

**LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES
OCEANS**
UMR 6523 (CNRS-IFREMER-IRD-UBO)
Rapport LPO 2010_07

Michel OLLITRAULT – IFREMER/Centre de Brest – Laboratoire de
Physique des Océans

**RECHERCHE DE L'ÉPAVE DU VOL AF447:
ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES**

17 Novembre 2010

Sommaire

Avertissement.....	5
Introduction	5
I Critique du champ de courants obtenu par Analyse Objective	7
II Modèle d'Ekman Gill Gonella (EGG en abrégé).....	10
III Compatibilité des solutions proposées avec les trajectoires bouées.....	22
IV Conclusions	31
Références	31
Appendices	32

Avertissement

La lecture de ce document suppose un minimum de familiarité avec les travaux menés par le groupe de dérive et publiés dans le Scientific committee report téléchargeable sur le site du BEA (<http://www.bea.aero/en/enquetes/flight.af.447/flight.af447.php>).

Introduction

Après l'échec des recherches sur zone pendant la phase 3, il convient de s'interroger à la fois sur la qualité de la couverture acoustique réalisée et sur la pertinence des modèles de reconstruction du champ des courants utilisés pour estimer la zone de recherche, qui a été couverte acoustiquement.

S'il n'est pas exclu que l'avion se trouve à l'intérieur du rectangle proposé par le groupe de dérive avant les recherches en mer des mois d'Avril et Mai 2010, et qu'il n'ait pas été détecté par les moyens acoustiques mis en œuvre, il est aussi possible qu'il ne soit pas à l'intérieur de la zone couverte par les AUV et le sonar Orion.

D'après les experts consultés, et de l'avis des participants aux campagnes en mer, tout ce qui a été couvert par les AUV Remus peut être considéré comme blanchi¹: on ne revient pas (sauf exception argumentée) sur les zones explorées. Ce qui a été fait par le sonar Orion est, semble-t-il, moins sûr que la couverture par les AUV. A cet égard, il est dommage que la partie Est du rectangle (de 3000 km², déterminé par le comité de dérive) n'ait pas été couverte entièrement par les AUV. Cela aurait permis d'écarter clairement le rectangle si la couverture AUV complète du rectangle n'avait rien donné. D'un autre côté, la couverture quasi complète du quart Nord-Ouest du cercle ACARS par les AUV exclut de fait cette surface d'environ 4300 km², comme zone potentielle du crash. Il convient également de noter que trois petites régions ont été couvertes par les AUV dans la partie Est du rectangle.

Enfin la zone proposée par la Marine (où le SNA Emeraude aurait enregistré les signaux des enregistreurs de vol) a été couverte par les AUV, mais aussi en vain.

¹ Blanchi signifie que les meilleurs moyens ont été utilisés (les AUV Remus) et que les fauchées ont couvert avec recouvrement la zone concernée.

La figure 1 montre la couverture réalisée par les AUV et le sonar Orion. La couverture réalisée en juillet 2009 par les SAR de l'IFREMER est aussi reportée sur cette figure (le point jaune représente la position d'une tache de pollution suspecte repérée le 2 juin à 8h16 TU).

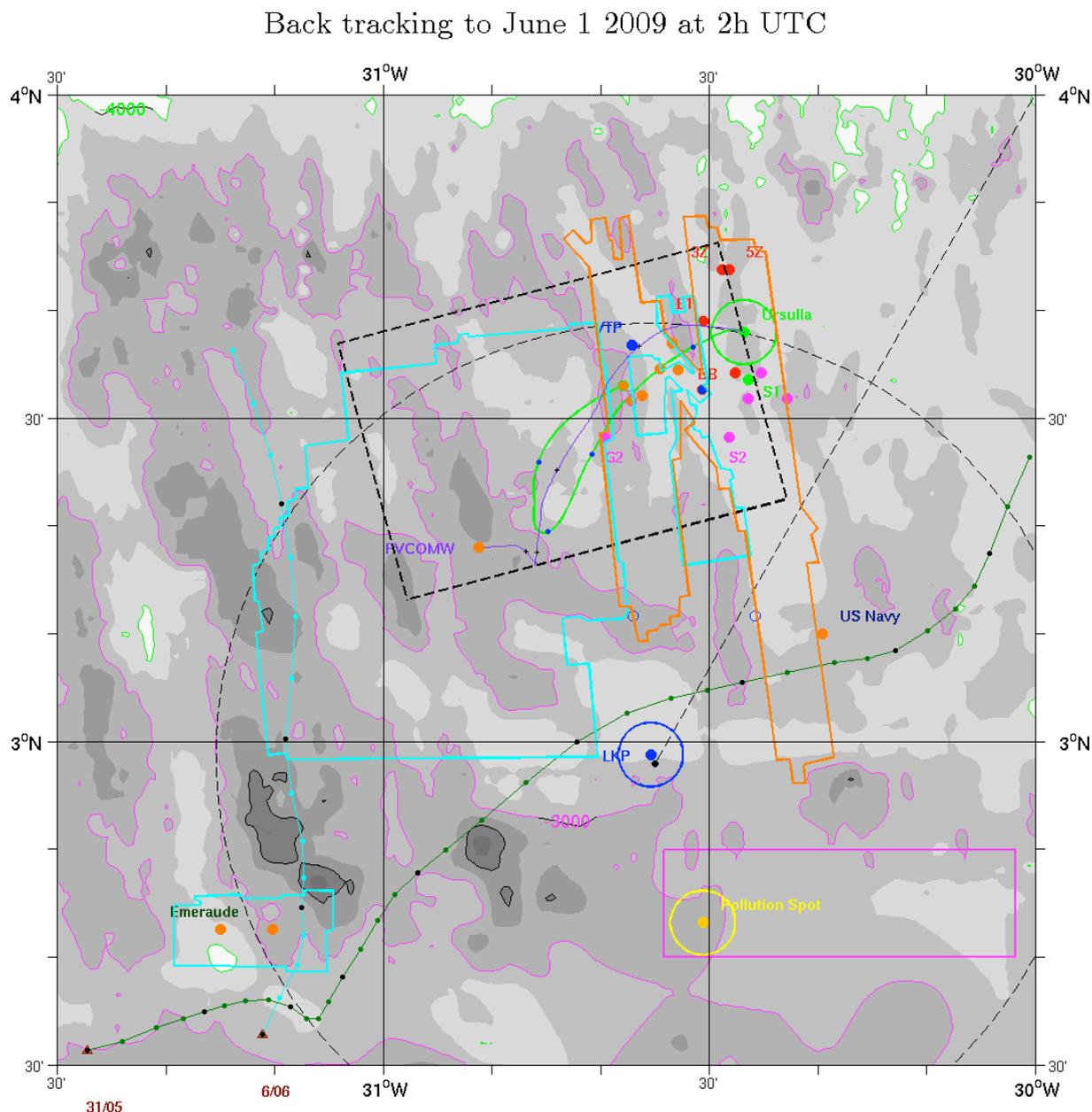


Figure 1: La couverture acoustique réalisée par les AUV est en cyan, celle réalisée par le sonar Orion en orange. La couverture effectuée en juillet 2009 par le SAR de l'IFREMER est en magenta. LKP (Last Known Position) est la dernière position connue de l'avion.

Les enregistrements réalisés par les AUV et l'Orion ont été communiqués à l'IFREMER afin d'effectuer un travail de vérification (avec WHOI qui dispose des logiciels adaptés). Les données du SAR (IFREMER) sont évidemment disponibles et les alentours de la tâche

de pollution vont être regardés à nouveau (rien de tangible n'avait été détecté en juillet 2009). Les données et les trajets de l'Emeraude sont probablement classifiés et ne pourront pas être obtenus (mais les meilleurs moyens disponibles aujourd'hui ayant ratissé la zone de l'Emeraude, on ne peut probablement rien faire de plus).

Il va de soi qu'après ces vérifications et si l'avis des différents experts est unanime pour dire que les zones couvertes ont été blanchies, cela signifiera **qu'en l'état actuel des recherches et compte tenu des moyens à notre disposition, l'avion ne se trouve probablement pas dans le rectangle, et par conséquent que toutes les estimations proposées par les modèles retenus (par le groupe de dérive) sont probablement erronées.**

Avant de passer à la critique des champs de courants proposés par le groupe de dérive, il convient de remarquer que les TPL (Towed Pinger Locator) mis en œuvre en juin et juillet 2009 ont couvert une grande partie du cercle ACARS (sauf un coin au Sud Est, voir la carte page 83 du rapport d'étape n°2). Mais quelque soit le jugement sur la qualité de détection des TPL, si les balises des enregistreurs de vol n'émettaient pas, l'utilisation des TPL n'a servi à rien.

I Critique du champ de courants obtenu par Analyse Objective

Rappelons d'abord que tous nos modèles (que ce soit l'analyse objective ou les modèles numériques actuels au $1/12^\circ$) sont plutôt adaptés pour les échelles dites moyennes de taille typique ~ 100 km.

Les reconstructions du champ des courants ne permettent pas de décrire correctement des phénomènes d'échelles plus petites, typiquement ~ 10 km (aspect filamentaire, e.g.) qui existent dans l'océan. La figure 2 montre un exemple de telles structures de petite échelle incluses dans les tourbillons d'échelle moyenne (qui sont bien de l'ordre de 100 km). Cette image a été obtenue à partir de la mesure satellitaire de la couleur de la mer et permet entre autre d'estimer la concentration de phytoplancton en surface (mais ce dernier n'est pas un traceur totalement passif, donc certaines structures de petite échelle peuvent ne pas correspondre à des structures identiques en courant).

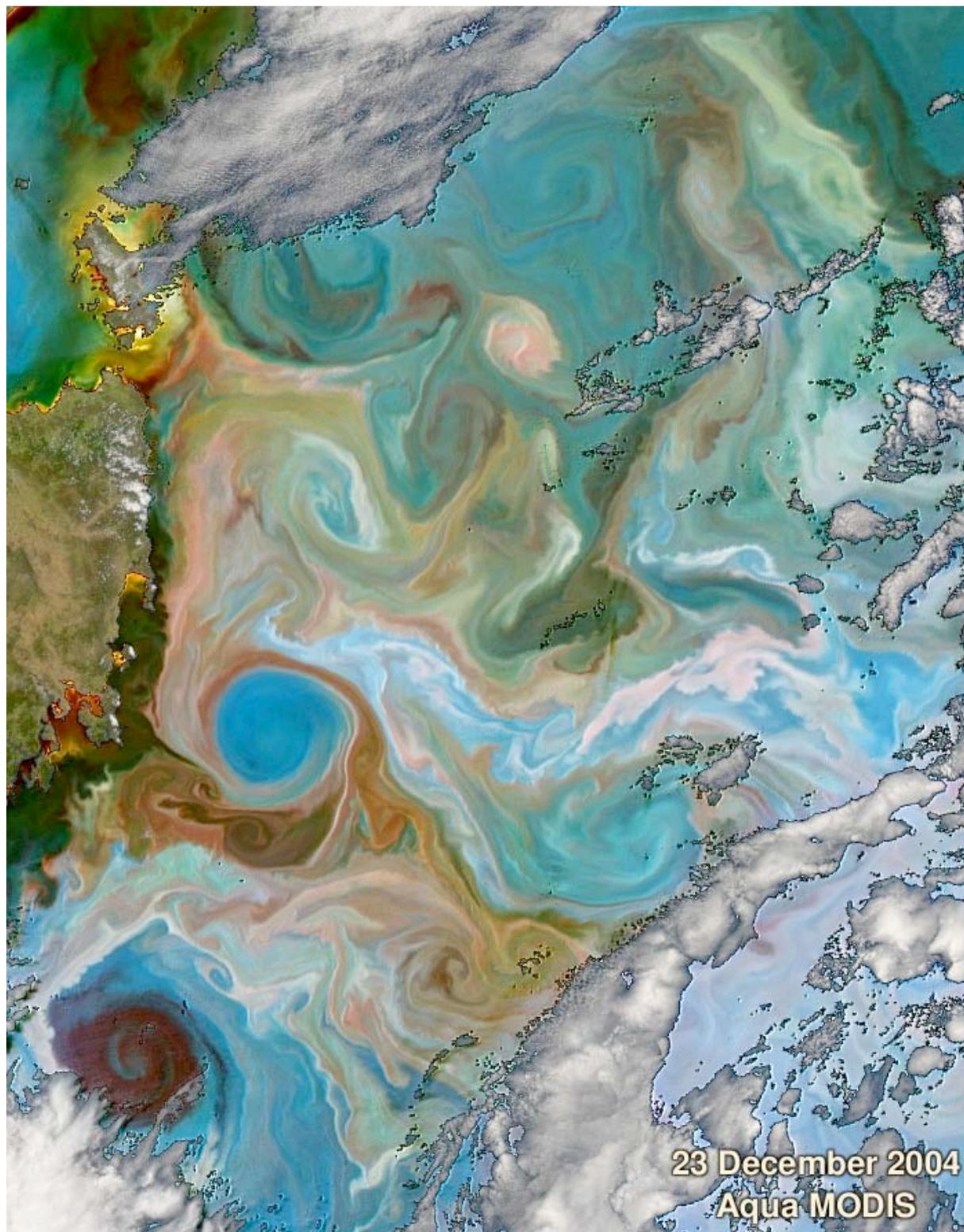


Figure 2 : Image synthétisée à partir des radiances de la surface de la mer mesurées par le radiomètre MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) à 551, 488 et 412 nm (et utilisées en proportion de rouge, vert et bleu). Cette image n'est pas ce qu'un œil humain verrait à bord du satellite Aqua de la NASA. La surface représentée couvre un rectangle de 850 km par 580 km environ. Le tourbillon bleu sur la gauche de l'image, à l'Est de la Tasmanie, a un diamètre de 100 km. (Voir le site <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

Malheureusement sur la zone ACARS, du fait de la couverture nuageuse et des pluies il n'a pas été possible de récupérer une seule image de couleur de la mer qui couvrirait le cercle ACARS. La figure 3 est la seule image que l'on a pu récupérer (le 2 juin à 12h27 TU). On reviendra plus loin sur cette image néanmoins.

