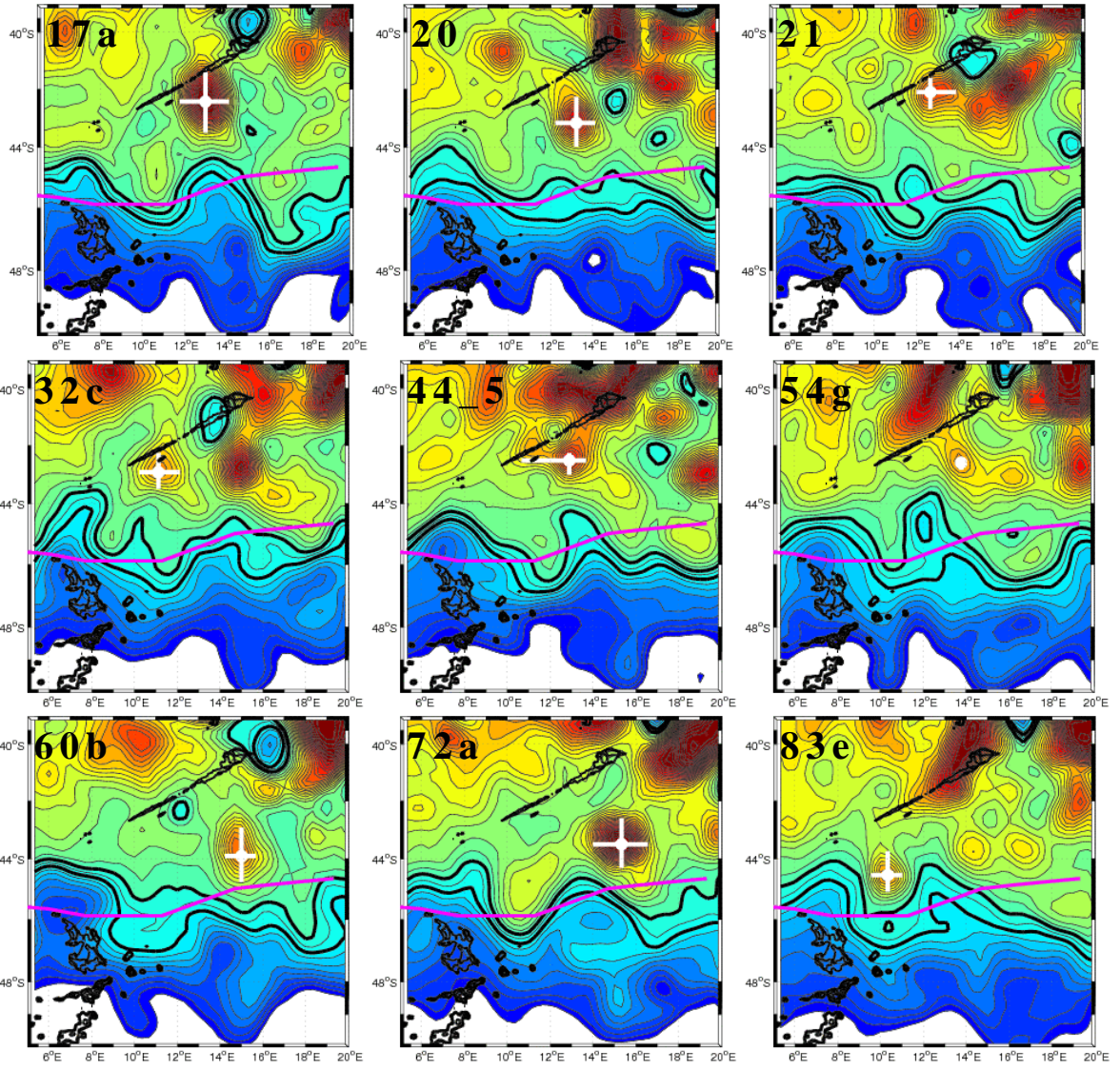
Pour les 2 derniers tourbillons formés par subdivision sur la pointe de la dorsale, les intervalles de temps entre lâchers par la retroflection et formations des tourbillons sont plus longs: 3 semaines pour le 121, et 6 semaines pour le 60b. Les positions de la limite de la retroflection, aux instants de lâchers associés à ces deux tourbillons (Figure 2.36), se trouvent

plus à l'est. Ceci explique le délai plus long pour la masse d'eau lâchée pour atteindre la dorsale et se subdiviser, malgré des écarts en longitude relativement faibles. Dans ces deux cas, la dorsale n'a probablement pas perturbé la retroflexion dans sa progression vers l'ouest, et n'a pas contribué au déclenchement du lâcher de masses d'eaux par la retroflexion.

#### **2.4.3.4 Interaction avec le Front Subantarctique SAF**

L'interruption de la composante de déplacement vers le sud des tourbillons pourrait découler de leur interaction avec le SAF, s'écoulant vers l'est, comme cela apparaît sur la Figure 2.37. Celle-ci représente les positions les plus au sud des 14 tourbillons étudiés, ainsi qu'un tracé des contours de SSH à 1.1m et 1.2m. Ces contours, qui sont associés à un resserrement des lignes d'iso-SSH, délimitent le domaine de présence du SAF. On constate que ces contours se situent toujours au sud du tourbillon. Le SAF semble ainsi constituer une limite sud au déplacement des tourbillons. De plus, la proximité des tourbillons avec ces contours dans bon nombre de cas, notamment lorsque le resserrement des isolignes est intense, laisse penser à un rôle de barrière active jouée par ce front. Un autre signe de cette interaction entre tourbillons et front, est que l'on observe, pour la plupart des tourbillons, un ralentissement de leur composante de vitesse vers l'ouest, voire un déplacement vers l'est, lorsqu'ils sont le plus au sud. Cela pourrait traduire un effet d'entraînement par le front, lequel s'écoule vers l'est et pourrait advecter temporairement le tourbillon lorsqu'il est à son contact. Ce retour temporaire vers l'est est notamment visible dans le cas du tourbillon 129s (voir Figure 2.33).

La Figure 2.33 fait apparaître, pour le tourbillon 129s, une influence de l'interaction des tourbillons avec le SAF, qui est également observée pour la majorité des tourbillons ; à savoir, un léger accroissement de l'anomalie au centre du tourbillon, ainsi que de la surface des tourbillons. Ces grandeurs diminuent à nouveau à l'amorce de la remontée des tourbillons, et donc leur éloignement du SAF. Cette observation laisse penser que cette interaction pourrait avoir un rôle clé dans la modification des masses d'eaux du tourbillon. Le sens d'écoulement du front au sud du tourbillon est tel qu'il permettrait peut-être un renforcement de la dynamique du tourbillon, mais également une adjonction des eaux environnantes au sein de celui-ci.



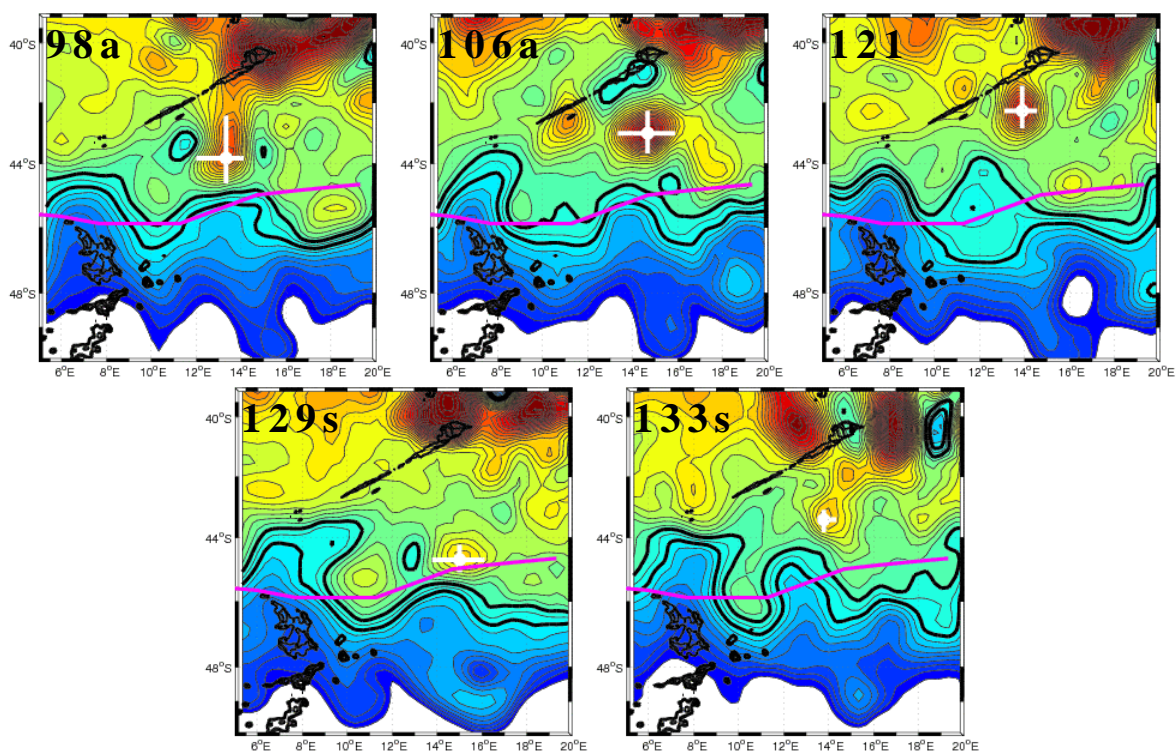


Figure 2.37. Interactions des anneaux avec le front SAF. Les contours de SSH à 1,1 m et 1,2 m en gras indique la position probable du SAF. Les segments blanc donnent les dimensions longitudinale et latitudinale des tourbillons dans leur position la plus au sud. Le contour violet indique la position du SAF selon Belkin et Gordon.

#### 2.4.3.5 Evaluation de l'importance des modifications hydrologiques

Les échanges air-mer subis au sud de la dorsale des Aiguilles par ces anneaux sont en grande partie responsables du refroidissement et de la convection dans leur cœur, observés par Arhan et al. (1999) ou Gladyshev et al. (2008). Ceux-ci sont les plus intenses en période hivernale, et sont d'autant plus marqués que les anneaux ont stationné longtemps dans la région durant la période froide. Afin de mieux apprécier l'impact relatif de ces anneaux sur les échanges indo-atlantiques, il convient d'étudier à la fois leur temps de séjour au sud de la dorsale des Aiguilles, et à quelle période de l'année ce séjour a lieu. Le Tableau 2.5 détaille alors, pour chaque tourbillon, le nombre de semaines passées au sud de la dorsale, le nombre de ces semaines appartenant au semestre automne-hiver (comme indicateurs de la période froide), et la latitude la plus au sud atteinte par les tourbillons.

On constate ainsi que 4 des 14 tourbillons ont passé un semestre automne/hiver complet au sud de la dorsale (soit 26 semaines), et que 5 autres y ont stationné au moins 10 semaines durant cette même époque de l'année. Seuls 3 tourbillons n'ont pas séjourné sous la dorsale durant ce semestre, l'un d'entre eux (le tourbillon 21) n'ayant passé que 4 semaines au sud de la dorsale. Les modifications hydrologiques subies par ce dernier sont probablement

moindre, de sorte que ce tourbillon pourrait également être considéré comme faisant partie d'une autre sous-famille de la voie sud. La Figure 2.38 représente la position en latitude des tourbillons ramenée à un cycle annuel, les dates des franchissements de la dorsale vers le nord, pour les tourbillons qui parviennent à la franchir, étant indiquées.

nom	début	fin	sem	Sem dorsale /s	Sem /s dorsale et automne/hiver	Latitude sud max atteinte(*sud)
32c	22/07/1998	27/01/1999	28	10	10	42.93
	31/01/1996	13/11/1996	42	36	26	43.17
72a	17/12/2003	05/01/2005	54	36	27	43.49
83e	13/07/2005	25/10/2006	69	38	12	44.53
17a	02/08/1995	06/03/1996	30	14	6	42.43
98a	23/03/1994	22/03/1995	51	25	25	43.81
106a	22/07/1998	14/07/1999	50	30	9	43.01
60b	05/06/2002	27/11/2002	26	26	16	43.90
121	06/10/2004	02/02/2005	18	17	0	42.27
21	07/02/1996	26/06/1996	21	5	0	42.11
54g	22/08/2001	13/11/2002	65	32	7	42.60
133sd	01/10/1997	21/01/1998	17	17	0	43.41
129s	15/01/2003	19/11/2003	45	42	27	44.69
44_5	05/04/2000	09/08/2000	19	19	19	42.52
Total			535	347	184	

Tableau 2.5. Pour chaque tourbillon, sont indiqués les dates de début et fin de suivi, le nombre de semaines passées au sud de la dorsale, le nombre de ces semaines appartenant au semestre automne-hiver, et la latitude la plus au sud atteinte.

Le temps de suivi cumulé des trajectoires de tourbillons lorsqu'elles se situent au sud de la dorsale est de 347 semaines, ce qui représente 46.7% de l'étendue temporelle de l'étude. Si l'on considère qu'un seul tourbillon se situe au sud de la dorsale à un instant donné, il y a donc près d'une chance sur deux de trouver un tourbillon du type étudié ici dans cette région. Près de la moitié de ce temps de séjour au sud de la dorsale à lieu en semestre automne-hiver.

Aucune saisonnalité significative n'est constatée dans le comportement des tourbillons, si ce n'est qu'aucun franchissement de la dorsale n'est enregistré durant les mois de mai à août (la remontée comptabilisée en août correspond au tourbillon 44\_5, qui ne parvient pas à franchir la dorsale en réalité), soit pendant 4 mois de l'année. Et ce alors que les périodes de formation des tourbillons semblent assez aléatoires (voir Figure 2.39a). Le nombre de tourbillons suivis est cependant trop faible pour conclure à une tendance.



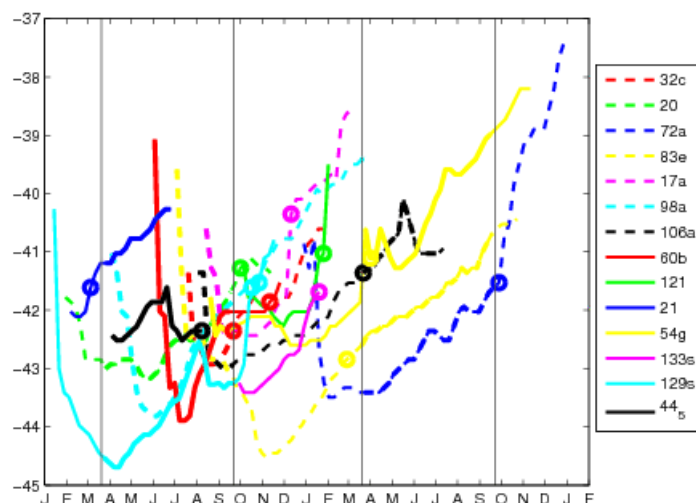


Figure 2.38. Latitude des tourbillons remontant vers la dorsale de Aiguilles dans le temps, ramené à leur cycle annuel. Les traits verticaux délimitent les périodes automne/hiver (latitudes tracés en gras) de printemps/été (latitudes en fin/discontinu). En rond de couleur les passages au-dessus de la dorsale (ou les dernières dates lorsque la dorsale n'est pas franchie).

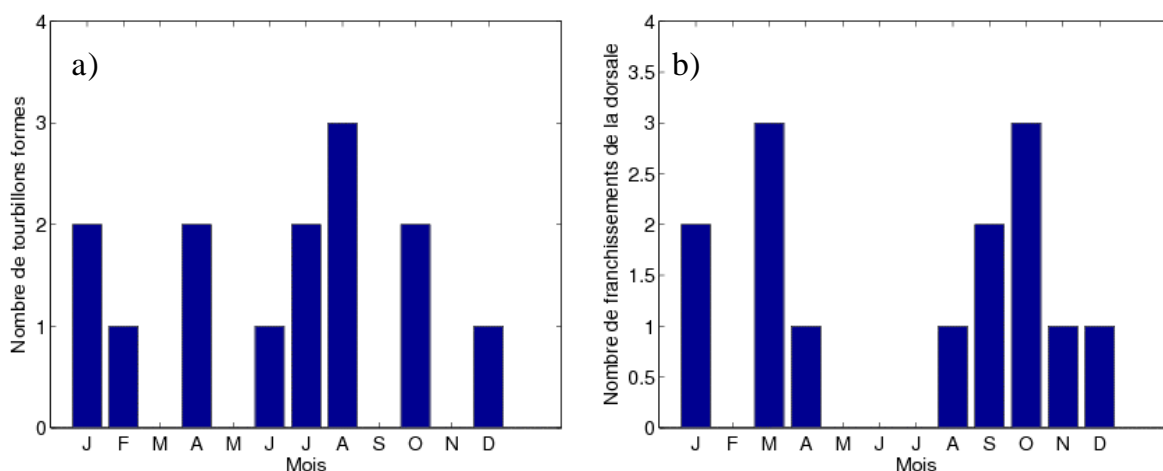


Figure 2.39. a) Nombre d'anneaux étudiés ici formés par mois. b) Nombre de franchissements de la dorsale vers le nord par mois.

### 2.4.3.6 Remontée et franchissement de la dorsale

Après avoir stationné au sud de la dorsale, et interagi avec le front subantarctique, les tourbillons étudiés ici amorcent leur remontée en direction de la dorsale des Aiguilles. Ils dérivent vers le nord-ouest, direction de propagation typique des anneaux des Aiguilles. Un examen des trajectoires des tourbillons indique alors une zone d'approche et de franchissement privilégiée de la dorsale. 11 des 14 tourbillons abordent la dorsale dans la région où la ligne de crête de la bathymétrie est la plus profonde (Figure 2.40), entre 11.5°E et 14°E. La majorité d'entre eux franchit d'ailleurs la dorsale au voisinage du creux le plus marqué, vers 12°E. Cette zone de la dorsale semble donc la plus propice au franchissement

des tourbillons, minimisant les interactions entre bathymétrie et anticyclones, lesquels sont probablement encore très profonds lorsqu'ils s'approchent de la dorsale. C'est le cas des tourbillons échantillonnés par Arhan et al. (1999) et Gladyshev et al. (2008), dont la signature dynamique se situe au-delà des 1000 m de profondeur, alors que les tourbillons ont déjà franchi la dorsale lors de leur échantillonnage (voir Figure 2.25).

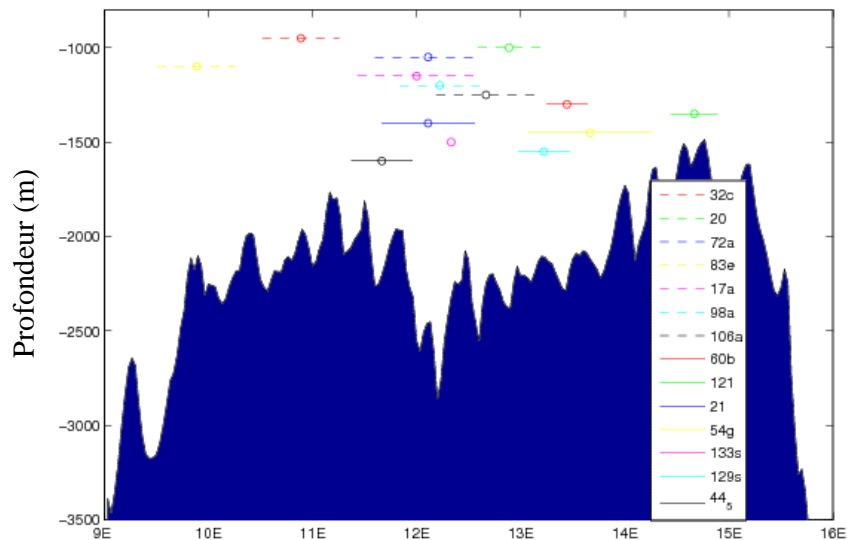


Figure 2.40. Les positions des centres des tourbillons, lors du franchissement de la dorsale sont représentées en ronds colorés. La ligne de crête de la bathymétrie de la dorsale est représentée en fond bleu, tandis que les traits horizontaux barrant les positions des centres de tourbillons indiquent les diamètres moyens des tourbillons lors du franchissement.

Le tracé des trajectoires des tourbillons montre qu'une grande partie d'entre eux ne poursuit pas son déplacement très longtemps après franchissement de la dorsale. Cependant, un examen des trajectoires issues de l'analyse en ondelettes indique que la plupart des tourbillons concernés opèrent une jonction avec un anticyclone, peu après avoir franchi la dorsale (hormis le tourbillon 44\_5, qui s'estompe avant franchissement). Les tourbillons rejoints étant le plus souvent de diamètres moyens supérieurs, le suivi ultérieur du tourbillon leur est attribué dans la méthode mise en place. On peut donc penser que tous les tourbillons, sauf peut-être le 44\_5, poursuivent leur dérive dans l'atlantique sud, seuls ou adjoints à un autre anneau des Aiguilles.

### 2.4.3.7 Cinématique des tourbillons

Comme indiqué plus haut, la phase initiale de déplacement des tourbillons vers le sud de la dorsale se fait rapidement. Cela est illustré Figure 2.33 pour le tourbillon 129s, où la distance curviligne parcourue croît fortement les premières semaines. Puis, durant les phases de stagnation au sud, et de remontée vers la dorsale, la vitesse de déplacement du centre des

tourbillons est en général plus faible. D'où le palier apparent Figure 2.33, dans le tracé de la distance curviligne parcourue par le tourbillon 129s. Le profil de vitesse des divers tourbillons, au sud de la dorsale, présente occasionnellement quelques accélérations brusques. Celles-ci peuvent traduire une réelle variabilité des vitesses de déplacement dans cette région, mais proviennent surtout des limites de l'analyse en ondelettes. En effet, le positionnement du centre du tourbillon au point d'anomalie de SSH maximale est sensible à la précision des données, et ne reflète pas nécessairement le centre dynamique du tourbillon à chaque pas de temps. La position attribuée au centre du tourbillon peut donc se déplacer d'une semaine sur l'autre, sans que le tourbillon n'ait beaucoup dérivé. On constate en revanche toujours un ralentissement lorsque les tourbillons commencent à ressentir la présence de la dorsale. C'est le cas pour le tourbillon 129s: lorsque la distance du centre du tourbillon à la dorsale atteint la valeur du rayon moyen du tourbillon, on observe un palier dans le tracé de la distance curviligne parcourue par le tourbillon. Une fois la dorsale franchie, les profils de vitesses sont à nouveau variables.

#### **2.4.3.8 Érosion des tourbillons**

De par leur appartenance à la voie sud (pour 10 des 14 anneaux étudiés ici), ces tourbillons présentent des caractéristiques conforme à ceux mis en évidence dans l'étude de la voie. Tout d'abord, on constate une érosion importante et rapide de l'anomalie de SSH au centre des tourbillons, ainsi que de leur diamètre moyen (ou surface), lors de leur migration vers le sud de la dorsale. Cela est apparent dans le cas du tourbillon 129s (Figure 2.33), comme pour l'ensemble des tourbillons, comme on peut le voir sur la Figure 2.41 représentant les évolutions temporelles de ces grandeurs pour les 14 tourbillons. Sur cette figure, on remarque également la variabilité importante des valeurs initiales de diamètres et d'anomalies au centre des tourbillons, et l'érosion très importante des tourbillons les plus gros. Ainsi, en dépit du refroidissement conséquent des tourbillons au sud de la dorsale, des tourbillons de diamètres relativement faibles parviennent, tout comme d'autres plus gros, à franchir la dorsale en ayant conservé une signature en anomalie de SSH permettant leur suivi par l'analyse en ondelettes. Les tracés de la Figure 2.41 montrent cependant que les tourbillons ayant stationné le plus longuement au sud de la dorsale avant de la franchir, présentaient les valeurs initiales d'anomalies de SSH et de surface les plus fortes.



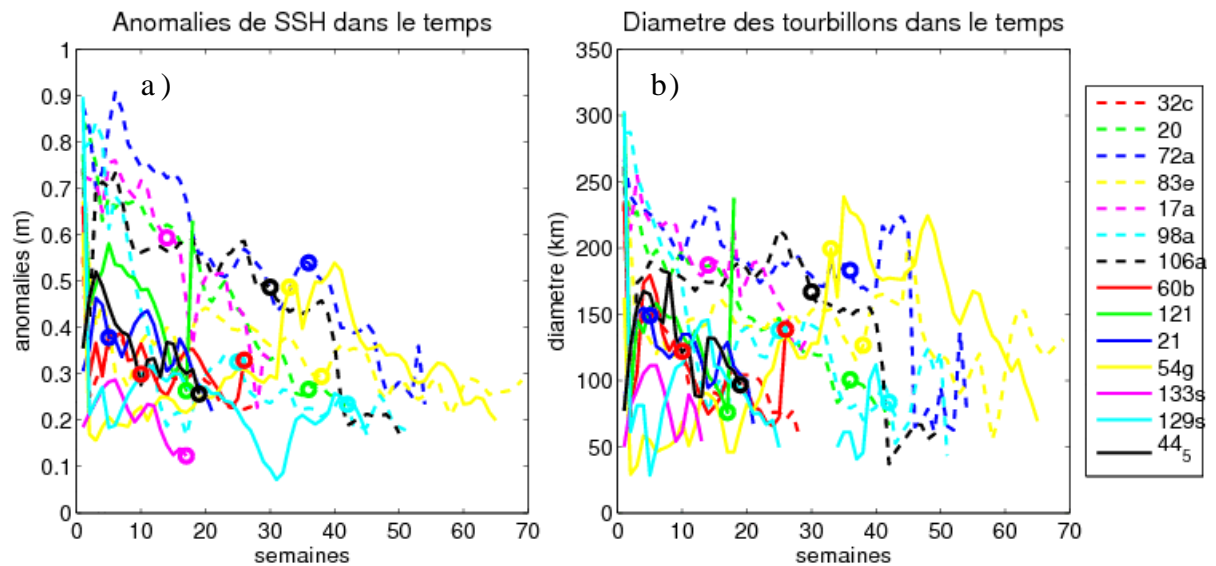


Figure 2.41. a) Evolution temporelle, à partir de leur date de formation, a) de l'anomalie de SSH au centre des tourbillons, b) de leur diamètre.

Ensuite, lors de leur probable interaction avec le front subantarctique, les anomalies et surfaces associées aux anneaux subissent souvent une légère augmentation, comme indiqué plus haut et illustré dans le cas du tourbillon 129s (Figure 2.33).

Poursuivant le suivi de l'érosion des tourbillons au cours de leurs trajectoires, on constate un effet possible de la dorsale sur la surface et l'anomalie au centre des tourbillons. Lorsque la distance entre le centre d'un tourbillon et la dorsale s'approche de la valeur du rayon moyen du tourbillon, soit lorsque le tourbillon commence à ressentir la présence de la dorsale à sa périphérie, cela entraîne parfois un accroissement de ces grandeurs. Cet effet est notamment visible sur la Figure 2.33 dans le cas du tourbillon 129s (au voisinage de la semaine 40).

Au vu de ces résultats, la décroissance de la signature dynamique des tourbillons semble résulter principalement des modifications rapides de leurs propriétés hydrologiques lors de leur entrée dans la zone subantarctique, plus que de leur interaction avec le SAF ou la dorsale des Aiguilles.

#### 2.4.3.9 Recouplement de trajectoires avec des tourbillons échantillonnés en mer:

Comme indiqué plus haut, un tourbillon étudié par Arhan et al. (1999), détaillé à partir des données hydrographiques prélevées lors des campagnes CITHER3, à bord de l'Atalante, début 1995, correspond au tourbillon 98a de l'étude. Il présente une cœur froid et profond, témoignant de la longue période passée au sud de la dorsale des Aiguilles (voir Figure 2.25).

Le signal de ce tourbillon sur les données altimétriques s'estompe très fortement après son échantillonnage, de sorte qu'il n'est plus détecté par l'analyse en ondelettes que lors des trois semaines suivantes. Or, les données hydrographiques montrent une dynamique intense et profonde, au-delà de 1000 m, qui aura perduré certainement plus longtemps. Cette observation atteste de la probable subduction du cœur refroidi de l'anneau, lorsqu'il pénètre dans les eaux plus chaudes du gyre subtropical de l'atlantique sud.

Un autre tourbillon appartenant à la sous-famille de la voie sud envisagée ici, et échantillonné en mer, est décrit par Gladyshev et al. (2008). Ce tourbillon, baptisée E3 et échantillonné en novembre 2004, correspond au tourbillon 72a de cette étude. Il a été formé par subdivision d'un anneau sur la pointe de la dorsale des Aiguilles, et son suivi par l'analyse en ondelettes a été l'un des plus longs. Il a notamment passé tout l'hiver austral au sud de la dorsale, ce qui se traduit par un refroidissement très fort du noyau vers  $12,5^{\circ}\text{C}$ , et d'une homogénéisation due à la convection, visible sur les tracés de température potentielle, de salinité, d'oxygène dissous, ou de densité  $\sigma\text{-}0$ . La Figure 2.42 reprend des informations sur la radiale et le tourbillon échantillonné (E3 sur la figure), et le suivi du tourbillon par l'analyse en ondelettes. La forte homogénéisation verticale de ce tourbillon en température, salinité et densité, ainsi que les concentrations élevées en oxygène dissous ( $>250 \mu\text{mol/kg}$ ) sont le signe d'une convection verticale intense et récente au sein de cette structure, atteignant 600 m de profondeur. Un minimum en oxygène dissous ( $<220 \mu\text{mol/kg}$ ) situé sous ce noyau convecté révèle par ailleurs un piégeage de l'eau par cette structure jusqu'à 1000 m au moins.

Ce tourbillon a pu être suivi par l'analyse en ondelettes pendant près de 2 mois au-delà de la date de son échantillonnage au nord de la dorsale. Il s'agit d'un des tourbillons de plus grandes tailles parmi les 14 étudiés. A la date de son franchissement de la dorsale, l'anomalie de SSH au centre du tourbillon (de près de 0.45 m), ainsi que sa surface, sont parmi les plus élevés (voir Figure 2.41). Ceci explique probablement la longévité de la signature en anomalie de SSH de ce tourbillon après avoir franchi la dorsale des Aiguilles.

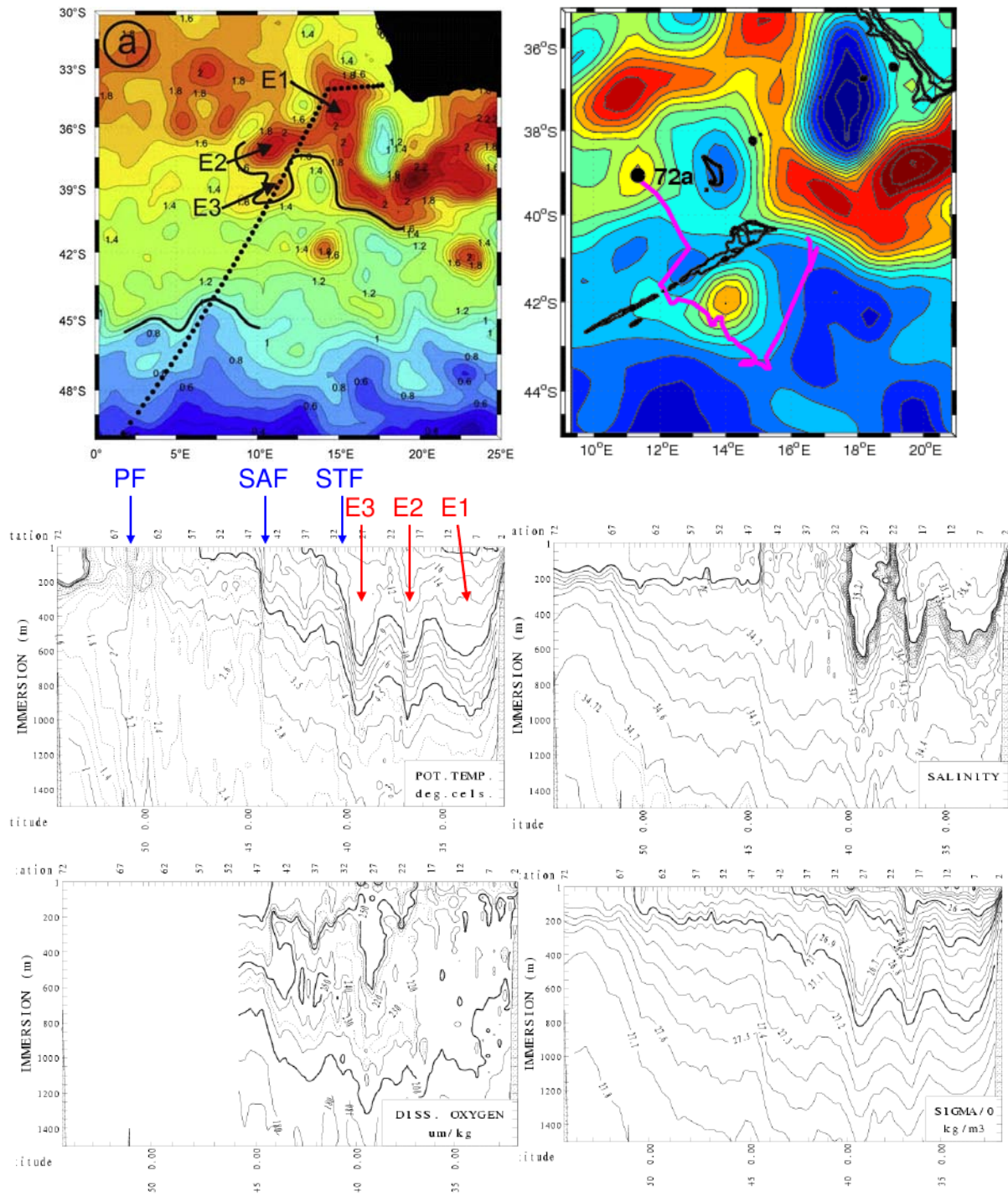


Figure 2.42. a) Carte de SSH pour le 10 Novembre 2004, date de l'échantillonnage du tourbillon E3, le long de la radiale Goodhope tracée en trait noir discontinu (Gladyshev et al., 2008). b) Tracé de la trajectoire du tourbillon 72a, correspondant au tourbillon E3, depuis sa formation jusqu'à la date correspondant à la figure a). Les figures c) à f) correspondent respectivement aux tracés de la température potentielle, de la salinité, du taux d'oxygène dissous, et de la densité sigma-0 le long de la radiale.

## 2.5 Conclusion

L'outil d'analyse en ondelettes a permis une détection et un suivi des anneaux des Aiguilles, dans la série temporelle de hauteur de mer, depuis leur détachement de la retroflexion. Grâce à cet outil, les évènements de subdivisions et de jonctions ont été recensés, et l'évolution quantitative de certaines propriétés des tourbillons (diamètre, anomalies de SSH en leur centre) obtenue. L'analyse réalisée ensuite, s'appuyant sur un recensement exhaustif des anticyclones sur une période de 14 ans environ, et prenant en compte les trajectoires d'anneaux depuis leur date de formation jusqu'à leur disparition, a précisé certains résultats antérieurs sur la décroissance des anneaux (Schouten et al., 2000). L'analyse fournit également une description statistique du comportement spatio-temporel des anneaux.

Le rôle de la bathymétrie (Mont Erica, Mont Schmidt-Ott et dorsale des Aiguilles) dans certains comportements des anneaux (ralentissement, blocage, subdivision) et dans la distribution des trajectoires selon des voies préférentielles, a été mis en évidence. L'analyse réalisée à partir des 199 trajectoires identifiées permet d'identifier des familles de tourbillons, et ainsi de donner un certain ordonnancement au comportement décrit comme turbulent du « Chaudron du Cap » (Boebel et al. (2003)). Nous avons été amené à considérer 3 familles de trajectoires dont les caractéristiques spécifiques ont été détaillées. Une des caractéristiques des tourbillons de la « voie nord » est leur interaction avec les écoulements du talus africain. Ce phénomène important pour les échanges hauturier-côtier semble se produire principalement au sud de 34°S. La bordure sud de la « voie centrale », très proche des tracés classiques du STF dans la région, suggère une contribution des tourbillons de cette voie à la définition du front. La « voie sud » se caractérise par un transit de ses tourbillons dans la zone subantarctique, où d'intenses échanges avec l'atmosphère et le milieu ambiant entraîne une forte modification de leurs propriétés hydrologiques. Une étude spécifique des évènements de la vie des tourbillons de cette voie, comprenant des interactions avec le SAF et le franchissement de la dorsale des Aiguilles, a été présentée.

Une estimation du transport volumique par les anneaux des Aiguilles, à travers des sections s'avancant dans l'océan Atlantique sud, a été tentée. Bien que probablement sous-évaluée, cette estimation conforte les valeurs généralement acceptées, et a permis de répartir le transport entre les 3 voies définies ci-dessus. Ainsi, les voies nord et centrale sont les principales contributrices en transport, tandis que le transport associé à la voie sud est faible et décroît rapidement vers l'ouest. La contribution des tourbillons de la voie sud, est cependant

la plus fortement sous-estimée, en raison d'une perte accélérée du signal en SSH des anticyclones.

Une étude plus poussée des anneaux dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles a été menée, en raison de leurs caractéristiques hydrologiques atypiques acquises au cours de leur séjour dans le domaine subantarctique. L'étude a montré que le SAF bloquait le déplacement vers le sud des anneaux, avant que ceux-ci n'entament leur remontée vers la dorsale des Aiguilles. Les anneaux parvenant à franchir la dorsale empruntent alors un couloir profond dans la ligne de crête de la dorsale. Puis, ils subduisent probablement en franchissant le Front Subtropical, perdant alors leur signature en anomalie de SSH.

### 3 Etude de la branche sud du supergyre

Les anneaux des Aiguilles étudiés au chapitre précédent constituent, par leur dérive vers l'atlantique sud, le vecteur principal des échanges indo-atlantiques de la branche nord du supergyre subtropical liant océans indien et atlantique. L'existence théorique d'échanges par la branche sud du supergyre est, elle, rendue possible par la position moyenne de la zone de convergence subtropicale (STCZ), qui correspond à la ligne quasi-zonale où le rotationnel du vent s'annule. En effet, la STCZ contrôle l'étendue de l'extension vers le sud des gyres subtropicaux. Or, celle-ci passe au sud du continent africain (de Ruijter et al., 1999), permettant donc une connexion des gyres des deux bassins. La façon dont sont assurés les échanges d'eaux subtropicales par la branche sud du supergyre, depuis l'atlantique sud vers l'indien, est beaucoup moins connue. Des études, notamment à partir d'analyses lagrangiennes de modèles d'océans globaux (Speich et al., 2002), ont mis en évidence de tels échanges. De même, les mesures in-situ confirment que la délimitation du domaine subtropical d'avec l'ACC au sud, passe en moyenne au sud du continent africain. La notion d'une continuité entre les gyres subtropicaux indien et atlantique est encore confortée par la représentation fréquente d'un front subtropical (STF) continu, vers 40°S-42°S, entre les deux océans (Orsi et al., 1995 ; Belkin et Gordon, 1996 ; Stramma et Peterson, 1990 ; Lutjeharms, 1985).

Cependant, plusieurs questions demeurent sur la façon dont les échanges par la branche sud du supergyre sont réalisés. La première concerne la possibilité d'une fermeture partielle du gyre subtropical de l'atlantique sud. Stramma et Peterson (1990), tout comme Belkin et Gordon (1996), proposent qu'une partie du transport de la branche sud du gyre subtropical atlantique s'oriente au nord-est et rejoint le Courant du Benguela, assurant ainsi une fermeture du gyre à l'est. Cependant, les schémas de circulation proposés par ces deux études sont différents, et sont basés sur un nombre de radiales hydrologiques ne permettant pas de tenir compte de la forte variabilité de la STCZ. Une incertitude demeure donc sur la nature de cette fermeture du gyre, ainsi que sa variabilité temporelle. Celle-ci peut être abordée grâce à la longueur de la série temporelle de SSH utilisée jusqu'ici. Une deuxième question concerne la manière dont la continuité moyenne du STF au sud de l'Afrique s'accommode de l'intense activité mésoéchelle étudiée au chapitre précédent. Nous avons en effet montré que les anneaux des Aiguilles de la voie centrale pouvaient occasionnellement participer à la définition du front, et que les anneaux de la voie sud franchissent régulièrement

ce front pour pénétrer dans le domaine subantarctique, ce franchissement pouvant alors perturber le cheminement moyen du front. L'utilisation des données de SSH fournies par CLS permet d'envisager une étude plus fine du cheminement du STF, et de sa continuité temporelle, du fait de la bonne résolution de la moyenne échelle associée aux cyclones ou anticyclones de la région.

### **3.1 Etat de l'art**

#### **3.1.1 Le STF est-il mutli-branches en atlantique sud ? La question d'une fermeture partielle du gyre subtropical**

La présence d'un front subtropical STF, d'abord nommé STCZ, quasi-continu autour du continent antarctique, et délimitant les eaux subtropicales de celles du domaine subantarctique, est connue depuis de nombreuses années. Sa structure dans l'atlantique sud et sud-est demeure cependant incertaine. Le front est caractérisé par des gradients marqués de salinité et de température, décrits par de nombreux auteurs à partir de mesures in-situ. Une définition du front communément acceptée, car basée sur un ensemble très étoffé de données, est celle proposé par Orsi et al. (1995). Les auteurs situent le front aux passages de température de 10°C à 12°C à 100 m, ou de 34.6 psu à 35.0 psu à 100 m, le critère en salinité étant jugé plus fiable car moins influencé par la saisonnalité. Cette vision d'un front unique dans l'atlantique sud (représenté Figure 3.1b), n'est cependant pas unanimement acceptée. Une forte variabilité de sa position au sud et sud-est du bassin atlantique a souvent été remarquée, et plusieurs structures frontales ont été observée dès 1985 par Lutjeharms (1985) à partir de mesures XBT. Stramma et Peterson (1990) ont alors proposé un schéma de circulation un peu différent, distinguant le cheminement du STF de celui du Courant Sud-Atlantique (SAC ; Figure 3.1a). Ils constatent que ce courant suit le STF sur son flanc nord le long du bassin atlantique sud, mais que leurs trajectoires divergent vers 0°E. Alors que le STF se prolonge vers l'indien en déviant vers le sud-est à l'approche de la retroflexion du courant des Aiguilles, la trajectoire du SAC s'infléchit vers le nord, rejoignant le courant du Benguela, et participant donc à une fermeture partielle du gyre subtropical de l'atlantique sud. Enfin, Belkin et Gordon (1996) proposent l'existence, sur l'ensemble de l'atlantique sud, de deux fronts délimitant au nord et au sud la région de la STCZ, et encadrant le SAC (Figure 3.1c). Le front situé au nord, baptisé NSTF (*North Subtropical Front*), pourrait s'infléchir à l'approche du continent africain, participant ainsi à la circulation du gyre subtropical de l'Atlantique sud. Leurs résultats ne permettent cependant pas de conclure à cela, car le

transport associé au NSTF pourrait également se prolonger vers l'est et rejoindre le SSTF ou le courant de Retour des Aiguilles. Le SSTF (*South Subtropical Front*) poursuit sa trajectoire au sud de l'Afrique, et correspond en cela au STF unique le plus souvent référencé, les critères de Orsi et al. (1995) situant le STF à peu près entre le NSTF et le SSTF.

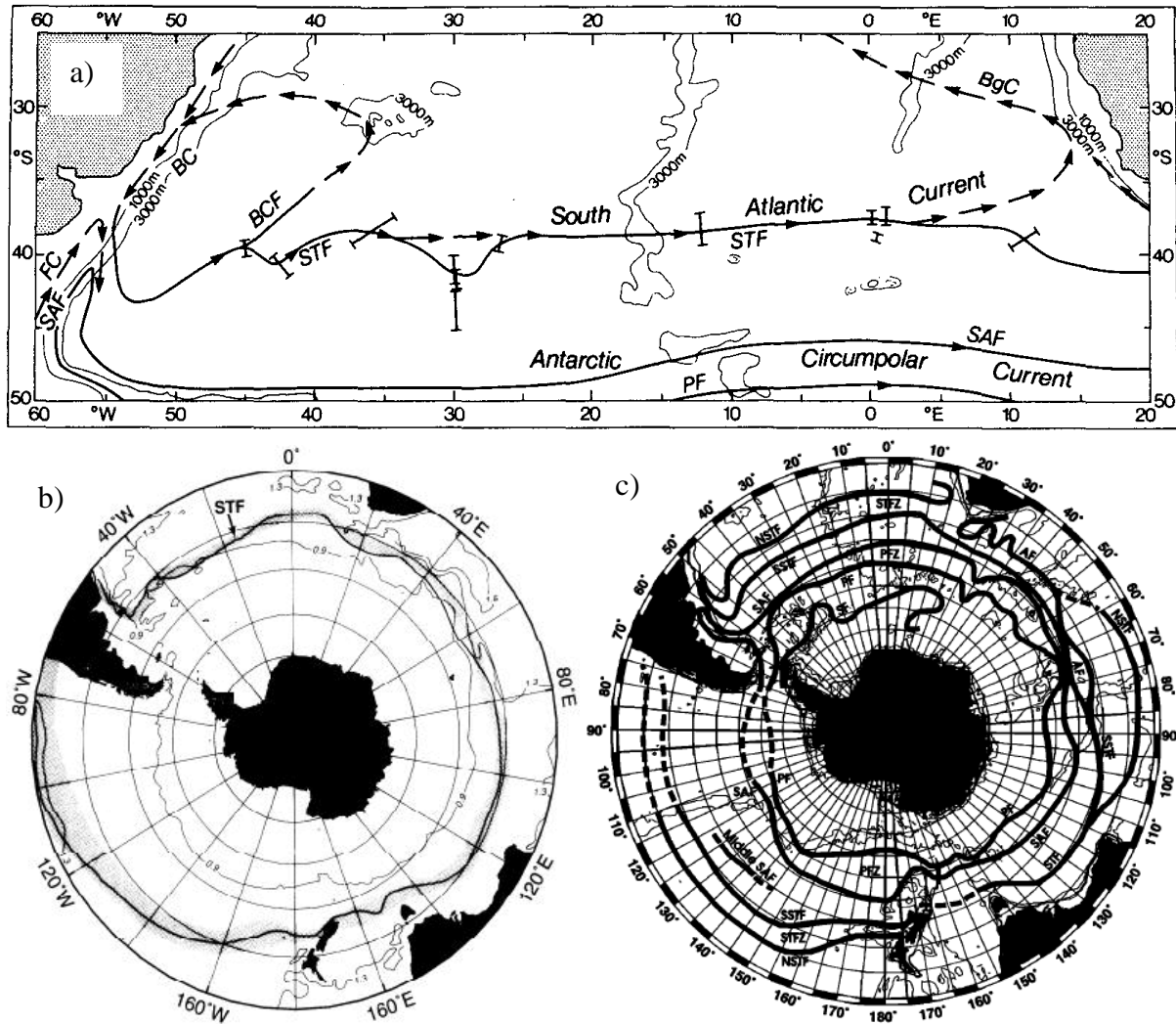


Figure 3.1. a) Stramma et Peterson (1990). Schéma présentant le STF de l'Atlantique sud, délimitant le domaine subtropical du domaine subantarctique. Celui-ci est continu au sud du continent africain, et rejoint l'océan Indien. Cependant, le transport associé au SAC s'écarte du STF en atlantique sud-est, pour rejoindre le courant du Benguela, et ainsi fermer le gyre subtropical atlantique. b) Orsi et al. (1995). Tracé du front subtropical STF. Celui-ci est continu autour du continent antarctique, hormis au Passage de Drake, et constitue la frontière entre domaines subtropicaux et subantarctique. c) Belkin et Gordon (1996). Sont représentés l'ensemble des fronts de l'ACC, ainsi que les fronts NSTF et SSTF associés à la STCZ.

La présence d'une ou plusieurs branches du STF dans cette région de variabilité importante n'est pas tranchée. Les schémas proposés par Stramma et Peterson (1990) et Belkin et Gordon (1996) indiquent une fermeture partielle du gyre subtropical atlantique, alors que le schéma plus classique d'un front unique donne l'image d'une circulation



strictement en supergyre, les eaux véhiculées par le SAC étant entièrement advectées dans l'indien. La question de la fermeture partielle du gyre de l'atlantique sud reste donc posée. Les schémas proposés par les différents auteurs se basent sur un nombre important de radiales ou autres données in-situ, mais l'étendue longitudinale et la variabilité de cette région océanique sont trop importantes pour déterminer plus précisément les schémas frontaux et leur variabilité.

### **3.1.2 La question de la continuité du supergyre par le biais du STF**

Dans l'ensemble des visions évoquées du STF ou SSTF, celui-ci est perçu, en moyenne, comme étant continu au sud de l'Afrique (voir Figure 3.1). La continuité de ce front est une condition essentielle au transport des eaux subtropicales du bassin atlantique vers l'indien, et donc à l'existence du supergyre. Or, la région du bassin du Cap et du bassin des Aiguilles est le siège d'une intense activité tourbillonnaire, susceptible d'interagir avec le front en différents endroits et d'interrompre son cheminement. Ce rôle perturbateur des tourbillons vis à vis de la continuité du front a, par exemple, été évoqué par Duncan en 1968, dans l'étude d'un anticyclone échantillonné lors d'une campagne en mer de 1964. Inversement, il a été montré dans le chapitre précédent que certains anneaux, appartenant à ce qui a été nommé « voie centrale », pouvaient jouer un rôle actif dans la constitution du front, lorsque celui-ci vient s'appuyer sur le flanc sud d'un anneau. Le STF dans cette région pourrait alors présenter un cheminement sinueux et très variable, au gré de ses interactions avec les anneaux des Aiguilles. Un tel cas est schématisé sur la Figure 3.2, qui reproduit le tracé du STF au cours d'une radiale pour laquelle le front a été repéré sur le flanc sud d'un anticyclone (Gladyshev et al., 2008). La continuité spatiale du front dans cette région critique, ainsi que sa variabilité temporelle sont donc largement méconnues à ce jour, bien qu'essentielles à l'évaluation et la compréhension des échanges par la branche sud du supergyre.

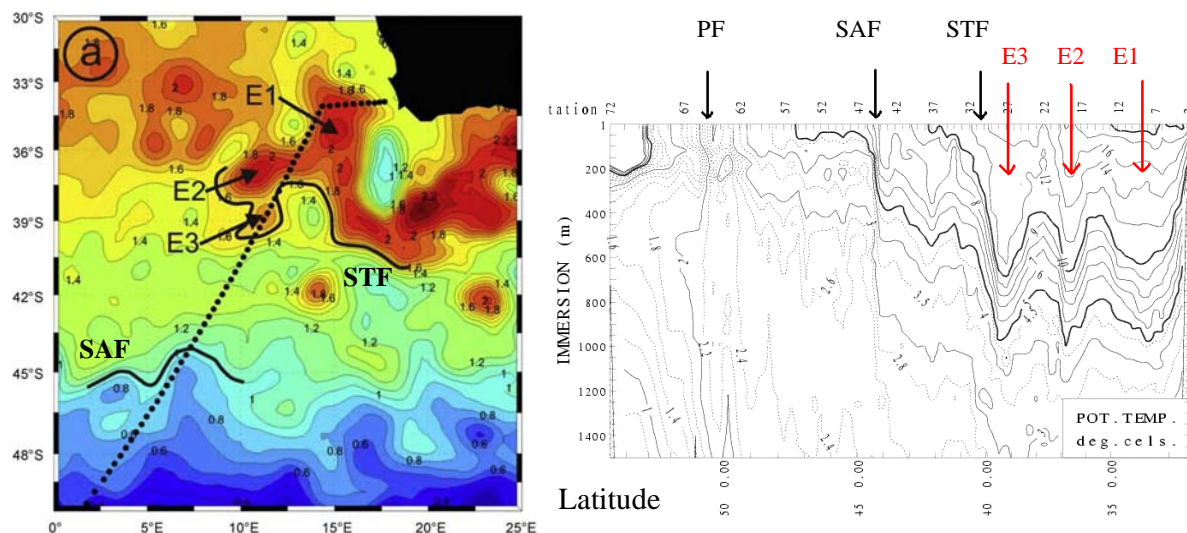


Figure 3.2. A gauche: champ de hauteur dynamique pour le 10 Novembre 2004. En pointillé, tracé de la radiale Goodhope (Gladyshev et al., 2008). E1, E2, E3 sont des anticyclones échantillonnés par la radiale. En traits continus les positions des fronts STF et SAF au voisinage de la radiale. A droite: profil de température potentielle le long de la radiale, avec positionnement des anticyclones et des fronts.

### 3.1.3 Un STF marqué au sud de l'Afrique dont l'origine et la variabilité sont peu connues

A l'est de 20°E environ, le STF (ou SSTF de Belkin et Gordon (1996)) est décalé vers le sud relativement à sa position dans l'Atlantique. Il est également distinct, et au sud, du Front des Aiguilles (AF ; Figure 3.1c) qui marque le Courant de Retour des Aiguilles (ARC). Lutjeharms et Valentine (1988) ont étudié, à partir de 89 radiales hydrologiques, la structure frontale au sud de l'Afrique. Conformément à ce que proposent Belkin et Gordon (1996), ils trouvent deux fronts au nord du domaine subantarctique. Au nord, le front des Aiguilles (AF pour Agulhas Front) est associé à l'ARC. Plus au sud, le STF (ou SSTF de Belkin et Gordon (1996)) constitue la véritable frontière entre domaines subtropical et subantarctique, et présente des gradients de salinité et de température plus marqués qu'en atlantique sud (Lutjeharms et Valentine, 1988 ; Belkin et Gordon, 1996). La présence de ces deux fronts est corroborée par Park et al. (2001), qui se basent sur les critères en salinité et température établis par Belkin et Gordon (1996) pour identifier l'AF et le SSTF, à partir d'une radiale réalisée à 30°E (voir Figure 3.3). Cependant, ces deux fronts présentent une variabilité assez importante. Des déplacements en latitude de l'ordre de 40 km et 110 km sont constatés sur des périodes d'un mois, pour l'AF et le STF respectivement, selon Lutjeharms et al. (2002). Cette variabilité est évoquée pour expliquer que les deux fronts se regroupent parfois en un seul, comme cela est observé dans un peu moins de 70% des radiales étudiées par Lutjeharms et

Valentine (1984). Une part importante de cette variabilité est attribuée à la présence de tourbillons formés au niveau de chaque front, notamment des tourbillons libérés par la retroflexion, ou par l'AF au niveau du Plateau des Aiguilles (Lutjeharms et Valentine, 1988).

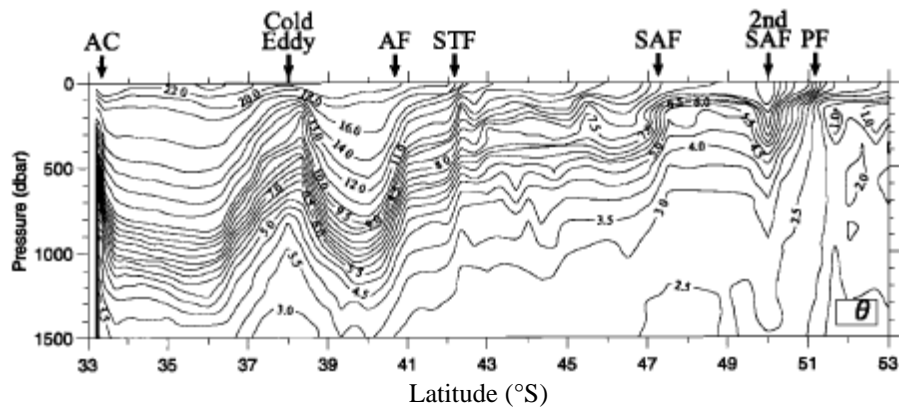


Figure 3.3. Park et al. (2001). Température potentielle le au sud de l’Afrique à 30°E, à partir d’une radiale réalisée en 1996. On distingue la présence de gradients marqués pour l’AF et pour le STF, situé 1° plus au sud.

La présence d’un STF au sud de l’Afrique soutient l’hypothèse d’une continuité de ce front entre océans atlantique sud et indien, et donc d’échanges par la branche sud du supergyre indo-atlantique. Cependant, la continuité du front à l’ouest de la retroflexion, où règne une intense activité mésoéchelle, n’est pas encore établie et semble incertaine. Comment alors expliquer la présence d’un STF au sud l’Afrique, souvent distinct de l’AF, et présentant des gradients aussi marqués ? A quelle longitude ce front naîtrait-il ? Quel rôle pourrait jouer la mésoéchelle du Chaudron du Cap, et celle observée au sud de l’AF ? La recherche de fronts au sud de l’Afrique dans la série temporelle de SSH dont nous disposons a été employé pour tenter de répondre à ces questions.

### 3.2 Objectifs

**A partir de la série temporelle de SSH, nous avons examiné la structure frontale définissant la limite sud du domaine subtropical, le STF. La longueur de la série temporelle, et sa bonne résolution de la mésoéchelle permettent d’obtenir des informations statistiquement fiables et tenant compte des effets des tourbillons au sud de l’Afrique. En recherchant la signature du (ou des) front(s) subtropicaux, nous avons cherché principalement à : mieux évaluer la possible fermeture partielle du gyre subtropical de l’atlantique sud ; étudier le comportement spatio-temporel du STF à l’ouest de la retroflexion où il interagit avec la mésoéchelle, et en évaluer la continuité ;**

**enfin, mieux comprendre l'origine et la variabilité du STF très marqué au sud de l'Afrique, depuis la région de la retroflexion jusque dans l'océan indien.**

### **3.3 Outils d'étude et méthode**

Nous avons mis en place une méthode de détection de fronts dans un domaine englobant la région de jonction des fronts subtropicaux des océans atlantique et indien, soit de 5°O à 35°E. Pour cela nous avons utilisé les produits d'altimétries CLS de hauteur de mer absolue, basés sur le champ moyen Rio05, et les champs de vitesse géostrophique associés. Les produits hebdomadaires s'étendent du 14 octobre 1992 au 1<sup>er</sup> janvier 2007, soit la même période que pour l'étude du chapitre précédent et un total de 658 semaines.

#### **3.3.1 Recherche des fronts moyens**

Les schémas frontaux proposés par les différents auteurs cités plus haut sont issus d'un nombre important de données in-situ leur permettant de proposer une position moyenne des fronts. La première analyse réalisée ici a alors consisté à rechercher les fronts moyens présents dans les champs d'altimétrie. En moyennant les champs de hauteur dynamique de l'ensemble de la série temporelle, on obtient le champ de SSH moyen sur la période 1992-2007. On peut alors chercher à détecter les fronts sur ce champ moyen. Ceux-ci sont caractérisés par des gradients importants de température, salinité ou d'autres grandeurs physiques, fonctions des masses d'eau présentes de part et d'autre du front. Ces gradients résultent en un gradient de densité et un écoulement géostrophique qui peut être associé à un gradient important de SSH. C'est pourquoi la signature attendue des fronts moyens, sur les champs altimétriques, est un extremum local de vitesse géostrophique.

#### **3.3.2 Mise en évidence des fronts moyens**

En se plaçant à une longitude donnée du domaine envisagé, correspondant à un point de grille du champ de SSH moyen (au 1/3 ° de longitude), on peut, en parcourant l'ensemble des points de grille en latitude, tracer la relation entre le module de vitesse géostrophique associé au champ de SSH moyen, et la hauteur dynamique (ou la latitude). En choisissant une gamme de latitude englobant largement le domaine de présence du (ou des) fronts subtropicaux, on voit ainsi apparaître un ou plusieurs maxima de vitesse géostrophique. La Figure 3.4 présente ces tracés pour les longitudes 4°O, 3°O et 2°O. Ceux-ci font apparaître deux fronts moyens (SSTF et NSTF). En effectuant cette démarche par intervalles de longitude suffisamment resserrés, on peut déterminer les tracés de ces deux fronts. Un examen

des tracés a montré qu'il était suffisant de déterminer la gamme de recherche en hauteur dynamique pour chaque front avec un pas de  $1^\circ$  de longitude, la recherche de maxima de vitesse géostrophique étant effectuée avec le pas de grille des champs de SSH, soit tous les  $1/3$  de degré.

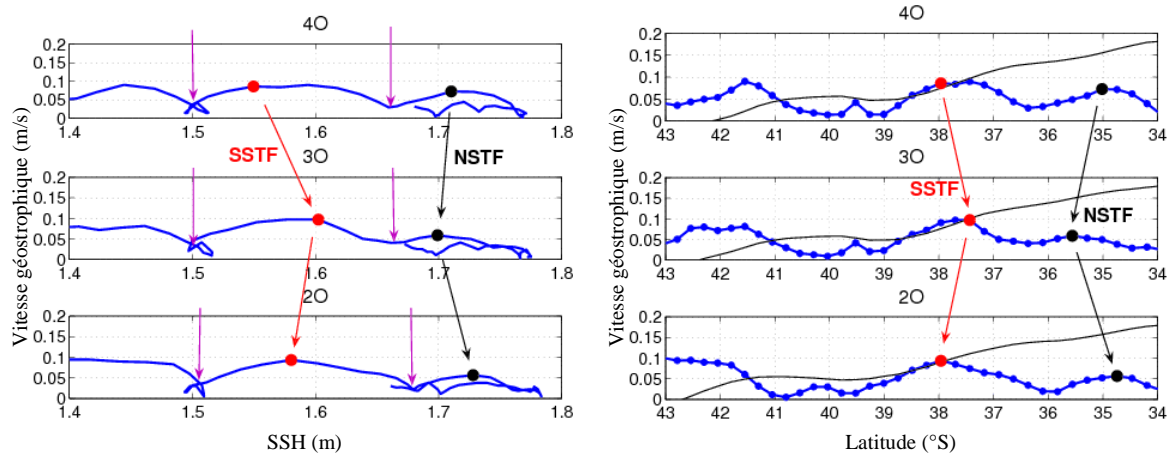


Figure 3.4. Pour trois longitudes successives (4, 3 et  $2^\circ$  Ouest), à gauche: en bleu la vitesse géostrophique en fonction de la hauteur dynamique. Les flèches magenta indiquent les limites des gammes de recherche en hauteur dynamique pour chaque front (la limite haute pour le SSTF est la limite basse pour le NSTF, ce dernier n'ayant pas de limite haute de recherche); à droite: en bleu vitesse géostrophique associée au champ moyen, en noir la hauteur dynamique, en fonction de la latitude. Sur chaque série, les points rouges représentent les maxima associés au SSTF moyen, et en noir ceux associés au NSTF moyen.

### 3.3.3 Méthodes et critères choisis

Afin de déterminer la latitude des fronts, la méthode suivante a été adoptée. A partir de la relation entre vitesse géostrophique et hauteur dynamique, des intervalles adjacents de hauteur dynamique sont définis, qui encadrent les maxima observés pour une longitude donnée. Les bornes de ces intervalles sont représentées par des flèches violettes sur la Figure 3.4, pour les longitudes  $4^\circ\text{O}$ ,  $3^\circ\text{O}$  et  $2^\circ\text{O}$ . Des méthodes et critères d'attribution de la position des fronts doivent alors être définis, dont les choix ont des conséquences sur l'interprétation des résultats. Ainsi, partant d'une latitude très au sud de la position attendue d'un front STF (partant donc de valeurs de hauteur dynamique faibles), nous recherchons les maxima de vitesses par point de grille de latitude, en respectant trois critères. Le premier maximum de vitesse rencontré, satisfaisant ces critères et compris dans l'un des intervalles de hauteur dynamique définis auparavant, est retenu comme représentant la position du front. Les trois critères définis sont les suivants :

- Tout d'abord, le maximum de vitesse doit se trouver dans un intervalle de hauteur dynamique (donc de latitude) prédéfini.

-On considère par ailleurs uniquement les maxima pour lesquels la composante de vitesse zonale est positive. Cette convention a des conséquences sur l'allure du front obtenu à l'issue de l'étude. Un front qui aurait un tracé suffisamment sinueux pour effectuer un retour local vers l'ouest aurait potentiellement trois positions d'attribution pour cette longitude : deux d'entre elles caractérisées par une composante zonale de vitesse positive, encadrant une troisième de composante zonale de vitesse négative. En choisissant systématiquement le premier maximum rencontré en partant du sud, la position d'attribution du front correspond à sa branche la plus au sud (laquelle peut être en amont ou en aval de l'écoulement du front, selon que le retour local du front vers l'ouest se fasse au nord ou au sud).

-Enfin, les recherches de maxima, en fonction de l'intervalle de longitude considéré, sont faites dans une gamme de latitude qui peut être restreinte en fonction de la situation géographique de la recherche. Ceci permet de s'affranchir du caractère localement non monotone en latitude de la hauteur dynamique, qui pourrait placer un front dans une région éloignée de sa position réelle. Ceci est utile en particulier au voisinage de la limite de la retroflexion (pour des hauteurs dynamiques entre 1.3 m et 1.6 m), entre 5°O et 0°O (pour des hauteurs dynamiques voisines de 1.5 m), ou encore à l'est de la retroflexion (pour des hauteurs dynamiques supérieures à 1.7 m, qui englobent l'AF mais aussi le courant des Aiguilles). Cette non monotonie est visible sur la Figure 3.5b représentant le champ de hauteur dynamique moyen.

### **3.3.4 Finesse de recherche en longitude**

Sur la majeure partie du domaine d'étude, la variabilité en longitude des courbes de vitesse géostrophique en fonction de la hauteur dynamique est suffisamment faible pour que les maxima de vitesse puissent être suivis sans ambiguïté. La détermination des gammes de hauteurs dynamiques de recherche est faite à chaque degré de longitude entre 5°O et 35°E. Les intervalles ainsi définis sont utilisés pour la recherche des fronts à la longitude correspondante, mais aussi aux points de grille situés à 1/3° de longitude de part et d'autre.

## **3.4 Résultats**

### **3.4.1 Etude des fronts dans le champ moyen de SSH**

Les fronts identifiés au travers de cette étude sont représentés sur la Figure 3.5. L'étude fait apparaître un front continu de l'Atlantique jusque dans l'indien, mais également un deuxième front dans l'Atlantique sud, et un troisième côté indien clairement associé au

courant de retour des Aiguilles. Ce schéma frontal s'approchant le plus de celui proposé par Belkin et Gordon (1996), leur nomenclature est adoptée ici. Le front principal et reliant les océans (rouge sur la figure) est nommé SSTF, tandis que les deux autres (noirs) sont nommés NSTF et AF.

Les trois fronts du champ moyen de SSH vont être présentés ci-dessous, en commençant par le SSTF, puis le NSTF, et l'AF. Les caractéristiques générales de chaque front seront analysées en relation aux trois principales questions évoquées plus haut. La première question est celle de la continuité du front subtropical entre océans Atlantique et Indien, et concerne le SSTF. La deuxième est relative à la fermeture partielle du gyre subtropical de l'Atlantique sud et concerne le NSTF. La dernière question, qui est celle de l'origine et de la variabilité du front subtropical au sud du continent africain, concerne à la fois le SSTF et l'AF. Après cette présentation des fronts du champ moyen de SSH, les résultats de l'étude des fronts dans les champs hebdomadaires de SSH seront présentés. L'ordre de présentation des fronts sera identique, et l'analyse des résultats centrée sur les trois mêmes questions.



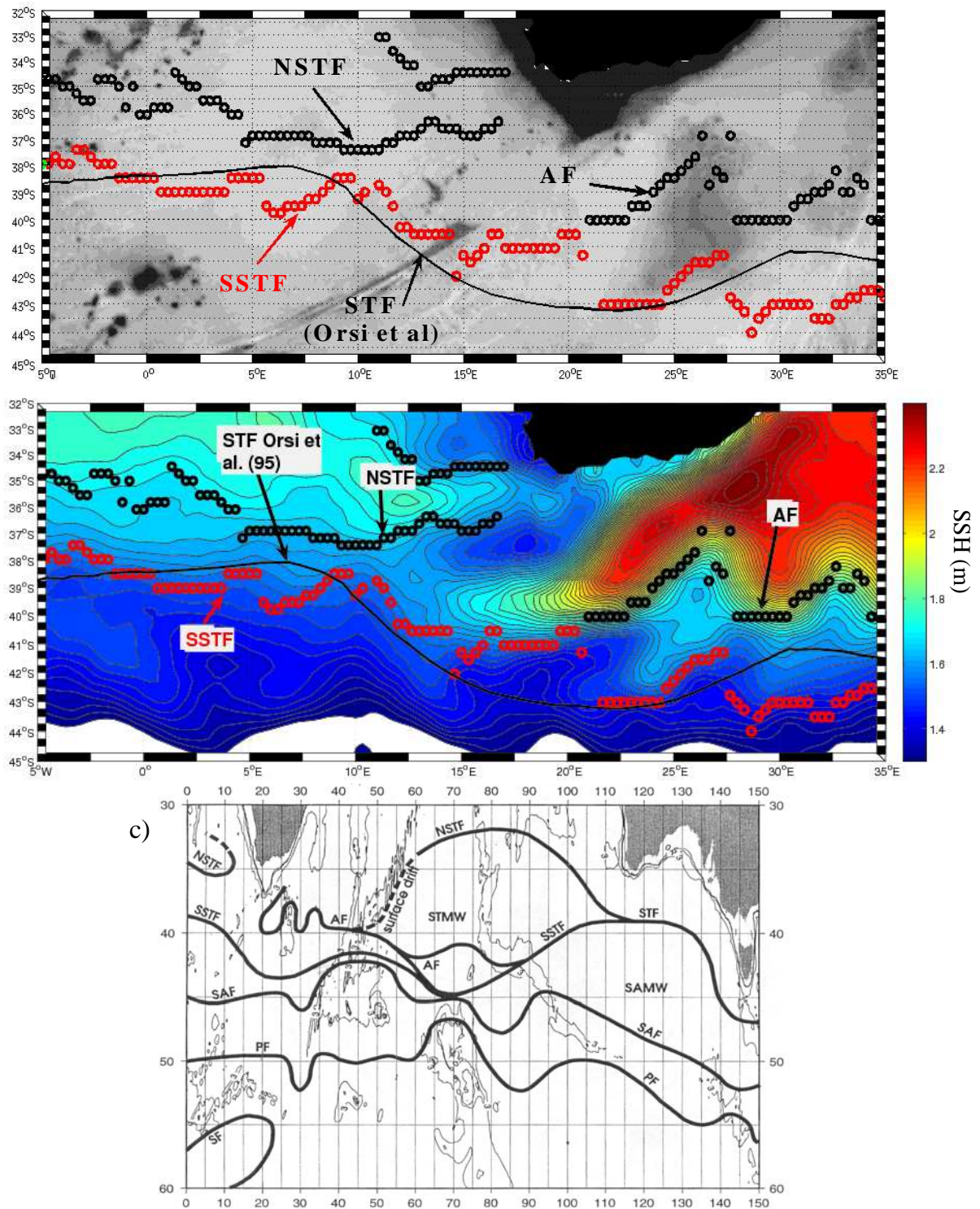


Figure 3.5. Position des fronts moyens issus de l'étude, a) sur contour bathymétrique, b) sur le champ de hauteur dynamique moyen. Les ronds noirs représentent les positions du NSTF à l'ouest et de l'AF à l'est. La branche du NSTF remontant dans l'Atlantique est également représentée en ronds noirs. Les ronds rouges représentent le SSTF. Le trait noir continu correspond au front STF de Orsi et al. (95). c) Tracé des fronts de Belkin et Gordon (1996) entre 0°E et 150°E.



### **3.4.1.1 Front SSTF du champ moyen**

#### **Une trajectoire localement confondue avec l'ARC**

Le SSTF moyen apparaît relativement continu, malgré quelques écarts notables, vers 5°E, 20°E ou encore 27°E. Son tracé se rapproche de celui de Belkin et Gordon (1996), sauf en quelques endroits. Les écarts les plus importants se situent entre 15°E et 20°E, à l'approche de la retroflexion du courant des Aiguilles. Alors que le tracé proposé par ces auteurs migre rapidement vers le sud (42°-43°S à 15°-20°E), contournant largement la retroflexion et l'AF, le SSTF de notre étude semble se raccorder à l'AF (41°S à 15°-20°E), avant de finalement se décaler au sud, vers 20°E (à environ 43°S). La discontinuité apparente à 20°E (Figure 3.5b), résulte probablement d'un retour vers l'ouest du front avant une reprise de sa trajectoire plus au sud. Il apparaît donc que sur le champ moyen, la distinction entre le SSTF et l'AF n'est pas très marquée entre 15°E et 20°E, bien qu'elle le soit plus à l'est. Cette coïncidence moyenne pourrait être la conséquence du regroupement fréquent du SSTF et de l'AF dans cette région, Lutjeharms et Valentine (1984) ayant constaté que les deux fronts y étaient confondus près de 70% du temps.