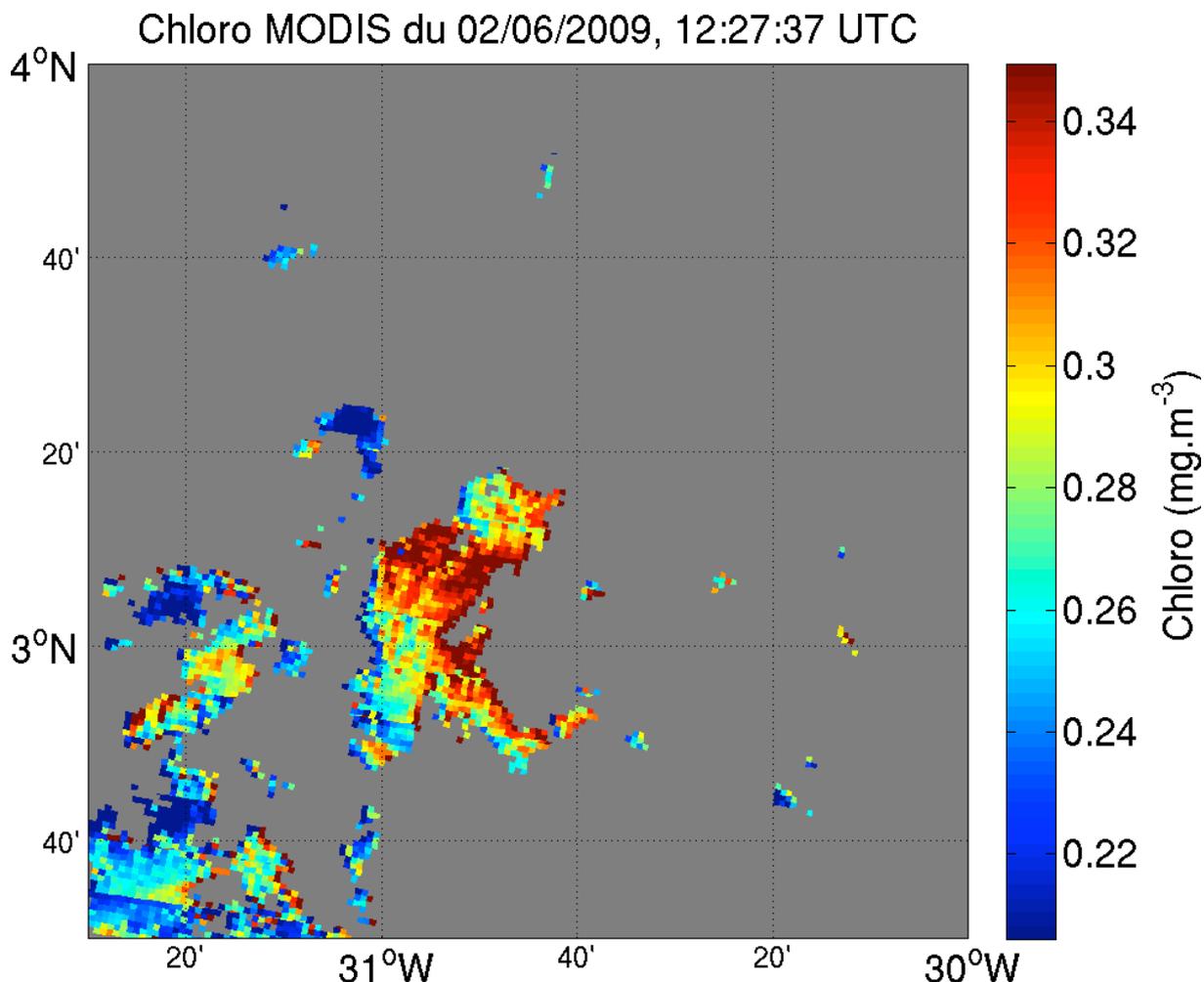


Figure 3: MODIS est aussi embarqué sur le satellite Terra de la NASA et a permis d'obtenir cette image de la concentration en Chlorophylle le 2 juin 2009 vers 12h30 TU.

Nous avons montré dans le rapport scientifique du groupe de dérive que les champs de courant des modèles numériques ne correspondaient généralement pas avec les courants mesurés par les bouées pêcheurs, ce qui diminue la confiance à accorder à ces modèles. D'un autre côté le champ de courant déduit par analyse objective des données seules était bien compatible (quasi parfaitement) avec les trajectoires des bouées pêcheurs, ce qui est normal puisque ce champ est construit de sorte qu'il soit le plus proche possible des données (moyennant quelques hypothèses raisonnables comme la non divergence horizontale), ce qui renforçait

notre confiance dans ce résultat. Evidemment, la présence éventuelle de structures de petite échelle pouvait très bien diminuer la qualité du champ reconstruit, loin des données, mais un test effectué sur un champ de courant modèle (en l'occurrence PSY2V3) avait montré que l'erreur induite sur une trajectoire croissait d'environ 5 km par jour, ce qui était suffisant pour délimiter approximativement une zone de crash.

Néanmoins, les bouées étant relativement éloignées (de l'ordre de 100 km) de la zone ACARS les 1 et 2 juin 2009 (voir la figure 20 du rapport scientifique e. g. ou la figure 13 de ce rapport), on a pu très bien avoir raté une structure (filamentaire ou autre) de la taille de plusieurs dizaines de km du fait que les fonctions de covariance sont représentatives des échelles moyennes (~ 100 km).

Dans ce cas, on ne peut exclure que les débris aient été emportés vers le nord les 1 et 2 juin (alors que le vent portait au sud néanmoins) en provenance de la « tâche de pollution » ou du point LKP par exemple.

Nous allons montrer que c'est possible effectivement et que les champs de courant modélisés sont encore parfaitement compatibles avec les trajectoires des bouées pêcheurs.

II Modèle d'Ekman Gill Gonella (EGG en abrégé)

Nous allons utiliser les équations linéarisées de la mécanique des fluides en rotation :

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial X}{\partial z}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial Y}{\partial z} \quad (\text{voir Gill, 1982, pages 317-333 e. g.})$$

où $\mathbf{v} = (u, v)$ est la vitesse horizontale, ρ la masse volumique (≈ 1025 kg m⁻³), p la pression et $\mathbf{X} = (X, Y)$ la tension horizontale (à la surface $\mathbf{X} = \mathbf{X}_S = (X_S, Y_S)$ la tension du vent à l'interface air mer, de l'ordre de 0.1 Nm⁻²). f est le paramètre de Coriolis, de l'ordre de 10^{-5} (rd)s⁻¹ vers 4° de latitude Nord.

Il y a donc deux forces qui peuvent accélérer l'eau : celle due au gradient horizontal de pression et celle due au gradient vertical de la tension horizontale.

Comme les équations sont linéaires, on peut décomposer le champ de vitesses en $u = u_P + u_E$ $v = v_P + v_E$ satisfaisant respectivement les équations :

$$\frac{\partial u_P}{\partial t} - f v_P = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \frac{\partial v_P}{\partial t} + f u_P = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

et

$$\frac{\partial u_E}{\partial t} - f v_E = \frac{1}{\rho} \frac{\partial X}{\partial z} \quad \frac{\partial v_E}{\partial t} + f u_E = \frac{1}{\rho} \frac{\partial Y}{\partial z}$$

Comme la tension \mathbf{X} est nulle en dehors de la couche limite (dite couche d'Ekman), l'intégration verticale des deux dernières équations donne :

$$\rho \left(\frac{\partial U_E}{\partial t} - f V_E \right) = X_S \quad \rho \left(\frac{\partial V_E}{\partial t} + f U_E \right) = Y_S \quad \text{avec } (U_E, V_E) = \int (u_E, v_E) dz$$

En réalité, la couche d'Ekman correspond dans notre cas à la couche bien mélangée de surface (épaisseur 40m) qui est observée par les profils de température et salinité des flotteurs Argo cyclant dans la zone. On admettra que la turbulence dans cette couche fait en sorte que le courant est constant approximativement sur la verticale, et que cette couche glisse presque sans frottement sur la couche sous-jacente (Gonella, 1971).

Si l'on suppose le vent constant pendant un intervalle de temps donné (disons une heure pour fixer les idées), on peut intégrer les deux équations précédentes : si on les réécrit en notation complexe,

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + i f \mathbf{u} = \frac{\mathbf{X}_S}{\rho H} \quad \text{avec } \mathbf{u} = u_E + i v_E \quad \mathbf{X}_S = X_S + i Y_S \quad \text{on obtient :}$$

$$\mathbf{u}(t) = (\mathbf{u}_{obs} + \frac{i \mathbf{X}_S}{\rho f H}) \exp(-i f (t - t_{obs})) - \frac{i \mathbf{X}_S}{\rho f H} \quad \text{et}$$

$$\mathbf{M}(t) = \mathbf{M}_{obs} - \frac{i \mathbf{X}_S}{\rho f H} (t - t_{obs}) + \frac{\mathbf{X}_S}{\rho f^2 H} (1 - \exp[-i f (t - t_{obs})]) + \frac{i \mathbf{u}_{obs}}{f} (\exp[-i f (t - t_{obs})] - 1)$$

$\mathbf{M}(t)$ est la position à l'instant t de la particule qui était en \mathbf{M}_{obs} à l'instant t_{obs} et avec la vitesse $\mathbf{u}_{obs}(t_{obs})$.

Les expressions précédentes sont valables si on intègre en temps physique (donc croissant)². Si l'on veut intégrer de façon rétrograde (c'est à dire en remontant le temps physique), il suffit de poser par exemple, $\tilde{\mathbf{u}} = -\mathbf{u}$ et $d\tilde{t} = -dt$ (avec $\tilde{t} = t_{obs} - t$) et résoudre l'équation :

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial \tilde{t}} - i f \tilde{\mathbf{u}} = \frac{\mathbf{X}_S}{\rho H} \text{ avec la condition initiale } \tilde{\mathbf{u}}_{obs} = -\mathbf{u}_{obs}(t_{obs}) \text{ au point } \mathbf{M}_{obs}.$$

$$\text{On obtient alors : } \tilde{\mathbf{u}}(\tilde{t}) = \left(\tilde{\mathbf{u}}_{obs} - \frac{i\mathbf{X}_S}{\rho f H} \right) \exp(i f \cdot \tilde{t}) + \frac{i\mathbf{X}_S}{\rho f H} \text{ et}$$

$$\tilde{\mathbf{M}}(\tilde{t}) = \mathbf{M}_{obs} + \frac{i\mathbf{X}_S}{\rho f H} \cdot \tilde{t} + \frac{\mathbf{X}_S}{\rho f^2 H} (1 - \exp[i f \cdot \tilde{t}]) + \frac{i\tilde{\mathbf{u}}_{obs}}{f} (1 - \exp[i f \cdot \tilde{t}])$$

Il convient encore d'introduire un paramètre de frottement R (dit de Rayleigh, cf. Gill, 1982). L'équation directe (respectivement rétrograde) devient $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + i f \mathbf{u} = \frac{\mathbf{X}_S}{\rho H} - R \mathbf{u}$ (resp^t. $\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial \tilde{t}} - i f \tilde{\mathbf{u}} = \frac{\mathbf{X}_S}{\rho H} + R \tilde{\mathbf{u}}$) et il suffit de remplacer f par $f - iR$ dans les autres expressions.

Evidemment, la valeur de R doit être estimée. Par exemple, $R^{-1} = 10$ jours, correspond à une (resp^t. deux) période(s) inertielle(s) à 3°N (resp^t. 6°N). Pollard and Millard (1972) ont utilisé $R^{-1} = 4$ jours. Les résultats sont cependant assez sensibles à la valeur de R, comme nous allons le montrer.

Sur la figure 4 les trajectoires à rebours sont calculées avec les expressions précédentes (et $R^{-1} = 10$ jours), à partir du 5 juin à 12h TU et ce jusqu'au 1 juin à 2h TU (points oranges). La position initiale est en 3.6°N 30.5°W et 5 vitesses initiales différentes sont utilisées. Il n'y a pas de courant géostrophique, c'est à dire que \mathbf{u}_p est nulle.

La courbe jaune se rapproche des trajectoires modélisées par OA ou FVCOMW entre le 3 juin et le 5 juin. Cela est plutôt satisfaisant puisque le courant le 5 juin vers 12h TU est estimé par OA ou FVCOMW à 10-15 cm/s vers l'Est près de la position Ursulla (la courbe jaune correspond à un courant « initial » le 5 juin à 12h TU de 10 cm/s vers l'Est).

Par contre la trajectoire jaune diffère avec celles de OA ou FVCOMW entre le 1 juin et le 3 juin, puisqu'elle semble provenir de LKP, et ne montre pas de retour vers le Nord ou l'Ouest.

² Si le courant géostrophique n'est pas nul, mais supposé constant sur l'intervalle d'intégration, il suffit de remplacer $\mathbf{u}_{obs}(t_{obs})$ par $\mathbf{u}_{obs}(t_{obs}) - \mathbf{u}_p$ dans l'équation de la vitesse et de rajouter \mathbf{u}_p à la fin. De même dans l'équation donnant $\mathbf{X}(t)$, on rajoutera $\mathbf{u}_p(t - t_{obs})$ à la fin.

Backward drift from June 05 12h to June 01 2009 2h ($R=.10 \text{ day}^{-1}$, $U_{\text{geos}}=0 \text{ m/s}$)

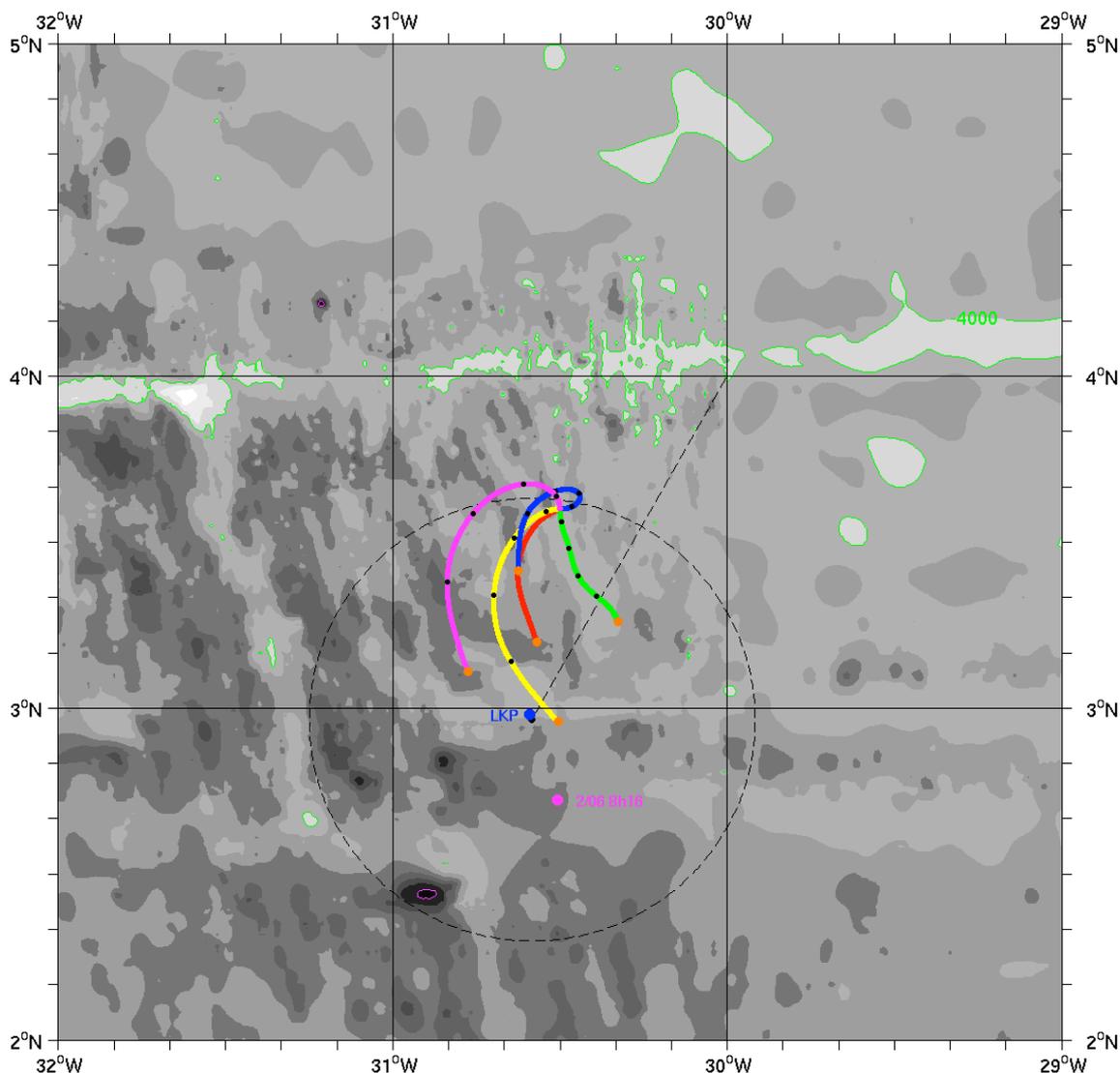


Figure 4: Trajectoires à rebours obtenus avec le modèle EGG explicité pages précédentes. Les vitesses initiales (en m/s) le 5 juin à 12h TU sont : $0+0i$ (en rouge), $0.1+0i$ (en jaune), $0+.1i$ (en vert), $-0.1+0i$ (en bleu) et $0-.1i$ (en magenta). Il n'y a pas de courant géostrophique. R^{-1} vaut 10 jours, et la tension du vent est celle du champ Cersat HR (voir rapport scientifique du groupe de dérive).

Regardons maintenant l'effet d'une dissipation plus importante (avec $R^{-1}=4$ jours). La figure 5 montre que la trajectoire jaune proviendrait alors de la région autour de la tache de pollution. Il est normal qu'une plus grande dissipation induise un plus grand déplacement à rebours, alors qu'en intégrant en avant (le temps physique croissant) le déplacement va être freiné et sera donc plus court.

Backward drift from June 05 12h to June 01 2009 2h ($R=.25 \text{ day}^{-1}$, $U_{\text{geos}}=0 \text{ m/s}$)

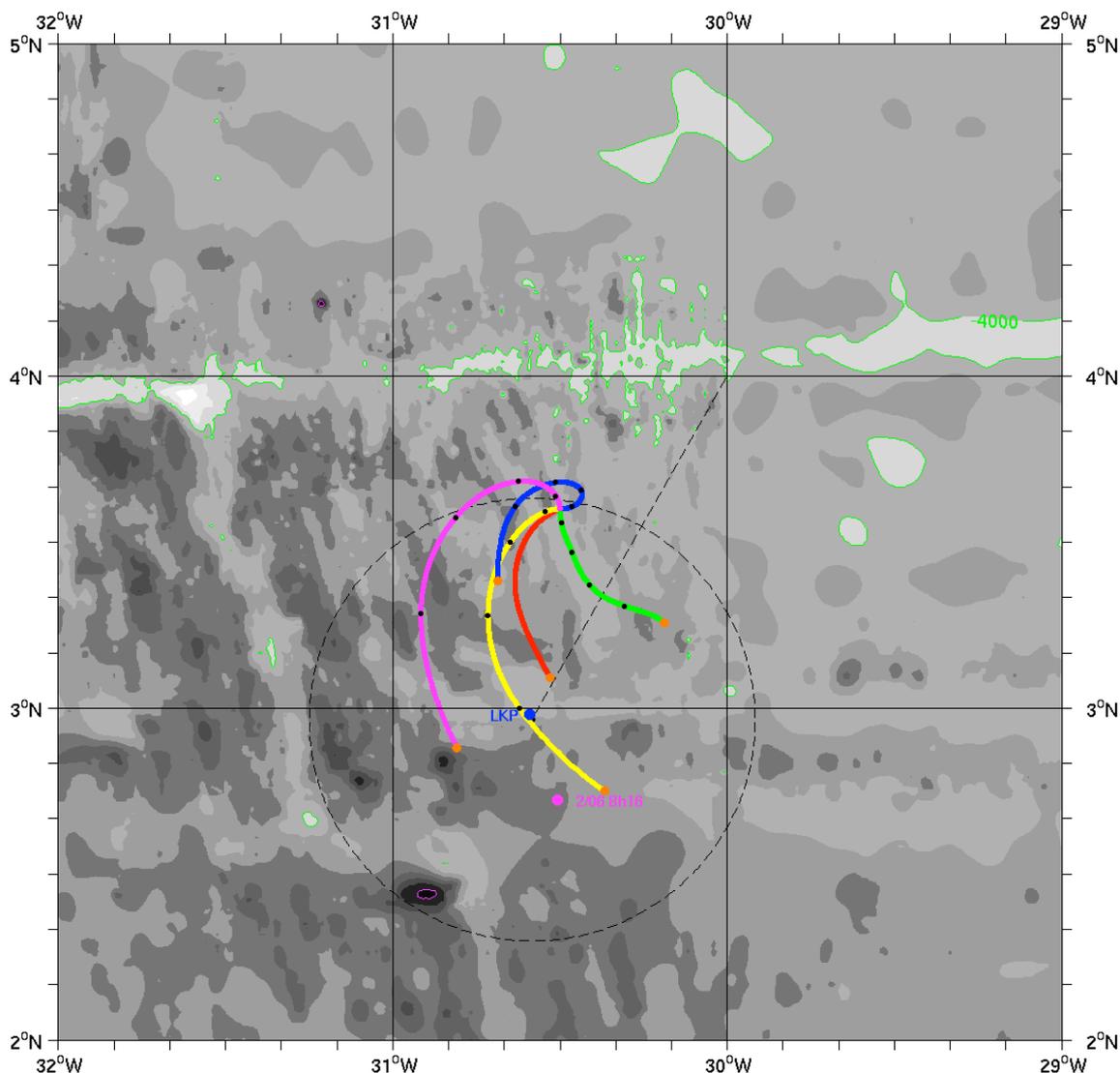


Figure 5 : Identique à la figure 4, excepté $R^{-1}=4$ jours.

Il est difficile à ce stade de décider lequel de ces deux paramètres de Rayleigh est le plus réaliste.

Passons maintenant à l'estimation de la vitesse géostrophique \mathbf{u}_p .

Pour le modèle Surcouf (voir l'appendice 4 du rapport scientifique du groupe de dérive) la partie « géostrophique » du courant près de la surface a été estimée à partir des données altimétriques et des mesures historiques des courants de surface. La figure 6 montre ce champ de courant géostrophique pour le 2 juin 2009 vers 12h TU. Ce champ de courant géostrophique varie très peu au cours de la semaine du 1 au 7 juin 2009, car c'est une moyenne spatio-temporelle sur 300 km par 10 jours. Il est donc représentatif de la période concernée, du moins peut-on l'espérer. Près de LKP le courant géostrophique porterait vers l'Est Nord-Est à 20-25 cm/s.

Surcouf 1 m daily geostrophic displacements on 2009 June 02 at 12h

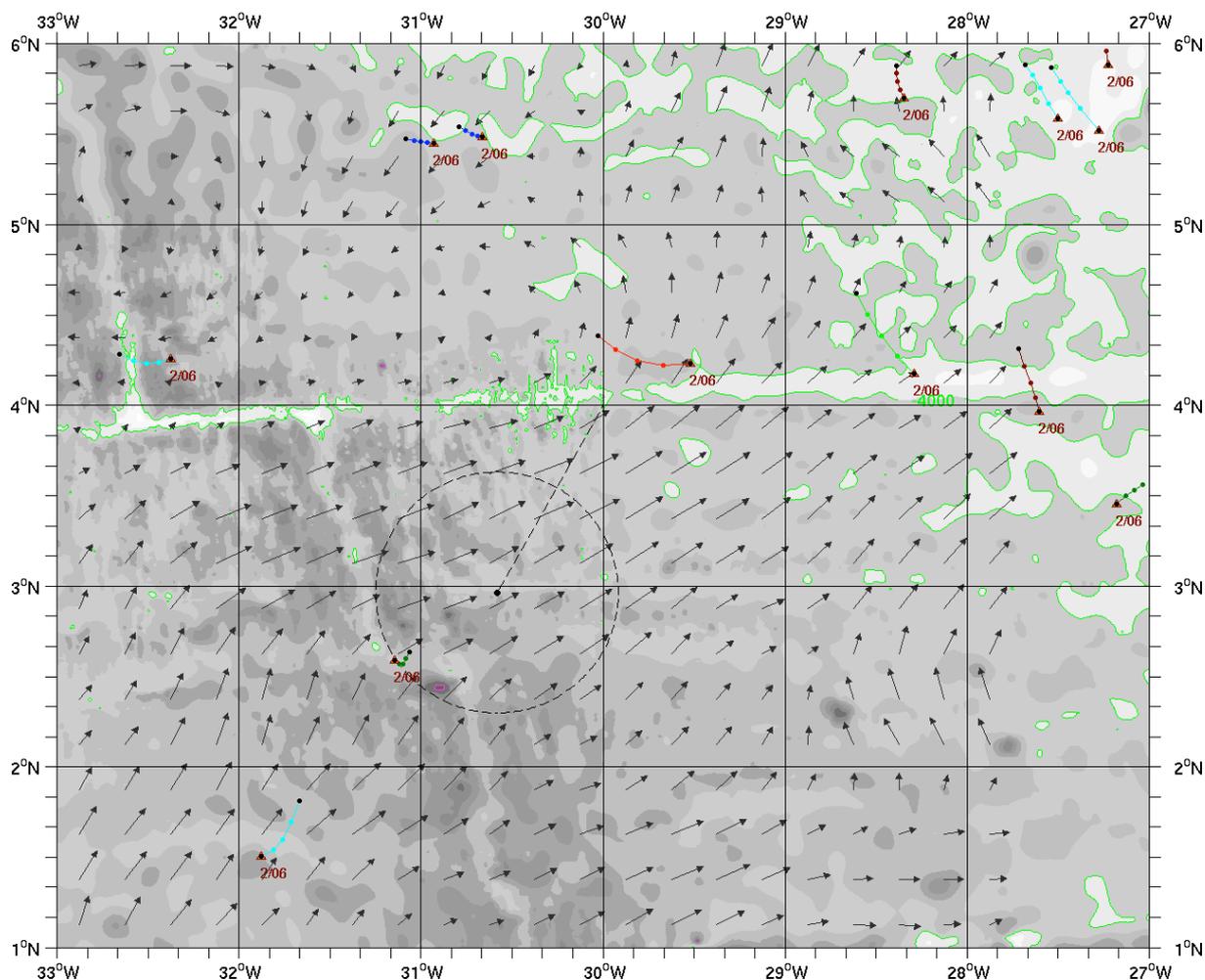


Figure 6: Le champ de courant géostrophique estimé le 2 juin 2009 vers 12h TU (mais varie peu sur la semaine du 1 au 7 juin 2009) par CLS. Autour de LKP, il vaut $0.2 + 0.1i$ m/s.