#### **Evolution des vitesses et hauteurs dynamiques du SSTF**

Le tracé d'évolution de la vitesse géostrophique de surface associée au SSTF avec la longitude est représenté Figure 3.6a. Est ici représenté le module de la vitesse géostrophique au point de grille de position du front moyen, qui correspond donc à un maximum de vitesse local. On constate que la vitesse géostrophique associée au SSTF moyen est quasi-constante, aux alentours de 0.08 m/s, de 5°O à 15°E. A l'est de cette longitude elle croît jusqu'à plus de 0.35m/s à 20°E. Cette croissance traduit l'influence grandissante vers l'est de la retroflexion du courant des Aiguilles et de l'ARC. Cela est visible sur le champ de SSH moyen (Figure 3.5b), où l'on constate un resserrement de plus en plus marqué des lignes d'iso-SSH à l'approche de la position moyenne de la retroflexion. Cette évolution des vitesses confirme la tendance du SSTF moyen à rejoindre l'AF, plutôt que de le contourner par le sud, comme proposé par Belkin et Gordon (1996).

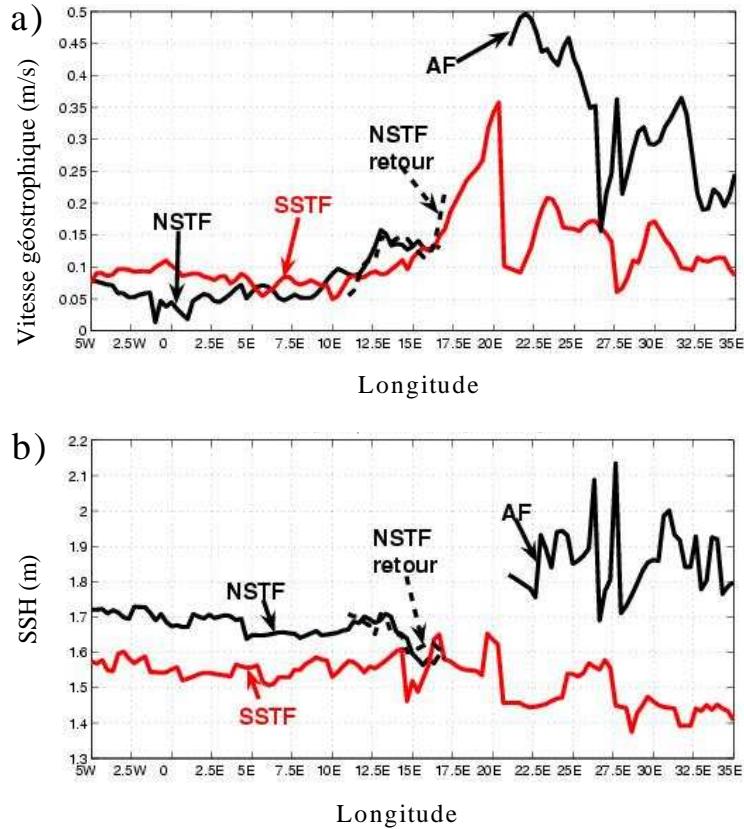


Figure 3.6. Evolutions de a) la vitesse géostrophique et b) la hauteur dynamique avec la longitude pour les différents fronts du champ moyen. En rouge le SSTF; en noir (de 5°O à 16.67°E) le NSTF; en noir également (de 21°E à 25°E) l'AF; en trait noir discontinu la branche retour du NSTF.

Puis, à 20°E où a lieu la discontinuité du SSTF associée à son retour vers l'ouest évoqué plus haut, la vitesse géostrophique chute subitement. Cette chute s'explique par le fait que la trajectoire ne correspond alors plus à celle de l'AF. A l'est de 20°E, les valeurs de vitesses sont moins stables qu'à l'ouest de 15°E. Elles sont également plus élevées en moyenne, ce qui est en accord avec les observations de gradients particulièrement marqués du front dans cette région (Lutjeharms et Valentine, 1988 ; Belkin et Gordon, 1996).

Le tracé des valeurs de SSH associées à la position du front représenté Figure 3.6b, est assez stable à l'ouest de 15°E autour de 1.55m, comme c'est le cas pour la vitesse géostrophique. La valeur de SSH associée au SSTF est moins stable à l'est de cette longitude, et tend à décroître vers l'est jusqu'à atteindre 1.4 m à 35°E. Les sauts de valeurs de SSH correspondent souvent sauts de vitesse géostrophique. On constate cependant que les valeurs de SSH sont également assez stables entre 15°E et 20°E, région où la vitesse géostrophique moyenne était fortement croissante sous l'influence de l'AF. Cela confirme qu'il s'agit bien du SSTF que l'on suit dans cette région, et non exclusivement de l'AF. En effet, les lignes d'iso-SSH du champ moyen sont certainement voisines des lignes de courants pour

l'écoulement en subsurface. On s'attend donc à ce que le tracé d'un front sur le champ moyen suive une ligne d'iso-SSH, ou à n'observer qu'une dérive lente, comme c'est le cas ici (de 1.55 m à 5°O à 1.4 m à 35°E).

Le SSTF détecté sur le champ moyen de SSH présente donc une trajectoire relativement continue, depuis l'atlantique et jusque dans l'indien. Cependant, la recherche de ce front sur le champ moyen ne permet pas de conclure à la continuité en temps réel du SSTF, en particulier à l'ouest de la retroflexion. En réalisant une moyenne des champs de SSH hebdomadaires, la mésoéchelle présente dans cette région est effacée de sorte que la structure du champ moyen est très éloignée de celle observée pour une semaine donnée. L'étude des champs hebdomadaires devrait permettre une meilleure évaluation de cette continuité.

#### **3.4.1.2 Front NSTF du champ moyen**

L'identification d'un front moyen se rapprochant du NSTF de Belkin et Gordon (1996), confirme l'idée d'une possible fermeture partielle du gyre subtropical atlantique. Une branche du front remontant vers l'équateur, pouvant assurer la fermeture partielle du gyre, a par conséquent été recherchée dans le but de mieux en évaluer la nature. Celle-ci est ici nommée « NSTF retour », ou « branche retour » du NSTF. Pour ce front, la méthode de recherche a été modifiée. D'une part, le maximum de vitesse identifié doit présenter une composante zonale orientée vers l'ouest, à l'inverse des autres fronts. Par ailleurs, la recherche du front est menée depuis le nord vers le sud, à l'inverse des autres fronts, de façon à balayer le champ de SSH par ordre croissant de hauteurs dynamiques.

Le NSTF moyen apparaît continu par morceaux de 5°O à 17°E, les discontinuités ne dépassant pas 1.5° de latitude localement, notamment à 1°E. Une branche nord du NSTF a également été détectée dans le champ moyen, qui accredit la thèse d'une fermeture partielle du gyre subtropical atlantique par ce front, évoquée par Belkin et Gordon (1996). En supposant à nouveau que lignes d'iso-SSH représentent les lignes de courant de subsurface, la fermeture du gyre apparaît d'ailleurs clairement sur le champ moyen de SSH (Figure 3.5b). L'évolution en longitude du module de vitesse géostrophique (Figure 3.6a) montre une relative stabilité de 5°O à 9°E, autour de 0.06 m/s, soit un peu moins que pour le SSTF. Ces faibles vitesses, alliées à un tracé parfois discontinu dans la partie la plus atlantique du domaine étudié, donnent l'image d'un front moyen assez mal défini.

A proximité du continent africain, de 9°E à 14°E, la vitesse du front croît jusqu'à un palier de 0.13 m/s observé de 14°E à 17° E. Cela traduit une intensification de la fermeture du gyre subtropical de l'Atlantique sud, comme le resserrement des iso-SSH le montre (Figure

3.5b). La signature en hauteur dynamique du NSTF, stable autour de 1.7 m à l'ouest de 13°E, décroît à l'approche de la terminaison du front. Cette décroissance est probablement liée à une fermeture graduelle en longitude du gyre moyen subtropical : l'extension vers l'est de l'extrémité sud-est du gyre est probablement variable dans le temps, de sorte que sur le champ moyen les lignes d'iso-SSH remontant vers le nord se trouvent fortement espacées (Figure 3.6b). De ce fait, le maximum local de vitesse vers l'est servant à positionner le front se retrouve à des valeurs de SSH plus faibles. La terminaison de ce front moyen si elle semble effective, présente cependant un comportement éloigné du comportement instantané, du fait de l'importance probable de la variabilité du gyre subtropical à proximité du continent africain. L'étude de ce front dans les champs hebdomadaires devrait permettre une meilleure compréhension de sa terminaison, et sa possible contribution à la fermeture du gyre subtropical.

#### **3.4.1.3 Front AF du champ moyen**

Le front des Aiguilles, AF, est le mieux défini des trois fronts identifiés ici. Son tracé suit clairement le courant de retour des Aiguilles, l'ARC (Figure 3.5). Il présente des vitesses géostrophiques très élevées (Figure 3.6a), qui cependant s'estompent vers l'est. Ceci traduit l'érosion du courant, en raison notamment de la fermeture graduelle de la cellule de circulation du gyre subtropical de l'Indien, très intensifiée au sud-ouest du gyre (Stramma et Lutjeharms, 1997). La valeur de SSH associée au front présente des écarts importants. Ceci s'explique par le fait qu'un gradient de SSH fort existe sur une large gamme de valeurs de ce paramètre au travers du front. En conséquence, le maximum de vitesse peut se trouver à des valeurs différentes alors que le tracé demeure continu. De même, l'échantillonnage au  $1/3^\circ$  est probablement insuffisant pour ces forts gradients de SSH, de sorte que des différences importantes de SSH existent d'un point de grille au voisin. Le positionnement de l'AF sur un point de grille, ou au point adjacent en latitude, entraîne un écart significatif en valeur de SSH.

#### **3.4.2 Etude des fronts dans les champs hebdomadaires de SSH**

L'étude des fronts présents dans le champ de SSH moyen montre un schéma frontal proche de celui proposé par Belkin et Gordon (1996), malgré une distinction moins nette du SSTF et de l'AF entre 15°E et 20°E. Cependant, l'intense activité mésoéchelle de la région de la retroflexion et du bassin du Cap n'est pas présente dans ce champ moyen. C'est pourquoi plusieurs questions demeurent, qui nécessitent une analyse du comportement des fronts dans

les champs hebdomadaires. Nous avons cherché à transposer la méthode développée pour la recherche des fronts du champ de SSH moyen aux champs de SSH hebdomadaires. Une présentation des modifications de la méthode de recherche des fronts est tout d'abord exposée. Les caractéristiques du SSTF, du NSTF, puis de l'AF sont ensuite exposées et analysées relativement aux trois questions évoquées en début de chapitre.

### **3.4.2.1 Modifications de la méthode**

#### **SSTF initial et SSTF modifié**

Deux modifications ont été apportées à la méthode de recherche du SSTF issue de l'étude du champ moyen. Le front trouvé dans les champs hebdomadaires de SSH, sans prise en compte de ces modifications, sera appelé « SSTF initial ». Le front obtenu après modification de la méthode sera appelé « SSTF modifié ». Les modifications en questions sont ici exposées et expliquées.

La première modification concerne l'intervalle de hauteur dynamique dans lequel le front SSTF est recherché, dans la gamme de longitude où l'AF est également recherché, soit à l'est de 19°E. Sachant que le SSTF et l'AF se regroupent fréquemment (Lutjeharms et Valentine, 1984), il faut permettre ce regroupement dans la méthode de recherche. Les premiers essais d'identification de l'AF dans les champs hebdomadaires montrent que celui-ci est identifié sans difficulté avec les critères employés pour le champ moyen. Cela signifie que, lors d'un regroupement des fronts, le maximum de vitesse unique associé aux deux fronts se trouve à une hauteur dynamique se situant dans l'intervalle de recherche de l'AF. Or, les intervalles de recherche des deux fronts dans le champ moyen étant disjoints, le SSTF ne pouvait pas être identifié lors d'un tel regroupement. Pour permettre, dans un tel cas, d'associer le maximum de vitesse au SSTF également, la borne supérieure de recherche du SSTF, à l'est de 19°E, a été portée à 2.2 m de hauteur dynamique, soit très au-delà de la valeur associée au maximum de vitesse.

Une deuxième modification apportée à la méthode de recherche du SSTF concerne la région située à l'ouest de 19°E. La gamme de recherche en hauteur dynamique du SSTF moyen est construite à partir de sa signature sur le champ moyen, dans lequel les effets de la mésoéchelle ont disparu. On s'attend en revanche à ce que la mésoéchelle joue un rôle dans la constitution du SSTF, comme cela a été observé au cours d'une radiale Goodhope de 2004 (Figure 3.2). Or, un examen du tracé du SSTF obtenu par transposition directe de la méthode de recherche du front moyen montre que le SSTF n'est que rarement détecté sur le flanc sud

d'un anticyclone, contrairement à ce qu'indique son tracé. Cela provient de ce que le maximum de vitesse localisé sur le flanc d'un anticyclone est souvent situé à une valeur de SSH très élevée, du fait de l'anomalie positive importante associée à ces structures. Pour permettre aux anticyclones de jouer un rôle actif dans la constitution du SSTF, la borne supérieure de la gamme de SSH d'identification du front a été retirée sur l'ensemble du domaine à l'ouest de 19°E. Un nouvel examen des trajectoires hebdomadaires obtenues montre que la modification règle ce problème, sans par ailleurs engendrer de conséquences néfastes sur l'identification du front.

### **Recherche de l'AF depuis le nord**

Une autre modification concerne la méthode de recherche de l'AF. Des essais d'application directe de la méthode mise en place pour le champ moyen montrent que, dans certains cas, l'AF est détecté au sud de l'ARC. Ceci provient de la présence occasionnelle d'anticyclones au sud de l'ARC. En effet, ces anticyclones étant associés à des anomalies de SSH positives, il arrive qu'un maximum de vitesse soit détecté sur leur flanc sud, et à des hauteurs dynamiques suffisamment élevées pour se situer dans l'intervalle de recherche de l'AF. Pour s'affranchir de cet effet, la méthode d'identification a été modifiée en menant la recherche du nord vers le sud.

#### **3.4.2.2 Etude de sensibilité**

Une étude de sensibilité a été menée, afin de valider l'utilisation de la méthode de recherche des fronts du champ moyen dans le cadre des champs hebdomadaires. Le paramètre déterminant dans la recherche des fronts est la gamme de recherche en hauteur dynamique. C'est donc sur ce paramètre que l'étude de sensibilité est menée. L'étude montre que la méthode est adaptée à la recherche des fronts hebdomadaires. Le principe et les résultats de cette étude sont présentés en annexe de ce chapitre.

#### **3.4.2.3 Etude du SSTF**

##### **Continuité du SSTF et rôle de la mésoéchelle à l'ouest de la retroflexion**

La possibilité d'échanges par la branche sud du supergyre tient principalement à la continuité du SSTF entre les deux océans. Si ce front paraît continu sur le champ moyen, la mésoéchelle à l'ouest de la retroflexion a cependant été lissée par l'effet de moyenne. L'étude

du SSTF dans les champs hebdomadaires apporte un éclairage plus réaliste sur la nature de ce front, et sur le rôle supposé de certains anticyclones dans sa constitution.

### **Rôle central de la mésoéchelle**

La modification apportée dans la méthode de recherche du SSTF sur la limite supérieure de l'intervalle de recherche d'un maximum de vitesse, avait pour but la prise en compte des contributions des anticyclones à la constitution du front. Les tracés des taux de présence du SSTF (Figure 3.7a, en fonction de la longitude), avant et après avoir effectué cette modification, nous renseignent sur le rôle de la mésoéchelle. Avant modification, le « SSTF initial » présente des taux de présence faibles entre 5°E et 18°E principalement, avec un minimum de 40% autour de 13°E. Après modification de la méthode de recherche, le SSTF dit modifié présente un taux de présence minimal de 87% à 10°E, et supérieur à 90% sur l'ensemble de la région d'étude. Ce tracé montre l'importance de la prise en compte d'une possibilité pour le front de s'appuyer sur le flanc sud d'anticyclones. C'est donc ce mode de détermination du front qui a été choisi, et le « SSTF modifié » qui est étudié par la suite. Par souci de simplification, celui-ci sera simplement appelé SSTF. La carte de densité de probabilité de présence du front est présentée sur la Figure 3.8a. Les densités de probabilité de vitesses géostrophiques et de SSH du front en longitude, sont tracées sur les Figure 3.8b&c.

Le rôle des tourbillons est également visible sur les tracés de répartition des vitesses géostrophiques et des hauteurs dynamiques associées au SSTF. A l'est de 8°E en particulier, les vitesses associées au SSTF (Figure 3.8b) augmentent très fortement, atteignant des valeurs caractéristiques des tourbillons (>1 m/s). Ceci est par exemple visible sur le champ hebdomadaire correspondant au 6 mai 1998, représenté Figure 3.9. Pour cette date particulière, le SSTF s'appuie sur deux anticyclones, l'un à 12°E, le second à 15°E. Or un examen du champ de SSH environnant montre que les gradients de SSH les plus marqués sont clairement situés sur le pourtour de ces tourbillons. Par ailleurs, la répartition des hauteurs dynamiques associées au front (Figure 3.8c), montre une gamme de valeurs très étalée, pouvant atteindre 2m de hauteur dynamique vers 15°E. Or de telles valeurs ne sont associées qu'aux anticyclones, confirmant leur implication dans la constitution du front.

Le taux de présence important du SSTF (modifié) sur la Figure 3.7a, grâce à la contribution des anticyclones, donne l'image d'un front offrant une bonne continuité dans la région de jonction des gyres subtropicaux atlantique et indien, y compris à l'ouest de la retroflexion. Cependant, un taux de présence élevé ne suffit pas à conclure à une réelle continuité du front.

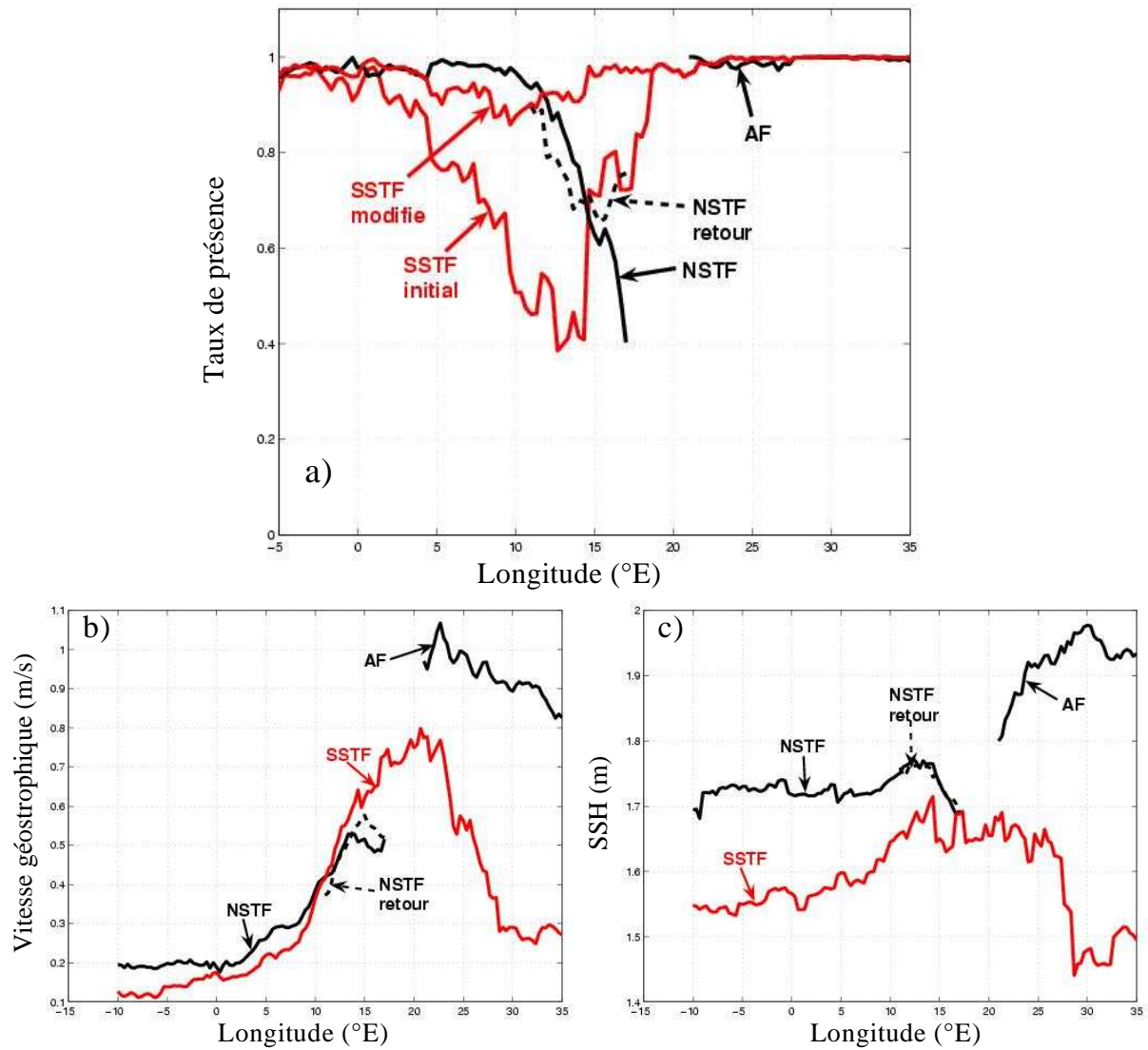


Figure 3.7. a) Probabilité de présence des fronts en fonction de la longitude. Les 2 courbes rouges correspondent au SSTF dans sa définition initiale (méthode de recherche identique à celle sur champ moyen de SSH) et modifiée (méthode de recherche modifiée pour prise en compte de la mésoéchelle); en trait noir (de 10°O à 16.67°E) le NSTF; en trait noir également (de 21°E à 25°E) l'AF; en trait discontinu noir la branche retour du NSTF. b) Evolution longitudinale de la vitesse géostrophique moyenne des différents fronts. c) Idem pour la hauteur dynamique.



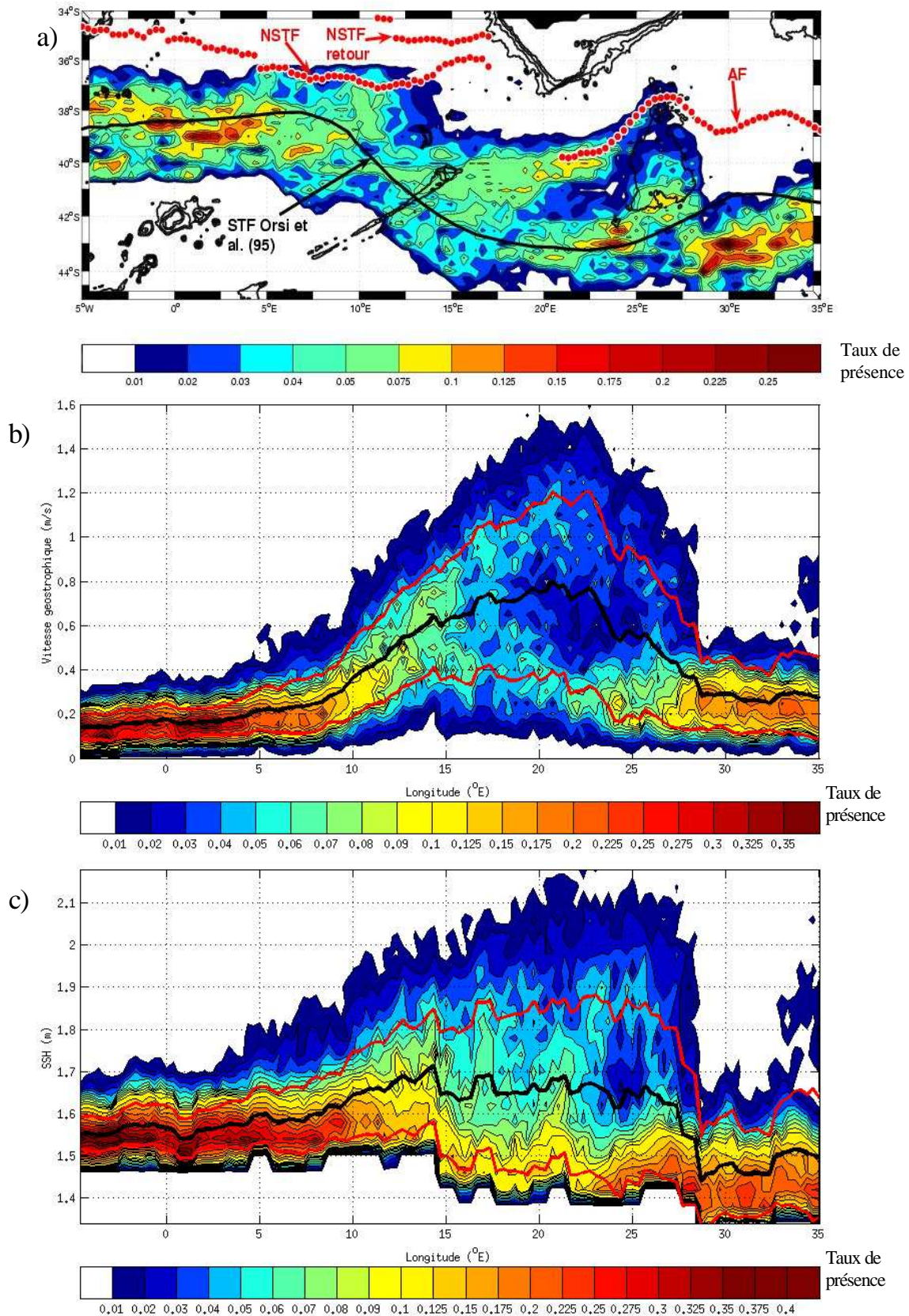


Figure 3.8. a) Densité de probabilité de présence du SSTF, ramenée au nombre total de fichiers hebdomadaires (658). En trait continu noir, le front STF de Orsi et al. (95). En points rouges, à l'est: la position moyenne du Front des Aiguilles issus de l'étude en instantané; à l'est: celle du NSTF et du NSTF retour. Les contours bathymétriques sont à 500, 1000, 2000 et

3000 m. b) Densité de probabilité des vitesses géostrophiques du SSTF en fonction de la longitude. La probabilité, pour chaque longitude, est ramenée au nombre total de fichiers hebdomadaires, soit 658. c) Même tracé pour la hauteur dynamique associée au SSTF.

### Evaluation de la continuité du SSTF

Il faut d'abord noter que dans cette région fortement tourbillonnaire le front est certainement très sinueux, avec des retours locaux vers l'ouest, au gré des contournements des tourbillons. Or, la méthode mise en place pour détecter les fronts ne permet pas de rendre compte de ces retours vers l'est. Cela exigerait de pouvoir attribuer plusieurs positions au front pour une même longitude, et également d'attribuer une position du front à des maxima de vitesse de composante zonale négative. Par conséquent, le cheminement du front dans cette région ne peut présenter un cheminement tout à fait continu. Cela est par exemple illustré sur la Figure 3.9, où l'on constate que le SSTF présente une discontinuité entre les deux anticyclones, situés à 12°E et 15°E, alors que le contour des iso-SSH permet d'envisager un raccordement continu et sinueux du front. Dès lors, toute discussion sur l'évaluation de la continuité du front dans cette région doit tenir compte de cette lacune propre à la méthode de recherche du front.

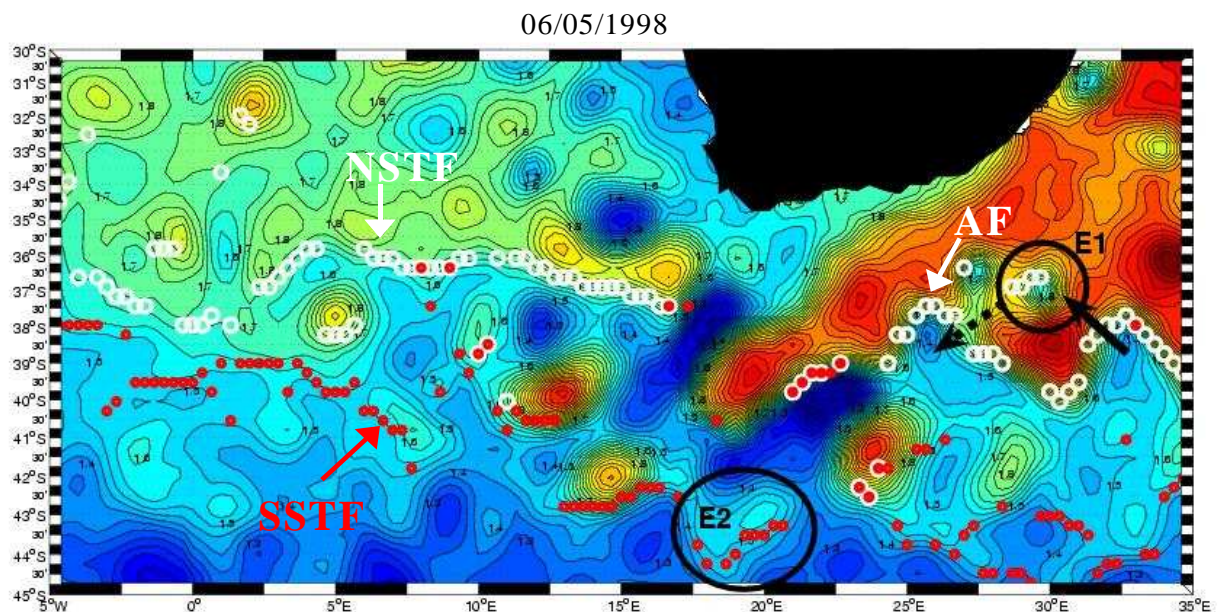


Figure 3.9. Représentation des fronts pour le 6 mai 1998, sur contour de champ de hauteur dynamique correspondant. En rouge est représenté le SSTF dans sa version modifiée. E1, cyclone type effectuant un parcours vers l'est au nord de l'AF, entre deux oscillations du front, ce qui a pour effet de placer l'AF au nord de sa position la plus vraisemblable. E2, anticyclone typique appartenant à la famille des Agulhas eddies (Lutjeharms et Valentine, 1988) stagnant au sud de la retroflexion, et au sud duquel le critère situe le front. On remarque dans ce cas une certaine continuité possible en amont.

La première observation pouvant atténuer l'image d'un front continu suggérée par un taux de présence important du SSTF, réside dans sa variabilité latitudinale très importante à



l'ouest de la retroflexion. Le tracé de la densité de probabilité de présence du front en latitude, représenté sur la Figure 3.8a, montre un élargissement significatif du domaine de présence du SSTF à l'est de 5°E. Le front est bien défini dans sa partie la plus atlantique, de 5°O à 5°E, avec un front compris entre 38°S et 39°S, en bon accord avec le positionnement proposé par Belkin et Gordon (1996). La variabilité en latitude du front est assez faible sur ce domaine, présentant un écart type moyen de 0.98° de latitude. En revanche, de 5°E à 19°E, l'écart type moyen en latitude est de 1.74°. Une continuité du cheminement du front semble moins évidente dans le contexte d'une telle variabilité.

Afin de mieux analyser la continuité du front, et l'apport à cette continuité de la modification de la méthode de recherche appliquée au champ moyen, nous pouvons nous intéresser à la Figure 3.10. Celle-ci présente la répartition statistique de l'étendue en degrés de longitude, et sur l'ensemble du domaine de recherche du SSTF (de 5°O à 35°E), sur laquelle le front n'est pas détecté. Deux courbes concernant le SSTF y sont représentées. L'une, en trait rouge continu et nommé SSTF initial, caractérise le front obtenu par application directe de la méthode issue de l'étude du champ moyen. La seconde, en trait rouge discontinu (SSTF modifié), concerne le SSTF obtenu après modification pour prise en compte des contributions de la mésoéchelle.

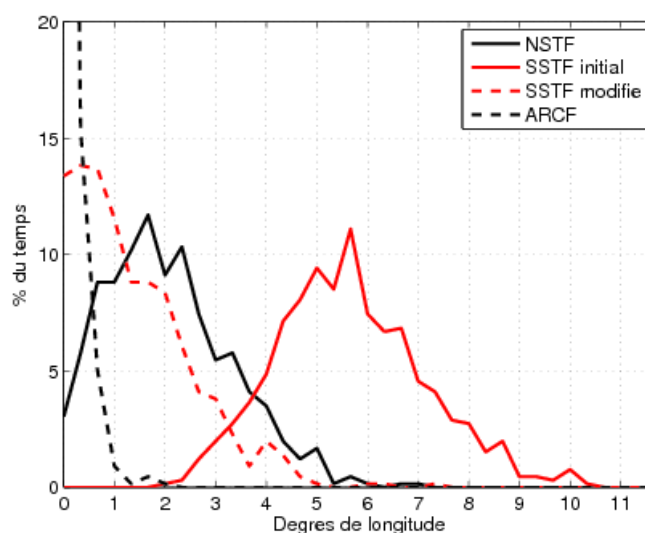


Figure 3.10. Fraction temporelle d'absence d'un front, en fonction de l'étendue longitudinale d'absence (continue ou discontinue).

Le front obtenu avant modification de la méthode de recherche présente une moyenne d'environ 6° de longitude manquant dans les champs hebdomadaires. 5° à 6° de longitude manquent dans l'identification du SSTF initial dans plus de 35% des 658 champs hebdomadaires. Et aucun champ ne présente moins de 2° de longitude manquant. Le SSTF ne peut donc être supposé continu hors prise en compte de la mésoéchelle. Certains fichiers

hebdomadaires présentent jusqu'à  $10^\circ$  de longitude manquant. Concernant le SSTF modifié, on constate en revanche que plus de 50% des fichiers hebdomadaires présentent au plus  $1^\circ$  de longitude manquant. L'étendue de longitude manquante ne dépasse jamais les  $5^\circ$  de longitude. Ces valeurs d'étendues de longitude manquantes ne tiennent pas compte des éventuels sauts discontinus d'un point de longitude au suivant, et donc de la possibilité d'établir un tracé continu réaliste joignant chaque point de définition du front. Elles ne nous renseignent pas non plus sur la répartition des points de grilles pour lequel le front n'est pas détecté. Il pourrait s'agir de points isolés, mais aussi de segments continus. Cependant, on peut considérer qu'un front continu présentera une étendue faible de longitude sans détection de front. En ce sens, ce tracé nous permet une discussion de la continuité du SSTF.

La comparaison de ces courbes nous renseigne tout d'abord sur l'importance de la contribution des anticyclones à la définition du SSTF. Le décalage des pics de chacune des courbes nous permet d'estimer que les tourbillons supportent en moyenne le front sur une étendue cumulée d'environ  $5^\circ$  de longitude. Ce chiffre est approximatif. La modification de la méthode a amélioré la détection du front dans des régions où la mésoéchelle n'a probablement pas de rôle prépondérant à jouer, notamment entre  $5^\circ\text{O}$  et  $5^\circ\text{E}$  (Figure 3.7a). Mais surtout, un examen visuel du SSTF obtenu sur des champs hebdomadaires, avant modification de la recherche, montre qu'il est parfois détecté en certains points au sud d'un tourbillon (la modification permettant de compléter sa détection en tout point au sud du même tourbillon). Ceci provient de ce que les gradients de SSH à la périphérie d'un tourbillon sont très importants. Ainsi, le maximum local de vitesse géostrophique peut être attribué à un point de grille présentant une valeur de SSH légèrement inférieure à la limite supérieure de l'intervalle de définition du front, tel que défini dans la recherche du front du champ moyen. Cet effet apparaissant assez fréquemment, on peut supposer que la contribution de la mésoéchelle à la détection du SSTF est en réalité supérieure à  $5^\circ$  de longitude cumulés.

L'allure de la courbe relative au SSTF après modification de la méthode, sur la Figure 3.10, nous permet également de discuter de la continuité du front. Avec plus de 50% des champs hebdomadaires présentant moins d'un degré de longitude sans position du front attribuée, le front apparaît comme assez continu statistiquement. Les réserves émises sur la difficulté de prise en compte de la répartition des points manquants, et du caractère disparate des positions successives du front empêchent cependant de conclure sur la continuité du front. L'obtention d'une étendue de longitude faible sans détection du front peut néanmoins être considérée comme une condition nécessaire à cette continuité.

### **Trajectoire du SSTF liée à celles d'anneaux des Aiguilles**

Entre 12°E et 17°E, on constate sur le diagramme de densité de probabilité de présence en latitude du SSTF (Figure 3.8a), que ses positions les plus probables décrivent un axe quasi-zonal, à environ 40°S, rejoignant le courant de retour des Aiguilles. Cet axe correspond à l'enveloppe sud des trajectoires de tourbillons de la voie centrale identifiée au chapitre précédent. Ainsi, ces anneaux des Aiguilles, au cours de leur dérive vers l'ouest, supportent le SSTF sur leur flanc sud. Cela avait été illustré dans le cadre de l'étude des tourbillons de la voie centrale. Cette constitution du front explique les fortes vitesses associées au front dans cette région (Figure 3.8b). Cette jonction apparente du front avec l'AF, est donc en accord avec la trajectoire du SSTF obtenu sur le champ moyen.