Afin de tester si ces courants géostrophiques sont compatibles avec les courants de dérive (calculés par la théorie EGG) nous allons utiliser les trajectoires de bouées pêcheurs et essayer de reconstruire leurs trajectoires à partir du 1 juin 2009 à 0h (avec la vitesse initiale en surface $\mathbf{u}_E + \mathbf{u}_p$ connue puisque mesurée grâce au mouvement de la bouée). Nous allons faire cet exercice pour la période du 1 juin 0h au 4 juin 0h (soit sur 3 fois 24h) pour garder un intervalle de temps suffisamment petit de façon à ne pas biaiser les courants géostrophiques (qui varient dans le temps) et ne pas avoir une trop grande influence du paramètre de dissipation.

La figure 7 montre les trajectoires intégrées en avant sans courant géostrophique (en jaune) et avec un courant géostrophique ajusté pour que la trajectoire (en rouge) coïncide au mieux avec la trajectoire expérimentale de la bouée correspondante. Cinq trajectoires de bouées dérivantes ont été modélisées : en partant du coin SO et dans le sens

des aiguilles d'une montre, on a les bouées 246, 31919, 27045, 29317 et 31526. La tension du vent est indiquée pour le 1 juin 2009 à 12h TU. Elle est forte mais a chuté notablement à partir du 3 juin. On constate qu'au nord de 4°N, prendre un courant géostrophique nul n'est pas une mauvaise approximation, même si évidemment ajuster la valeur du courant géostrophique permet une meilleure restitution de la trajectoire expérimentale. Par contre pour les deux bouées les plus au sud, il est important de considérer un courant géostrophique ($U_{\text{geos}} = 0.225 + 0.05i$ m/s pour la bouée 246, $U_{\text{geos}} = 0.20 + 0.05i$ m/s pour la bouée 31526) si l'on veut se rapprocher des trajectoires expérimentales. Les trajectoires qui partent de LKP et de la tâche de pollution ont été obtenues avec $U_{\text{geos}} = 0.15 + 0.05i$ m/s et $U_{\text{init}} = -0.10 + 0.05i$ m/s ($U_{\text{geos}} = 0.15 + 0.15i$ m/s et $U_{\text{init}} = -0.10 + 0.10i$ m/s resp^d). Ces deux trajectoires seront discutées plus loin.

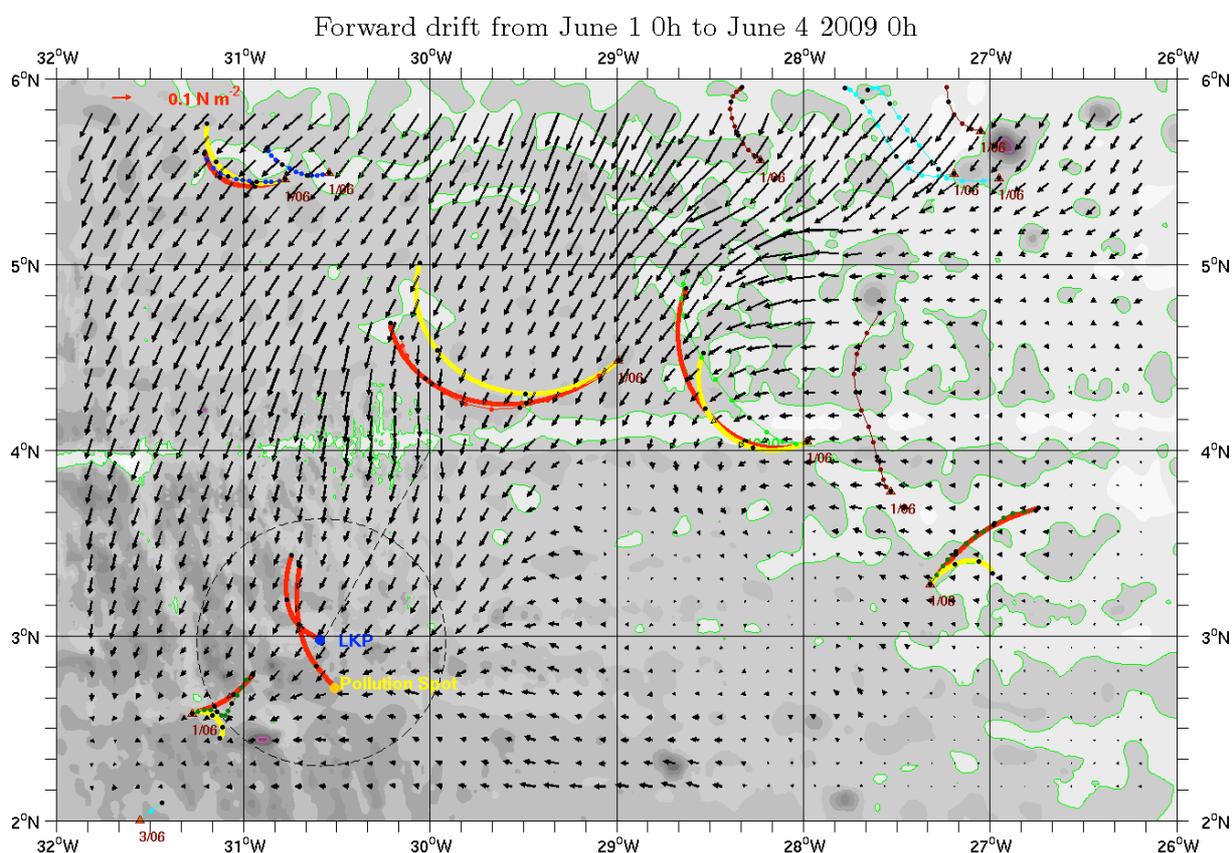


Figure 7 Trajectoires obtenues avec le modèle EGG et le vent Cersat HR. En jaune sans courant géostrophique (i.e. $U_{\text{geos}}=0$) et en rouge en ajustant U_{geos} de façon à ce que les trajectoires coïncident approximativement avec les trajectoires expérimentales ($U_{\text{geos}}=0.225+0.05i$, $-0.025-0.05i$, $-0.12-0.075i$, $0.05+0.15i$ and $0.20+0.05i$ pour les bouées 246, 31919, 27045, 29317 et 31526 respectivement). Les deux trajectoires qui partent de LKP et de la position de la tâche de pollution ont été obtenues avec $U_{\text{geos}}=0.15+0.05i$ et $U_{\text{init}}=-0.10+0.05i$ m/s ($U_{\text{geos}}=0.15+0.15i$ et $U_{\text{init}}=-0.10+0.10i$ m/s resp^d).

Il est satisfaisant de constater que le courant géostrophique (obtenu par ajustement sur les trajectoires) à prendre en compte pour la région au sud de 4°N est approximativement égal à celui donné par Surcouf (voir la figure 6). Par contre au nord de 4°N, la concordance est moins bonne, bien que la tendance à un mouvement cyclonique du courant géostrophique soit présente.

Une autre façon d'appréhender le courant géostrophique consiste à regarder les mesures ADCP sous la couche de mélange comme représentatives du courant géostrophique en surface (c'est approximatif évidemment). La figure 8 montre les courants ainsi mesurés vers 19, 59 et 99 m d'immersion. On retrouve à 59 m d'immersion (les flèches bleues), sous la couche bien mélangée, le mouvement cyclonique évoqué précédemment. Il y a un courant faible en 4°N, 30°W, mais dont la direction est consistante avec Surcouf et nos estimations de U_{geos} pour les deux bouées au sud.

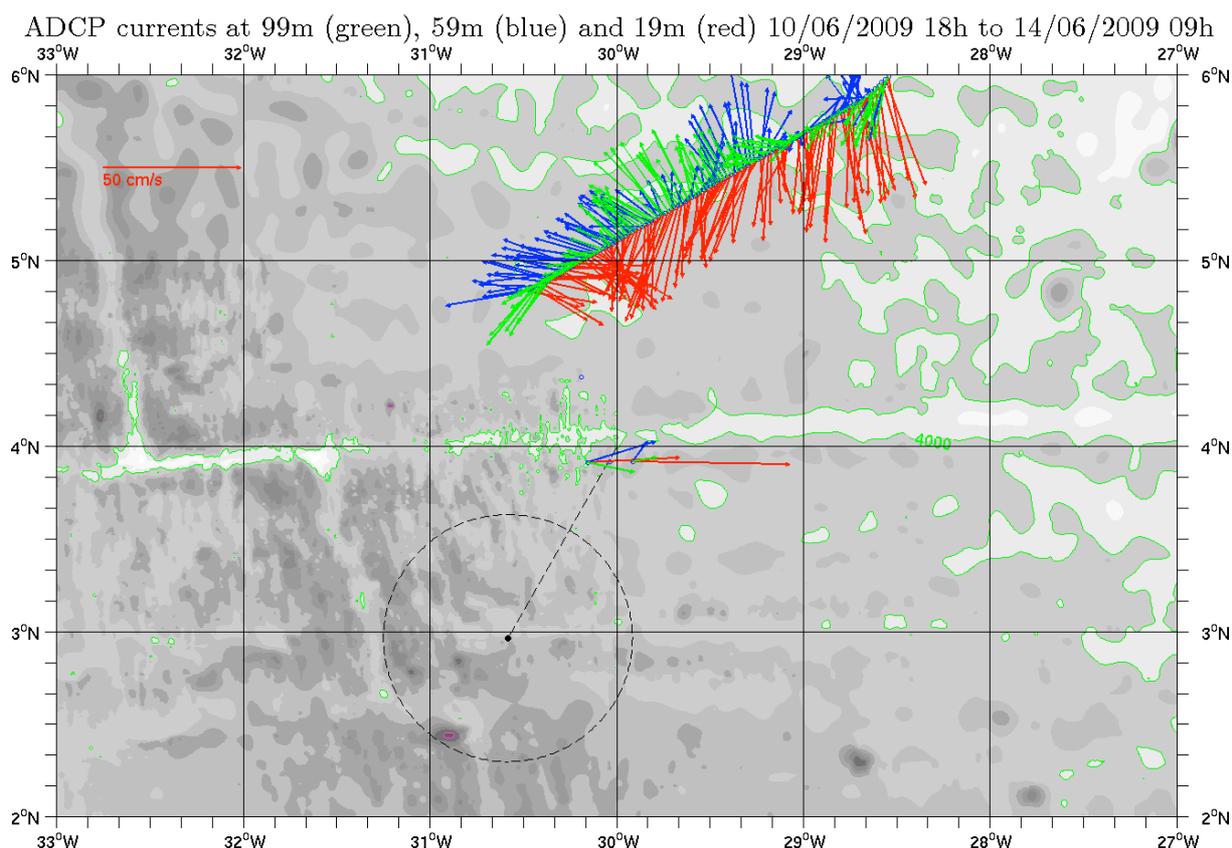


Figure 8 Mesures de courant ADCP qui montrent le cisaillement vertical important entre le courant sous la couche de mélange et le courant au cœur de celle-ci (l'épaisseur de la couche de mélange était d'environ 40 m).

Il convient néanmoins de remarquer que ces mesures ADCP ont été effectuées entre le 10 et le 14 juin 2009 et que les courants sous la couche de mélange ont pu changer en 10 jours (dans la couche de surface, ils ont changé drastiquement). Enfin, les mesures à 99m de profondeur, si en moyenne elles ressemblent à celles à 59m, en diffèrent notablement individuellement. Cela montre qu'il n'est pas évident d'obtenir le courant géostrophique (rappel: la géostrophie s'applique approximativement à partir de 2 à 3° de latitude). Mais on ne peut guère mettre en doute les mesures ADCP (ici à 19 m de profondeur) car elles concordent bien avec les vitesses des bouées et des flotteurs Argo (voir le rapport du groupe de dérive).

Tous les calculs précédents ont été effectués avec $R^{-1}=10$ jours. Avec un $R^{-1}=4$ jours, on obtient évidemment des trajectoires plus courtes (en intégrant en avant), avec un écart maximal après 3 jours inférieur à 20 km. Ce n'est pas négligeable, mais l'allure des trajectoires étant très similaires, on ne considèrera dorénavant que les simulations effectuées avec $R^{-1}=10$ jours (tout en gardant en tête 10 km comme ordre de grandeur de l'erreur après 3 jours, due à la non connaissance de R^{-1}).

Maintenant nous allons intégrer à rebours (entre le 4 juin 2009 0h et le 1 juin 2009 2h TU) et partir de la position retro calculée du sighting Ursulla le 4 juin à 0h TU (voir sur la figure 1) car comme expliqué dans le rapport du groupe de dérive, celle-ci est relativement bien estimée (que ce soit par l'AO ou par FVCOMW). Prenons donc la position et la vitesse correspondante pour Ursulla obtenue par l'AO : $Lat_init=3.445$, $Lon_init=-30.680$ et $U_init=0.12+0.23i$ m/s (le 4/06/2009 0h TU).

La figure 9 montre les trajectoires à rebours partant de la position Ursulla le 4 juin avec différentes vitesses géostrophiques (discuté plus bas), mais aussi à titre de comparaison, les trajectoires à rebours pour les 5 bouées déjà utilisées précédemment, en jaune si $U_geos = 0$, en rouge avec U_geos ajusté pour correspondre au mieux aux trajectoires expérimentales ($U_geos = 0.255-0.01i$ m/s pour la bouée 246, $U_geos = -0.04-0.06i$ m/s pour la bouée 31919, $U_geos = -0.20-0.20i$ m/s pour la bouée 27045, $U_geos = -0.15+0.10i$ m/s pour la bouée 29317, $U_geos = 0.13+0.05i$ m/s pour la bouée 31526). Il est rassurant de constater que les vitesses géostrophiques ainsi ajustées sont peu différentes de celles obtenues en intégrant en avant (mais, vu les

approximations faites par ce modèle et l'hypothèse implicite que le champ de courant géostrophique est stationnaire sur 3 jours, il est normal qu'il y ait des écarts).

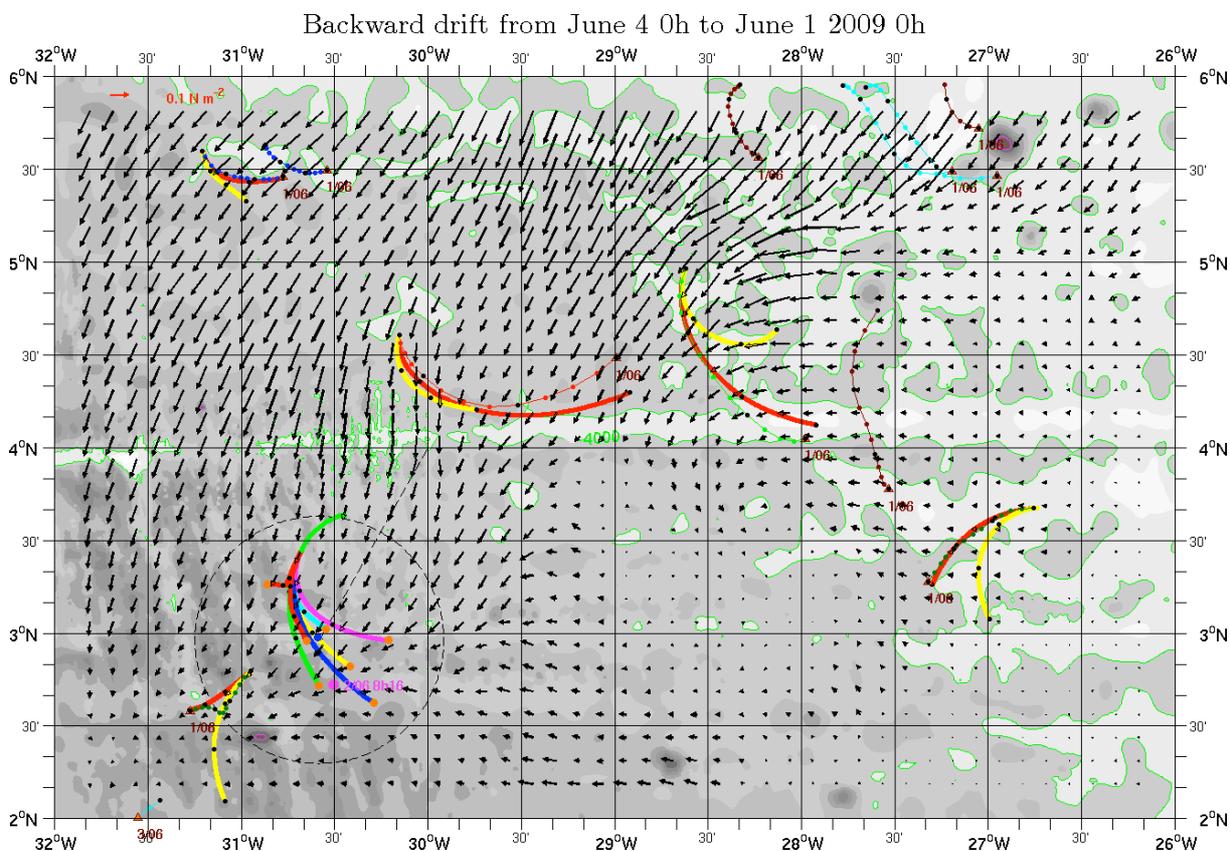


Figure 9 Trajectoires obtenues avec le modèle EGG, mais en intégrant en arrière (dans le temps). En jaune sans couant géostrophique (i.e. $U_{\text{geos}}=0$). En rouge, en ajustant U_{geos} de façon à ce que les trajectoires coïncident approximativement avec les trajectoires des bouées ($U_{\text{geos}}= 0.255-0.01i, -0.04-0.06i, -0.20-0.20i, -0.15+0.10i, 0.13+0.05i$ pour les bouées 246, 31919, 27045, 29317 et 31526 resp¹). Les trajectoires au centre du cercle ACARS ont été obtenues avec différentes valeurs de U_{geos} et la vitesse initiale le 4 juin 2009 0h TU de la trajectoire reconstituée par AO à partir de la position Ursulla le 5 juin 2009 16h TU (la courbe verte au nord de LKP). Ces différentes trajectoires sont décrites plus en détail figure 10.

Passons à la discussion des trajectoires rétro calculées à partir de la position Ursulla le 4 juin 0h TU (elle-même obtenue par intégration dans le champ estimé par AO entre le 5 juin 16h et le 4 juin 0h). La figure 10 présente un agrandissement de la zone autour de LKP donnée sur la figure précédente.

En trait plein, les couleurs suivantes correspondent aux différentes vitesses géostrophiques utilisées, à savoir :

Jaune	$U_{\text{geos}} = 0.00 + 0.00i$ m/s
Cyan	$U_{\text{geos}} = + 0.10 + 0.00i$ m/s
Vert	$U_{\text{geos}} = + 0.00 + 0.08i$ m/s
Magenta	$U_{\text{geos}} = + 0.00 - 0.10i$ m/s
Bleu	$U_{\text{geos}} = - 0.10 + 0.00i$ m/s
Rouge	$U_{\text{geos}} = + 0.10 + 0.05i$ m/s (la traj va vers LKP)
Rouge	$U_{\text{geos}} = + 0.25 + 0.05i$ m/s (la traj remonte vers le NO)

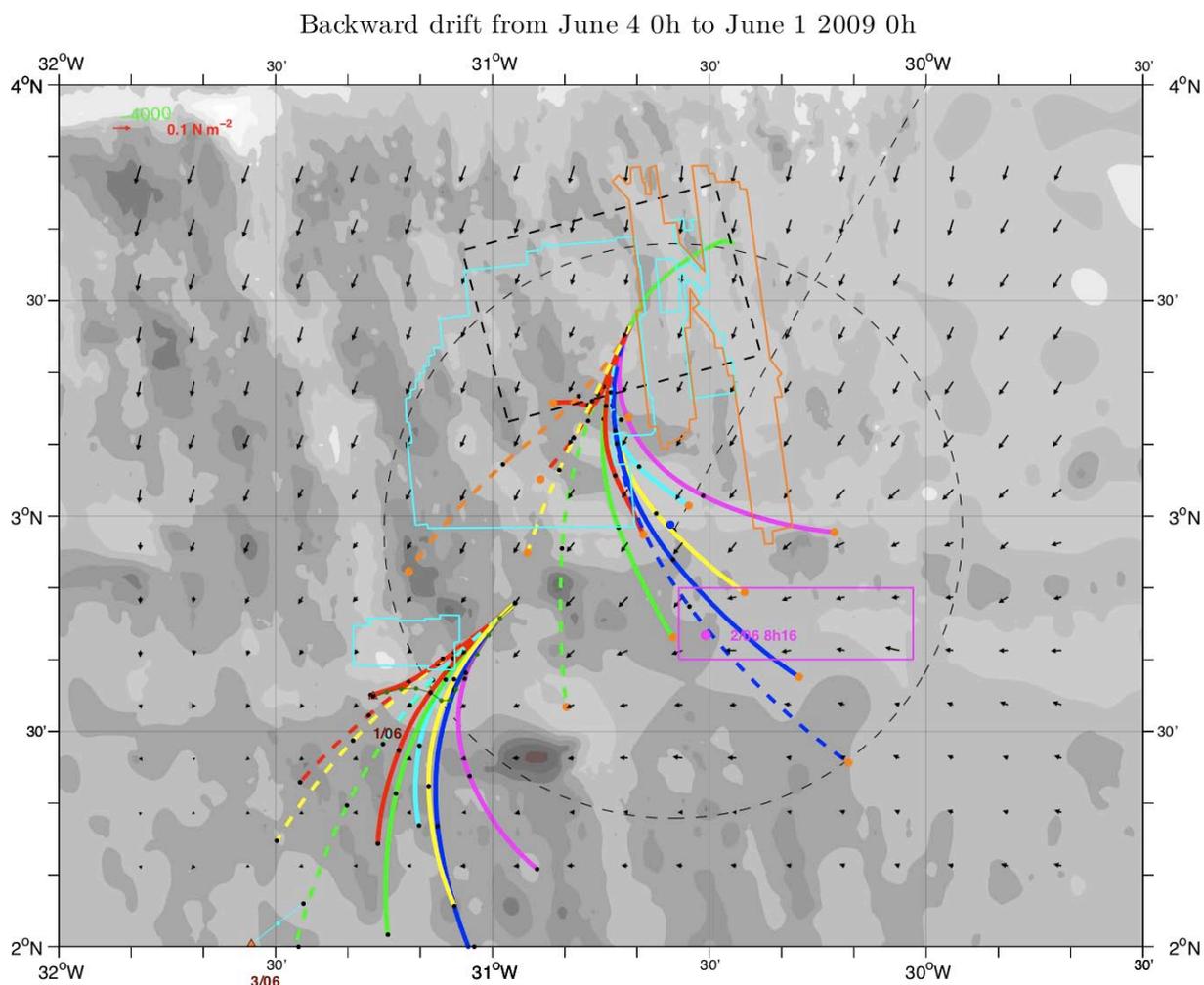


Figure 10 Trajectoires obtenues avec le modèle EGG, en intégrant en arrière à partir du 4 juin 2009 0h TU. En traits pleins, les couleurs jaune, cyan, vert, magenta, bleu et rouge correspondent à $U_{\text{geos}} = 0.00 + 0.00i$, $0.10 + 0.00i$, $0.00 + 0.08i$, $0.00 - 0.10i$, $- 0.10 + 0.00i$, $0.10 + 0.05i$ m/s resp^t. La courbe rouge qui remonte vers le NO pour ‘Ursulla’ correspond à $U_{\text{geos}} = 0.25 + 0.05i$ m/s. De même la courbe rouge qui permet une concordance approchée avec la trajectoire de la bouée 246 correspond à $U_{\text{geos}} = 0.255 - 0.01i$ m/s. En traits tiretés, les couleurs jaune, cyan, vert, bleu et rouge correspondent à $U_{\text{geos}} = 0.15 + 0.15i$, $0.20 + 0.0i$, $0.0 + 0.20i$, $- 0.20 + 0.0i$ et $0.20 + 0.10i$ m/s resp^t. La courbe orange tiretée correspond à $U_{\text{geos}} = 0.20 + 0.25i$ m/s.

En fait, un certain nombre de U_{geos} ne semblent pas être à considérer. En particulier les vitesses géostrophiques dont une

composante est négative (avec lesquelles on obtient les courbes bleu et magenta) car l'estimation de U_{geos} par Surcouf ou par ajustement sur les trajectoires bouées (ou même par comparaison avec les vitesses ADCP à 59 m) donne un U_{geos} vers le NE.

Les courbes **cyan** ($U_{\text{geos}} = 0.10+0.00i$ m/s) et **rouge** ($U_{\text{geos}} = 0.10+0.05i$ m/s) convergent vers ou près de LKP, la courbe **verte** vers la tâche de pollution, et les courbes correspondantes pour la bouée 246 coïncident bien avec la trajectoire de cette bouée pour la journée du 3 juin 2009, mais s'en écartent très clairement les 1 et 2 juin 2009. Si l'on veut réconcilier la trajectoire expérimentale de la bouée 246 entre le 4 juin et le 1 juin avec celle obtenue avec le modèle EGG, il faut utiliser un $U_{\text{geos}} = 0.255-0.01i$ m/s (en intégrant en avant on avait plutôt $0.225+0.05i$, peu différent). $U_{\text{geos}} = 0.25+0.05i$, appliqué à Ursulla, donne la trajectoire rétro calculée rouge qui ressemble beaucoup à la trajectoire obtenue par FVCOMW (voir figure 1). Pour autant, et comme on l'a dit en introduction, le rectangle initial proposé pour les recherches ayant été couvert nous sommes amenés à penser que cette solution ne convient pas. Il paraît d'ailleurs peu probable qu'il faille prendre un courant géostrophique aussi important au nord de 3°N (vers 3.25°N) compte tenu de ce qu'on a déjà expliqué à propos de la structure spatiale de U_{geos} . Mais, qui sait ? C'est pourquoi sur la figure 10, les courbes pointillées ont été obtenues avec les courants géostrophiques plus forts suivants :

Jaune	$U_{\text{geos}} = 0.15 + 0.15i$ m/s
Cyan	$U_{\text{geos}} = + 0.20 + 0.00i$ m/s
Vert	$U_{\text{geos}} = + 0.00 + 0.20i$ m/s
Rouge	$U_{\text{geos}} = + 0.20 + 0.10i$ m/s
Bleu	$U_{\text{geos}} = - 0.20 + 0.00i$ m/s

La courbe bleue pointillée confirme bien qu'il ne faut pas considérer de U_{geos} vers l'Ouest. La courbe verte pointillée semble devoir être exclue grâce à la comparaison avec la bouée 246 (voir aussi partie III qui suit). Donc, seules les courbes jaune et rouge pointillées resteraient à considérer (mais compte tenu de la couverture AUV, la courbe rouge pointillée doit aussi être exclue). On peut même obtenir une trajectoire qui atteindrait la montagne située au Nord de la zone de l'Emeraude (avec $U_{\text{geos}} = 0.20+0.25i$ m/s) : la trajectoire orange pointillée.