On remarque cependant une région secondaire de probabilité de présence significative, entre 12°E et 17°E, située aux alentours de 42°S. L'étude du chapitre précédent laisse à penser que le SSTF, dans cette région, est également parfois détecté sur des anticyclones appartenant à la voie sud et présents au sud de la dorsale des Aiguilles.

### **Constitution du front à l'est de la retroflexion**

Le diagramme de densité de probabilité de présence en longitude du SSTF (Figure 3.8a) présente, de part et d'autre de 19°E, des caractéristiques très différentes. Comme décrit plus haut, les anneaux des Aiguilles de la voie centrale induisent, à l'ouest de cette longitude, un SSTF apparent principalement dirigé vers l'ARC. Seule la stagnation au sud de la dorsale des Aiguilles de tourbillons de la voie sud, rend compte d'une zone de présence secondaire plus au sud. Mais à l'est de 19°E, une région de présence marquée à 43°S apparaît, et le SSTF adopte un comportement bipolaire entre un positionnement correspondant toujours à l'AF et ce domaine de présence plus au sud. On constate un maintien de cette bipolarité jusque 23°E. A l'est de cette longitude, le SSTF ne se trouve plus sur l'AF, mais est exclusivement situé le long d'une trajectoire bien définie autour de 43°S.

Il semble donc qu'un SSTF distinct de l'AF ne prend véritablement naissance qu'à partir de 19°E. Dans cette distribution bipolaire, le maximum situé au sud suit le tracé plus classique du STF (Orsi et al., 1995) ou du SSTF de Belkin et Gordon (1996). Et l'on remarque que la longitude d'apparition du domaine de présence le plus au sud, soit 19°E, correspond à celle de la discontinuité du SSTF obtenue dans l'étude du champ moyen (Figure 3.5). Celle-ci peut ainsi s'expliquer par l'apparition à 19°E de la contribution importante au SSTF du champ moyen de la région la plus au sud. On remarque également que ce

comportement bipolaire, entre 19°E et 23°E, est compatible avec l'observation d'un regroupement fréquent de l'AF et du SSTF par Lutjeharms et Valentine (1984).

Le diagramme de présence en latitude décrit ci-dessus nous amène à nous interroger sur la cause de l'apparition d'un domaine de présence à 43°S à partir de 19°E, ainsi que sur les raisons de la bipolarité dans la position du front jusqu'à 23°E, et sur la disparition de cette bipolarité plus à l'est.

### **Le SSTF au sud de la dorsale des Aiguilles**

L'étude des anneaux des Aiguilles présentée au chapitre précédent a mis en lumière un comportement particulier de tourbillons dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles. Appartenant à ce qui a été nommé « voie sud », ils présentent une vitesse de dérive très élevée entre leur lieu de formation (détachement de la retroflexion ou subdivision d'anneau sur la dorsale des Aiguilles) et leur lieu de stagnation au sud de la dorsale. Ce schéma de déplacement explique que le diagramme de densité de présence du SSTF (Figure 3.8a) présente un maximum local vers 42°S au sud de la dorsale (zone de stagnation des tourbillons de la voie sud), associé à un minimum relatif vers 41°S (zone de dérive rapide). La forte érosion des tourbillons de la voie sud lors de leur phase initiale de dérive rapide a également été soulignée au chapitre précédent. Ceci explique, sur la Figure 3.8b, une bipolarisation de la probabilité des vitesses géostrophiques (de part et d'autre de 0.5 m/s) à 12°-17°E, là-même où les tourbillons des voies centrale et sud causent une bipolarisation du SSTF à 40°S et 42°S.

### **Bipolarité du SSTF entre 19°E et 23°E**

Des tourbillons, qui ne sont pas des anneaux des Aiguilles, sont présents au sud du courant de retour des Aiguilles. Lutjeharms et Valentine (1988) les ont classés en plusieurs familles. Dans l'une d'entre elles, les Agulhas eddies, figurent des anticyclones formés par détachement de l'ARC à proximité de la retroflexion, qui peuvent séjourner plusieurs mois au sud de l'AF avant d'être réabsorbés par l'ARC. Or, un examen de tracés du SSTF pour des champs hebdomadaires, comme c'est le cas le 6 mai 1998 (tourbillon E2 sur la Figure 3.9), montre que ces tourbillons peuvent contribuer à un positionnement du SSTF au sud de l'AF. Il apparaît ainsi que le SSTF, entre 19°E et 23°E, est détecté sur le flanc sud de ces anticyclones lorsque l'un d'entre eux s'y trouve, et sur le tracé de l'AF en l'absence d'Agulhas eddy. C'est le cas le 6 mai 1998, puisque le SSTF se situe au sud de l'anticyclone E2 à 20°E, mais se trouve sur le tracé de l'ARC à l'est du tourbillon. Ceci explique le comportement bipolaire du SSTF dans cette région.

Cette interprétation est soutenue par un examen des vitesses associées au front dans la même gamme de longitude (Figure 3.8b). La répartition des vitesses présente également une forte bipolarité qui prolonge celle déjà noté à 12°-17°E. Le noyau de valeurs voisines de 1m/s correspond au positionnement du SSTF sur l'AF, puisque de telles valeurs sont clairement associées à l'AF (Figure 3.7). Le noyau de valeurs plus faibles, centré autour de 0.35 m/s environ, est représentatif du positionnement au sud du front. Or, une vitesse de 0.35 m/s est trop élevée pour qu'il s'agisse d'un gradient permanent, tel que rencontré dans la partie atlantique du front (vitesses de l'ordre de 0.15 m/s). Il s'agit donc bien de vitesses rencontrées sur le pourtour d'anticyclones.

### **Le SSTF à l'est de 23°E**

La bipolarité du SSTF disparaît à l'est de 23°E. Seule demeure sa position la plus classiquement admise aux alentours de 43°S. Un examen des vitesses du noyau sud de position du front (Figure 3.8b) indique une décroissance d'ouest en est, allant d'environ 0.35m/s dans la région 19°E-23°E à 0.25 m/s seulement à l'est de 23°E. Cette décroissance des vitesses, alliée à la disparition de la bipolarité dans le positionnement du front, suggère que le SSTF ne s'appuie plus sur des anticyclones passagers situés au sud de l'ARC, mais suit plutôt un gradient quasi-permanent situé à 43°S. On peut observer cela sur le champ hebdomadaire du 6 mai 1998 (Figure 3.9). Comme décrit plus haut, entre 19°E et 23°E, le SSTF s'appuie sur le tourbillon E2 et sur l'AF. En revanche plus à l'est, le front s'appuie sur une ligne d'iso-SSH quasi-continue.

Si les vitesses associées au SSTF sont plus faibles dans cette région (de l'ordre de 0.25 m/s), du fait que le front s'appuie probablement sur un tracé plus continu, elles sont néanmoins plus élevées que celles rencontrées en atlantique sud (environ 0.15 m/s). Ce résultat est en accord avec l'observation de gradients de propriétés particulièrement marqués du STF dans cette région (Lutjeharms et Valentine, 1988 ; Belkin et Gordon, 1996).

### **Continuité du SSTF et formation d'un front continu**

Ce qui est décrit plus haut peut se résumer ainsi :

- Un SSTF d'apparence continue, statistiquement bien défini en latitude et en SSH, et associé à des vitesses géostrophiques relativement faibles (~0.15 m/s et 0.25 m/s) est observé à l'ouest de 12°E, et à l'est de 23°E.

- De 12°E à 17°-19°E, le SSTF est principalement détecté sur le flanc sud des anneaux des Aiguilles de la voie centrale (cf. chap.2), vers 40°S, le long d'une « bande » qui se

raccorde plus à l'est à l'AF. Une autre zone de détection (moins marquée) vers 42°S au sud de la dorsale des Aiguilles, signale la détection du SSTF sur le flanc sud des anneaux de la voie sud.

-De 17°-19°E à 23°E cette bipolarité latitudinale de présence du SSTF s'accroît, et s'équilibre entre : une coïncidence avec l'AF, vers 40°S, et une bande vers 43°S, signe d'une détection du front sur le flanc sud des « tourbillons des Aiguilles » (Agulhas eddies) décrits par Lutjeharms et Valentine (1988). Cette bande à 43°S se raccorde, à l'est de 23°E, au STF classique et continu de l'océan Indien.

Si l'étude réalisée ici ne permet pas d'expliquer la formation de ce STTF continu vers 43°S, on peut toutefois émettre quelques hypothèses. Notre étude a montré que la présence occasionnelle du SSTF au sud de la dorsale et au sud de l'ARC, tient à la présence des anneaux de la voie sud et des tourbillons des Aiguilles, structures anticycloniques détachées de la retroflexion et de l'ARC. L'ARC constituant la limite sud du gyre subtropical indien, les eaux de ces tourbillons possèdent des propriétés subtropicales. En migrant au sud de l'ARC, dans la zone subantarctique où ils peuvent demeurer plusieurs mois (Lutjeharms et Valentine, 1988), il est probable qu'ils s'érodent et se mélangent aux eaux environnantes, générant des eaux de caractéristiques intermédiaires. L'ACC s'écoulant d'ouest en est, ces eaux mélangées pourraient être advectées vers l'est, créant une bande zonale d'eaux aux propriétés intermédiaires distinctes de celles de la retroflexion. Cela expliquerait la formation d'un gradient permanent vers l'est entre ces eaux et les eaux subpolaires.

#### **3.4.2.4 Etude du NSTF**

##### **Un front intense et de forte variabilité en Atlantique sud**

L'application de la méthode de recherche du NSTF du champ moyen de SSH s'avère adéquate pour l'identification du front dans les champs hebdomadaires. Ceci est soutenu par le taux de présence très élevé du front à l'ouest de 10°E (Figure 3.7a). Le diagramme de densité de probabilité de présence en latitude du front (Figure 3.11a) montre en revanche une variabilité importante du front en latitude, l'écart type étant de 1.65° de latitude sur l'ensemble du domaine de recherche. La vitesse géostrophique associée au front, dont la probabilité est tracée sur la Figure 3.11b, est assez stable dans la partie la plus Atlantique du domaine de recherche, voisine de 0.20 m/s. Cette valeur, comme pour l'ensemble des fronts, est beaucoup plus élevée que celle trouvée dans le champ moyen, du fait du lissage inhérent au calcul du champ moyen. Mais on constate surtout que la vitesse associée au NSTF est plus



forte, dans cette région, que celle du SSTF, comme on peut le constater sur la Figure 3.7a. Or l'inverse a été observé dans l'étude du champ moyen. Ceci résulte de la variabilité plus importante en latitude du NSTF, dont le gradient est ainsi beaucoup plus lissé dans le champ moyen. Le NSTF est plus intense que ce que l'étude du champ moyen ne laissait apparaître.

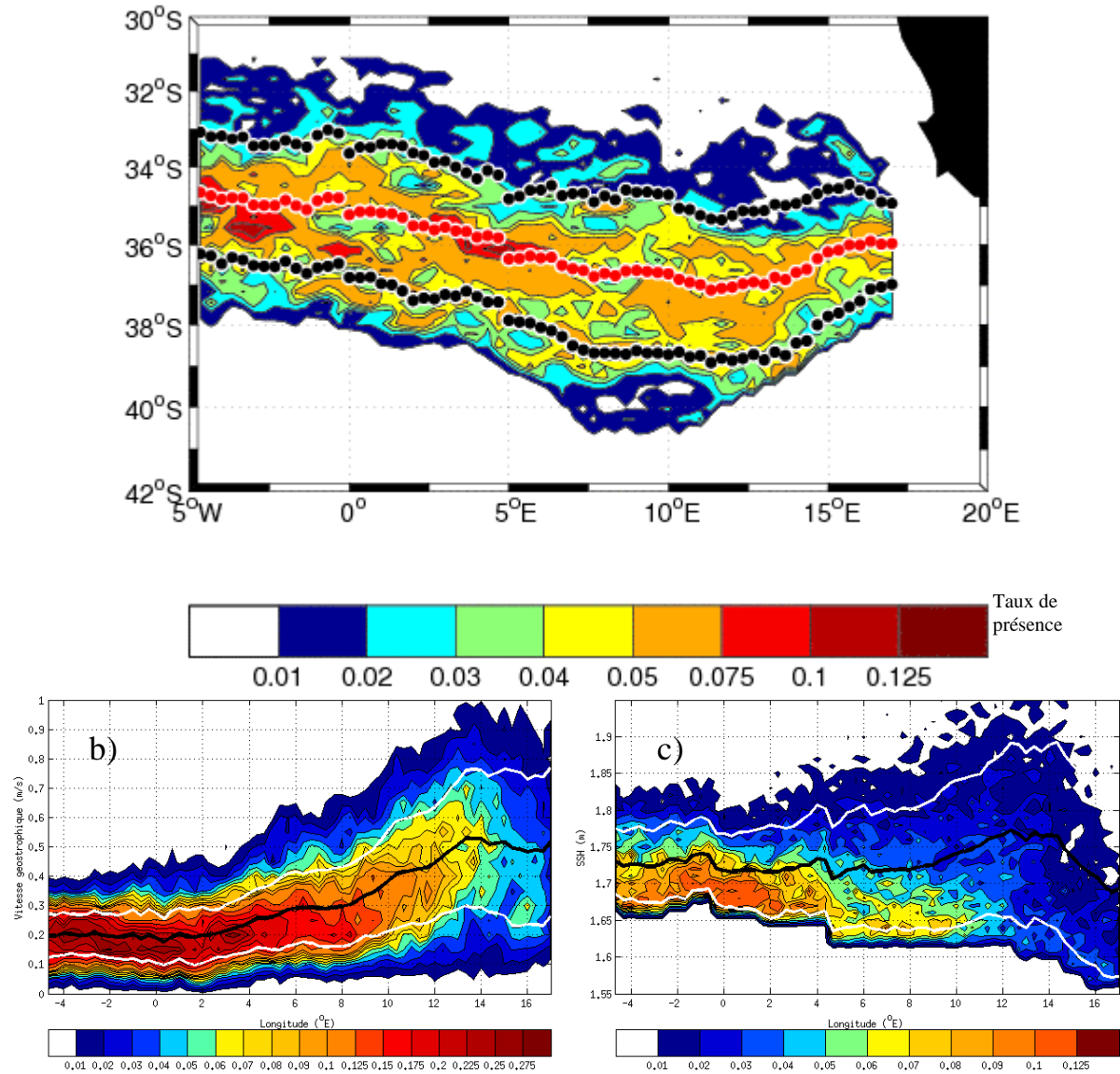


Figure 3.11. a) Densité de probabilité de présence en latitude du NSTF en fonction de la longitude, ramené au nombre total de fichiers (658). En ronds rouges, la latitude moyenne du front. En ronds noirs, écart type sur la latitude du front, en fonction la longitude, tracé de part et d'autre de la latitude moyenne. b) Tracé de probabilité des vitesses géostrophiques du NSTF en longitude. La probabilité, pour chaque longitude, est ramenée au nombre total de fichiers hebdomadaires, soit 658. C'est pourquoi les probabilités sont faibles vers l'est, où le taux de présence du front est le plus faible. c) Même tracé pour la hauteur dynamique associée au NSTF. Les traits noirs représentent les valeurs moyennes en longitude pour chacun des deux tracés ; les traits blancs représentent l'écart type, de part et d'autre des valeurs moyennes.

## **Fermeture du gyre subtropical de l'Atlantique sud**

L'étude du NSTF du champ moyen suggérait l'existence d'une fermeture partielle du gyre subtropical atlantique par l'intermédiaire de ce front. Cependant les caractéristiques du front moyen dans sa partie la plus proche du continent africain semblaient refléter un effet de la variabilité du gyre subtropical. L'étude du NSTF et de sa branche retour trouvés dans les champs hebdomadaires corrobore ces deux idées.

Le diagramme de densité de probabilité de présence du NSTF (Figure 3.11a) montre une variabilité latitudinale décroissante à mesure que le front s'approche des côtes africaines, et une inflexion vers le nord. La branche retour du NSTF est également détectée, et sa trajectoire moyenne en latitude représentée (Figure 3.8a), soutenant ainsi l'hypothèse de la fermeture partielle du gyre par le NSTF.

Cependant le taux de présence du front décroît progressivement vers l'est, jusqu'à atteindre 40% à 17°E (Figure 3.7a). Cette décroissance monotone est cohérente avec une extension variable en longitude, au sud-est, du gyre subtropical. De plus, le profil de décroissance est quasiment identique pour la branche retour du NSTF, comme le montre la même figure. Cette similitude des taux de présence du NSTF et du NSTF retour renforce l'idée que le NSTF et sa branche retour s'appuient sur le contour de fermeture du gyre subtropical (visible sur le champ moyen, par la trajectoire des contours d'iso-SSH au sud-est du gyre, Figure 3.5b). On s'attend en effet, dans cette hypothèse, à ce que le taux de présence de chacune des branches du front soit pareillement affecté par la variabilité de l'extension du gyre.

### **Rôle des anticyclones dans la fermeture du gyre subtropical et la trajectoire du NSTF**

Un examen du tracé du NSTF sur un champ hebdomadaire (voir Figure 3.9) montre que le front, dans cette région, peut s'appuyer sur le flanc sud des anticyclones présents dans le bassin du Cap. Ceci explique les vitesses importantes associées au NSTF (Figure 3.7a ; Figure 3.11b). Les valeurs de vitesses presque identiques du NSTF retour montrent que celui-ci s'appuie le plus souvent sur le flanc nord de ces mêmes anticyclones. Ainsi, si le NSTF et le NSTF retour, dans le cadre du champ moyen, épousent le contour lissé du gyre subtropical atlantique moyen, la configuration de l'extrémité du front semble différente dans les champs hebdomadaires. La limite sud-est de l'extension du gyre subtropical semble y être assurée par des anticyclones, notamment des anneaux des Aiguilles, supportant les deux fronts sur leurs contours.

Si le taux de présence du front, par sa décroissance forte à proximité du continent africain (Figure 3.7a), met en évidence une étendue variable du NSTF et du gyre subtropical, le tracé du front lui-même ne permet pas d'évaluer statistiquement son extension vers l'est. La Figure 3.10, représentant la répartition statistique de l'étendue longitudinale, et sur l'ensemble du domaine de recherche du front (de 5°O à 17°E), sur laquelle le front n'est pas détecté, permet une estimation plus fine de l'étendue moyenne du front et de sa variabilité.

Tout d'abord, on constate que pour la majorité des champs hebdomadaires, le front n'est pas identifié sur une étendue cumulée d'environ 1.5° de longitude. Etant donnée la décroissance monotone du taux de présence du front, présentée plus haut, on peut supposer que ces 1.5° de longitude manquants dans le tracé du NSTF forment le plus souvent un segment quasi-continu situé en extrémité est du domaine de recherche. Par conséquent, l'extension la plus probable du front vers l'est est à 15.5°E environ.

On remarque également sur ce tracé qu'il arrive que le front soit identifié en tout point du domaine d'étude. Cela arrive dans environ 3% des cas. Ce constat est cohérent avec le taux de présence non nul (40%) du NSTF à 17°E, en extrémité du domaine de recherche. Il aurait donc probablement été possible d'étendre le domaine de recherche du front vers l'est. Une simple extrapolation du tracé de la Figure 3.10, sur la base d'une courbe en cloche symétrique, permet d'estimer une extension maximale du NSTF vers l'est d'environ 1° de plus que la limite est du domaine de recherche, soit jusqu'à 18°E.

De la même manière, le tracé indique qu'il ne manque jamais plus de 6° de longitude dans la définition du front sur les champs hebdomadaires. On peut donc estimer que son extension la plus faible vers l'est se situe vers 11°E. L'extension du NSTF et de sa branche retour varie donc entre environ 11°E et 18°E, avec une extension la plus probable aux alentours de 15.5°E.

#### **3.4.2.5 Etude de l'AF**

Le front des Aiguilles, qui s'appuie sur la trajectoire du courant de retour des Aiguilles (Belkin et Gordon, 1996), est le mieux défini des trois fronts identifiés dans cette étude. Son taux de présence est très proche de 100% (Figure 3.7a). Il présente un écart type moyen en latitude de 1.15° en moyenne, et présente la particularité, comme le SSTF, d'avoir deux gammes de latitudes de présence autour de 30°E (Figure 3.12). Cela s'explique par la présence occasionnelle de cyclones au nord de l'ARC. Ces cyclones se sont le plus souvent détachés de l'ARC vers 33°E, au niveau d'une incursion vers le nord du courant, et se déplacent vers l'ouest pour rejoindre l'incursion de même type qui contourne le plateau des Aiguilles par le

nord. Ces cyclones ont été étudiés et décrits par Boebel et al. (2003). Le sens de rotation de ces cyclones est tel que l'AF est alors situé sur leur flanc nord, afin de respecter le critère d'une composante de vitesse zonale positive. La raison pour laquelle le front est situé sur ces tourbillons, plutôt que sur la trajectoire de l'ARC, tient à la modification de la méthode de recherche de l'AF par rapport au champ moyen. En menant la recherche de l'AF à chaque longitude depuis le nord et vers le sud, le maximum de vitesse local associé au cyclone sera le premier rencontré. Un exemple de ce cas de figure est fourni par la coupe verticale de température à 30°E reproduite par Park et al. (2001) en Figure 3.3. Un autre exemple est présenté sur la Figure 3.9, pour le 6 mai 1998, où le tourbillon nommé E1 supporte le front. Il est évident que la véritable position du front est située plus au sud. Hormis cette bipolarité dans le positionnement du front liée à la méthode de recherche, la trajectoire obtenue pour l'AF est conforme à nos connaissances actuelles (notamment Belkin et Gordon, 1996). On retrouve notamment le contournement très stable du plateau des Aiguilles par le nord (Figure 3.12).

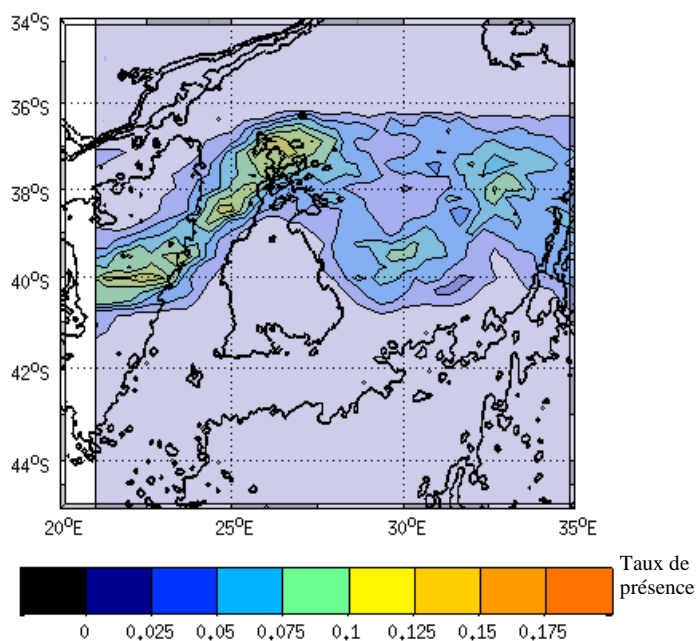


Figure 3.12. Densité de probabilité de présence en latitude de l'AF au contournement du plateau des Aiguilles (contour bathymétrique du plateau à 3000 m).

### 3.5 Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre aux conditions d'un transfert d'eaux subtropicales d'ouest en est par la branche sud du supergyre. De tels échanges sont liés à la présence de fronts délimitant les eaux subtropicales des eaux subantarctiques, et aux courants associés. L'étude du champ de SSH moyen, pour une période allant d'octobre 1992 à janvier

2007, met en évidence l'existence de fronts se rapprochant des propositions de Belkin et Gordon (1996). La présence du front SSTF moyen, de part sa continuité d'un bassin à l'autre, corroborerait l'idée d'une connexion des gyres subtropicaux de l'Atlantique sud et de l'Océan Indien. Au sud de la retroflexion, le SSTF moyen est distinct du front des Aiguilles, confirmant le schéma proposé par les auteurs. Nous décelons également la présence d'un front NSTF moyen, assez peu marqué, susceptible de fermer partiellement le gyre atlantique. Mais au-delà de cette étude des champs moyens, nous nous sommes appuyés sur la longueur de la série temporelle de champ de hauteur dynamique pour étudier le comportement de ces fronts dans le temps, autour de quelques questions principales. Les résultats principaux de cette étude, synthétisés ci-dessous, sont schématisés sur la Figure 3.13.

**L'étude du SSTF dans les champs hebdomadaires a permis d'examiner la question de la continuité ouest-est de ce front. Plusieurs diagnostics statistiques révèlent une continuité à l'ouest de 12°E environ, puis à l'est de 23°E. Dans la région 12°E-23°E, les critères de détection du SSTF sont observés sur le flanc sud d'anticyclones détachés de l'ARC ou de la retroflexion, ou sur l'ARC lui-même, et la densité de probabilité de présence du front présente un caractère bimodale, avec un maximum à environ 40°S (se raccordant au front continu de l'Atlantique) et 42°S-43°S (se raccordant au front continu de l'Océan Indien). Ce positionnement des critères sur des tourbillons, et le « raccordement » des segments continus de chaque océan à des catégories distinctes de tourbillons donnent l'image d'une discontinuité du STF au sud de l'Afrique. Cette configuration suggère un transfert d'eau subtropicale de l'Atlantique vers l'Océan Indien qui, au mieux, serait très limité, et s'effectuerait par échanges turbulents.**

**Une hypothèse a été proposée pour la formation du STF de l'Océan Indien, observé à environ 2° de latitude au sud de l'ARC. La présence intermittente de ce front sur le flanc sud d'anneaux ou de tourbillons des Aiguilles à l'ouest de 23°E environ suggère la création par érosion de ces tourbillons d'une eau subtropicale « diluée » le long de l'ARC, dont la limite sud constituerait le STF de l'Océan Indien.**

**L'étude du NSTF dans les champs hebdomadaires suggère une fermeture à l'est du gyre subtropical de l'Atlantique par ce front. Cette fermeture, variable en longitude, est assurée par des anticyclones du bassin du Cap (vraisemblablement de la voie nord) autour desquels semble s'enrouler le front.**

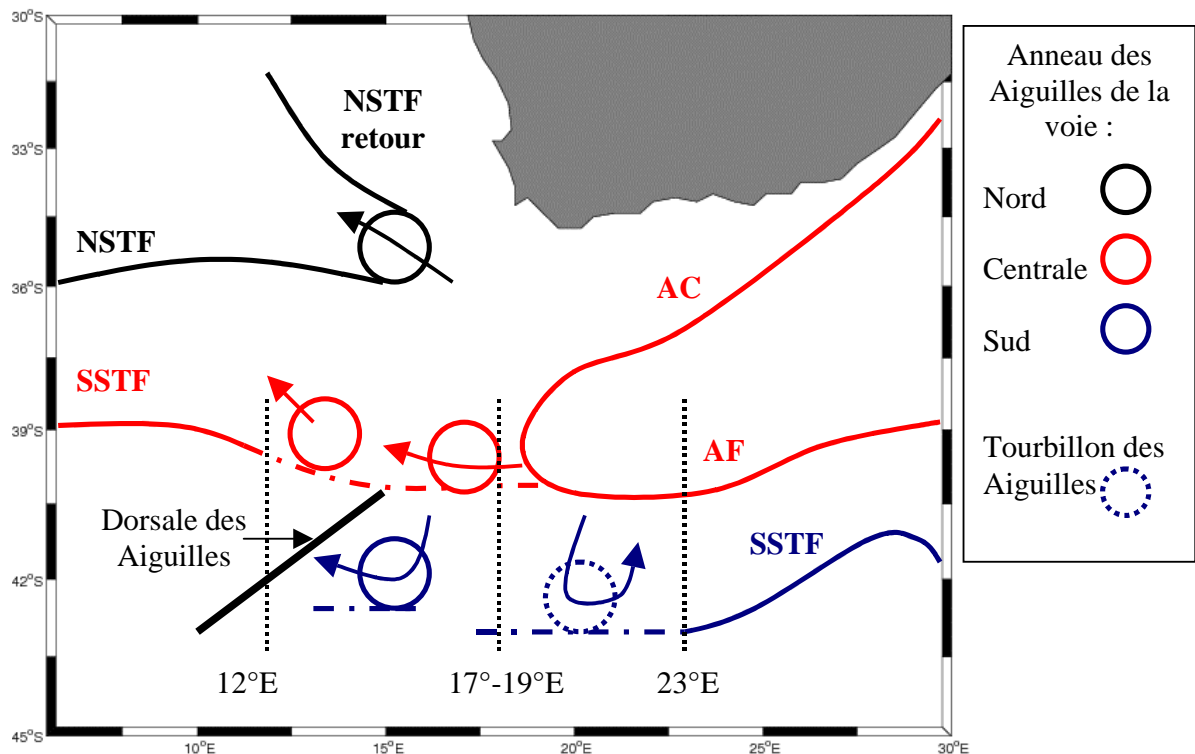


Figure 3.13. Schéma synthétique du comportement des fronts présents dans les champs hebdomadaires. Se référer au texte ci-dessus.

## 3.6 Annexe

### 3.6.1 Etude de sensibilité

#### 3.6.1.1 Principe

Les critères de la méthode utilisée pour la recherche des fronts hebdomadaires reposent essentiellement sur un diagnostic des caractéristiques du champ moyen de SSH. La transposition de cette méthode a nécessité de modifier certains critères, concernant le SSTF et l'AF. Ces modifications permettent par exemple une meilleure prise en compte du rôle de la mésoéchelle, dans le cas du SSTF. Elles sont donc liées à la présence de mésoéchelle dans les champs hebdomadaires de SSH, absente dans le champ moyen. Cependant, la méthode pourrait être inadaptée, ou mal calibrée vis à vis des champs hebdomadaires. Pour évaluer l'aptitude de notre méthode à détecter les fronts recherchés dans les champs hebdomadaires, une étude de sensibilité a été menée.

Les intervalles de latitude de recherche des différents fronts ont été choisis de façon à englober très largement leurs domaines de variabilité respectifs. La sensibilité de la méthode réside donc principalement dans les choix des intervalles de hauteurs dynamiques. C'est ce

paramètre qui est susceptible d'avoir une influence significative sur les positions des fronts. Deux études de sensibilité ont été définies. Dans la première, les intervalles ont été décalés de 0.02 m vers les valeurs de SSH faibles. Un décalage équivalent, mais de sens inverse est réalisé dans la seconde étude. Etant donné le gradient méridien moyen de SSH orienté vers l'équateur, un décalage positif entraîne un décalage moyen du domaine de recherche vers le nord, et inversement. On parlera donc abusivement de décalage vers le nord et vers le sud. Le choix de cette amplitude de décalage, 0.02 m, se base sur les caractéristiques de la recherche du SSTF dans le champ moyen. Ce décalage est cependant appliqué également au NSTF et à l'AF. La largeur moyenne de l'intervalle de SSH de recherche du SSTF dans le champ moyen est de 0.148m. Un décalage de 0.02 m représente donc 13.5% en moyenne de la largeur de la gamme de recherche du SSTF moyen. Sachant que le gradient moyen de hauteur dynamique avec la latitude, entre 5°O et 35°E, est d'environ 10 °lat/m, cela représente également un décalage moyen de la fenêtre de recherche de 0.2° de latitude, vers le nord et vers le sud. Cette valeur de décalage est donc suffisamment faible pour permettre 86.5% de chevauchement moyen des intervalles de SSH, par rapport à l'intervalle de la méthode principale. Ainsi, s'il existe un front bien défini et faiblement variable en latitude, il sera le plus souvent situé dans les intervalles décalés, et donc correctement détecté dans les tests de sensibilité. En revanche, si aucun front défini n'existe, le positionnement du front se fera de façon aléatoire, et le front sera, en moyenne, détecté 0.2° de latitude plus au nord ou plus au sud. Et si l'intervalle de recherche issu de l'étude du champ moyen n'est pas correctement centré autour de la position moyenne du front hebdomadaire, des décalages importants pourront être détectés dans l'un ou l'autre des 2 tests. On notera que seule la limite inférieure de l'intervalle de recherche est décalée dans le cas du SSTF, puisque la limite nord a été retirée à l'ouest de 19°E (et portée à 2.2 m à l'est de cette longitude, assurant de toute façon une détection systématique).

### **3.6.1.2 Résultats**

#### **AF**

Les résultats principaux des deux études sont reportés dans le Tableau 3.1. Tout d'abord, le front des Aiguilles présente une très faible sensibilité au choix des intervalles de SSH de recherche. Les écarts sur la latitude moyenne du front, de 0.11° et 0.13° pour les décalages vers le nord et vers le sud (+0.02 m et -0.02 m), sont bien inférieurs aux 0.2° associés au gradient méridien moyen de SSH. Mais surtout, l'écart moyen entre positions des

modes (latitude de présence la plus élevée du front), est extrêmement faible, avec plus de 93% des positions des modes inchangées en longitude.

Etude	Front	Ecart moyen en latitude des positions moyennes du front	Ecart moyen en latitude des positions du mode associé au front	Pourcentage de positions du mode inchangées
1: décalage vers le nord (+0.2 m)	SSTF	0.25°	0.32°	67.65%
	NSTF	0.30°	0.13°	80.50%
	AF	0.11°	0.05°	93.02%
2: décalage vers le sud (-0.2 m)	SSTF	0.24°	0.36°	69.85%
	NSTF	0.32°	0.27°	67.10%
	AF	0.13°	0.03°	93.02%

*Tableau 3.1. Résultats principaux des deux études de sensibilité. Pour chaque étude et chaque front, les résultats reportés sont : l'écart moyen en latitude des positions des fronts, moyennés sur l'ensemble du domaine de recherche de chaque front ; l'écart moyen en latitude des positions des modes, c'est à dire de la position présentant la plus forte probabilité de présence en latitude ; et enfin, sur l'ensemble des points de grille en longitude du domaine de recherche des fronts, le pourcentage de positions de modes qui sont inchangées par rapport à l'étude principale.*

## SSTF

Les résultats de l'étude concernant la position du SSTF montrent une sensibilité plus importante. Cependant, une analyse des causes de cette sensibilité permet de justifier l'emploi de critères inchangés par rapport à l'étude du champ moyen. Les écarts sur la latitude moyenne du SSTF, de 0.25° et 0.24° de latitude, sont légèrement supérieurs à l'écart de 0.2° lié au gradient méridien du champ moyen, montrant une sensibilité significative. Cependant, les écarts moyens en latitude des positions des modes associés au front donnent une image différente. De 0.32° et 0.36° de latitude, ces écarts sont encore bien supérieurs aux écarts sur les latitudes moyennes du front. Cela s'explique par la présence au nord et au sud de deux fronts : le NSTF et le front subantarctique (SAF). Il s'ensuit qu'un décalage vers le sud de la limite sud de l'intervalle de recherche peut provoquer la détection fréquente du SAF, par empiètement sur le domaine de variabilité de ce front (la recherche étant menée depuis le sud vers le nord). Par conséquent, le mode associé à la position statistique du front peut apparaître en extrémité sud du domaine de recherche. Or, cela se traduit par un écart plus important sur la position des modes dans la latitude du front, que sur la latitude moyenne. Un raisonnement analogue explique la différence entre les deux écarts dans le cas du décalage au nord. Cette fois-ci, l'omission d'une partie du domaine de présence sur SSTF entraîne la détection du NSTF situé au nord. L'étude montre donc une sensibilité importante au choix de l'intervalle de SSH de recherche. Mais celle-ci s'explique par la proximité de deux fronts, parfois détectés en lieu et place du SSTF. Un examen du tracé de densité de probabilité de présence



du SSTF en latitude (Figure 3.8a), pour l'étude principale, permet alors de confirmer que l'intervalle de recherche issu de l'étude du champ moyen fonctionne correctement. En effet, le tracé ne présentant pas de noyaux de présence secondaires en bordure de domaine de recherche (au nord ou au sud), cela montre que les fronts voisins ne perturbent pas l'identification du front.

## **NSTF**

L'étude de sensibilité du NSTF montre une sensibilité importante à un décalage de l'intervalle de recherche vers des valeurs supérieures de SSH (étude 1). En effet, l'écart moyen de latitude, sur le domaine de définition du front, est de  $0.30^\circ$  pour cette première étude de sensibilité. Cet écart est bien supérieur aux  $0.2^\circ$  liés au gradient moyen. Cependant, l'écart moyen sur la position du mode n'est que de  $0.13^\circ$  de latitude. Plus de 80% des positions des modes sont inchangées entre  $5^\circ\text{O}$  et  $17^\circ\text{E}$ . Ces chiffres s'expliquent par l'absence de front au nord du NSTF, et un domaine de variabilité du front qui s'étend jusqu'à la limite sud de l'intervalle de recherche (limite inférieure de l'intervalle). Dans ce contexte, un accroissement de la limite sud de recherche entraîne une omission fréquente de la position réelle du front. En l'absence de front plus au nord, le front se verra positionné de façon aléatoire, et à des latitudes parfois très au nord. La dispersion du positionnement statistique du front en latitude résulte en un écart assez important sur la latitude moyenne du front. En revanche, la dispersion aléatoire au nord du noyau principal associé au front n'engendre pas de noyau secondaire, de sorte que le mode demeure associé à la position la plus probable trouvée dans l'étude principale. La seconde étude de sensibilité, pour laquelle les limites de l'intervalle de recherche sont diminuées de 0.02 m (décalage vers le sud), indique également une sensibilité importante. L'écart sur la position moyenne en latitude du front, comme l'écart moyen sur les latitudes des modes, sont élevés. Cela provient de la présence du SSTF au sud du front, qui est parfois détecté en lieu et place du NSTF. Ainsi, l'intervalle semble sensible à un décalage dans un sens ou dans l'autre. Comme dans le cas du SSTF, seul l'examen du diagramme de densité de probabilité de présence du NSTF trouvé dans l'étude principale permet de s'assurer du bon choix de l'intervalle de recherche (Figure 3.11a). On constate en effet que le tracé présente une unique région de présence importante, assurant que le NSTF est correctement identifié.

## 4 Etude de la branche nord du supergyre dans un modèle à haute résolution

Les études réalisées jusqu'ici fournissent une caractérisation des évolutions temporelle et spatiale de grandeurs et phénomènes associés aux échanges indo-atlantiques. Le dernier chapitre de cette thèse est consacré à la reprise de certaines de ces études sur des simulations numériques régionales à haute résolution. L'objectif principal est ici de confronter la dynamique simulée à celle observée sur les données altimétriques. Les études menées à partir des données peuvent ainsi servir d'étalons à une évaluation de l'aptitude des modèles actuels à reproduire la physique des échanges d'eau subtropicale entre océans Atlantique et Indien. Seules les études associées à la branche nord du supergyre subtropical ont été reproduites ici, soit celles portant sur le comportement de la réflexion et sur les trajectoires des anneaux des Aiguilles.

### 4.1 Description des deux simulations

Les deux simulations étudiées sont issues d'un modèle régional à haute résolution de la région au sud du continent africain. Le modèle utilisé est ROMS (*Regional Ocean Modeling System*), dans une version développée par UCLA-IRD (voir Shchepetkin et McWilliams 2003 et 2005 pour une description complète du modèle). La résolution horizontale du modèle est le  $1/10^\circ$ . La résolution verticale se répartit sur 32 niveaux avec un espacement qui varie entre 30 cm en surface et 1086 m au fond. Le domaine modélisé va de  $10^\circ\text{O}$  à  $34^\circ\text{E}$ , et de  $25.4^\circ\text{S}$  à  $44^\circ\text{S}$ . La bathymétrie utilisée, d'une précision de 2', est celle estimée par Smith et Sandwell (1997). Pour les deux simulations envisagées ici, les forçages sont des moyennes mensuelles de climatologies, hormis pour les forçages de vents. Les conditions initiales et de forçages aux frontières océaniques sont dérivées de la climatologie de Levitus (Boyer et al., 2006). Les flux de chaleur et d'eau douce en surface correspondent aux moyennes mensuelles COADS (Da Silva et al., 1994). Les forçages de vent de la première simulation, appelée AGU10-CLIM, sont une climatologie mensuelle dérivée des mesures du satellite QuickSCAT (Bentamy, 2003) au  $1/2^\circ$ . La seconde simulation, appelée AGU10-DW, est forcée par des vents journaliers QuickSCAT.

La simulation AGU10-CLIM n'est exploitée qu'à partir de la cinquième année, les 4 premières années étant une phase de spin-up. La simulation est ensuite utilisée jusqu'à la fin de la dixième année. La seconde simulation est forcée avec les vents journaliers de la période

allant d'octobre 1999 à juin 2006. Les sorties des deux simulations sont moyennées et enregistrées par intervalles de 2 jours. L'unique champ exploité ici est celui de la SSH.

## **4.2 Etude de la retroflexion du courant des Aiguilles**

L'étude de la retroflexion et du positionnement de sa limite a été reprise, ainsi que la détection des instants de lâchers de masses d'eaux anticycloniques. Des adaptations ont dû être introduites, du fait notamment de la résolution spatio-temporelle plus fine des simulations. Ces adaptations seront détaillées. Cette étude a été menée sur les 2 simulations disponibles, et les résultats comparés à ceux de l'étude sur les données altimétriques. La simulation la plus fidèle a été choisie pour mener, dans un second temps, l'étude des trajectoires des anneaux.

### **4.2.1 Première comparaison des sorties de modèles avec les données altimétriques.**

#### **4.2.1.1 Une retroflexion moins variable et décalée vers l'ouest**

Avant d'aborder la recherche du point de retroflexion et son étude, un examen des caractéristiques moyennes des 2 simulations permet une première appréciation de leur aptitude à reproduire la dynamique observée dans les données. La Figure 4.1 présente trois champs moyens de SSH : celui correspondant aux données CLS (d'octobre 1992 à janvier 2007, avec champ moyen Rio05 (Rio et Schaeffer, 2005 ; Rio et Hernandez, 2004), et ceux correspondant aux périodes d'étude des 2 simulations. Sur cette figure, le niveau de SSH moyen des 2 simulations a été ramené à celui des données altimétriques sur le domaine représenté (de 0°E à 35°E et de 25°S à 50°S), afin de comparer les trois tracés. La position moyenne probable de la retroflexion est celle pour laquelle on observe le resserrement le plus important des lignes d'iso-SSH, puisque cela est associé à un maximum de vitesse géostrophique. On constate alors que la position moyenne de la retroflexion est plus avancée vers l'ouest dans les 2 simulations qu'elle ne l'est dans les données. Par ailleurs, les lignes d'iso-SSH, au niveau de la retroflexion, sont plus resserrées dans les champs moyens associés aux 2 simulations, suggérant un variabilité longitudinale inférieure à celle observée dans les données. La retroflexion apparaît donc décalée vers l'ouest et moins variable en longitude dans les 2 simulations que dans les données altimétriques. Cette interprétation des champs moyens demandera vérification après étude de la retroflexion dans les simulations.

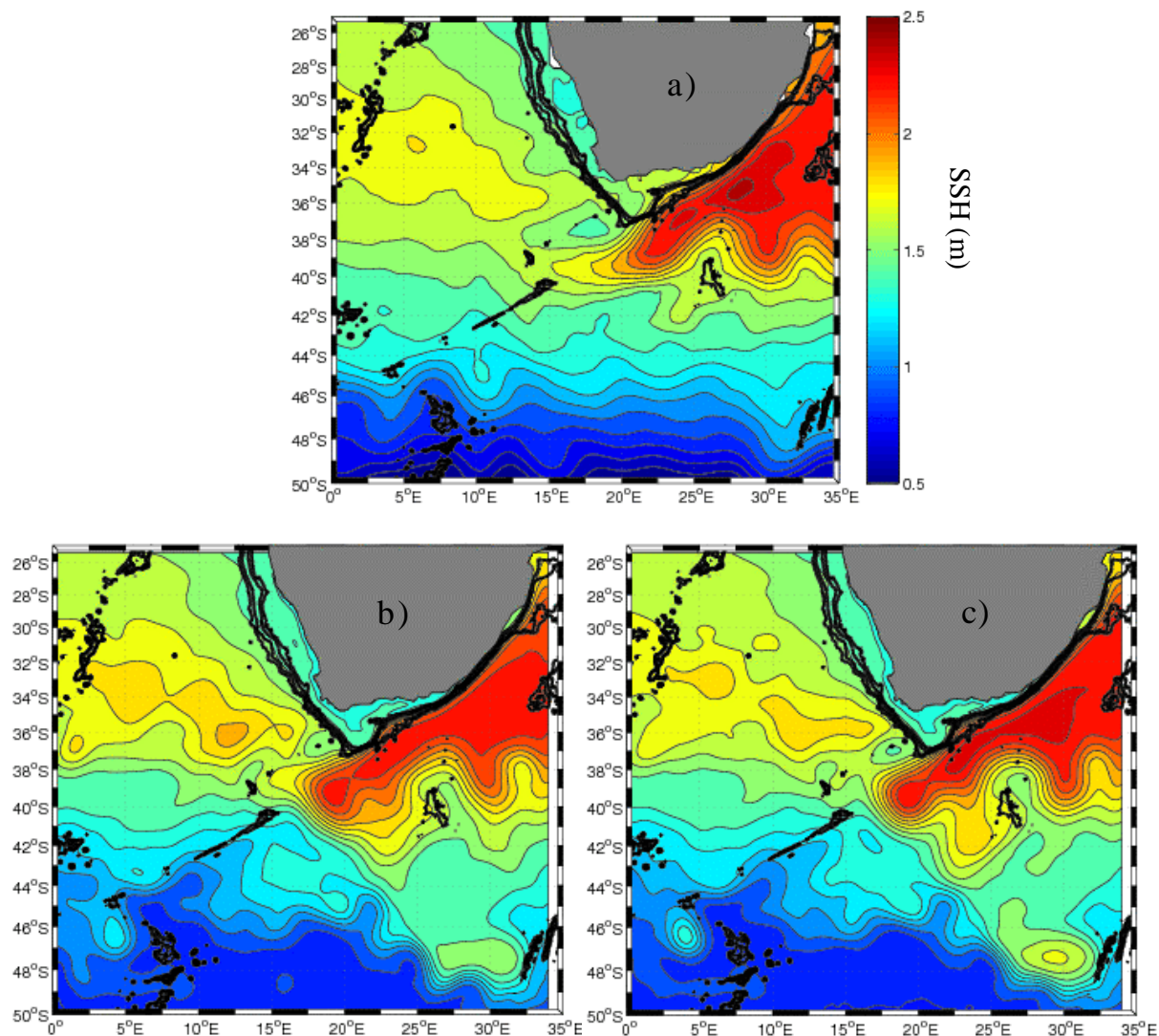


Figure 4.1. Niveaux moyens de SSH pour a) les données altimétriques CLS, b) la simulation sous forçage climatologiques AGU10-CLIM et c) la simulation sous forçages journaliers Quikscat AGU10-DW. (Niveau moyen modifié pour les 2 simulations, ramené à celui des données à des fins comparatives).

#### 4.2.1.2 Une activité mésoéchelle décalée vers le nord dans le bassin du Cap

Les tracés des écarts types sur les valeurs de SSH de la Figure 4.2, nous renseignent également sur l'intensité de l'activité mésoéchelle du bassin du Cap dans les 2 simulations. Les simulations présentent une variabilité plus marquée dans l'Atlantique sud-est, au nord-ouest de la retroflexion, et moins marquée plus au sud, notamment à l'aplomb et au sud de la dorsale des Aiguilles. Ces différences sont plus visibles encore sur la Figure 4.3 qui représente la différence entre les écarts types de SSH des données CLS et de chacune des 2 simulations. Il semble donc que l'activité mésoéchelle dans le bassin du Cap soit plus intense dans les 2 simulations, mais que la région au sud de la dorsale ne présente que très peu d'activité tourbillonnaire. Ce constat pourrait suggérer une prépondérance des voies nord ou

centrale empruntées par les anneaux des Aiguilles (telles que définies au chapitre précédent) par rapport à la voie sud. L'étude des trajectoires réalisée par la suite devrait permettre de vérifier cette hypothèse.

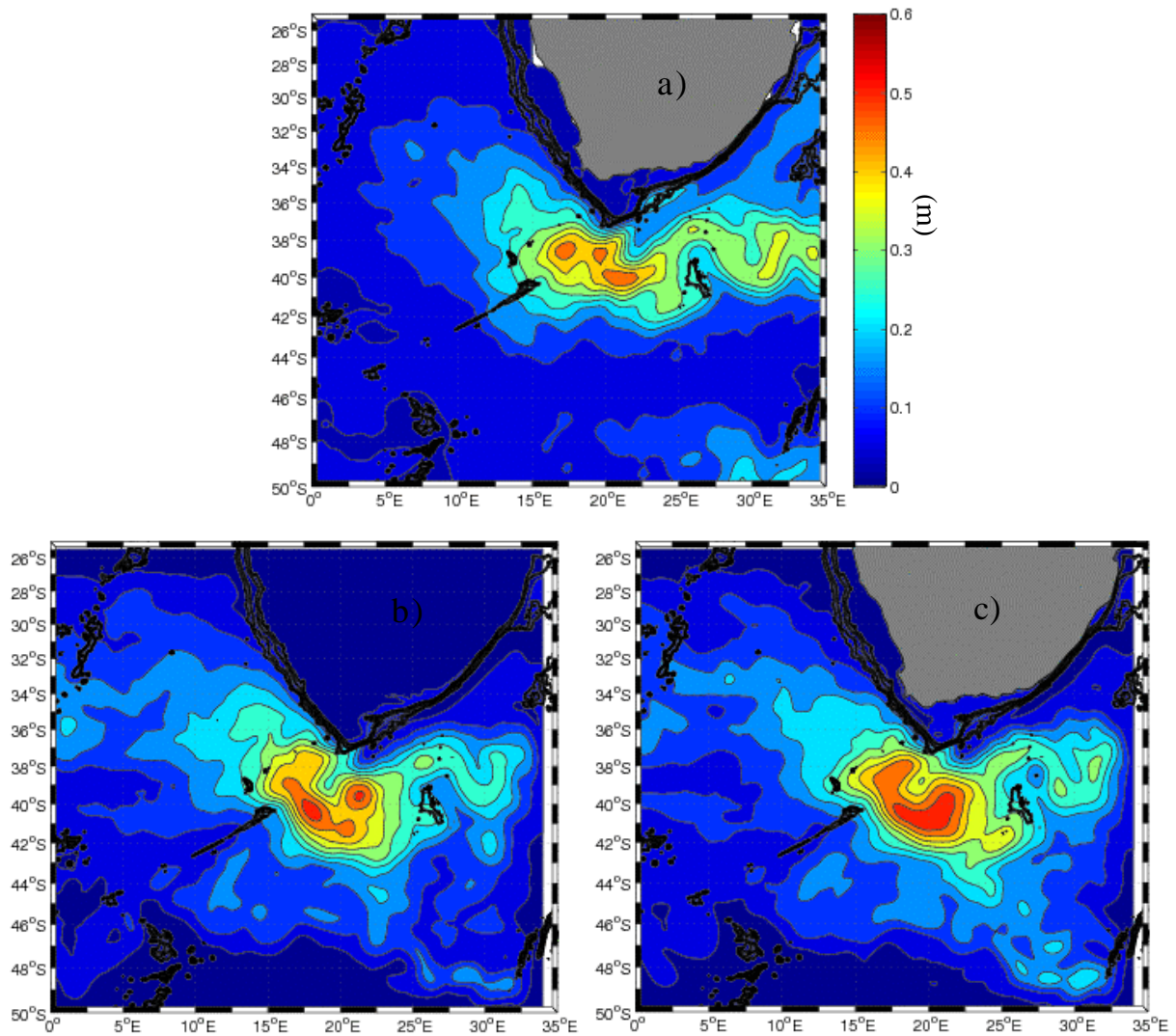


Figure 4.2. Ecart types de SSH pour a) les données altimétriques CLS, b) la simulation sous forçages climatologiques AGU10-CLIM et c) la simulation sous forçages journaliers Quikscat AGU10-DW.

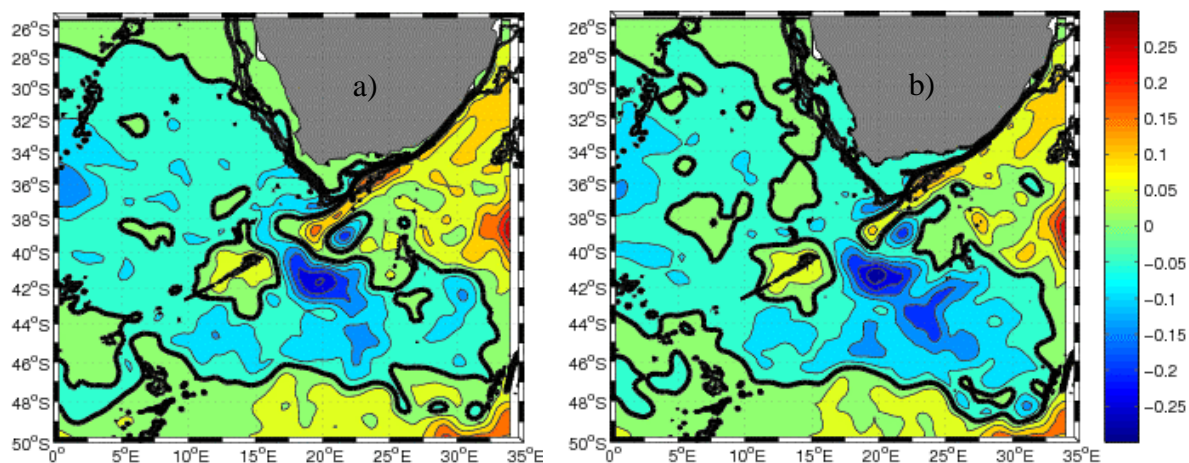


Figure 4.3. Différence entre écarts types de SSH pour les données CLS et la simulation sous forçages a) climatologique AGU10-CLIM et b) journaliers AGU10-DW.

## 4.2.2 Adaptations de la méthode

### 4.2.2.1 Calibrage de la méthode de caractérisation de la position du point de réflexion du courant des Aiguilles

Afin d'attribuer, à chaque pas de temps, une position à la limite ouest de la réflexion du courant des Aiguilles, la méthode employée pour les données altimétriques est calibrée et appliquée aux sorties de modèles. Si le modèle permet potentiellement de travailler sur des grandeurs physiques différentes, comme la salinité ou la température, et à des profondeurs différentes, nous choisissons de travailler sur la SSH issue des modèles. Cela permet d'une part de discuter de l'aptitude des modèles à exhiber des champs de SSH s'approchant des données altimétriques, et donc de la possibilité d'appliquer à de tels modèles la méthode mise en place pour les données altimétriques. Surtout, ce choix permet d'envisager une comparaison cohérente de résultats sur la base d'une méthode unique.

Afin de choisir la valeur de SSH critique permettant de positionner la limite de la réflexion, une étude de la relation statistique entre vitesses géostrophiques vers l'ouest et vers l'est en fonction de la SSH est menée au travers d'une section méridienne traversant le courant des Aiguilles et le courant retour. Dans un souci d'obtenir une relation qui soit la plus représentative de celle de la réflexion, cette section est choisie le plus à l'ouest possible, mais suffisamment à l'est pour assurer un recoupement quasi-permanent des deux courants. Cette longitude était de 23°E dans l'étude des données CLS. Le décalage vers l'ouest de la réflexion constaté plus haut dans les modèles conduit au choix d'une section plus à l'ouest, à savoir 21°E (ce choix est validé a posteriori par les résultats). Les relations obtenues sont présentées Figure 4.4. Le maximum de vitesse principal est associé à la hauteur dynamique



0.3 m, adoptée comme valeur critique principale pour la détection du point de retroflexion. La valeur critique secondaire de SSH employée est de 0.5 m. Une étude de sensibilité montre qu'une variation de la valeur critique secondaire de 0.05 m n'a que très peu d'influence sur les résultats. En outre, ce choix permet de préserver l'écart relatif de 0.2 m entre critères principal et secondaire utilisé pour les données (les critères principal et secondaire étaient de 1.7 m et 1.9 m).

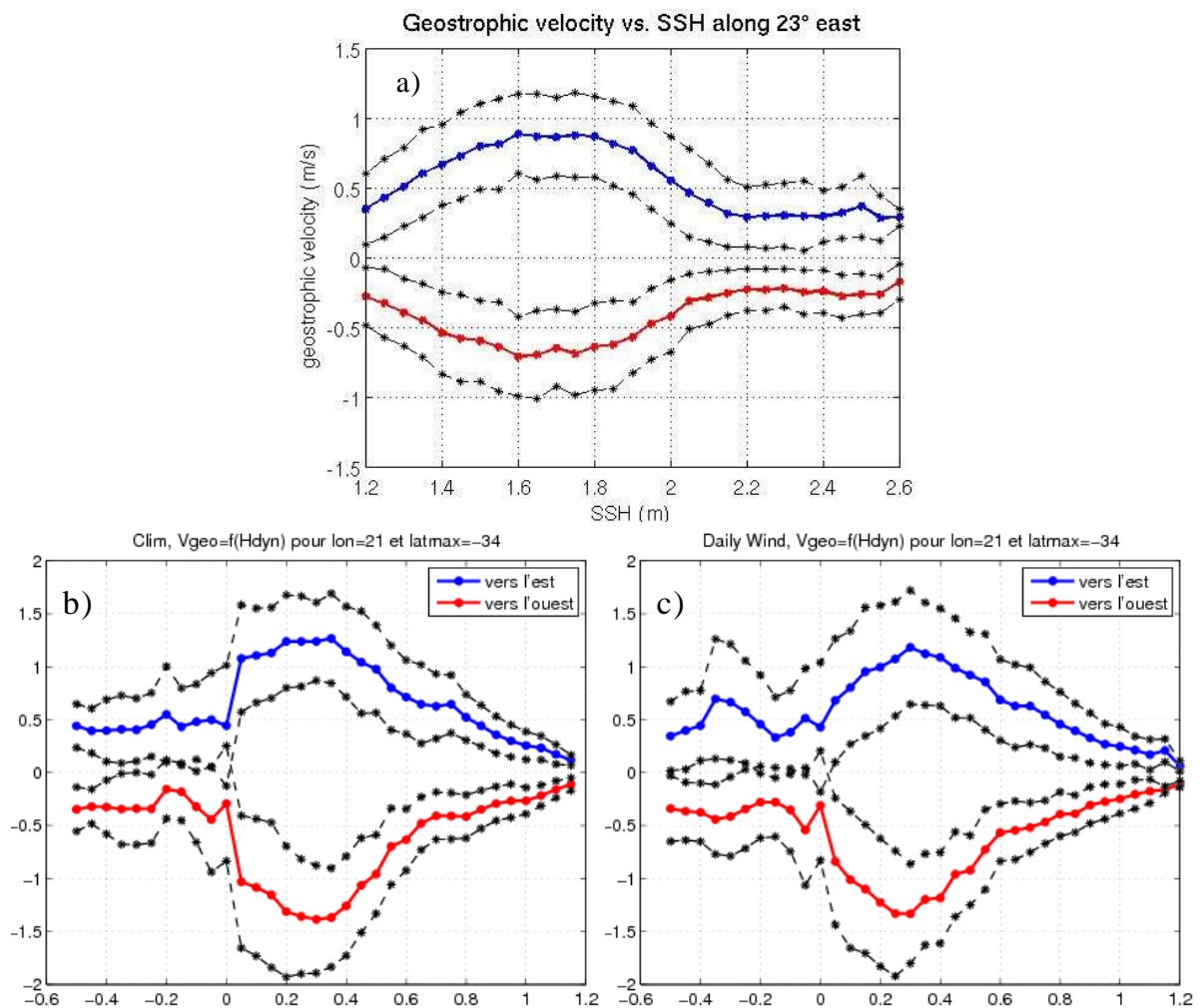


Figure 4.4. Relation entre vitesse géostrophique et SSH sur une section méridienne recoupant le courant des Aiguilles (vitesses vers l'ouest en rouge), et son courant de retour (vitesses vers l'est en bleu). a) pour les données CLS, à 23°E ; b) pour la simulation sous forçages climatologiques AGU10-CLIM, à 21°E ; c) pour la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW, à 21°E. Dans les trois cas, la relation est calculée pour une section allant de la côte africaine à 34°S.

Ensuite, de la même façon que pour l'étude menée sur les données CLS, les distances entre positions du point de retroflexion obtenues avec chaque critère sont calculés. Leur répartition statistique (Figure 4.5) montre que la distance de 130 km correspond à la limite de la gamme principale de la répartition, étant associée au premier minimum du tracé (Figure

4.5, colonne de gauche). Cette distance est inférieure à celle adoptée dans l'étude menée sur les données CLS, qui était de 150 km. Cela s'explique par la meilleure résolution spatio-temporelle obtenue dans les simulations, permettant à des anneaux de dimensions plus faibles de se détacher de la retroflexion. Il a été argumenté dans le premier chapitre que la distance critique de 150 km était à rapprocher de la dimension minimale associée aux tourbillons pouvant se détacher de la retroflexion. Il est ainsi normal d'obtenir une valeur un peu inférieure dans les 2 simulations. La distance de 130 km est donc choisie pour le choix du critère à prendre en compte pour chaque fichier bi-journalier, le critère principal de 0.3 m n'étant retenu que lorsque la distance entre points de retroflexion est inférieure à 130 km.

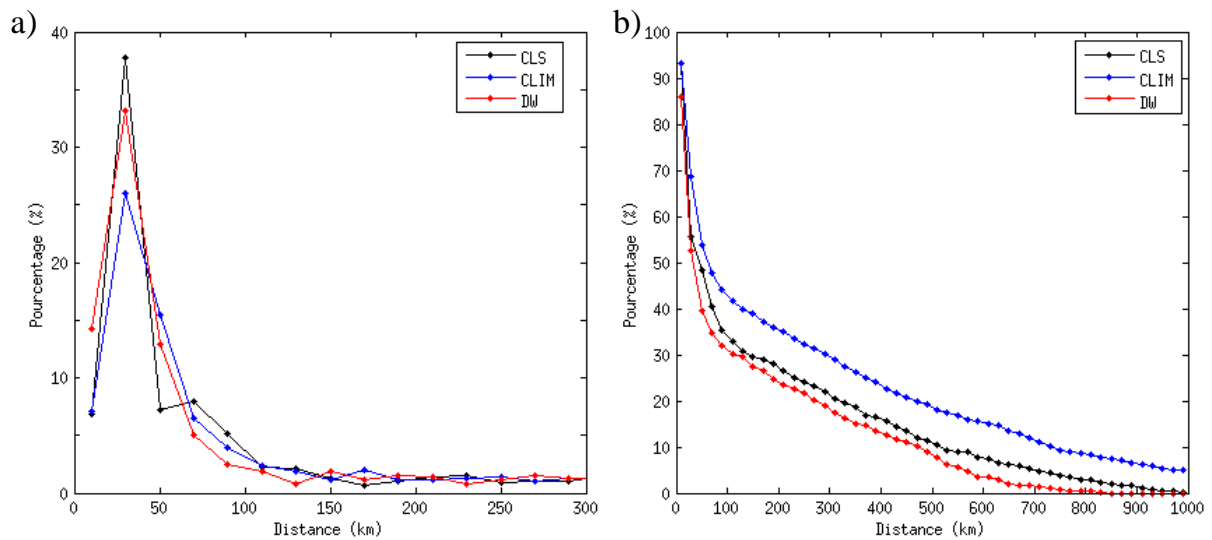


Figure 4.5. a) Répartition, en pourcentage du nombre de fichiers (hebdomadaires pour les données CLS, bi-journaliers pour les simulations), de la distance entre positions du point de retroflexion obtenues avec les valeurs critiques principale et secondaire. b) Pourcentage de fichiers pour lesquels la distance entre points de retroflexion obtenue par chaque valeur critique est supérieure à la valeur indiquée en abscisse.

#### 4.2.2.2 Détermination des lâchers de masses d'eaux par la retroflexion

Outre la détermination du point de retroflexion, nous avons également cherché à identifier les événements de lâchers de masses d'eaux anticycloniques par la retroflexion. Afin de pouvoir comparer les résultats du décompte des lâchers, des adaptations ont dû être apportées dans leur détermination. Le lecteur est renvoyé au chapitre 1 pour une présentation complète de la méthode, seules les modifications apportées étant mentionnées plus bas.

Dans l'étude des données altimétriques, les lâchers dits « définitifs » étaient définis par le non rattachement d'une masse d'eau à la retroflexion, pour 2 semaines consécutives (soit 2 fichiers hebdomadaires), un rattachement se manifestant par un basculement du point de retroflexion à l'ouest de la masse d'eau. Or les fichiers de SSH issus des simulations sont bi-



journaliers. Le choix est alors fait de considérer définitifs les lâchers lors desquels la masse d'eau n'est jamais reprise pour plus de 7 fichiers consécutifs, soit 2 semaines. Cependant, l'échantillonnage temporel plus court des fichiers de simulation induit parfois une instabilité du positionnement de la retroflexion, notamment lorsqu'un tourbillon est tout juste détaché de la retroflexion et se situe dans son voisinage proche. Ceci explique que l'on observe parfois une réintégration d'une masse d'eau pour une durée de plus de 14 jours (7 fichiers), mais parsemée d'un ou deux détachements pour des fichiers intermédiaires. Dans de tels cas, la masse d'eau est malgré tout considérée comme étant reprise, et le lâcher initial sera considéré temporaire et non définitif.

Outre ces adaptations, exigées par la meilleure résolution temporelle des fichiers de simulation, la résolution spatiale supérieure des champs de SSH bi-journaliers conduit à d'autres adaptations. Des tourbillons de dimensions horizontales parfois très faibles sont observés qui se détachent de la retroflexion, et s'en éloignent très rapidement. Ils ne sont souvent identifiables que sur 1 à 3 fichiers successifs, soit moins d'une semaine. Au-delà de ce temps, ces tourbillons se sont dissipés ou rattachés à des masses anti-cycloniques du bassin du Cap ou du bassin des Aiguilles. Donc, même si ces tourbillons existent dans l'océan réel, et s'ils pouvaient être résolus et apparaître dans les champs altimétriques, la cinétique de leur détachement ne serait probablement pas détectable à partir de fichiers hebdomadaires. On peut se demander si ces tourbillons existent réellement mais ne sont pas résolus par l'altimétrie, ou s'ils sont un produit propre aux modèles et à une dynamique mal reproduite de la retroflexion. Ne pouvant répondre à cette question, les lâchers de ce type sont néanmoins comptabilisés lorsque leur détachement de la retroflexion apparaît distinctement dans les champs de SSH.

On peut noter que le mécanisme de formation de ces petits anneaux des Aiguilles semble différer du schéma de lâcher classiquement observé. En effet, les anneaux des Aiguilles, ou masses d'eaux anticycloniques, sont habituellement formés par jonction du courant des Aiguilles et du courant de retour des Aiguilles à l'est de la retroflexion. En revanche, les petits tourbillons observés dans les 2 simulations semblent se former par détachement, depuis le courant de la retroflexion, d'un filament formant rapidement un petit anticyclone. De tels événements sont parfois observés dans les champs altimétriques, les tourbillons libérés étant cependant plus grand que la plupart de ceux observés dans les simulations.

Afin d'homogénéiser la méthode avec celle employée pour les données CLS, un critère sur l'intervalle de temps entre lâchers est également introduit. L'intervalle de temps minimal

entre lâchers lors de l'étude sur les données altimétriques est de 7 jours (les fichiers étant hebdomadaires). Ainsi, on choisit de regrouper les lâchers observés dans l'étude des sorties de modèle, lorsqu'ils sont espacés de moins de 7 jours (soit moins de 4 fichiers bi-journaliers). Dans tous les cas correspondant, au moins un des lâchers s'avère être de petite taille. La date de lâcher est alors attribuée au lâcher manifestement le plus conséquent, lequel se traduit par un saut plus important de la longitude de la retroflexion. Cela est cohérent avec l'étude des lâchers dans les données CLS, puisque un événement de lâcher pouvait correspondre au détachement simultané de plusieurs masses anti-cycloniques.

## 4.2.3 Résultats

### 4.2.3.1 *Caractéristiques spatiales de la position du point de retroflexion et sa progression vers l'ouest*

La Figure 4.6 présente les diagrammes de densité de probabilité de présence du point de retroflexion pour les données ainsi que pour les 2 simulations. Ces diagrammes confirment que la retroflexion est statistiquement située plus à l'ouest dans les simulations. Dans ses positions les plus avancées vers l'ouest, la retroflexion se décale au nord, particulièrement pour la simulation avec forçages climatologiques. Le décalage vers l'ouest est également plus marqué dans cette simulation, comme on le voit sur les tracés de densité de probabilité de présence en longitude de la retroflexion, présentés sur la Figure 4.7a. Par ailleurs, cette figure montre un étalement en longitude plus faible dans les simulations, soit une variabilité longitudinale plus faible. Ceci confirme l'interprétation faite plus haut du resserrement prononcé des iso-SSH au niveau de la retroflexion dans les champs de SSH moyens associés aux simulations. En outre, le choix de la section méridienne à 21°E pour la recherche des critères de détermination du point de retroflexion, semble justifié par la quasi-omniprésence de la retroflexion à l'ouest de cette longitude.

La position moyenne en latitude du point de retroflexion, en fonction de la longitude (Figure 4.7b), renseigne sur le schéma de progression de la retroflexion. Les latitudes moyennes et la variabilité en latitude, sur l'ensemble du domaine longitudinal de présence, sont comparables. Cependant, dans les deux simulations, la trajectoire de progression présente une composante méridienne plus forte que dans les données. Ainsi, la retroflexion se trouve près d'un degré trop au sud vers 19°E, mais dérive trop au nord à l'ouest de 16°E.

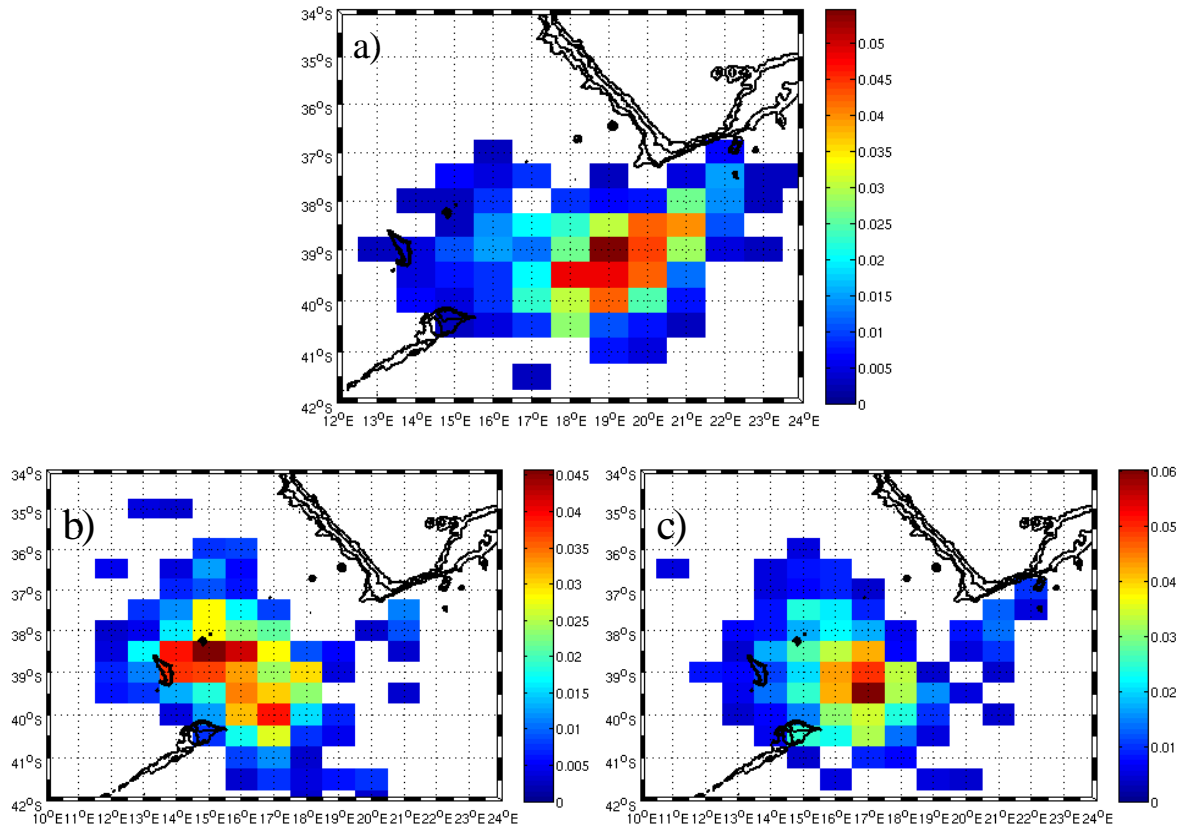


Figure 4.6. Densité de probabilité de présence de la retroflexion par  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  pour a) les données altimétriques, b) la simulation sous forçages climatologiques AGU10-CLIM et c) la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW. A noter que les échelles de couleurs employées sont différentes.