III Compatibilité des solutions proposées avec les trajectoires bouées

Les trajectoires que nous venons d'obtenir sont-elles compatibles avec les trajectoires des bouées, c'est à dire peut-on faire une AO de l'ensemble des trajectoires bouées auxquelles on aurait ajouté une trajectoire synthétisée, sans que l'analyse ne montre une impossibilité, ou une augmentation de l'erreur statistique d'analyse?

Nous avons reconstruit ainsi neuf champs de courant différents en ajoutant aux données des bouées et flotteurs, une des neuf trajectoires obtenues avec le modèle EGG, entre le 1 juin 2009 0h et le 4 juin 0h TU (la verte, la cyan, la rouge, la magenta, la jaune, la bleue, la verte pointillée, la jaune pointillée et la orange pointillée). Disons tout de suite que les 5 premiers champs au moins (obtenus par AO) sont compatibles avec les données bouées et flotteurs puisque l'écart entre les trajectoires modélisées et les trajectoires réelles est toujours inférieur à 1.5 km entre le 1 juin et le 6 juin 2009 (voir la figure 11). Les champs obtenus avec les trajectoires fictives vert pointillé ou jaune pointillé ou la trajectoire fictive orange pointillé, sont moins bien compatibles, avec un écart atteignant 2 km ou 2.5 km au maximum.

La courbe noire pointillée sur la figure 11 montre l'écart obtenu avec le champ estimé sans ajout d'une trajectoire fictive et retenu dans le rapport du groupe de dérive. Ce dernier champ présente une compatibilité légèrement meilleure que les champs précédents, mais cela est dû au fait qu'il a moins de données et donc plus de liberté pour s'ajuster à celles-ci. Mais statistiquement la différence n'est pas significative avec les 5 champs mentionnés plus haut.

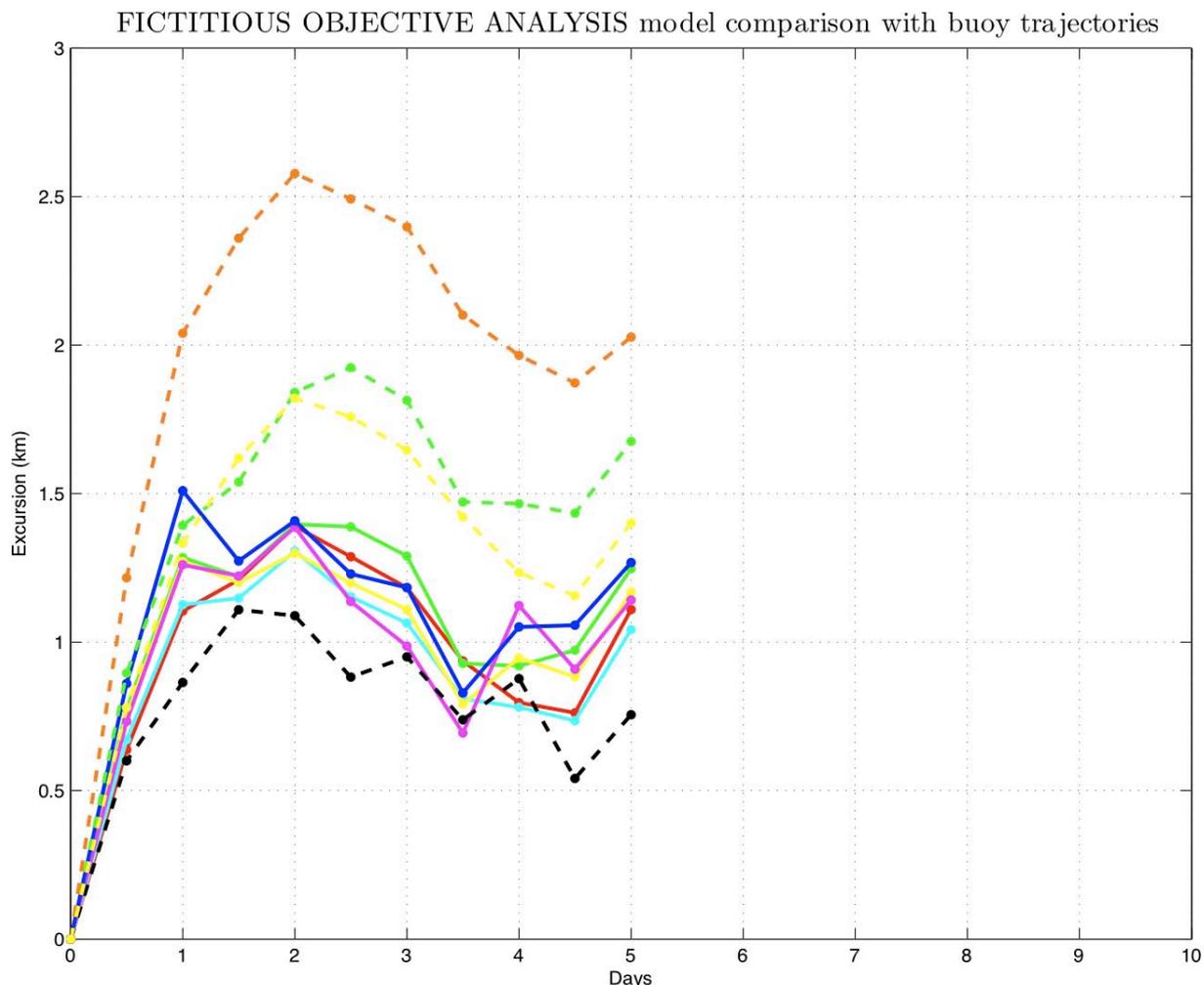


Figure 11 Ecart moyen entre les trajectoires reconstruites avec l'AO (en intégrant dans le champ de courants estimé par AO) et les trajectoires réelles des 4 bouées considérées (246, 27045, 42 et 92, voir rapport du groupe de dérive). Les codes de couleurs sont les mêmes que sur la figure 10. Manifestement les deux courbes d'écarts correspondant aux champs de courant obtenus par AO et prenant en compte soit la trajectoire fictive verte pointillée, soit la trajectoire fictive jaune pointillée, soit encore la trajectoire orange pointillée, sont moins bonnes. La courbe noire pointillée correspond à l'AO originale présentée dans le rapport du groupe de dérive (qui prend en compte uniquement les trajectoires réelles des bouées).

Afin de bien se rendre compte de l'effet de la prise en compte des trajectoires fictives (une seule pour chaque champ de courants), les figures suivantes (12, 12 bis et 12 ter) montrent la structure des courants ainsi obtenus avec les trajectoires cyan, verte et orange pointillé. La structure du champ de courants sans trajectoire fictive (tel que présenté dans le rapport du groupe de dérive) est présenté figure 13.

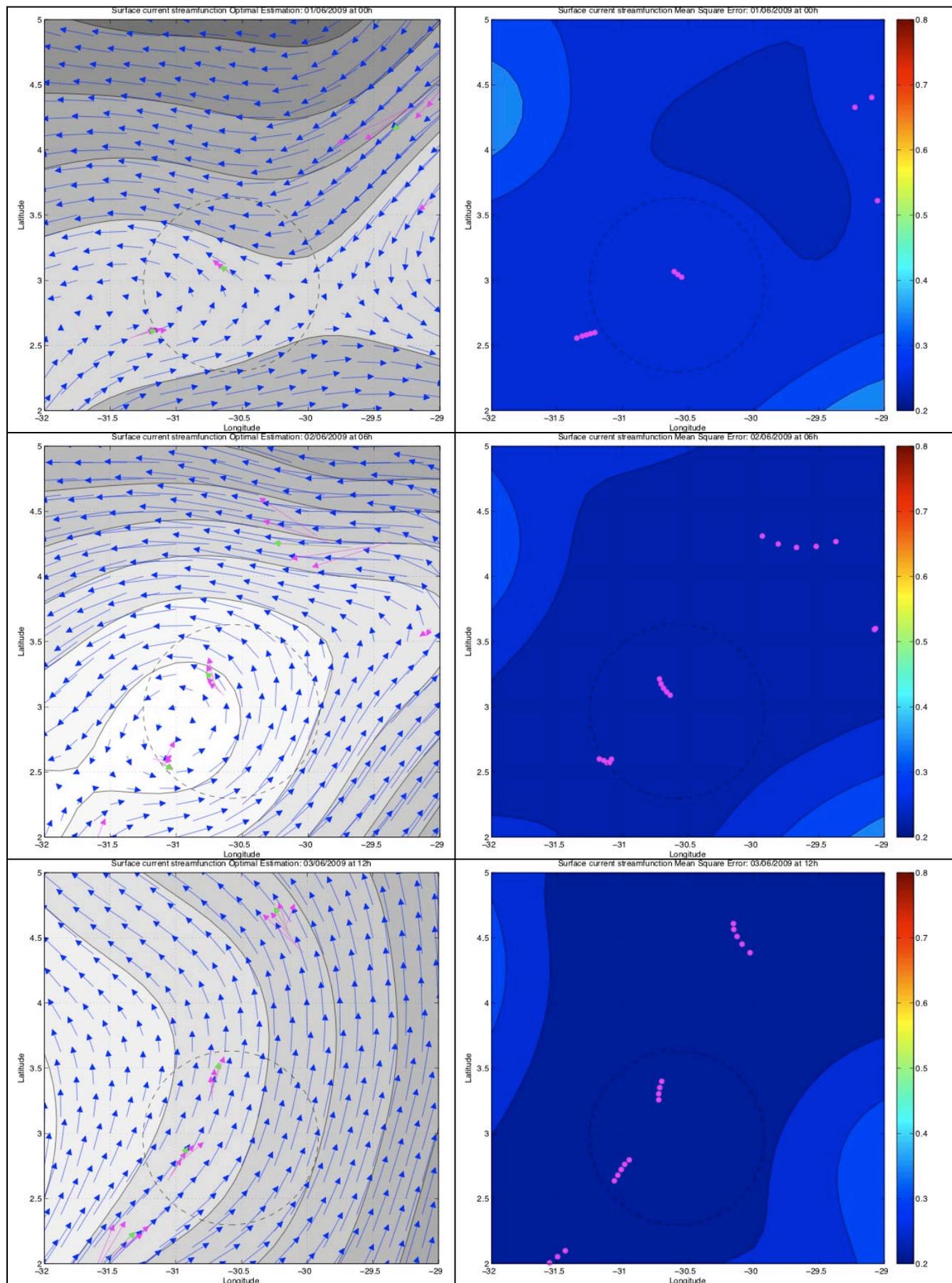


Figure 12 Champ de courants les 1 juin 0h, 2 juin 6h et 3 juin 12h TU, obtenus avec prise en compte de la trajectoire fictive cyan.