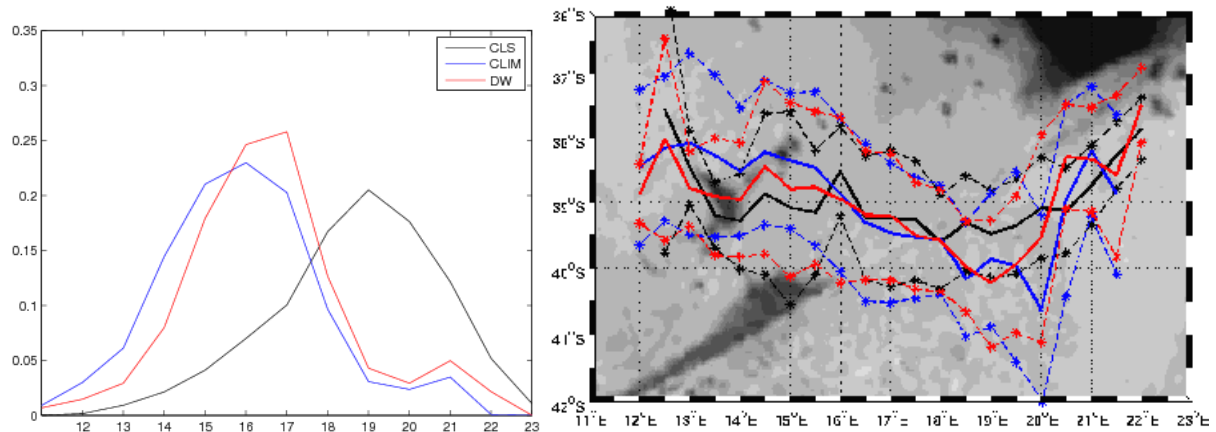


Figure 4.7. a) Densité de probabilité de présence en longitude du point de retroflexion pour les données CLS (courbe CLS) et les 2 simulations (courbes CLIM pour AGU10-CLIM (bleu), et DW pour AGU10-DW (rouge)). Le taux de probabilité est ramené à 1. b) Traits continus : latitude moyenne du point de retroflexion par intervalle de  $\frac{1}{2}$  degré de longitude pour les données CLS (noir) et les simulations a) AGU10-CLIM (bleu) et b) AGU10-DW (rouge). En traits discontinus, écarts types respectifs en latitude, représentés de part et d'autre de la latitude moyenne.

La Figure 4.8 représente les séries temporelles de longitude de la retroflexion dans chacun des trois cas. On retrouve le schéma type de progression de la retroflexion vers

l'ouest, suivi d'un saut vers l'est lors du détachement d'une masse anticyclonique. Ceci semble confirmer l'efficacité de la méthode de détermination des lâchers transposée aux simulations. L'étude des lâchers de masses d'eaux, présentée plus bas, montre que les décrochements vers l'est du point de retroflexion correspondent en effet aux épisodes de lâchers de masses d'eaux.

#### **4.2.3.2 Analyse temporelle du comportement de la retroflexion**

##### **Profil de vitesse de l'avancée vers l'ouest de la retroflexion**

A partir des séries temporelles de longitude du point de retroflexion, on peut calculer et comparer la cinématique de progression vers l'ouest obtenue dans les simulations avec celle des données. L'étude du profil d'avancée vers l'ouest de la retroflexion, dans le premier chapitre, était basé sur les résultats d'une analyse dite « onde par onde ». Celle-ci est plus complexe à mettre en place pour les deux simulations, notamment du fait de l'échantillonnage temporel plus fin. Une seconde méthode a donc été mise en place pour l'étude de la cinématique de progressions de la retroflexion, et appliquée aux séries temporelles des points de retroflexion des simulations, mais également des données altimétriques. Ceci explique les écarts de résultats obtenus pour les données avec chaque méthode. En dépit de ces écarts, on peut comparer les profils de vitesse obtenus ici pour les simulations et les données.

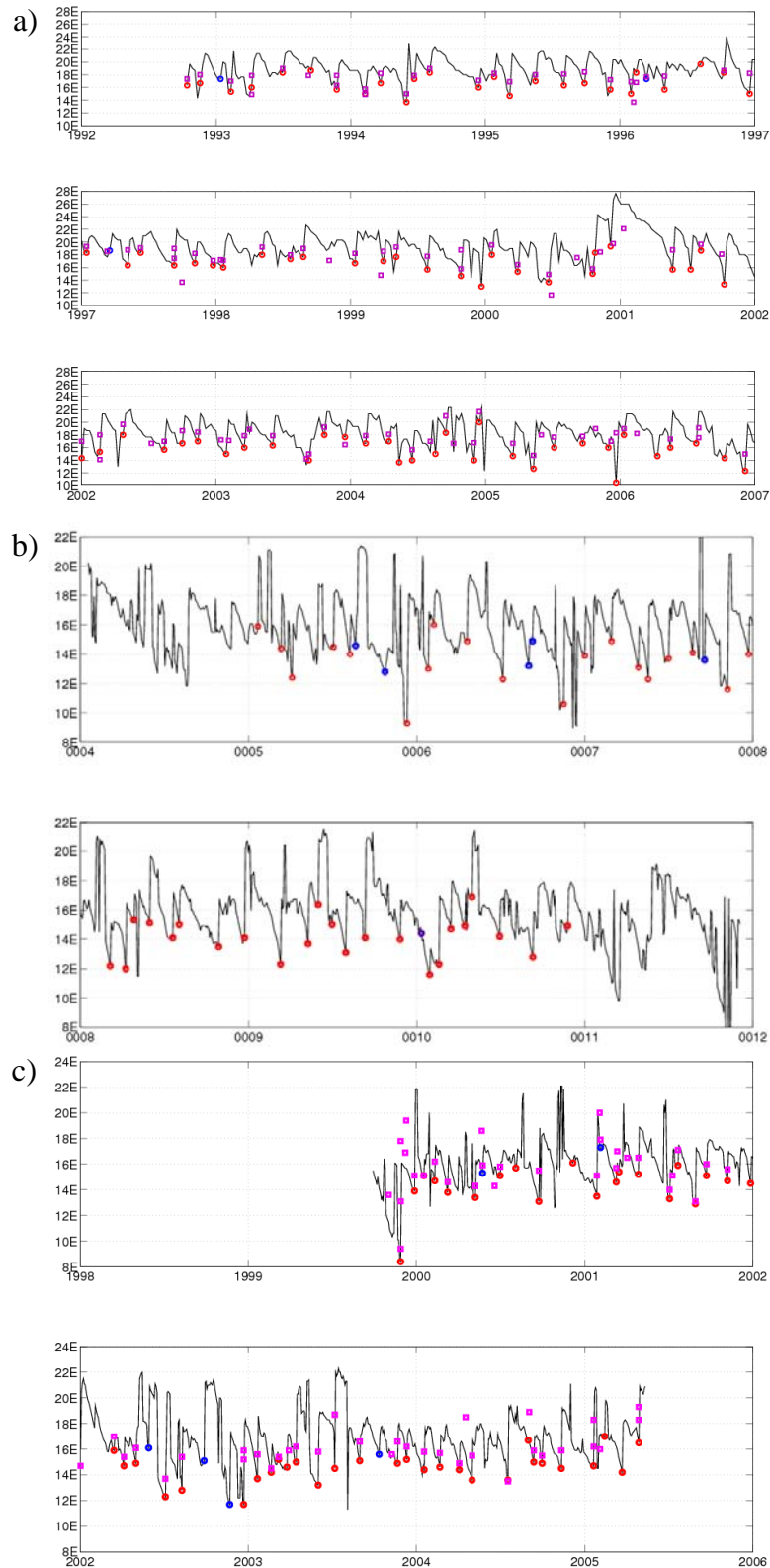


Figure 4.8. Longitude du point de réflexion pour a) les données CLS et les simulations b) AGU10-CLIM, et c) AGU10-DW. En rouge (bleus), les instants de lâchers définitifs (resp. temporaires) de masses d'eau. En carrés violets, dates et positions du centre des anneaux des Aiguilles issus de la réflexion, tels que déterminés dans l'étude (réalisée pour les données CLS et la simulation AGU10-DW).

## **Méthode**

La méthode utilisée pour le calcul des vitesses est basée sur le rapport, pour deux dates consécutives, de la distance entre les points de retroflexion et de l'intervalle de temps entre les deux dates. De même que pour le calcul du premier chapitre, la distance est une distance zonale, calculée à partir des longitudes des deux points de retroflexion et pour une latitude qui correspond à leur latitude moyenne. Cela permet d'évaluer la vitesse d'avancée d'est en ouest du front de la retroflexion. La méthode envisagée ici permet par ailleurs de prendre en compte la longitude à laquelle se situe la retroflexion à chaque pas de temps, de sorte que l'on peut obtenir un profil de vitesse en fonction de la longitude, chose qui n'était pas possible dans le calcul fait à partir de l'analyse onde par onde. Pour ne considérer que les phases de progression vers l'ouest de la retroflexion, on souhaite s'affranchir dans ce calcul, de deux évènements particuliers. D'une part, les évènements de lâchers marquent les fins de progressions et sont suivies d'un saut vers l'est. Ceux-ci doivent être écartés du calcul. D'autre part, les détachements et rattachements de structures tourbillonnaires introduisent parfois des perturbations dans le schéma de progression quasi-monotone de la retroflexion. Ces perturbations provoquent des sauts vers l'est ou vers l'ouest, qui se traduisent par des vitesses importantes. A cette fin, un critère de distance zonale entre points de retroflexion pour deux dates successives est introduit. Pour la série correspondant aux données altimétriques, ne sont comptabilisées que les dates pour lesquelles le point de retroflexion n'avance ou ne recule pas de plus de 130 km. Cette valeur étant inférieures aux diamètres des tourbillons résolus dans les champs de SSH, les deux types d'évènements évoqués sont correctement écartés. Cela a pour conséquence d'autoriser seulement les vitesses de déplacement de la retroflexion inférieures à 18.6 km/jour, du fait de l'intervalle de 7 jours entre champs de SSH. Cependant, les résultats montrent a posteriori que cette vitesse n'est que très rarement atteinte, validant le choix de cette distance critique. Pour les simulations, des tourbillons de dimensions plus faibles peuvent être observés, donc ce critère doit être abaissé. Et comme le pas de temps n'est que de 2 jours, la distance zonale entre positions de la retroflexion est plus faible. Une distance zonale critique de 50 km est adoptée, autorisant une vitesse maximale de 25 km/jour. Là encore, les résultats montrent que de telles vitesses ne sont que très rarement approchées, validant ce choix a posteriori.

## **Résultats**

Les profils de vitesse de progression obtenus dans les trois cas sont représentés sur la Figure 4.9. On constate que ces profils vont croissant lors de la progression vers l'ouest de la

retroflexion. Ceci est en accord avec les observations de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988), comme on le voit sur la Figure 1.3). Il semble donc que cette cinématique soit correctement reproduite dans les simulations.

La vitesse moyenne d'avancée, sur toutes les longitudes, est de 4.49 km/jour pour les données, de 5.43 km/jour pour AGU10-CLIM, et de 6.09 km/jour pour AGU10-DW. Les vitesses sont donc plus élevées dans les simulations, particulièrement pour celles sous forçages de vent journaliers AGU10-DW. Pour les données CLS, la vitesse moyenne trouvée ici est plus de 2 fois plus faible que celle trouvée par la méthode du premier chapitre, avec 4.49 km/jour contre 9.55 km/jour. Si l'on compare ces valeurs à celles calculées par divers auteurs (10.4 km/jour selon Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988), ou 7 km/jour selon Feron et al. (1992)), il semblerait que la méthode utilisée ici sous-estime les vitesses de progression de la retroflexion. Ceci provient certainement du fait qu'aucun recul vers l'est n'était pris en compte dans le calcul à partir de l'étude onde par onde. En revanche, on considère dans la méthode employée ici des progressions non monotones vers l'ouest, ce qui explique une vitesse moyenne plus faible. On constate en effet de nombreux cas de déplacement vers l'est, comme on peut le voir sur la Figure 4.9.

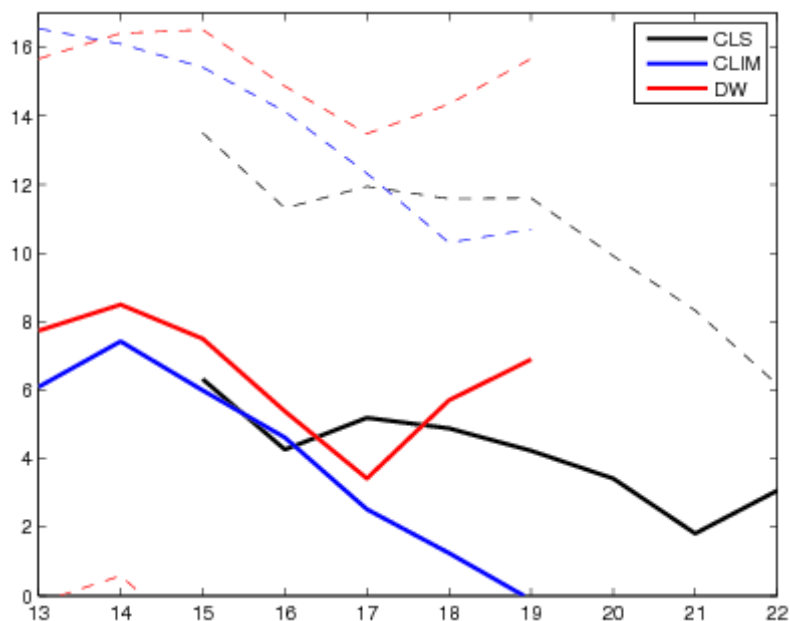


Figure 4.9. Profils de la vitesse zonale moyenne de progression de la retroflexion pour les données altimétriques (noir) et les simulations AGU10-CLIM (bleu) et AGU10-DW (rouge). Les vitesses sont comptées positivement vers l'ouest. Les traits discontinus représentent l'écart type de part et d'autre de la moyenne (les traits correspondant à un écart type retranché de la moyenne n'apparaissent pas car ils correspondent à des vitesses négatives qui sont hors du domaine du tracé).

### Analyse spectrale de la série temporelle de longitude du point de

## retroflexion

Une analyse spectrale de la série temporelle de longitude du point de retroflexion donne les spectres présentés Figure 4.10. Sur cette figure sont représentés les spectres classiques ainsi que les spectres de type « *variance preserving form* », pour lesquels l'aire sous la courbe est représentative de l'énergie contenue dans un intervalle de fréquence donné. On constate d'une part que la série temporelle associée à la simulation sous forçages climatologiques, AGU10-CLIM, est plus énergétique que celle la seconde simulation et que celle des données altimétriques, lesquelles présentent des niveaux d'énergies comparables. Mais on constate surtout la présence d'un pic énergétique à 5-6  $\text{an}^{-1}$  dans la simulation AGU10-CLIM, également présent dans le cas des données altimétriques. Aucun pic n'est présent à cette fréquence dans la simulation AGU10-DW. Or, ce pic est probablement imputable à la fréquence de lâchers de tourbillons par la retroflexion entre deux progressions successives de la retroflexion vers l'ouest. Ainsi, la simulation AGU10-CLIM semble mieux reproduire cette dynamique. Or, une bonne reproduction de ce phénomène est essentielle à l'obtention d'échanges indo-atlantiques réalistes, puisque ce phénomène est responsable de la libération d'anneaux des Aiguilles véhiculant les eaux de l'océan indien vers l'Atlantique. On relève toutefois un pic vers la fréquence 8  $\text{an}^{-1}$  dans la série temporelle associée à la simulation AGU10-DW, probablement attribuable à ce mécanisme, qui serait donc reproduit à une fréquence trop élevée.

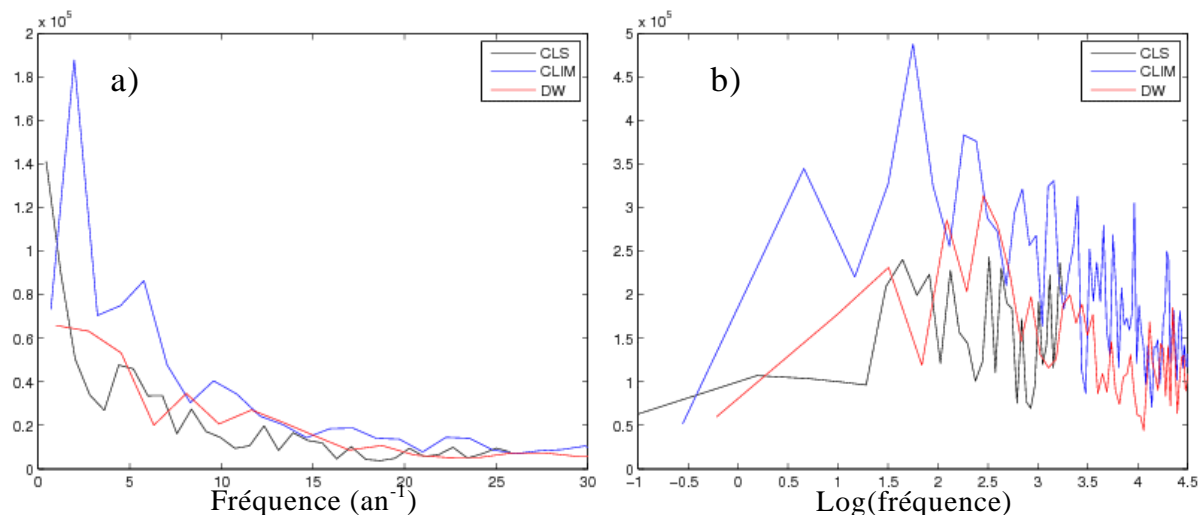


Figure 4.10 a) Spectres normalisés des séries temporelles de longitude du point de retroflexion pour les données altimétriques (noir) et les simulations AGU10-CLIM (bleu) et AGU10-DW (rouge). b) idem pour les spectres de type « *variance preserving form* » (l'aire sous la courbe représente l'énergie d'un intervalle de périodes).



### 4.2.3.3 Etude des lâchers de masses d'eaux par la retroflexion

Le recensement des lâchers, dont les dates et longitudes correspondantes sont indiquées sur les séries temporelles de longitude du point de retroflexion (Figure 4.8), donne les résultats présentés dans le Tableau 4.1. On constate une fréquence de lâchers plus grande dans la simulation AGU10-DW que dans la seconde, avec 9.6 lâchers/an contre 7.8. Le fait d'obtenir des fréquences de lâchers dans les simulations supérieures aux 6.1 lâchers/an trouvés pour les données semble cohérent avec les résultats précédents. En effet, les vitesses moyennes de progression vers l'ouest de la retroflexion sont plus élevées dans les simulations alors que les gammes de présence en longitude sont moins étendues. Ces deux éléments entraînent un rythme de lâchers plus élevé. On constate par ailleurs que pour les deux simulations les fréquences de lâchers sont supérieures aux fréquences principales trouvées dans l'analyse spectrale présentée ci-dessus (environ 5-6 et 8 an<sup>-1</sup>, voir Figure 4.10a). Cela provient de la meilleure résolution spatio-temporelle des simulations. Il arrive en effet que des tourbillons de dimensions assez faibles se détachent de la retroflexion sur son flanc nord ou sud, sans entraîner de recul important de la retroflexion, ni perturber sa progression vers l'ouest. L'examen de la Figure 4.8 montre que pour les modèles, certains lâchers identifiés ne s'accompagnent effectivement pas de saut vers l'est. Ces lâchers s'additionnant à ceux associés à la terminaison ouest des progressions de la retroflexion, résultent en une fréquence de lâchers supérieure à la fréquence principale dans la série de longitude du point de retroflexion.

	Lâchers (dont temporaires)	Tourbillons émis depuis la retroflexion	Lâchers par an	Tourbillons émis depuis la retroflexion par an
Données CLS	86 (3)	102	6.1 an <sup>-1</sup>	7.2 an <sup>-1</sup>
Simulation AGU10-CLIM	48 (6)	-	7.8 an <sup>-1</sup>	-
Simulation AGU10-DW	55 (6)	64	9.6 an <sup>-1</sup>	11.1 an <sup>-1</sup>

Tableau 4.1. Statistiques relatives aux évènements de lâchers pour les données altimétriques CLS et les 2 simulations.

## 4.3 Etude des anneaux des Aiguilles

La forte activité mésoéchelle de la région du sud de l'Afrique n'est pas correctement reproduite dans les modèles de circulation générale à basse résolution. Concernant les trajectoires d'anneaux, on constate souvent la présence d'une branche quasi-continue du courant des Aiguilles se poursuivant dans l'Atlantique (Biaستoch et al., 2008), ou d'un train d'anneaux excessivement régulier empruntant un couloir de propagation étroit (Barnier et al., 2006). Biaستoch et al. (2008) ont montré que le flux d'eaux échangées est surestimé dans les modèles à basse résolution, démontrant l'importance d'une résolution permettant une

reproduction des mécanismes de mésoéchelle. Pour ce faire, ils se sont appuyés sur un modèle global ORCA05 à basse résolution, mais avec une résolution plus fine au sud de l’Afrique. Leur simulation présente une variabilité mésoéchelle a priori réaliste, au niveau du courant des Aiguilles comme des anneaux. Les simulations régionales étudiées ici montrent également des caractéristiques mésoéchelle proches de celles de l’océan réel (fréquence de lâchers d’anneaux, cinématique de la retroflexion), malgré quelques écarts (position moyenne de la retroflexion). Cependant, l’étude réalisée sur les trajectoires d’anneaux des Aiguilles a révélé la présence de voies privilégiées pour les anneaux, subissant des influences diverses avec la bathymétrie ou l’atmosphère, et pouvant influencer sur leur contribution en chaleur ou en sel aux échanges interocéaniques. Une bonne reproduction par des modèles de l’ensemble de ces caractéristiques des anneaux apparaît essentielle pour obtenir des échanges indo-atlantiques réalistes. En reproduisant l’étude des trajectoires d’anneaux réalisée sur les données altimétriques sur l’une des simulations, nous pouvons utiliser l’étude sur les données comme étalon à des fins comparatives et pour tenter de diagnostiquer les causes de divergence de comportements des anneaux dans les modèles.

#### **4.3.1 Choix de la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW**

Pour réaliser cette étude, le choix s’est porté sur la simulation sous forçages de vent journaliers, AGU10-DW, dont le réalisme attendu est supérieur à celui de la simulation AGU10-CLIM. Ce choix est également justifié par le meilleur positionnement de la retroflexion obtenu pour AGU10-DW. En revanche, la variabilité temporelle de la retroflexion et la fréquence de lâchers d’anneaux semblent moins bonnes dans cette simulation. Cependant, la moins bonne résolution des données altimétriques ne permet certainement pas un suivi des structures de plus petites dimensions identifiées dans les simulations et qui se détachent de la retroflexion. Ceci nuance les écarts obtenus entre fréquences de lâchers. L’étude des anneaux des Aiguilles réalisée sur les données altimétriques a montré le rôle de la bathymétrie de l’ouest du bassin des Aiguilles dans la divergence des trajectoires de tourbillons. Le décalage vers l’ouest de la retroflexion étant moins marqué dans la simulation AGU10-DW, les interactions des anneaux avec la bathymétrie y sont probablement mieux représentés, appuyant le choix de cette simulation.

#### **4.3.2 Adaptations de la méthode d’analyse en ondelettes**

L’outil d’analyse en ondelettes employé est une version automatisée de celui utilisé pour les données altimétriques. L’automatisation a permis un temps d’analyse beaucoup plus

court, mais a entraîné quelques adaptations et calibrages différents. D'autres calibrages ont été nécessaires qui tiennent aux propriétés différentes des tourbillons suivis, dues en partie à la meilleure résolution spatio-temporelle de la simulation.

Dans sa version automatisée, l'outil d'analyse en ondelettes recherche l'ensemble des tourbillons à chaque pas de temps. Dans un second temps, il balaye les dates successives tout en réalisant le suivi des tourbillons présents. Cette méthode ne nécessite donc qu'un seul lancement initial. Elle nécessite en revanche un tri a posteriori des trajectoires identifiées, afin de ne retenir que les tourbillons issus de la retroflexion, ou d'une subdivision d'un tourbillon lui-même issu de la retroflexion. Cette démarche diffère de celle employée pour les données altimétriques. Les tourbillons étaient identifiés à la date de leur détachement de la retroflexion, et leur suivi individuel était alors effectué. Cette méthode nécessitait donc autant de lancements que de trajectoires suivies (soit 199), d'où un temps d'analyse beaucoup plus long.

Comme dans le cas des données altimétriques, le travail de détection des tourbillons est réalisé sur les champs d'anomalies de SSH, calculé par simple soustraction du champ moyen sur les champs de SSH. Le domaine de recherche de tourbillons est limité à l'est à 21°E, la retroflexion se trouvant toujours plus à l'ouest. Son extension à l'ouest, au nord, et au sud, englobe le domaine d'étude adopté pour les données altimétriques.

Le suivi d'un tourbillon, dans les données, exigeait la présence du centre d'un tourbillon dans son contour déterminé à la date précédente. Dans la version automatisée de l'outil d'analyse, ce critère a été remplacé par un critère de distance maximale entre les centres des tourbillons à chaque pas de temps. Cette modification permet d'accélérer le calcul et limiter le stockage de données, en ne sauvegardant pas à chaque instant et pour chaque tourbillon détecté, les points de grille appartenant au tourbillon. La distance adoptée est de 100 km. Celle-ci autorise des déplacements du centre du tourbillon de 50 km/jour (58 cm/s), les sorties de la simulation étant bi-journalières. Ces vitesses, très supérieures à celles rencontrées dans l'océan réel, permettent de tenir compte de la sensibilité de la définition du centre du tourbillon d'un pas de temps au suivant (point d'anomalie de SSH maximale). Une analyse des trajectoires montre que cette distance est toujours suffisante et jamais excessive, dans la mesure où les trajectoires ne sautent jamais d'une structure tourbillonnaire à une autre. Il peut cependant arriver que plusieurs tourbillons se trouvent simultanément dans le cercle de rayon 100 km autour du centre d'un tourbillon à la date précédente. Dans ce cas, le tourbillon dont le centre est le moins éloigné du centre du tourbillon précédent est considéré comme

étant son prolongement. Une vérification a posteriori des trajectoires de tourbillons montre que le tourbillon suivi est toujours le bon.

La surface minimale des tourbillons recherchés est fixée à 25 points de grille. La grille étant au 10ème de degré, cette taille est plus faible que les 24 points de grille choisis dans l'étude des données (grillage au 1/9 de degré après interpolation des champs au 1/3 de degré). Ce choix est fait à partir d'essais ayant montré qu'avec un nombre de points de grille de 30 ou plus, les plus petits tourbillons apparaissant sur les champs de SSH ne sont pas identifiés par l'analyse. Cela provient de la haute résolution du modèle permettant l'apparition de tourbillons de dimensions plus faibles que ceux visibles dans les données. En revanche un nombre de points de grille de 20 ou moins engendre plusieurs problèmes. Le premier est la détection d'un grand nombre de structures ne correspondant pas à des tourbillons mais à des structures de très petite échelle, souvent situées dans le voisinage des tourbillons. La reconstitution des trajectoires est alors perturbée par la présence de ces structures, celles-ci se trouvant souvent dans le rayon de 100 km évoqué plus haut.

### **4.3.3 Résultats**

Suite à l'identification des trajectoires de tourbillons, l'identification des voies empruntées par les tourbillons a été reprise. L'analyse du transport assuré par les tourbillons, au travers de sections progressant dans l'océan atlantique, a également été reprise, pour l'ensemble des tourbillons ainsi que par voie. La présentation qui suit présente les principales divergences et similitudes constatées avec l'étude du chapitre 2, dans le but de mettre en évidence les améliorations attendues dans une telle simulation. Dans un premier temps, les trajectoires et caractéristiques temporelles des tourbillons sont discutées, pour l'ensemble des tourbillons et les différentes voies. Les évolutions des diamètres et anomalies de SSH associées aux tourbillons sont ensuite discutées. Enfin, les résultats de l'étude de transport sont présentés.

#### **4.3.3.1 Caractéristiques temporelles des tourbillons et des voies empruntées**

Cette section se réfère à la Figure 4.11 où sont présentées les trajectoires, les lieux de jonctions, de subdivisions, et de fin de suivi des tourbillons, et le diagramme de densité de probabilité de présence des tourbillons. Egalement, la Figure 4.12 présente les trajectoires des tourbillons des voies nord et centrale. Le Tableau 4.2 présente un comparatif des caractéristiques temporelles principales des trajectoires des études sur la simulation et sur les données.

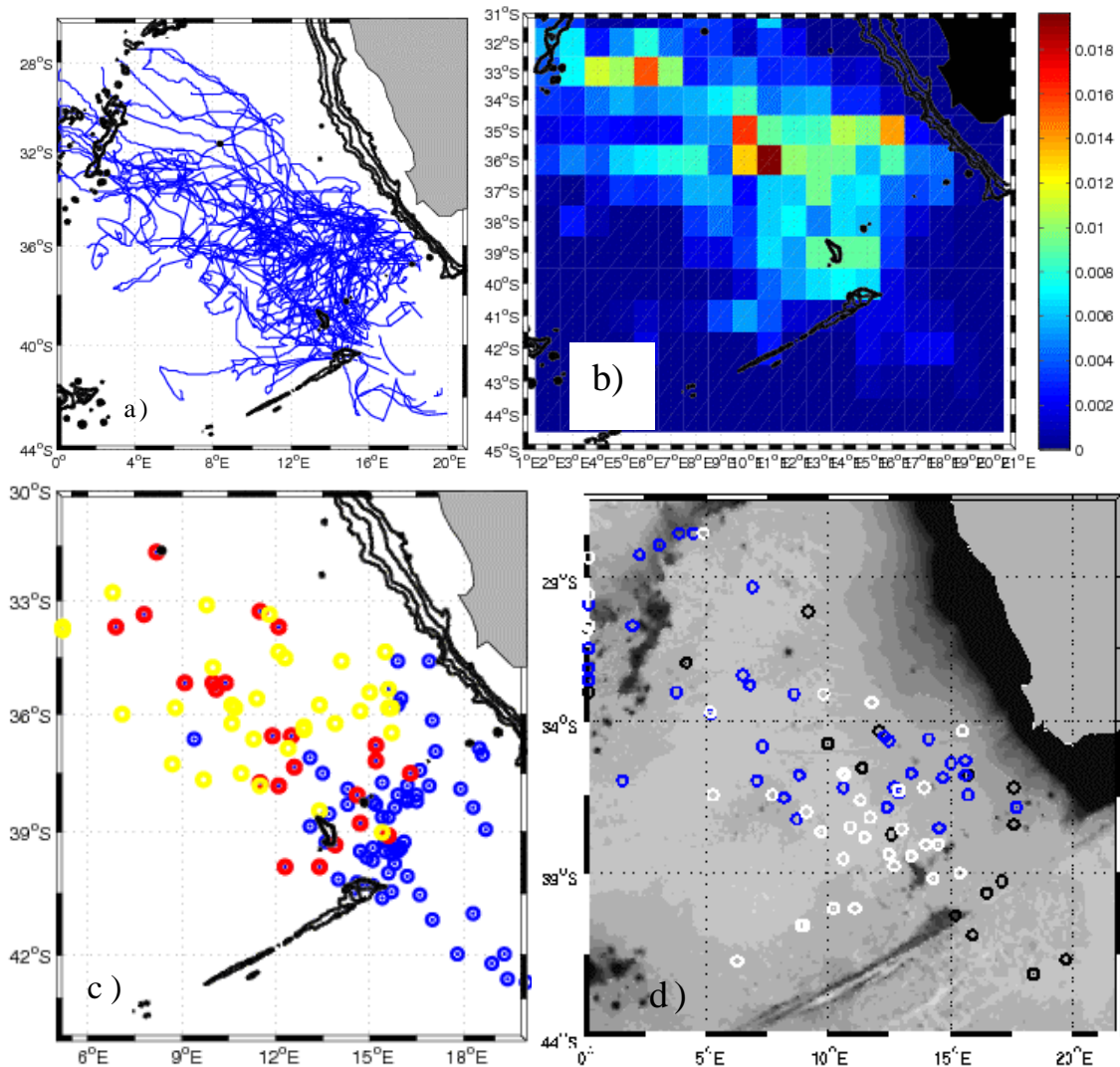


Figure 4.11. a) Tracé des 88 trajectoires d'anneaux des Aiguilles identifiées entre octobre 1999 et juin 2005, soit 5 ans et 9 mois. b) Densité de probabilité de présence des tourbillons par  $1^\circ \times 1^\circ$ . c) En bleu, positions de départs des tourbillons issus de la retroflexion. En jaune, lieux des jonctions de tourbillons. En rouge, lieux des subdivisions. d) Positions finales des tourbillons. En bleu, les tourbillons de la voie nord ; en blanc, de la voie centrale ; en noir, n'appartenant à aucune voie.

### Plus d'anneaux lâchés par la retroflexion, moins de subdivisions

L'étude des trajectoires d'anneaux dans la simulation indique que 11.1 tourbillons sont émis par an par détachement direct de la retroflexion. Il s'agit de tourbillons appelés « initiaux » dans l'étude réalisée sur les données. Si l'on ramène ce chiffre aux 9.6 évènements de lâcher par an, le rapport est proche de celui trouvé dans les données altimétriques, avec 7.2 tourbillons libérés par an pour 6.1 lâchers par an.

Le nombre total de trajectoires identifiées par an (14) est proche de celui obtenu pour les données (15.3). Le nombre de tourbillons émis directement depuis la retroflexion étant supérieur dans la simulation (11.1 contre 7.2 pour les données), cela signifie que les

tourbillons sont moins sujets à des subdivisions. On ne comptabilise en effet que 4.17 subdivisions par an dans la simulation contre 10.7 dans les données.

Les durées de vies des tourbillons (tenant compte de l'âge corrigé des sous-tourbillons issus de subdivisions d'anneaux) sont comparables, avec 23.77 semaines de moyenne contre 26.1 pour les données.

	Données altimétriques CLS					Simulation AGU10-DW				
	Total	Cumul des voies	Voie nord	Voie centrale	Voie sud	Total	Cumul des voies	Voie nord	Voie centrale	Voie sud
Nombre de trajectoires par an	14.0					15.3				
Temps total de suivi par an (% du total)	305	287	97.3 (31.90%)	120.8 (39.61%)	69.1 (22.66%)	292.5	267.9	142.1 (48.6%)	125.8 (43.0 %)	0
Nbre issus de la réflexion par an	7.2					11.1				0
Durée de vie moyenne avec âge corrigé (écart type)	26.1 (19.4)	24.4 (19.1)	24.3 (18.1)	22.3 (18.9)	29.4 (18.5)	23.77 (21.08)		28.13 (21.40)	21.34 (21.65)	0
Nbre de subdivisions par an	10.7					4.17				

Tableau 4.2. Comparatif des caractéristiques temporelles principales des trajectoires identifiées dans l'étude des données altimétriques et de la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW. Les données temporelles sont en semaines.

#### Etude des voies : Absence de voie sud et favoritisme de la voie nord

L'étude des voies empruntées par les tourbillons montre l'absence totale de tourbillons de la voie sud. Les trajectoires se partagent entre les voies nord et centrale, représentées sur la Figure 4.12. La voie nord est la plus empruntée des deux, à l'inverse de ce que montrent les données, comme en témoigne les pourcentages de temps de suivi de trajectoires imputables à chaque voie et par an (indiquées dans le Tableau 4.2). Les durées de vies des tourbillons de chaque voie sont comparables à celle trouvée dans les données, avec une longévité plus importante pour la voie nord (28.13 semaines de moyenne pour la voie nord, contre 21.34 pour la voie centrale).

Cette dominance de la voie nord dans le modèle apparaît sur la carte de niveau moyen de SSH (Figure 1.1). Sur une telle carte, le passage fréquent de tourbillons depuis le gyre subtropical de l'océan Indien vers celui de l'Atlantique se traduit par une dorsale (ou un col) reliant les deux gyres. Cette dorsale de SSH apparaît au nord des monts Erica et Schmidt-Ott dans les champs des simulations (Figure 1.1b,c), mais se superpose à ces mêmes accidents bathymétriques dans le champ déduit de l'altimétrie.

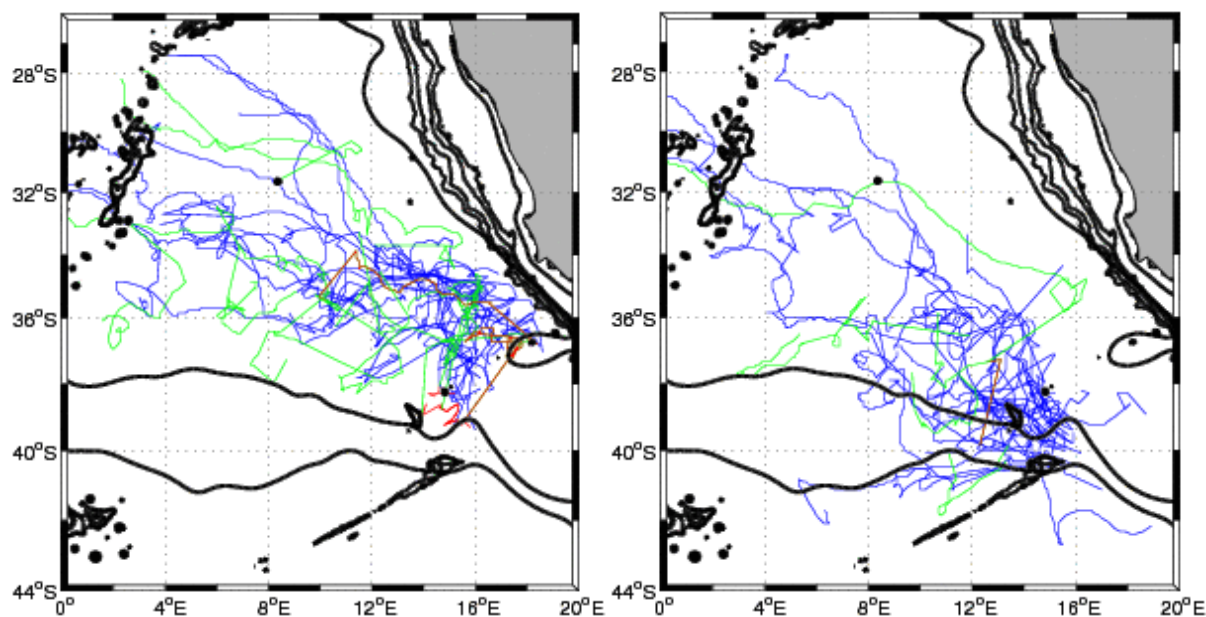


Figure 4.12. Trajectoires des tourbillons des voies a) nord et b) centrale. En bleu, les trajectoires franchissant la section de définition de la voie correspondante. En vert, les sous-tourbillons issus de subdivisions ultérieures au franchissement. En rouge les tronçons de trajectoires de tourbillons initiaux lorsqu'une subdivision a lieu avant franchissement par un sous-tourbillon.

### Rôle du comportement de la retroflexion

Le surreprésentation de la voie nord et l'absence de voie sud peuvent s'expliquer en partie par un positionnement trop au nord de la retroflexion à l'ouest de 16°E (voir Figure 4.7b). Une majorité des anneaux libérés par la retroflexion se trouvant au voisinage ou à l'ouest de cette longitude au moment de leurs détachements, leurs trajectoires ultérieures sont décalées vers le nord. Ceci est visible sur la Figure 4.11c, où l'on constate que les positions de départ de tourbillons sont en moyenne plus au nord que pour l'étude des données (Figure 2.9).

Le positionnement trop au nord de la rétroflexion modélisée pourrait résulter d'une sous-représentation, dans les simulations, de la zone d'écoulement cyclonique située à l'ouest immédiat du Banc des Aiguilles sur la Figure 4.1a. Cette zone, positionnée à l'entrée de la voie nord, constitue certainement dans l'océan réel une gêne pour les anticyclones sur le point d'emprunter cette voie. Etant moins intense dans les simulations (Figure 4.1b,c), cette fonction d'obstacle vers la voie nord y est atténuée. Si cette interprétation était correcte, ce défaut des simulations serait à relier à une représentation imparfaite des cyclones se propageant vers le sud-ouest entre le Courant des Aiguilles et le talus continental sud-africain. Lutjeharms et al. (2003) et Boebel et al. (2003) ont en effet montré que la zone cyclonique présente à l'ouest du Banc des Aiguilles (appelée « *lee eddy* » par Penven et al., 2001) trouvait son origine dans les « *Natal pulses* » cycloniques formés dans la partie amont du

Courant des Aiguilles et dans les « tourbillons de cisaillement » (« *shear edge eddies* » formés contre le talus continental dans l'Est immédiat du Banc des Aiguilles.

### **Rôle de la bathymétrie**

L'absence de tourbillons empruntant la voie sud, mais aussi le faible nombre de subdivisions observées, peuvent également être lié au rôle joué par la bathymétrie. L'étude menée sur les données a montré le rôle central de la bathymétrie de l'ouest du bassin des Aiguilles et en particulier de l'extrémité nord-est de la dorsale des Aiguilles. L'interaction d'anneaux avec ce mont sous-marin est à l'origine de nombreuses subdivisions d'anneaux. Le décalage au nord de la trajectoire de la retroflexion à l'ouest de 16°E dans la simulation, mentionné ci-dessus, peut avoir pour effet que les anneaux contournent ce mont sous-marin par le nord. Ceci expliquerait le faible nombre de subdivisions diagnostiquées dans la simulation. Cette hypothèse est soutenue par les tracés des lieux des subdivisions dans les deux études (Figure 4.11c et Figure 2.11a), où l'on remarque une concentration importante à l'est et au voisinage du mont sous-marin dans les données, alors que les subdivisions sont comparativement plus présente dans le bassin du Cap dans la simulation. Ainsi, le décalage vers le nord de la trajectoire de la retroflexion semble avoir pour conséquence de limiter les interactions d'anneaux avec la bathymétrie, et ainsi réduire le nombre de subdivisions que ces interactions engendrent.

Par ailleurs, l'étude menée sur les données altimétriques a montré qu'une majorité (54%) d'anneaux de la voie sud étaient issus de subdivisions. Lors d'une subdivision d'un anneau sur l'extrémité de la dorsale, un des sous-tourbillon se propage au sud de la dorsale en empruntant la voie sud. Le décalage de la trajectoire de la retroflexion vers le nord, et la diminution du nombre de subdivision de ce type qui en résulte, fournit une explication supplémentaire à l'absence de tourbillon de la voie sud dans la simulation.

### **Rôle du positionnement du SAF**

Un autre facteur pouvant contribuer à l'absence de tourbillons de la voie sud réside dans le positionnement du front subantarctique (SAF). La signature du front dans le champ de SSH moyen des données altimétriques (Figure 4.1a) se situe entre 44°S et 46°S environ, et est marqué par un resserrement des lignes d'iso-SSH. Si l'on compare ce champ avec celui de la simulation (Figure 4.1c), on constate un resserrement des lignes d'iso-SSH autour des mêmes niveaux de SSH, caractérisant le tracé du SAF. Or, celui-ci se situe trop au nord sur le bord ouest du domaine, et son tracé s'incurve vers le nord à l'approche de la dorsale des Aiguilles.



Son tracé est ensuite également décalé au nord dans la région de la retroflexion. L'étude des tourbillons de la voie sud réalisée au chapitre 2 a mis en évidence le rôle de barrière joué par ce front, les tourbillons ne parvenant pas à le franchir vers le sud. Le décalage vers le nord du SAF pourrait ainsi contribuer à l'absence de tourbillons de la voie sud dans la simulation, mais aussi au décalage vers le nord de la trajectoire de la retroflexion à l'approche de la longitude de la dorsale, le SAF simulé se situant trop au nord à cet endroit (voir lignes d'iso-SSH de la Figure 4.1c).

### **Des interactions insuffisantes entre bathymétrie et anneaux des Aiguilles**

Un dernier facteur semble contribuer au faible nombre de subdivisions observées dans la simulation : une reproduction inadéquate des interactions entre la bathymétrie et les anticyclones. La plupart des tourbillons se détachant de la retroflexion sont initialement formés à l'est des monts Erica, Schmidt-Ott, et de l'extrémité de la dorsale des Aiguilles (Figure 4.11c), et un grand nombre de trajectoires chevauchent ou s'approchent de ces reliefs sous-marins. Cependant, seules 4 ou 5 subdivisions ont lieu dans le voisinage de ces reliefs sous-marins, comme on le voit sur cette même figure. Il est ainsi possible que les interactions entre anneaux et reliefs sous-marin soient mal reproduites, n'aboutissant que trop rarement à des subdivisions.

L'étude réalisée sur les données a montré que les trois reliefs sous-marins de l'ouest du bassin des Aiguilles avaient également tendance à ralentir la progression vers l'ouest des anneaux. Ceci ne semble pas être le cas dans la simulation. En comparant les diagrammes de densité de probabilité de présence spatiale des tourbillons (Figure 4.11b et Figure 2.13), on constate en effet un taux de présence plus faible à l'est de ces monts sous-marins dans la simulation. Ceci témoigne d'un blocage moins important des tourbillons par ces reliefs. De même, une comparaison des tracés de moyenne spatiale de l'âge corrigé des tourbillons (Figure 4.13 et Figure 2.14) montre un vieillissement moins rapide d'est en ouest de ces reliefs, appuyant l'idée d'un blocage moins important dans la simulation.

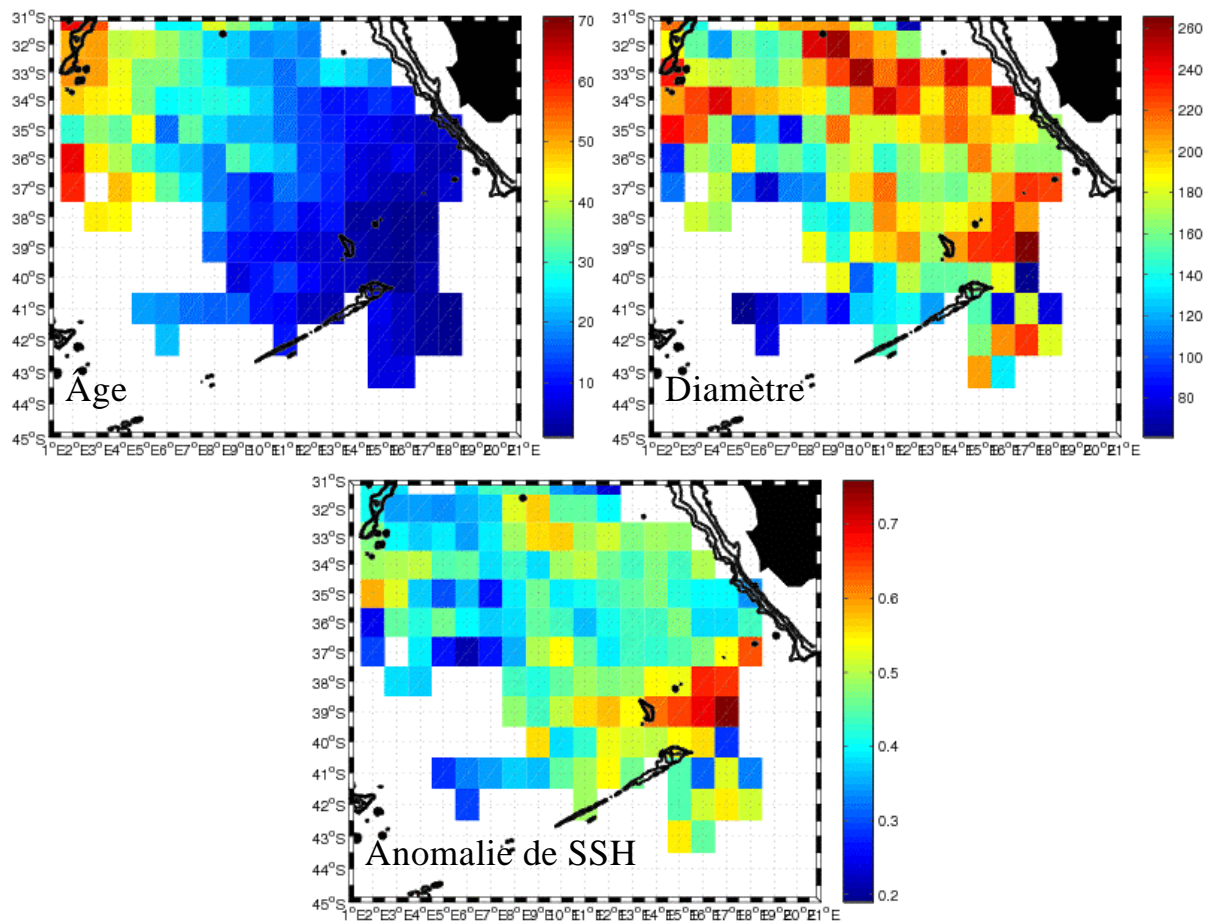


Figure 4.13. Tracé des valeurs moyennes, par  $1^\circ \times 1^\circ$ , de l'âge corrigé des tourbillons, des anomalies de SSH en leur centre, et de leurs diamètres. Les valeurs ne sont affichées que lorsqu'un minimum de 5 tourbillons sont comptabilisés dans un domaine d' $1^\circ \times 1^\circ$ .

#### 4.3.3.2 Erosion des tourbillons

##### Erosion générale fidèle à celle obtenue à partir des données

Les tracés d'évolution spatiale des anomalies au centre des tourbillons et de leurs diamètres (Figure 4.13) donnent des profils d'évolution semblables à ceux des données (Figure 2.14). On retrouve une décroissance comparable des diamètres au cours de la dérive vers le nord-ouest des tourbillons, ainsi que des diamètres importants à proximité du talus continental. On retrouve également une diminution forte des anomalies de SSH au centre des tourbillons dès le franchissement des éléments bathymétriques de l'ouest du bassin des Aiguilles.

Les évolutions temporelles des diamètres et anomalies au centre des tourbillons (calculées avec l'âge corrigé des tourbillons), sont également comparables à celles des données (Figure 4.14). Les valeurs initiales sont cependant moins élevées dans la simulation, les tourbillons ayant initialement une anomalie de SSH moyenne en leur centre de 0.6 m

environ contre 0.8 m pour les données, et des diamètres moyens de 200 km contre 250 km dans les données. Ceci provient certainement de la meilleure résolution de la simulation, permettant la détection de tourbillons de dimensions plus faibles. Leur prise en compte diminue ainsi la moyenne initiale de ces grandeurs physiques. Les allures de décroissance sont par conséquent moins marquées par la suite, la décroissance se faisant jusqu'à des valeurs finales comparables.

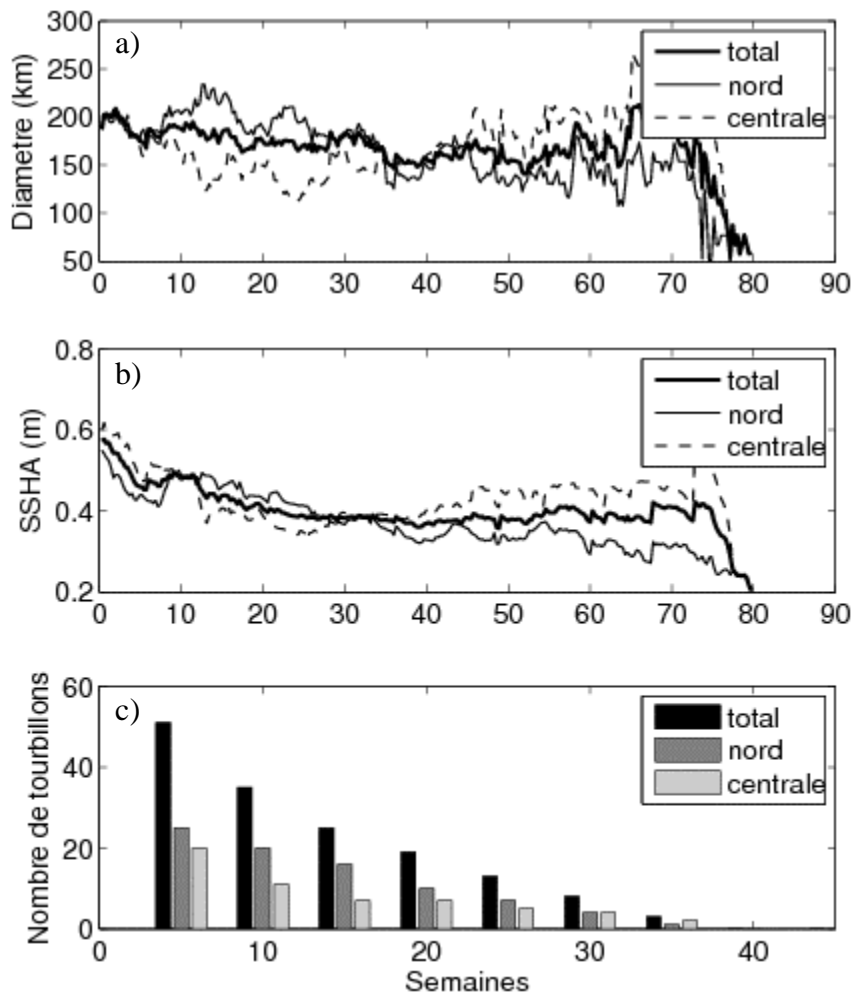


Figure 4.14. Evolutions temporelles a) de l'anomalie de SSH au centre des tourbillons et b) de leur diamètre, pour l'ensemble des tourbillons et par voie. Le temps correspond à l'âge corrigé des tourbillons. c) Nombre de tourbillons dont la durée de vie est supérieure à l'âge indiqué en abscisse.

#### **Erosion spécifique à chaque voie correctement reproduite**

Les profils d'érosion spécifiques aux voies nord et centrale se retrouvent également dans l'étude des données altimétriques. On retrouve par exemple une décroissance plus rapide des diamètres des tourbillons de la voie centrale, avant que l'inverse ne se produise au-delà de 40 à 50 semaines d'âge corrigé des tourbillons.

### 4.3.3.3 Estimation du transport des tourbillons

L'estimation des transports associés aux tourbillons, selon la méthode employée dans l'étude des données altimétriques, a été reprise pour la simulation. Les transports par section et par voie sont représentés sur la Figure 4.15. Le Tableau 4.3 présente un comparatif de ces transports avec ceux obtenus dans l'étude des données. Les transports annuels moyens et leur taux de décroissance sont représentés Figure 4.16. A noter que les transports à travers les sections (a) et (b) sont identiques. Les tracés de ces sections ne diffèrent que dans leurs parties sud et n'affichent donc des transports différents que pour les tourbillons de la voie sud, laquelle n'est pas empruntée dans la simulation.

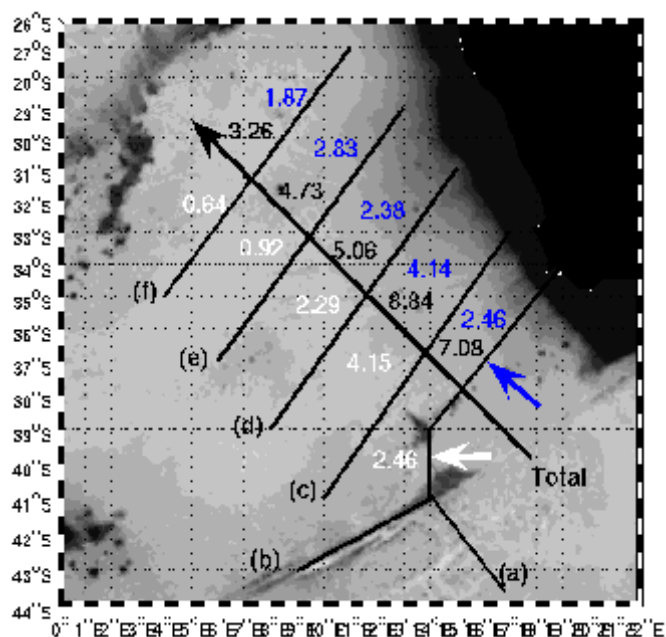


Figure 4.15. Estimation du transport ( $Sv$ ) annuel des tourbillons à travers différentes sections. En noir, le transport de l'ensemble des tourbillons ; en bleu (blanc), celui des tourbillons de la voie nord (centrale).

	Ensemble des tourbillons		Voie Nord		Voie Centrale		Voie Sud	
	CLS	AGU10-DW	CLS	AGU10-DW	CLS	AGU10-DW	CLS	AGU10-DW
Section (a)	8.54	7.08	3.07	2.46	3.89	4.25	1.66	0
Section (b)	8.35	7.08	3.07	2.46	3.89	4.25	1.00	0
Section (c)	6.92	8.84	1.72	4.14	2.82	4.15	0.52	0
Section (d)	6.02	5.06	0.89	2.38	2.73	2.29	0.30	0
Section (e)	3.21	4.73	0.17	2.83	1.13	0.92	0.15	0
Section (f)	1.44	3.26	0.25	1.87	0.59	0.64	0	0

Tableau 4.3. Comparatifs des transports ( $Sv$ ) pour l'étude des données altimétriques (CLS) et de la simulation sous forçages journaliers (AGU10-DW). Les transports indiqués sont ceux de l'ensemble des tourbillons et des tourbillons de chaque voie.

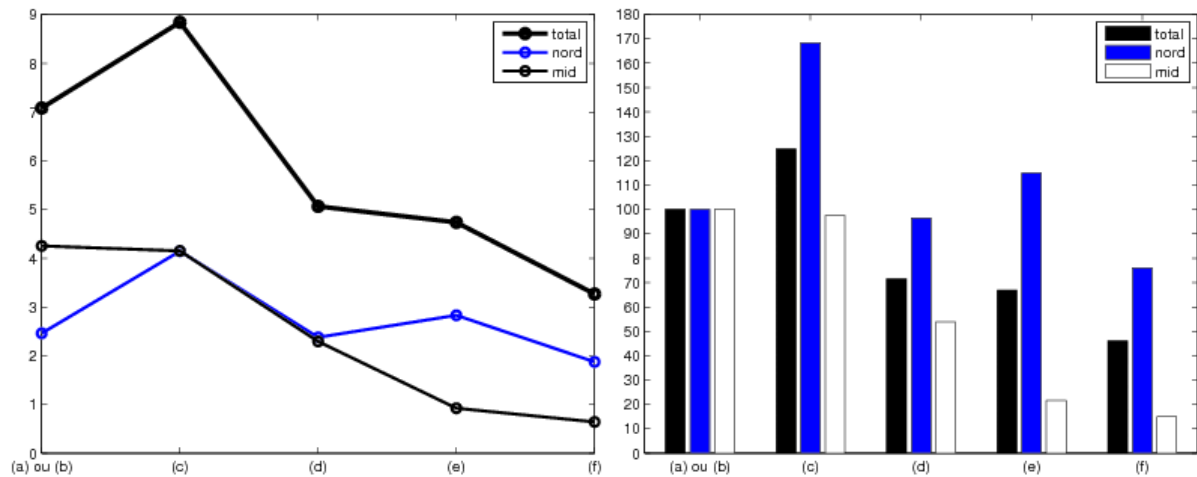


Figure 4.16. a) Transport annuel moyen (Sv) et b) taux de décroissance du transport des tourbillons à travers chaque section, pour l'ensemble des tourbillons ainsi que par voie.

### Caractéristiques des transports par voie

On constate que les transports à travers la section (c) sont plus forts que pour la section (a). Cela tient à ce que de nombreux tourbillons se détachent de la retroflexion à l'ouest de la section (a) (Figure 4.11c). C'est pourquoi la comparaison des transports doit se faire à partir de la section (c). La voie centrale présente des transports relativement comparables aux données, hormis à travers la première section (c) où le transport est plus élevé (4.15 Sv contre 2.82 Sv).

La voie nord présente des transports assez semblables à ceux de la voie centrale dans la simulation. Le transport par la voie nord est donc supérieur à celui obtenu pour les données altimétriques, avec 4.14 Sv contre 1.72 Sv à travers la section (c). La décroissance du transport d'une section à la suivante est ensuite moins rapide que dans les données, le transport étant de 2.83 Sv contre 0.17 Sv à travers la section (e) (Figure 4.16 et Figure 2.30). Le transport élevé par la voie nord provient de ce que cette voie est plus empruntée dans le modèle que dans les données. La décroissance moins rapide au travers des sections est le résultat de la décroissance temporelle également moins rapide du diamètre des tourbillons. Cet effet est plus visible pour la voie nord que pour la voie centrale, laquelle présente un profil de décroissance du transport semblable à celui des données. La faible décroissance spatiale des transports s'accorde avec une décroissance temporelle des diamètres également plus faible dans la simulation (Figure 4.14).

## Un transport total surestimé

Une comparaison des transports cumulés montre des valeurs plus élevées pour la simulation que pour les données, avec 8.84 Sv contre 6.92 Sv à travers la section (c), et une décroissance moins marquée d'une section à l'autre.

L'obtention d'un transport trop important peut avoir plusieurs origines. La première tient au décalage vers le nord des trajectoires, favorisant la voie nord au détriment de la voie sud. L'étude réalisée sur les données altimétriques a montré une contribution faible des tourbillons de la voie sud, et surtout une décroissance marquée au-delà de la première section en raison d'une érosion forte des tourbillons lors de leur période de stagnation au sud de la dorsale des Aiguilles. Les tourbillons n'empruntant jamais cette voie dans la simulation, cet effet d'érosion rapide y est moins présent.

Une seconde explication au transport excessif assuré par les anneaux des Aiguilles pourrait être liée à l'intensité du transport du Courant des Aiguilles dans la simulation. Biastoch et al. (2008) ont montré, à partir d'un modèle de circulation générale présentant une haute résolution dans la région du sud de l'Afrique, qu'une diminution du transport du Courant des Aiguilles avait tendance à augmenter les échanges indo-atlantiques. Ces auteurs montrent également qu'une diminution du transport du courant décale la position moyenne de la retroflexion vers l'ouest, en accord avec l'étude de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988). Or, la retroflexion se situant trop à l'ouest dans la simulation étudiée ici, il se peut que le transport surévalué des anneaux des Aiguilles soit associé à un transport trop faible du Courant des Aiguilles. Le test de cette hypothèse nécessiterait une évaluation du transport du Courant des Aiguilles dans la simulation. Par ailleurs, en reconduisant l'étude sur les trajectoires d'anneaux des Aiguilles dans la simulation sous forçages climatologiques AGU10-CLIM, il serait possible de tester les conclusions de Biastoch et al. (2008). La retroflexion se situant encore plus à l'ouest dans cette simulation que dans celle étudiée ici, il serait intéressant de vérifier que l'on y obtient un transport des tourbillons encore supérieur.

D'autres explications à la surévaluation du transport par les anneaux des Aiguilles tiennent à la physique du modèle, qui a permis par exemple la détection de tourbillons de taille plus faible que ceux suivis dans les champs altimétriques. Si de tels tourbillons existent mais sont trop petits pour être résolus par l'altimétrie, le transport réel pourrait être plus proche de celui obtenu dans la simulation. Les interactions entre tourbillons et bathymétrie semblent également incorrectement reproduites par le modèles, les anneaux semblant moins ralentis dans leur dérive vers l'ouest, ce qui pourrait expliquer un transport trop fort dans le

modèle. Enfin, la modélisation des échanges air-mer reste une difficulté importante dans les modèles actuels. Or, ceux-ci sont susceptibles d'influer fortement sur les eaux superficielles et donc la signature en anomalie de SSH des anneaux. Le transport reposant sur cette signature en SSH par l'intermédiaire du diamètre calculé par l'analyse en ondelettes, il est difficile de savoir si l'érosion provoquée par les échanges air-mer est correctement simulée, et si la relation qui existe entre la signature en SSH et la dynamique d'un anneau est correctement reproduite par le modèle.

#### **4.4 Analyse lagrangienne**

Une analyse lagrangienne a également été initiée, réalisée par B. Blanke (Laboratoire de Physique des Océans). Dans cette étude, nous avons évalué les échanges indo-atlantiques d'eau subtropicale des deux simulations, afin de répondre à trois objectifs découlant des résultats de notre étude. Les travaux de Biastoch et al. (2008), mis en parallèle de ceux de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1988), semble montrer une corrélation entre : 1) une diminution du transport du courant des Aiguilles, 2) un décalage vers l'ouest de la retroflexion et 3) une diminution des échanges indo-atlantiques d'eau subtropicale. Le premier objectif de cette étude est de tester cette corrélation entre les simulations et avec l'étude menée sur les données altimétriques. Le second objectif est de comparer, pour la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW, les échanges obtenus par le calcul lagrangien et par le calcul réalisé à partir des trajectoires et diamètres de tourbillons. Cette comparaison permettra de discuter de la validité des deux calculs, et par extension de la méthode de calcul de transport des tourbillons appliquée aux données altimétriques.

##### **4.4.1 Principe de l'outil de l'analyse lagrangienne**

L'outil de diagnostic lagrangien utilisé est ARIANE (Blanke et Raynaud, 1997, voir <http://fraise.univ-brest.fr/lpo/ariane/> pour une description détaillée). A partir d'un contour fermé compris dans le domaine de simulation, le flux volumique au travers d'une section d'émission appartenant par exemple à la bordure du domaine est décomposé en un grand nombre de particules. Celles-ci sont ensuite suivies dans le temps, leurs trajectoires étant calculées de façon lagrangienne à partir de la série temporelle des champs de vitesses enregistrés au cours de la simulation. En enregistrant les points du contour fermé par lesquels sortent les particules, l'analyse fournit une fonction de courant ou évalue la répartition du flux entrant par la section d'émission entre différentes sections du contour fermé.

#### 4.4.2 Paramètres de l'étude

Dans notre étude, nous considérons le contour fermé représenté sur la Figure 4.17. La section du contour choisie comme section d'émission (en rouge sur la figure), se situe à 30°E et s'étend de la côte africaine à 35°S. Celle-ci englobe le domaine de variabilité courant des Aiguilles. La section de sortie (en vert) comprend un tronçon zonal à 31.3°S, et un tronçon méridien à 0°E allant 31.3°S à 35°S. Afin de prendre en compte l'ensemble des eaux subtropicales, on ne considère que les eaux situées entre 0 et 1500 m de profondeur en section d'émission. Plusieurs calculs lagrangiens ont été menés, dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4.4. Pour chaque calcul, les particules sont émises pendant une année complète le long de la section d'émission. Leurs trajectoires sont calculées jusqu'à ce qu'elles sortent du contour fermé. Les particules n'étant pas sorties du domaine fermé au bout d'un temps T constituent un transport « résiduel ». Le temps T de calcul est fixé à 4 ans pour la plupart des simulations. Cette valeur, permettant d'obtenir un transport résiduel négligeable, ne peut être augmentée étant donné la durée de la simulation AGU10-DW. La durée plus longue de la simulation AGU10-CLIM permet de réaliser plusieurs calculs en changeant l'année d'émission. Ainsi par exemple, le calcul Y2000 DW correspond à une émission durant l'année 2000 de la simulation AGU10-DW, pour T=4 ans. Afin d'obtenir un calcul pour deux années différentes de la simulation AGU10-DW, deux calculs lagrangiens sont menés pour T=3 ans, et des émissions pour les années 2000 et 2001. Elles sont nommées Y2000 DW\* et Y2001 DW\*. A noter que pour le calcul Y8 CLIM, le temps de suivi est inférieur à 4 ans, puisqu'il n'a pas de 12<sup>ème</sup> année. Cependant, l'examen du transport résiduel indique que le temps de transit est très rapide, de sorte que cela n'influe pas sur le résultat. Les résultats des différentes simulations sont reportés dans le Tableau 4.4.

On peut considérer que cette section de sortie intersecte les trajectoires de l'ensemble des anneaux des Aiguilles, comme on peut le voir sur le tracé des trajectoires (Figure 4.11a) dans le cas de la simulation AGU10-DW. Ceci valide le choix de cette section pour le calcul du transport vers l'Atlantique. Ceci est confirmé par la fonction de courant associée à ce transport pour l'expérience Y2000 DW (Figure 4.18), où l'on constate que l'ensemble des eaux pénétrant l'Atlantique le font par le tronçon zonal de la section de sortie.



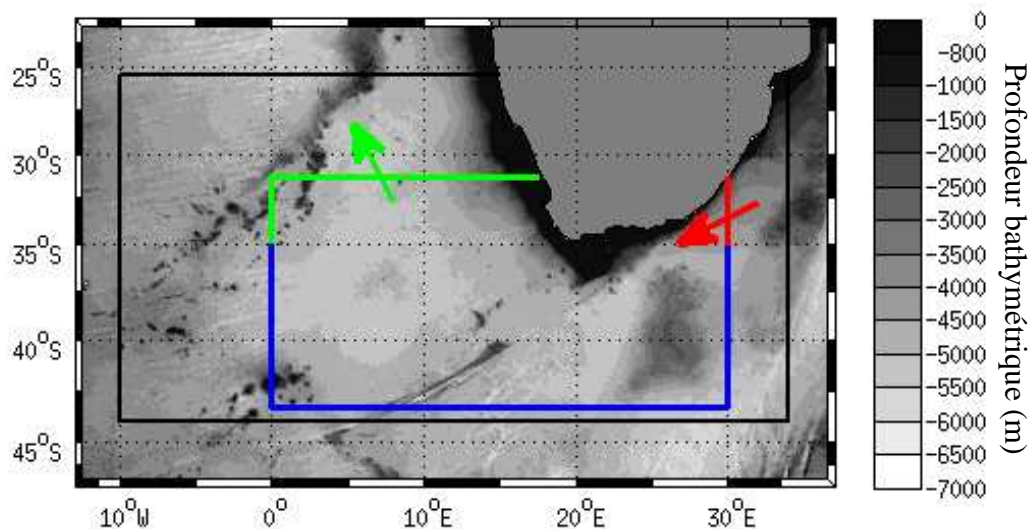


Figure 4.17. Le contour coloré représente le domaine de calcul de l'analyse lagrangienne. La section d'émission de particules est tracée en rouge ; celle de sortie, évaluant les échanges indo-atlantiques, est tracée en vert. Le domaine de calcul des simulations est délimité par le contour tracé en noir.

### 4.4.3 Résultats

#### 4.4.3.1 Echanges indo-atlantiques mieux simulés par AGU10-DW

Les calculs lagrangiens indiquent des transports du courant des Aiguilles comparables dans les deux simulations, avec 63.9 Sv pour AGU10-CLIM et 62.5 Sv pour AGU10-DW (moyenne pour les calculs Y2000 DW\* et Y2001 DW\*). En revanche, les échanges avec l'Atlantique sud sont plus faibles pour la simulation sous forçages journaliers AGU10-DW. La valeur moyenne de 12.4 Sv pour cette simulation se trouve dans l'intervalle de valeurs actuellement acceptées, entre 2 Sv et 15 Sv, (Gordon et Haxby, 1990 ; Gordon, 1985). En revanche, les échanges pour la simulation AGU10-CLIM sont en limite supérieure et dépassent même cette fourchette certaines années (Y5-6-8 CLIM).

	Transport du Courant des Aiguilles	Transport vers l'Atlantique sud	Transport résiduel
Y4 CLIM	67.3	14.7	0.2
Y5 CLIM	63.6	18.4	0.3
Y6 CLIM	61.7	18.9	0.3
Y7 CLIM	64.4	15.7	0.3
Y8 CLIM	62.8	19.4	0.3
Y2000 DW	66.2	12.5	0.2
Y2000 DW*	66.2	12.3	0.6
Y2001 DW*	66.9	13.1	0.7

Tableau 4.4. Résultats des calculs lagrangiens de transports. Sont indiqués pour chaque calcul le transport du courant des Aiguilles, la part de transport traversant la section des sortie en Atlantique sud, et le transport résiduel dans le domaine de calcul (au bout 3 ou 4 ans selon le calcul).

#### 4.4.3.2 Corrélation entre longitude de la retroflection et transport de l'AC

Les deux simulations présentent des transports du courant des Aiguilles sensiblement identiques. Les longitudes moyennes de la retroflection devraient également être proche, selon l'étude de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984). Or, la retroflection se trouve  $0.58^\circ$  plus à l'ouest pour AGU10-CLIM. Cependant, cet écart concerne l'ensemble des périodes d'études de chaque simulation. En ne prenant en compte que les périodes d'émissions des calculs lagrangiens, cet écart n'est plus que de  $0.41^\circ$ , atténuant l'apparente absence de corrélation avec les résultats de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984). Par ailleurs, les simulations étant soumises à des forçages différents, le comportement de la retroflection peut être intrinsèquement différent, expliquant une longitude moyenne différente. La recherche de corrélation pour la simulation AGU10-CLIM n'est pas plus concluante, puisque la variabilité annuelle du transport de l'AC (voir Tableau 4.4) ne se retrouve pas dans la longitude en annuelle moyenne de la retroflection. Le constat de l'absence de cette corrélation fait écho au résultat identique obtenu dans l'étude menée sur les données altimétriques (1.7.5.3).