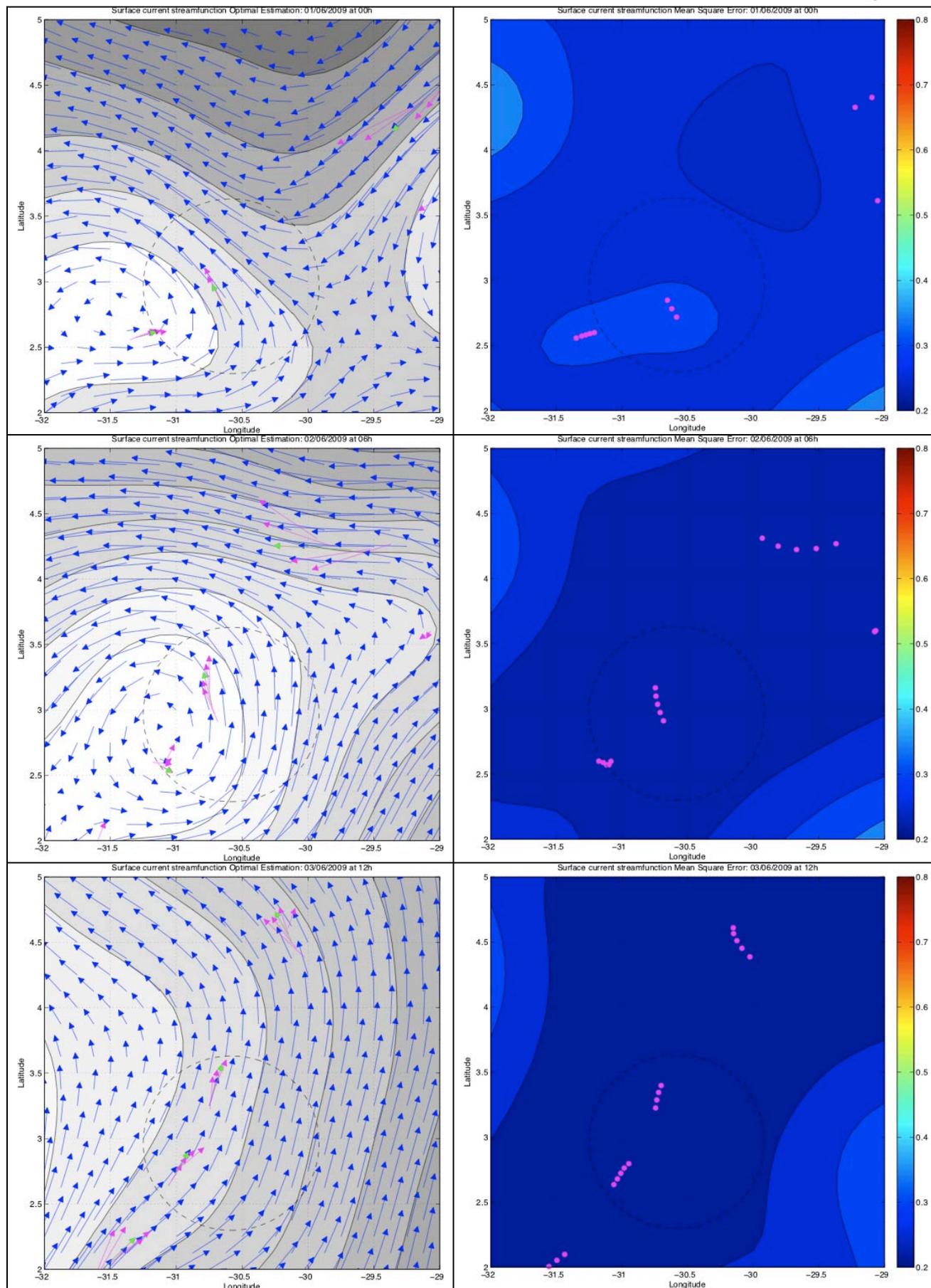


Figure 12 bis Champ de courants les 1 juin 0h, 2 juin 6h et 3 juin 12h TU, obtenus avec prise en compte de la trajectoire fictive verte.

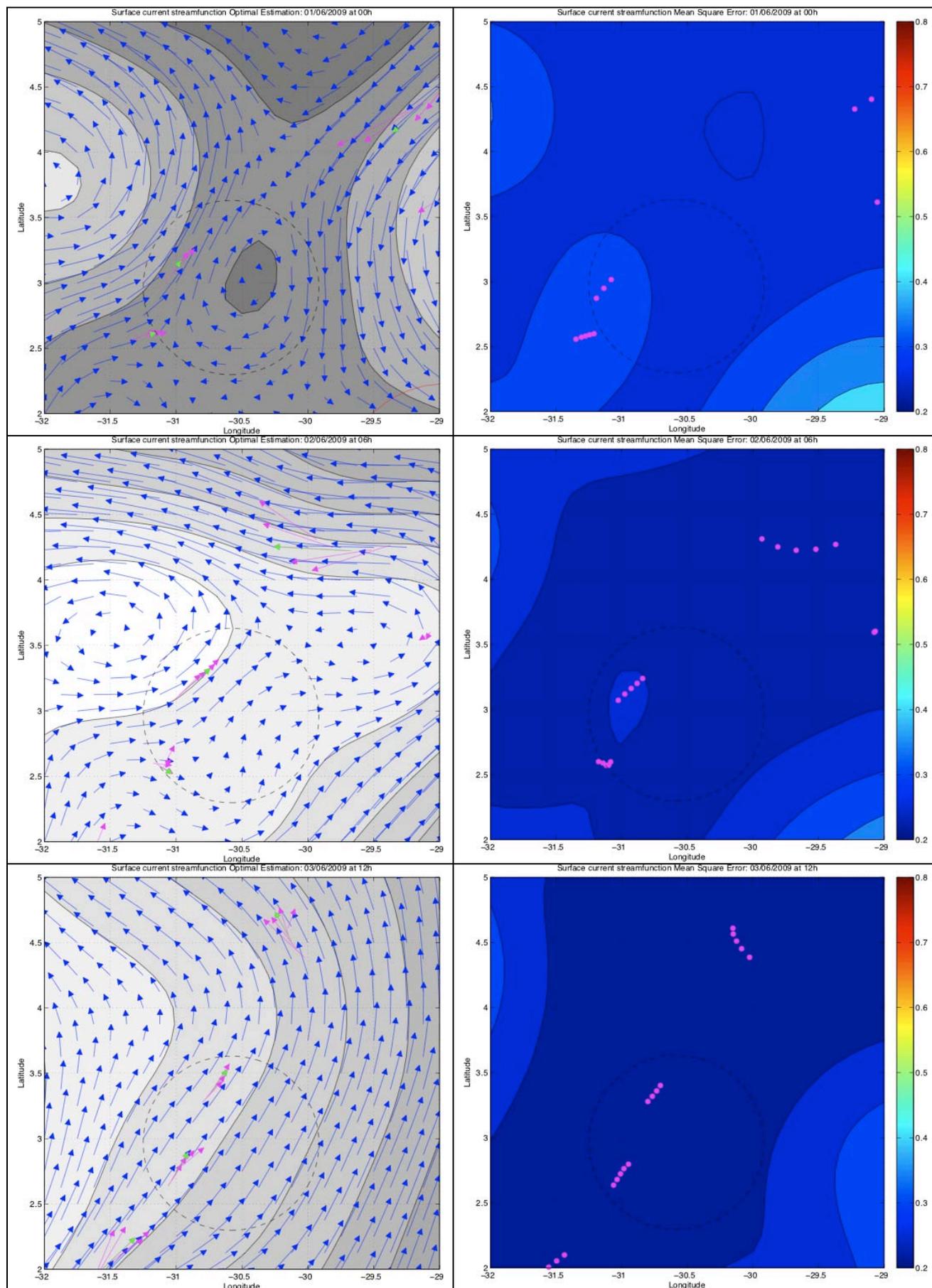


Figure 12 ter Champ de courants les 1 juin 0h, 2 juin 6h et 3 juin 12h TU, obtenus avec prise en compte de la trajectoire fictive orange pointillé.

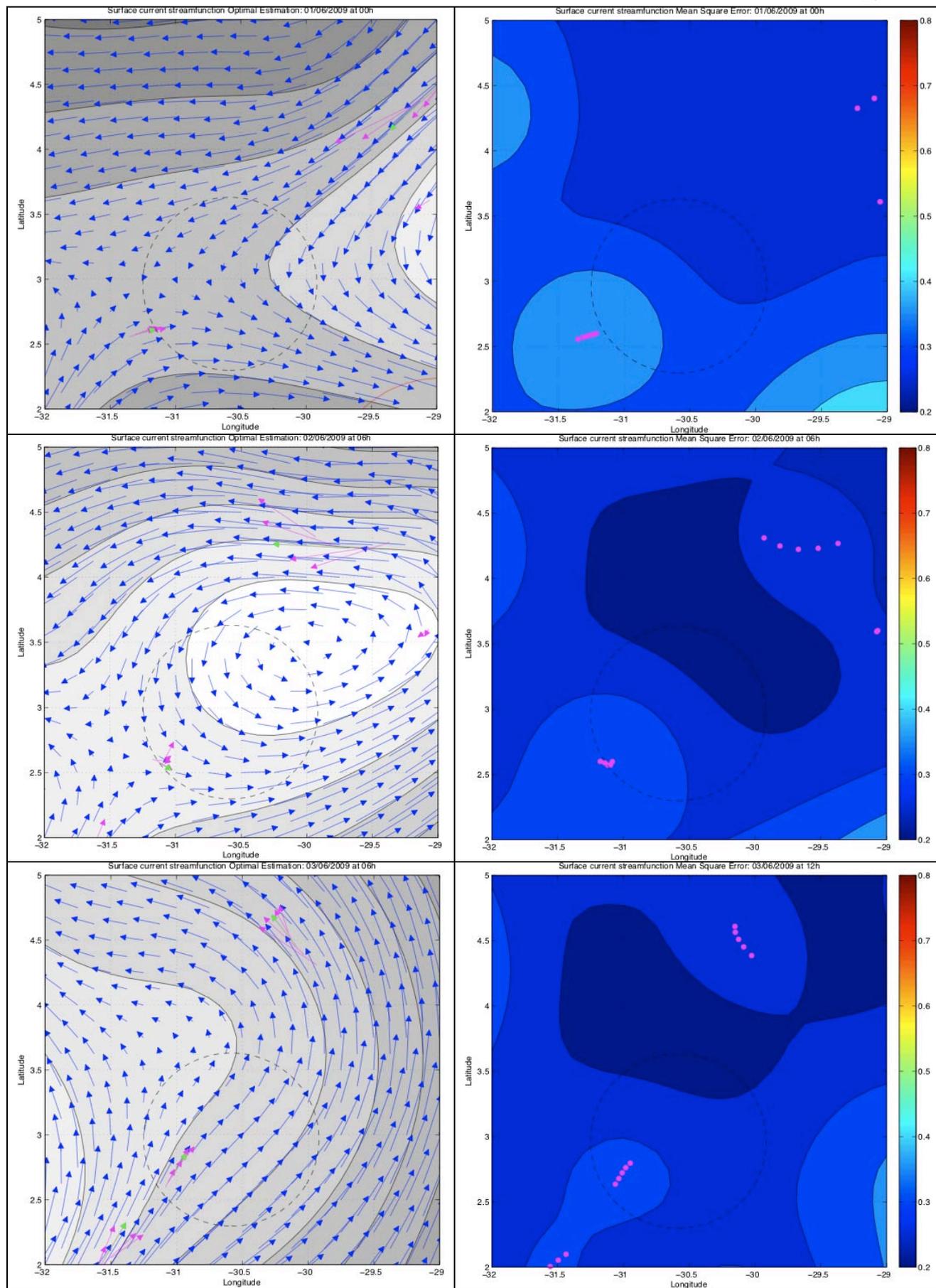


Figure 13 Champ de courants les 1 juin 0h, 2 juin 6h et 3 juin 12h TU, obtenus originellement (voir rapport du groupe de dérive).

On constate donc que **plusieurs** champs de courants sont compatibles avec les données des bouées. En particulier le champ de courant présenté figure 12 et associé à la trajectoire fictive **cyan** (obtenue avec le modèle EGG, et dont le point de départ est légèrement au NE de LKP le 1 juin 2009 à 2h TU) est un candidat tout aussi valable que le champ estimé avec les seules trajectoires des bouées. On peut même penser que ce champ est plus réaliste car intégrant une trajectoire, fictive certes, mais calculée par les **équations de la physique**. A contrario, le champ original proposé dans le rapport du groupe de dérive est bien compatible avec les données, mais comme ces données sont éloignées de la zone qui nous intéresse (en particulier les 1 et 2 juin 2009), ce champ est de fait **sous déterminé** (ou sous contraint si l'on préfère) par les données éparses en notre possession.

Il n'est du coup peut-être pas trop étonnant que rien n'ait été trouvé lors de la phase 3 des recherches en mer puisque la région autour de LKP (à moins de 15 milles de LKP) n'a pas été couverte.

Un autre champ compatible est celui associé à la trajectoire **verte** (dont le point de départ correspond approximativement à la position de la tâche de pollution). Si le point d'impact de l'avion se trouve près (disons à quelques km) de la position de cette tâche de pollution, cela implique un courant vers le nord assez fort le 1 juin et perpendiculaire au courant de la bouée 246 (voir la figure 12 bis). Mais c'est possible.

Par contre le champ de courant associé à la trajectoire fictive **jaune** tiritée (dont le point de départ le 1 juin 2009 est assez proche des positions de l'Emeraude) semble devoir être écarté car induisant des structures du champ de courant peu convaincante (la figure donnant les écarts avec les trajectoires réelles va dans le même sens).

Ce qui est étonnant c'est la convergence (grossière certes) des différents modèles dans le rectangle (ou près de celui-ci) donné dans le rapport du groupe de dérive. Il est possible évidemment que les couvertures acoustiques de la phase 3 n'aient pas « vu » les restes de l'avion dans ce rectangle ni d'ailleurs dans la zone plus grande couverte alors (voir figures 1 ou 10), mais on peut aussi suspecter que toutes les estimations données par les modèles retenus soient erronées. Rappelons à cet égard qu'un seul des modèles « assimile » les données de courant mais encore incomplètement (FVCOMW). Peut-être certains modèles numériques ont-ils été écarté par notre groupe trop vite : en particulier le modèle de la Marine américaine (NCOM), qui proposait un point d'impact au NE de LKP (voir figure 1).

Ceci étant, les courbes « cycloïdales » reconstituées par le modèle EGG sont capables de reproduire relativement bien les mouvements des bouées sur 3 jours (à condition d'avoir une bonne estimation du U_{geos} , ce qui n'est pas toujours acquis) et permettent d'obtenir des champs de courants réalistes qui indiquent un **faisceau de points d'impact possibles** dans un cercle centré sur LKP d'environ 20 milles de rayon (soit une surface à couvrir de **3000 km²** puisque une partie d'environ 1000 km² a déjà été couverte lors de la phase 3).

La tâche de pollution est à l'intérieur de ce cercle et doit être couverte par des AUV pour lever tout doute: le SAR de l'IFREMER avait couvert la zone pendant la phase II (document BEA2009-phaseII-SAR.pdf) mais sans rien détecter.

L'hypothèse faite est que l'avion est au dessous et que le kérosène relâché serait remonté à la surface où le vent l'aurait alors entraîné vers le sud (aspect en accent circonflexe dû à une saute de vent, voir le mail de Ian MacDonald de FSU). Mais on ne connaît pas bien la traînée du vent sur un film de kérosène à la surface de la mer.