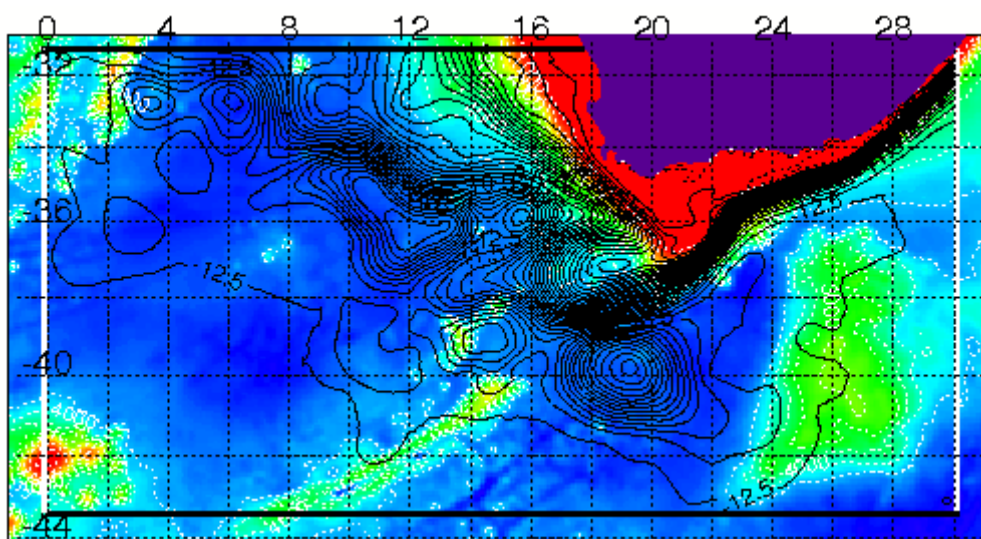


Figure 4.18. Calcul Y2000 DW. Fonction de courant pour les échanges entre section d'entrée et section de sortie, représentant les échanges indo-atlantiques d'eau subtropicale. Il s'agit d'une vision intégrée dans le temps et sur la profondeur du flux volumique de particules émises en section d'entrée et véhiculées en Atlantique sud. La ligne de transport nul (0 Sv) est choisie le long de la côte. Les schémas de circulations cycloniques et anticycloniques apparents se retrouvent sur le tracé du champ de SSH moyen pour l'ensemble de la série temporelle de la simulation AGU10-DW.

#### 4.4.3.3 Transports du courant des Aiguilles et vers l'Atlantique sud

Les calculs lagrangiens pour la simulation climatologiques mettent en évidence une corrélation entre un courant des Aiguilles intense et un transport faible vers l'Atlantique sud.

Cela se voit en comparant les calculs Y4 CLIM et Y7 CLIM avec les trois autres. Ce constat est en accord avec les résultats de Biastoch et al. (2008).

#### **4.4.3.4 Comparaison des méthodes de calculs de transports**

Plusieurs remarques doivent être faites avant de comparer les transports vers l'Atlantique obtenus, pour la simulation AGU10-DW, par les deux méthodes employées (trajectoires et diamètres d'anneaux, et calcul lagrangien). D'une part, le transport obtenu par la méthode basée sur les trajectoires d'anneaux ne tient pas compte des échanges indo-atlantiques réalisés par voie de filamentation issues directement du courant des Aiguilles. De plus, les diamètres d'anneaux décroissent au fil de leur dissipation, expliquant la décroissance du transport d'une section de calcul à la suivante. Or, une part des eaux dissipées est advectée dans l'Atlantique sud par le courant du Benguela. Nous choisissons conventionnellement de considérer, pour cette comparaison, le transport maximal obtenu par cette méthode, soit 8.84 Sv à travers la section (c). Ceci revient à supposer que l'ensemble des eaux initialement piégées dans les anneaux sont véhiculées dans l'Atlantique sud.

On obtient ainsi un transport de 8.84 Sv par la méthode basée sur les trajectoires d'anneaux, contre 12.7 Sv de moyenne (Y2000 DW\* et Y2001 DW\*) pour le calcul lagrangien. Cette dernière valeur ne se base en revanche que sur les eaux émises pour les années 2000 et 2001, alors que la première méthode concerne une période plus longue. La faible variabilité obtenue pour les calculs Y2000 DW\* et Y2001 DW\* permet cependant de supposer un transport peu variable sur les années suivantes, d'autant que le nombre de lâchers au cours de ces deux années est proche de la moyenne observée sur toute la série temporelle (voir Figure 4.8). Le transport obtenu par calcul lagrangien est donc supérieur au premier. Ce calcul étant théoriquement exact, on en conclue que le transport évalué par la première méthode sous-estime les échanges indo-atlantiques d'environ 30%. En appliquant cette rapport dans le cadre du transport calculé dans l'étude des données altimétriques, le transport moyen de 8.54 Sv obtenu à travers la section (a) serait corrigé à 12.3 Sv. Cependant, cette correction ne peut être appliquée directement. En effet, la relation qui existe entre d'une part le diamètre d'un anneau détecté par l'analyse en ondelettes, et d'autre part sa structure verticale et le volume d'eau qui véhicule, n'est probablement pas la même pour les données et pour la simulation. Seule une étude comparative de cette relation permettrait d'affiner la correction à appliquer au transport calculé dans le cadre des données.

## **4.5 Conclusion**

Nous avons ici repris les études menées sur la branche nord de la connexion du supergyre subtropical au sud de l’Afrique, dans le cadre de deux simulations régionales à haute résolution. L’analyse comparative des résultats obtenus avec les études menées sur les données altimétriques permet une évaluation de la qualité du modèle.

**L’étude met en évidence un décalage moyen vers l’ouest de la réflexion et une variabilité longitudinale réduite. On retrouve le schéma de progression vers l’ouest de la réflexion s’achevant par un lâcher d’anneaux des Aiguilles, bien que ce phénomène semble être reproduit à une fréquence moyenne trop élevée.**

**La reprise de l’étude de trajectoires d’anneaux des Aiguilles montre que la famille de tourbillons de la voie sud, identifiée dans l’étude des données altimétriques, est totalement absente dans la simulation avec forçages de vent journaliers. La voie nord est revanche plus empruntée. Un positionnement trop au nord du Front Subantarctique, ou une imparfaite représentation de la région cyclonique située à l’entrée de la voie nord sont des raisons potentielles de ce biais des simulations. Les tourbillons de la voie sud présentant des caractéristiques hydrologiques très différentes des anneaux des autres voies, leur absence dans la simulation aura des conséquences sur les échanges indo-atlantiques simulés. Par ailleurs, les interactions entre les anneaux et la bathymétrie semblent incorrectement simulés, peu de subdivisions d’anneaux étant diagnostiquées au voisinage de la bathymétrie de l’ouest du bassin des Aiguilles. Enfin, le calcul simplifié du transport des anneaux des Aiguilles indique une surestimation dans la simulation. Ce constat est cohérent avec plusieurs résultats de l’étude de la simulation tel qu’une fréquence de lâchers excessive, ou l’absence de tourbillons de la voie sud (qui contribuent relativement peu au transport tel que calculé ici).**

**D’une manière générale, cette comparaison entre modèles et données illustre la grande sensibilité du comportement des anneaux dans le Bassin du Cap à une bonne simulation de la réflexion : Dans le cas étudié ici, un décalage vers le nord de la pointe de la réflexion de moins de 1° de latitude suffit pour faire disparaître la voie sud des anneaux de la simulation.**

## **5 Résultats/Prospective**

### **5.1 Résultats**

#### **5.1.1 Etude la retroflection du Courant des Aiguilles**

L'étude des échanges indo-atlantiques d'eau subtropicale par la voie nord du supergyre a d'abord consisté en une étude de la retroflection du Courant des Aiguilles. L'étendue temporelle du jeu de données, et le fait qu'il s'agisse de données de hauteur de mer absolue, constituent l'originalité de l'étude. L'utilisation d'une méthode de détection du point de retroflection, et l'emploi d'une approche d'analyse onde par onde, donnent des résultats confortant les études antérieures, tant sur le mécanisme de battement de la retroflection que sur les événements de lâcher de masses d'eaux anticycloniques.

La longueur de la série temporelle de données a permis une étude de la saisonnalité et des fréquences pluriannuelles, qui avaient été peu abordées précédemment. Une analyse de type SSA de la série temporelle de longitude du point de retroflection a montré la présence d'un signal saisonnier d'amplitude  $1^\circ$  en longitude, corroborant les résultats de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984) et de Lutjeharms et al. (1992). Cependant, ce signal saisonnier semble très perturbé par des événements de retroflection amont, tel que celui de 2000/2001, qui a provoqué un retournement de phase du signal. Un retour progressif à un phasage « classique » semble s'opérer suite à l'événement de retroflection amont, entre 2001 et 2005. Cette perturbation du signal saisonnier par la basse fréquence associée à l'événement de retroflection amont est l'une des raisons de la difficulté à détecter le signal saisonnier.

Cette étude a également été menée sur deux simulations numériques régionales à haute résolution. Les résultats montrent que la retroflection simulée est située trop à l'ouest, et présente une variabilité restreinte en longitude. Les fréquences de battement de la retroflection et de lâcher de masse d'eau anticyclonique simulées sont trop élevées.

#### **5.1.2 Etude du comportement des anneaux des Aiguilles**

L'étude des échanges par la voie nord du supergyre a été poursuivie par une étude du comportement spatio-temporel des anneaux des Aiguilles. Un outil de détection de tourbillons, basé sur une analyse en ondelettes, a permis la détection et le suivi des anneaux dans la série temporelle de SSH entre octobre 1992 et janvier 2007. L'analyse a révélé la formation de 102 anneaux des Aiguilles, correspondant à 86 événements de lâcher ou

détachement de la retroflexion, tels que définis au chapitre 1. Par le biais de subdivisions, ces 102 tourbillons initiaux ont donné naissance à 97 sous-tourbillons, soit un total de 199 trajectoires recensées. La durée de suivi moyenne des tourbillons (augmentée, dans le cas de sous-tourbillons, de l'âge du tourbillon d'origine) est de 26.1 semaines.

L'ensemble de ces trajectoires reflète le comportement très turbulent de la région, qu'avaient souligné Boebel et al. (2003) en la désignant sous le terme de « Chaudron du Cap ». Une analyse plus fine permet cependant d'y déceler 3 routes, ou voies, privilégiées, déterminées par les reliefs bathymétriques délimitant les bassins des Aiguilles et du Cap. Ainsi, sans se réduire au schéma simplifié d'un « corridor », les trajectoires des anticyclones présentent néanmoins une certaine structuration. Si le chapitre I a montré le rôle de barrière joué par la bathymétrie (dorsale des Aiguilles, monts Erica et Schmidt-Ott) pour la progression vers l'ouest de la retroflexion, le chapitre 2 montre que les anneaux récemment détachés se subdivisent souvent à la rencontre de ces mêmes obstacles. Ces monts influencent l'orientation des tourbillons dans l'une ou l'autre des 3 voies identifiées.

Une estimation du transport volumique par les anneaux, vecteurs principaux des échanges indo-atlantiques d'eau subtropicale, fournit des valeurs en accord avec les estimations antérieures, et permet d'examiner la contribution des tourbillons de chaque voie. La voie centrale est la principale contributrice au transport avec 3.9 Sv traversant la section de calcul initiale, la plus proche de la retroflexion. 3.1 Sv sont initialement véhiculés par la voie nord, en faisant une contributrice importante. En revanche, seuls 1.7 Sv sont initialement véhiculés par la voie sud, et cette valeur décroît rapidement en allant vers l'ouest. Cependant, le transport par cette voie est probablement sous-estimé. Une meilleure estimation du transport par les tourbillons de la voie sud serait pourtant nécessaire, car ceux-ci présentent des caractéristiques hydrologiques différentes des tourbillons des autres voies.

Une étude plus approfondie du comportement des anneaux de la voie sud a été menée. Dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles, ceux-ci sont bloqués par le Front Subantarctique, et subissent des modifications hydrologiques importantes, avant de franchir la dorsale par un couloir profond dans sa ligne de crête.

L'étude décrite ci-dessus a également été reprise sur une des simulations haute résolution. Une analyse comparative montre un décalage des trajectoires vers le nord, soulignant une forte sensibilité à la simulation de la retroflexion. La retroflexion étant située trop au nord dans ses positionnements extrêmes ouest, les anneaux qui s'en détachent empruntent uniquement les voies nord et sud. Par ailleurs, peu de subdivisions sont observés

dans la simulation, indiquant une mauvaise simulation des interactions entre anneaux et reliefs bathymétriques.

### **5.1.3 Etude du Front Subtropical**

L'existence d'échanges d'eau subtropicale par la branche sud du supergyre, soit de l'océan Atlantique vers l'océan Indien, repose sur la question de la continuité du Front Subtropical (STF) entre les deux océans. Sur le champ moyen de SSH de la période 1992-2007, des fronts ont été détectés. Leur structure se rapproche de celle proposée par Belkin et Gordon (1996), avec une branche nord appelée NSTF, et une branche sud appelée SSTF. La continuité du SSTF entre les deux océans évoque un écoulement possible entre les océans. Cependant, la continuité observée sur le champ moyen ne serait qu'apparente. C'est ce que l'on constate en appliquant la méthode de détection des fronts mise en place sur le champ moyen aux champs de SSH hebdomadaires. Les méthodes de détection classiques du Front Subtropical, à partir de critères hydrologiques, permettent toujours de positionner le front à toute longitude. C'est également le cas avec la méthode utilisée ici. Cependant, notre étude montre que le tracé du front est fortement lié au positionnement des anneaux des Aiguilles présents à l'ouest de la retroflexion. Leur distribution spatiale très variable ne permet alors pas d'obtenir de continuité spatiale du tracé du front.

## **5.2 Prospective**

### **5.2.1 Branche nord du supergyre**

#### **5.2.1.1 Comportement de la retroflexion**

##### **Basse fréquence et signal saisonnier**

L'étude a mis en évidence l'influence de signaux de périodes pluriannuelles, les retroflexion amont, sur le signal saisonnier de positionnement de la retroflexion. Une actualisation de la série temporelle de SSH permettrait de vérifier la tendance observée d'un retour à un phasage classique de ce signal, suite à l'événement de retroflexion amont 2000/2001. Par ailleurs, cette actualisation permettrait d'analyser l'impact sur le signal saisonnier de la retroflexion du dernier événement de retroflexion amont, en 2008.

## **Lien entre intensité de l'AC, longitude et transport du courant de retroflection**

Biastoch et al. (2008) ont montré qu'un courant des Aiguilles intense est associé à une retroflection décalée vers l'est, confirmant les premiers résultats de Lutjeharms et Van Ballegooyen (1984). Nous avons mis en place une méthode pour estimer le transport du courant au niveau de la retroflection, mais sans trouver de corrélation significative avec la longitude de la retroflection. Cette méthode pourrait cependant être améliorée, pour tenir compte notamment de la largeur variable du courant.

Par ailleurs, Biastoch et al. (2008) ont montré, à partir d'un modèle à haute résolution, qu'un courant des Aiguilles intense est aussi associé à des échanges indo-atlantiques faibles d'eau subtropicale. Le calcul du transport des anneaux des Aiguilles, réalisé au chapitre 2, pourrait fournir une série temporelle associée aux échanges indo-atlantiques. Celle-ci pourrait être corrélée à la série de longitude du point de retroflection, afin de vérifier si ce lien se retrouve également dans les données.

### **5.2.1.2 Comportement des anneaux des Aiguilles**

L'analyse statistique du comportement des anneaux des Aiguilles a fourni une description de la variabilité spatio-temporelle de certaines de leurs caractéristiques physiques. Cependant, la définition de la surface d'un anticyclone détecté repose sur l'outil mathématique d'analyse en ondelettes, et ne reflète peut-être pas la dimension horizontale du tourbillon. De plus, cette surface, ainsi que l'anomalie de SSH au cœur du tourbillon dépendent de la signature en SSH du tourbillon, dont on ne sait pas comment elle reflète la dynamique profonde et l'hydrologie de l'anticyclone. Un calibrage entre les valeurs de surface et d'anomalie de SSH obtenues et les caractéristiques hydrologiques d'anneaux échantillonnés en mer permettrait d'obtenir des évolutions spatio-temporelles représentatives de la physique des anneaux. Ce calibrage est probablement complexe, puisque les anneaux présentent des historiques très variables susceptibles d'influencer leur signature en SSH de diverses façons. Un calibrage par voie (nord, centrale ou sud) semblerait alors approprié. Ce travail permettrait également d'affiner l'estimation de transport effectuée dans cette thèse.

L'étude menée sur les anneaux dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles a montré qu'ils interagissent avec le Front Subantarctique, interrompant leur dérive vers le sud. Une étude théorique de l'interaction entre un anticyclone et un front serait nécessaire pour vérifier cet effet bloquant et en comprendre le mécanisme. De plus, l'accroissement fréquemment observé de la signature de SSHA des tourbillons au cours de cette interaction pourrait



découler d'échanges importants avec l'écoulement du front. Pour mieux évaluer les contributions de ces anneaux aux échanges indo-atlantiques, il serait intéressant d'étudier la nature et l'importance des modifications de l'hydrologie du tourbillon au cours de cette interaction.

Cette même étude a aussi montré que seuls les anneaux présentant une signature forte en SSHA parviennent ensuite à franchir la dorsale des Aiguilles vers le nord. Ceux-ci semblent alors emprunter un couloir profond dans la ligne de crête de la dorsale. Une étude théorique pourrait, d'une part, expliquer cette orientation des trajectoires. D'autre part, dans l'optique d'une meilleure évaluation de leur apport vers l'océan Atlantique, une étude théorique permettrait d'évaluer les conséquences du franchissement la dorsale sur la structure verticale du tourbillon.

## **5.2.2 Branche sud du supergyre**

### **5.2.2.1 Continuité du Front subtropical**

L'étude menée dans cette thèse a montré que le tracé du STF dans la région du Chaudron du Cap est continu par morceaux, s'appuyant sur les flancs sud d'anneaux des Aiguilles. Ce schéma semble peu compatible avec un écoulement continu du front de l'océan Atlantique vers l'océan Indien. Les échanges par cette branche du supergyre sont donc probablement liés à des mécanismes turbulents. Pour étudier la nature de ces échanges, deux études sur simulations régionales de modèles à haute résolution pourraient être envisagées. D'une part, une étude lagrangienne permettrait de quantifier ces échanges, et d'obtenir des informations sur les mécanismes en jeu (grâce aux trajectoires de particules échangées). Par ailleurs, la méthode de détection des fronts développée dans cette thèse pourrait être reprise dans ces simulations. En comparant alors les trajectoires de particules échangées entre bassins et les tracés du STF, le rôle des anneaux des Aiguilles et la continuité du tracé du front pourraient être évalués. Cela nécessiterait cependant des améliorations dans la dynamique obtenues dans les simulations étudiées dans cette thèse, avec notamment un meilleur positionnement des fronts.

### **5.2.2.2 Formation du SSTF à l'est de 19°E**

Au sud de la retroflexion, le SSTF semble s'appuyer sur des anticyclones détachés de la retroflexion ou de l'ARC, avant de présenter un tracé continu et permanent plus à l'est. Pour expliquer ce résultat, un mécanisme de formation du front a été proposé, reposant sur le

mélange des eaux de ces anticyclones avec les eaux ambiantes s'écoulant vers l'est. Pour vérifier et mieux comprendre ce mécanisme, un suivi de ces tourbillons par l'analyse en ondelettes pourrait être envisagé. Parallèlement, cette étude pourrait être reprise sur une simulation (sur laquelle ces tourbillons seraient correctement simulés). Une étude lagrangienne permettrait alors d'étudier le devenir des eaux contenues dans ces tourbillons, et de mettre en évidence le mécanisme de mélange évoqué et sa responsabilité dans la formation d'un SSTF continu plus à l'est.

### **5.2.3 Amélioration attendues du modèle régional**

La reprise des études menées sur la branche nord du supergyre a mis en évidence certaines améliorations à attendre d'un tel modèle. Tout d'abord, le positionnement trop au nord des fronts de l'ACC, particulièrement du SAF, semble partiellement responsable de l'absence de tourbillons de la voie sud (dérivant au sud de la dorsale des Aiguilles). Ceci pourrait être lié à des conditions aux frontières inadaptées, et à une mauvaise simulation des interactions entre fronts et bathymétrie. Une bonne représentation par le modèle de l'intensité et de l'étendue du « lee eddy » cyclonique formé à l'ouest du Banc des Aiguilles devrait également être vérifiée. Cette structure est apparue trop faible dans la simulation, laissant la voie nord des tourbillons plus ouverte qu'elle ne l'est dans l'océan réel. Enfin, le décalage vers l'ouest de la retroflexion dans le modèle est un autre facteur influençant les conditions de détachement des tourbillons, leurs interactions avec la bathymétrie, et donc leurs trajectoires. Il serait également important, pour une bonne représentation des échanges indo-atlantiques, d'expliquer et de corriger ce biais.

## Références

ARHAN, M., MERCIER, H. & LUTJEHARMS, J. R. E. 1999. The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104, 20987-21005.

BARNIER, B., MADEC, G., PENDUFF, T., MOLINES, J. M., TREGUIER, A. M., LE SOMMER, J., BECKMANN, A., BIASTOCH, A., BONING, C., DENG, J., DERVAL, C., DURAND, E., GULEV, S., REMY, E., TALANDIER, C., THEETTEN, S., MALTRUD, M., MCCLEAN, J. & DE CUEVAS, B. 2006. Impact of partial steps and momentum advection schemes in a global ocean circulation model at eddy-permitting resolution. *Ocean Dynamics*, 56, 543-567.

BEAL, L. M. & BRYDEN, H. L. 1999. The velocity and vorticity structure of the Agulhas Current at 32 degrees S. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104, 5151-5176.

BELKIN, I. M. & GORDON, A. L. 1996. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 101, 3675-3696.

BENTAMY, A., KATSAROS, K. B., MESTAS-NUNEZ, A. M., DRENNAN, W. M., FORDE, E. B. & ROQUET, H. 2003. Satellite estimates of wind speed and latent heat flux over the global oceans. *Journal of Climate*, 16, 637-656.

BIASTOCH, A., BONING, C. W. & LUTJEHARMS, J. R. E. 2008a. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*, 456, 489-492.

BIASTOCH, A., LUTJEHARMS, J. R. E., BONING, C. W. & SCHEINERT, M. 2008b. Mesoscale perturbations control inter-ocean exchange south of Africa. *Geophysical Research Letters*, 35.

BOEBEL, O., LUTJEHARMS, J., SCHMID, C., ZENK, W., ROSSBY, T. & BARRON, C. 2003. The Cape Cauldron: a regime of turbulent inter-ocean exchange. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 50, 57-86.

BOYER, T. P., JI, A., BARANOVA, O. K., GARCIA, H., JOHNSON, D. R., LOCARNINI, R. A., MISHONOV, A. V., PITCHER, M. T. & SMOLYAR, I. 2006. World Ocean Database 2005, Introduction, NOAA Atlas NESDIS.

BYRNE, D. A., GORDON, A. L. & HAXBY, W. F. 1995. AGULHAS EDDIES - A SYNOPTIC VIEW USING GEOSAT ERM DATA. *Journal of Physical Oceanography*, 25, 902-917.

DA SILVA, A. M., YOUNG, C. C. & LEVITUS, S. Atlas of surface marine data 1994, vol. 1, algorithms and procedures, Tech. rep., U. S. Department of Commerce, NOAA.

DE RUIJTER, W. P. M., BIASTOCH, A., DRIJFHOUT, S. S., LUTJEHARMS, J. R. E., MATANO, R. P., PICHEVIN, T., VAN LEEUWEN, P. J. & WEIJER, W. 1999a. Indian-Atlantic interocean exchange: Dynamics, estimation and impact. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104, 20885-20910.

DE RUIJTER, W. P. M., VAN AKEN, H. M., BEIER, E. J., LUTJEHARMS, J. R. E., MATANO, R. P. & SCHOUTEN, M. W. 2004. Eddies and dipoles around South Madagascar: formation, pathways and large-scale impact. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 51, 383-400.

DE RUIJTER, W. P. M., VAN LEEUWEN, P. J. & LUTJEHARMS, J. R. E. 1999b. Generation and evolution of natal pulses: Solitary meanders in the Agulhas Current. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 3043-3055.

DERUIJTER, W. 1982. ASYMPTOTIC ANALYSIS OF THE AGULHAS AND BRAZIL CURRENT SYSTEMS. *Journal of Physical Oceanography*, 12, 361-373.

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. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 112.

DUNCOMBE RAE, C. M. 1991. Agulhas retroflection rings in the South Atlantic Ocean; an overview. *South African Journal of Marine Science*, 11, 327-344.

FERON, R. C. V., DERUIJTER, W. P. M. & OSKAM, D. 1992. RING SHEDDING IN THE AGULHAS CURRENT SYSTEM. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 97, 9467-9477.

FFIELD, A., TOOLE, J. & WILSON, D. 1997. Seasonal circulation in the South Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 24, 2773-2776.

FLIERL, G. R. 1981. PARTICLE MOTIONS IN LARGE-AMPLITUDE WAVE FIELDS. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 18, 39-74.

GARZOLI, S. L. & GORDON, A. L. 1996. Origins and variability of the Benguela Current. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 101, 897-906.

GARZOLI, S. L., RICHARDSON, P. L., RAE, C. M. D., FRATANTONI, D. M., GONI, G. J. & ROUBICEK, A. J. 1999. Three Agulhas rings observed during the Benguela Current experiment. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104, 20971-20985.

GLADYSHEV, S., ARHAN, M., SOKOV, A. & SPEICH, S. 2008. A hydrographic section from South Africa to the southern limit of the Antarctic Circumpolar Current at the

Greenwich meridian. Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers, 55, 1284-1303.

GONI, G. J., GARZOLI, S. L., ROUBICEK, A. J., OLSON, D. B. & BROWN, O. B. 1997. Agulhas ring dynamics from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data. Journal of Marine Research, 55, 861-883.

GORDON, A. L. 1985. INDIAN-ATLANTIC TRANSFER OF THERMOCLINE WATER AT THE AGULHAS RETROFLECTION. Science, 227, 1030-1033.

GORDON, A. L. 1986. INTER-OCEAN EXCHANGE OF THERMOCLINE WATER. Journal of Geophysical Research-Oceans, 91, 5037-5046.

GORDON, A. L. & HAXBY, W. F. 1990. AGULHAS EDDIES INVADE THE SOUTH-ATLANTIC - EVIDENCE FROM GEOSAT ALTIMETER AND SHIPBOARD CONDUCTIVITY-TEMPERATURE-DEPTH SURVEY. Journal of Geophysical Research-Oceans, 95, 3117-&.

GRUNDLINGH, M. L. 1995. Tracking eddies in the southeast Atlantic and southwest Indian oceans with TOPEX/POSEIDON. Journal of Geophysical Research-Oceans, 100, 24977-24986.

HERBETTE, S., MOREL, Y. & ARHAN, M. 2004. Subduction of a surface vortex under an outcropping front. Journal of Physical Oceanography, 34, 1610-1627.

JACOBS, S. S. & GEORI, D. T. 1977. Observations on the Southwest Indian/Antarctic Ocean. Deep-Sea Research, 24, 43-84.

KNORR, G. & LOHMANN, G. 2003. Southern Ocean origin for the resumption of Atlantic thermohaline circulation during deglaciation. Nature, 424, 532-536.

LUTJEHARMS, J. R. E. 1981. SPATIAL SCALES AND INTENSITIES OF CIRCULATION IN THE OCEAN AREAS ADJACENT TO SOUTH-AFRICA. Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers, 28, 1289-1302.

LUTJEHARMS, J. R. E. 1985. LOCATION OF FRONTAL SYSTEMS BETWEEN AFRICA AND ANTARCTICA - SOME PRELIMINARY-RESULTS. Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers, 32, 1499-1509.

LUTJEHARMS, J. R. E., BOEBEL, O. & ROSSBY, H. T. 2003. Agulhas cyclones. Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography, 50, 13-34.

LUTJEHARMS, J. R. E. & CONNELL, A. D. 1989. THE NATAL PULSE AND INSHORE COUNTER-CURRENTS OFF THE SOUTH-AFRICAN EAST COAST. South African Journal of Science, 85, 533-535.

LUTJEHARMS, J. R. E., JAMALOODIEN, S. & ANSORGE, I. J. 2002. The temporal displacement of ocean fronts south-east of Africa. *South African Journal of Science*, 98, 304-306.

LUTJEHARMS, J. R. E., SHILLINGTON, F. A. & RAE, C. M. D. 1991. OBSERVATIONS OF EXTREME UPWELLING FILAMENTS IN THE SOUTHEAST ATLANTIC-OCEAN. *Science*, 253, 774-776.

LUTJEHARMS, J. R. E. & VALENTINE, H. R. 1984. SOUTHERN-OCEAN THERMAL FRONTS SOUTH OF AFRICA. *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers*, 31, 1461-&.

LUTJEHARMS, J. R. E. & VALENTINE, H. R. 1988. EDDIES AT THE SUB-TROPICAL CONVERGENCE SOUTH OF AFRICA. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 761-774.

LUTJEHARMS, J. R. E. & VANBALLEGOOYEN, R. C. 1988a. ANOMALOUS UPSTREAM RETROFLECTION IN THE AGULHAS CURRENT. *Science*, 240, 1770-1772.

LUTJEHARMS, J. R. E. & VANBALLEGOOYEN, R. C. 1988b. THE RETROFLECTION OF THE AGULHAS CURRENT. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1570-1583.

MCDONAGH, E. L., HEYWOOD, K. J. & MEREDITH, M. P. 1999. On the structure, paths, and fluxes associated with Agulhas rings. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104, 21007-21020.

ORSI, A. H., WHITWORTH, T. & NOWLIN, W. D. 1995. ON THE MERIDIONAL EXTENT AND FRONTS OF THE ANTARCTIC CIRCUMPOLAR CURRENT. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 42, 641-673.

PARK, Y. H., CHARRIAUD, E., CRANEGUY, P. & KARTAVTSEFF, A. 2001. Fronts, transport, and Weddell Gyre at 30 degrees E between Africa and Antarctica. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 106, 2857-2879.

PEETERS, F. J. C., ACHESON, R., BRUMMER, G. J. A., DE RUIJTER, W. P. M., SCHNEIDER, R. R., GANSSSEN, G. M., UFKES, E. & KROON, D. 2004. Vigorous exchange between the Indian and Atlantic oceans at the end of the past five glacial periods. *Nature*, 430, 661-665.

PENVEN, P., LUTJEHARMS, J. R. E., MARCHESIELLO, P., ROY, C. & WEEKS, S. J. 2001. Generation of cyclonic eddies by the Agulhas Current in the lee of the Agulhas Bank. *Geophysical Research Letters*, 28, 1055-1058.

PICHEVIN, T., NOF, D. & LUTJEHARMS, J. 1999. Why are there Agulhas rings? *Journal of Physical Oceanography*, 29, 693-707.

QUARTLY, G. D. & SROKOSZ, M. A. 2002. SST observations of the Agulhas and East Madagascar retroreflections by the TRMM Microwave Imager. *Journal of Physical Oceanography*, 32, 1585-1592.

RAE, C. M. D., GARZOLI, S. L. & GORDON, A. L. 1996. The eddy field of the southeast Atlantic Ocean: A statistical census from the Benguela Sources and Transports project. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 101, 11949-11964.

RAE, C. M. D., SHANNON, L. V. & SHILLINGTON, F. A. 1989. AN AGULHAS RING IN THE SOUTH-ATLANTIC OCEAN. *South African Journal of Science*, 85, 747-748.

RAE, C. M. D., SHILLINGTON, F. A., AGENBAG, J. J., TAUNTONCLARK, J. & GRUNDLINGH, M. L. 1992. AN AGULHAS RING IN THE SOUTH-ATLANTIC OCEAN AND ITS INTERACTION WITH THE BENGUELA UPWELLING FRONTAL SYSTEM. *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers*, 39, 2009-2027.

RICHARDSON, P. L., LUTJEHARMS, J. R. E. & BOEBEL, O. 2003. Introduction to the "Inter-ocean exchange around southern Africa". *Deep-Sea Research Part Ii-Topical Studies in Oceanography*, 50, 1-12.

RIO, M.-H., SCHAEFFER, P., LEMOINE, J.-M. & HERNANDEZ, F. 2005. Estimation of the ocean Mean Dynamic Topography through the combination of altimetric data, in-situ measurements and GRACE geoid: From global to regional studies. *Proceedings of the GOCINA international workshop, Luxembourg*.

RIO, M. H. 2003. Combinaison de données in situ, altimétriques et gravimétriques pour l'estimation d'une topographie dynamique moyenne globale. PhD, University Paul Sabatier (Toulouse III, France).

RIO, M. H. & HERNANDEZ, F. 2004. A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 109.

SCHMID, C., BOEBEL, O., ZENK, W., LUTJEHARMS, J. R. E., GARZOLI, S. L., RICHARDSON, P. L. & BARRON, C. 2003. Early evolution of an Agulhas Ring. *Deep-Sea Research Part Ii-Topical Studies in Oceanography*, 50, 141-166.

SCHOUTEN, M. W., DE RUIJTER, W. P. M. & VAN LEEUWEN, P. J. 2002a. Upstream control of Agulhas Ring shedding. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 107.

SCHOUTEN, M. W., DE RUIJTER, W. P. M., VAN LEEUWEN, P. J. & DIJKSTRA, H. A. 2002b. An oceanic teleconnection between the equatorial and southern Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 29.

SCHOUTEN, M. W., DE RUIJTER, W. P. M., VAN LEEUWEN, P. J. & LUTJEHARMS, J. R. E. 2000. Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the southeastern Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 105, 21913-21925.

SHCHEPETKIN, A. F. & MCWILLIAMS, J. C. 2003. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 108.

SHCHEPETKIN, A. F. & MCWILLIAMS, J. C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9, 347-404.

SMITH, W. H. F. & SANDWELL, D. T. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277, 1956-1962.

SPEICH, S., BLANKE, B., DE VRIES, P., DRIJFHOUT, S., DOOS, K., GANACHAUD, A. & MARSH, R. 2002. Tasman leakage: A new route in the global ocean conveyor belt. *Geophysical Research Letters*, 29.

STRAMMA, L. & LUTJEHARMS, J. R. E. 1997. The flow field of the subtropical gyre of the South Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 102, 5513-5530.

STRAMMA, L. & PETERSON, R. G. 1990. THE SOUTH-ATLANTIC CURRENT. *Journal of Physical Oceanography*, 20, 846-859.

TREGUIER, A. M., BOEBEL, O., BARNIER, B. & MADEC, G. 2003. Agulhas eddy fluxes in a 1/6 degrees Atlantic model. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 50, 251-280.

VAN AKEN, H. M., VAN VELDHOVEN, A. K., VETH, C., DE RUIJTER, W. P. M., VAN LEEUWEN, P. J., DRIJFHOUT, S. S., WHITTLE, C. P. & ROUAULT, M. 2003. Observations of a young Agulhas ring, Astrid, during MARE in March 2000. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 50, 167-195.

VAN LEEUWEN, P. J., DE RUIJTER, W. P. M. & LUTJEHARMS, J. R. E. 2000. Natal pulses and the formation of Agulhas rings. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 105, 6425-6436.

VAN SEBILLE, E., BIASTOCH, A., VAN LEEUWEN, P. J. & DE RUIJTER, W. P. M. 2009. A weaker Agulhas Current leads to more Agulhas leakage. *Geophysical Research Letters*, 36.



VAUTARD, R. & GHIL, M. 1989. SINGULAR SPECTRUM ANALYSIS IN NONLINEAR DYNAMICS, WITH APPLICATIONS TO PALEOCLIMATIC TIME-SERIES. *Physica D*, 35, 395-424.

VAUTARD, R., YIOU, P. & GHIL, M. 1992. SINGULAR-SPECTRUM ANALYSIS - A TOOLKIT FOR SHORT, NOISY CHAOTIC SIGNALS. *Physica D*, 58, 95-126.

WEIJER, W., DE RUIJTER, W. P. M., DIJKSTRA, H. A. & VAN LEEUWEN, P. J. 1999. Impact of interbasin exchange on the Atlantic overturning circulation (vol 29, pg 2266, 1999). *Journal of Physical Oceanography*, 29, 3184-3184.

WYRTKI, K. 1973. *Physical oceanography of the Indian Ocean. Biology of the Indian Ocean.* Springer-Verlag ed. Berlin.