La tâche de pollution aurait-elle été entraînée aussi par le courant de surface entre le 1 juin 2h et le 2 juin 8h? C'est peu probable car si l'on prend le champ de courants associé à la trajectoire **cyan**, cela donnerait un point d'impact à 25 milles au sud de LKP (voir figure 14) qui correspondrait alors à peu près au champ de courants associé à la trajectoire verte pointillée (pour que les débris et corps soient retrouvés vers Ursulla le 5 juin en fin de journée) qui est rejeté par le test sur les écarts avec les trajectoires et impliquerait des courants vers le nord forts et perpendiculaires à ceux de la bouée 246.

Avec le champ de courant estimé uniquement avec les trajectoires réelles (donné dans le rapport de groupe de dérive), on trouve bien un point d'impact possible sous la trace de l'avion, une minute environ avant son passage à LKP, mais cela supposerait que les réservoirs ou une partie importante de l'avion soit tombée là, alors que le reste se serait crashé à 30 à 40 milles de distance. Cela est déraisonnable compte tenu des expertises du BEA qui indiquent que l'avion a impacté entier la surface de la mer.

Ainsi, seul le champ de courant associé à la trajectoire fictive **verte** serait compatible avec un crash à la position de la tâche de pollution.

Sur la figure 3 qui montre la concentration en chlorophylle le 2 juin vers 12h, on croit discerner une langue de forte concentration orientée SE NO ou peut-être un mouvement anticyclonique. C'est assez proche des champs de courant associés aux trajectoires cyan ou verte (voir figures 12 et 12 bis panneaux centraux), mais pas des deux autres

champs présentés figures 12 ter ou 13. Cela tendrait à confirmer un crash près de LKP ou de la tâche de pollution.

On peut se demander comment il se fait que la reconstruction par l'AO du champ de courants du modèle PSY2V3 ait été satisfaisante, si le champ des courants est largement sous contraint par les données, comme on vient de le montrer. Si on faisait le même exercice avec plusieurs champs de courants issus de modèles numériques différents ou du même modèle mais avec des forçages différents, il est vraisemblable qu'on obtiendrait un ensemble de reconstructions plus ou moins satisfaisantes. Une seule reconstruction n'est pas significative.

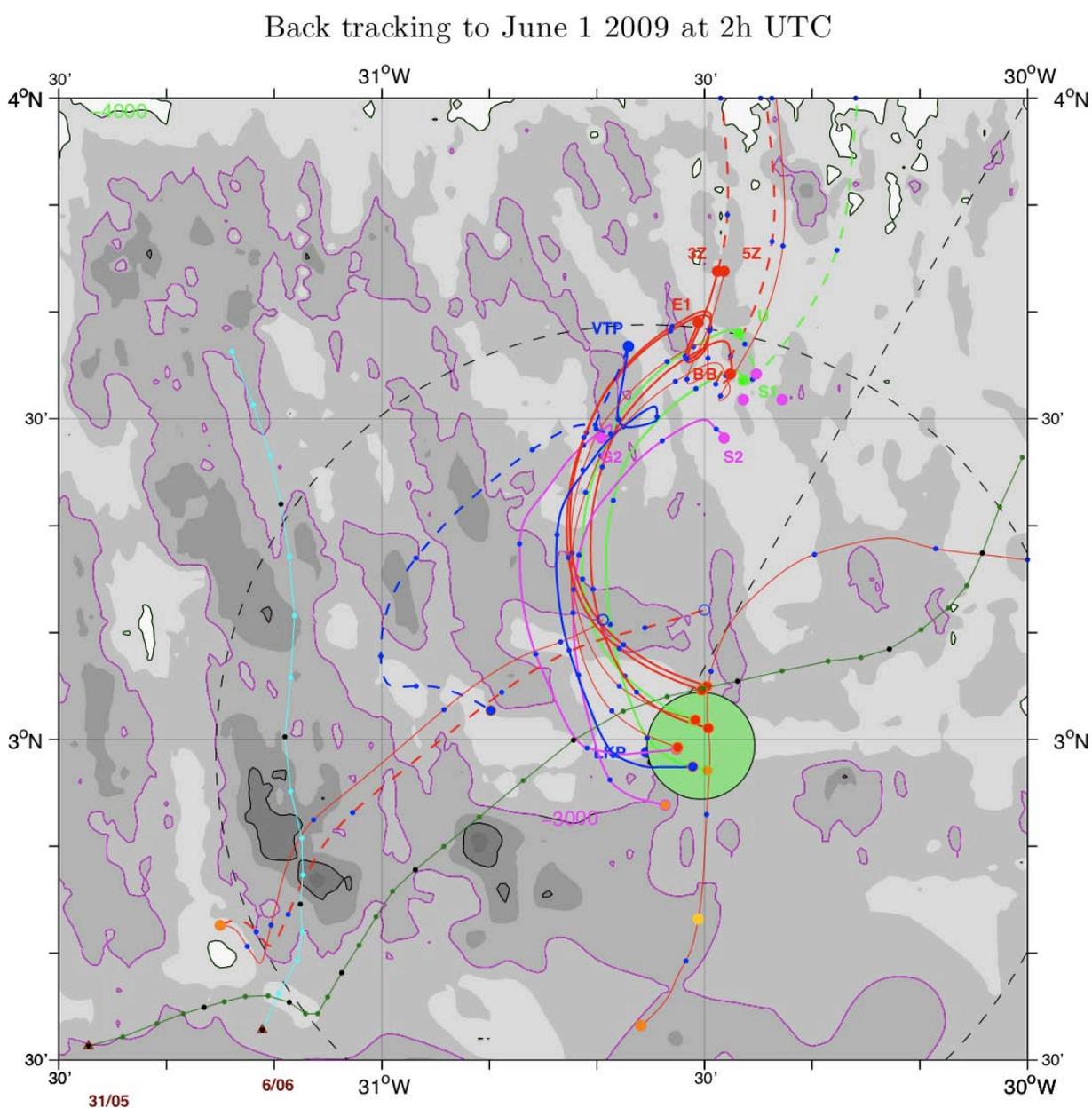


Figure 14 Trajectoires rétro calculées dans le champ de courants associé à la trajectoire fictive cyan

IV Conclusions

Nous avons montré qu'il existe **plusieurs** champs de courant compatibles avec les bouées pêcheurs qui incluent des trajectoires partant soit de LKP soit de la tâche de pollution (soit même, plus généralement de tout point compris à l'intérieur d'un cercle de 20 milles centré en LKP) et rejoignant le 4 juin les positions retro calculées (par exemple par l'AO ou FVCOMW) des corps et débris.

En conséquence, on ne peut plus accorder un **crédit** particulier aux courants interpolés par analyse objective des données seules les 1 et 2 juin. Les courants impliqués par la théorie EGG, au maximum de l'ordre de la trentaine de cm/s vers le nord nord-ouest, sont sans doute plus réalistes.

Dans le rapport du groupe de dérive, nous avons obtenu **une solution au problème** de détermination du point d'impact de l'avion, et **non pas forcément la solution**. Après les recherches infructueuses au cours de la phase 3, et sous réserve de la confirmation par les experts concernés de la qualité de la couverture acoustique réalisée, il faut admettre que la solution au problème n'est probablement pas à chercher dans le rectangle défini par le groupe de dérive.

La région autour de LKP et incluant la tâche de pollution est une deuxième zone potentielle où pourrait se trouver l'avion.

A titre d'illustration, la figure 15 en appendice montre la surface couverte par un cercle de 20 milles de rayon et centré en LKP, incluant la tâche de pollution.

Références

Gill, A. (1982) Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press. 662 p.

Gonella J. (1971) A local study of inertial oscillations in the upper layers of the océan. Deep-Sea Research, 18, 776-788.

Pollard, R. and R. Millard (1970) Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations. Deep-Sea Research 17, 813-821.

Appendices

Message de Ian MacDonald (Florida State University)

Sujet :Re: SAR image at Airbus Rio-Paris wreckage site
De :Ian MacDonald <imacdonald@fsu.edu>
Date :Tue, 14 Sep 2010 02:29:02 -0400

I read the section of the report on the Airbus crash with interest. The SAR image shown looks to my eye like a specular reflector (slick) caused by floating oil or similar surfactant. False targets in SAR can be caused by areas of low wind, but the relatively uniform background return suggests a wind field throughout the image.

The other feature of the anomaly is its chevron shape--we see this in natural seeps where the oil is reaching the surface in a stream that rises from depth over a time of ~24 hours. When there is a change in wind direction during the release, the oil signature on the surface will curve or even make sharp angles depending on the degree of wind change.

As I understand the report, the investigators were unwilling to attribute the slick to jet fuel because its location was too far from the probable flight path. This assumes that the fuel would have all been released on impact. I suppose it is also possible that some of the fuel tanks sank without discharging their fuel. This would then have spilled out over time while the tanks sank and after they reached the bottom. In water depths of >5000m an offset of several kilometers from the bottom position to the surface slick would be entirely possible. With information about the mid-water currents, it might be possible to back-calculate a offset direction.

This is rather speculative and I'm not sure that it would produce results that would be better than the very rigorous work already being done--but it might be worth thinking about.

I hope this helps.
Best wishes, Ian

Surface couverte par un cercle de rayon 20 milles centré en LKP

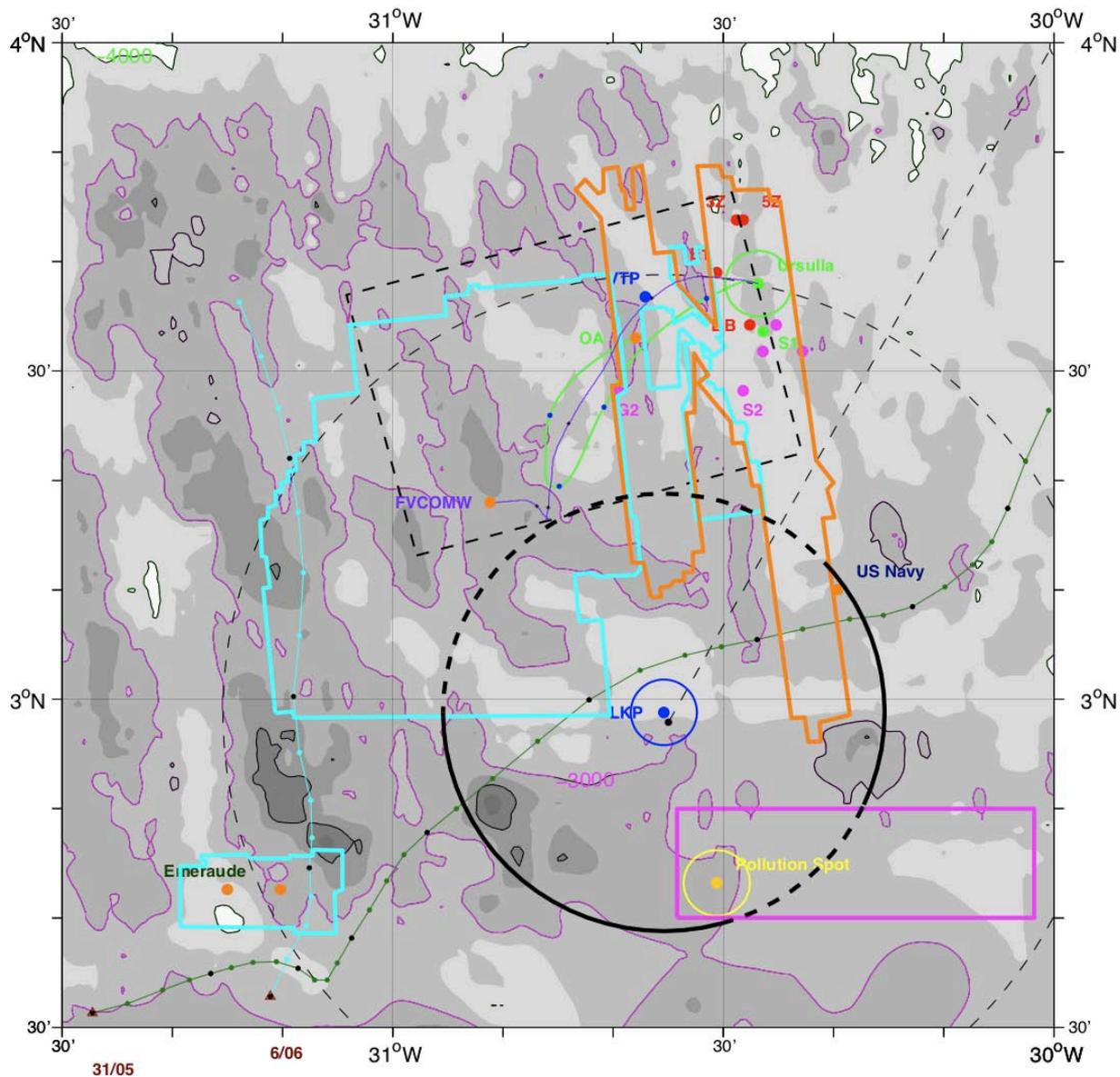


Figure 15 La surface couverte par le cercle noir gras centré en LKP et de rayon 20 milles nautiques est de 4300 km². Si l'on exclut les parties couvertes par les AUV et le sonar Orion, il reste environ 3000 km². Si on exclut encore la partie couverte par le SAR de l'IFREMER, il resterait finalement à peu près 2500 km².