

TITRE DU PROJET EGYPT

Projet commencé en (2005) – Durée du projet soutenu par LEFE et le GMMC (3 ans)

Nom des porteurs du projet
Laurent Mortier (LM) LOCEAN/ENSTA
Isabelle Taupier-Letage (ITL) LOPB

Liste des laboratoires impliqués et personnes responsables

LOCEAN UMR 7159 : Laurent Mortier

LMD UMR 8539 : Alexandre Stegner

UME(ENSTA) : Karine Béranger

LOPB UMR 6535 : Isabelle Taupier-Letage

AUDO et NIOF (Egypte) : Mohamed Said, Ahmed El Gindy

INSTM (Tunisie) : Cherif Sammari

OGS (Italie) : Pierre-Marie Poulain

HIMR (Syrie) : Najwa Hamad

Un bilan en ETP évalué avec les bases comptables de LEFE est donné ci-après

Résumé

L'objectif d'EGYPT est une meilleure description de la circulation générale et de sa variabilité dans le sud de la Méditerranée orientale dans le but de préciser le rôle de la topographie quant à la dynamique du courant de bord et des tourbillons résidants ou résultants des instabilités du courant. EGYPT a entrepris un recueil intensif de données in-situ, bouées, profileurs, mouillages courantométriques, qui sont analysées conjointement avec un OGCM et des produits MERCATOR. Les premiers résultats de l'analyse globale du jeu de données confirment clairement les hypothèses d'une circulation de l'eau atlantique le long des côtes Libyenne, avec un transport vers le large par des tourbillons anticycloniques côtiers ou situés plus au large. Plus quantitativement, les données lagrangiennes de surface confirment ce schéma, en cohérence avec la circulation modélisée avec un OGCM à haute résolution. Ces données mettent également en évidence une variabilité saisonnière importante en Méditerranée centrale. La dynamique propre des tourbillons côtiers a été étudiée en détail pour mettre en évidence les mécanismes de propagation de ces tourbillons. En cohérence étroite avec les observations, on a montré que la pente du talus continental était un ingrédient essentiel pour expliquer la propagation vers l'ouest de ces tourbillons.

1. Déroulement et opérations à la mer

1.1 Les phases du programme

EGYPT a été proposé en 2005 au PATOM comme une suite naturelle du projet SALTO-2, projet soutenu par LEFE en 2004-2005, focalisé sur la circulation dans le Canal de Sicile. La mise en place du programme EGYPT a débuté en réalité dès 2004, avec la recherche des partenaires et des financements. Les demandes de temps bateau et les négociations pour la coopération avec les collègues Egyptiens ont suivi au début de l'année 2005, tandis que nos collègues italiens soumettaient la proposition EGITTO à l'ONR, acceptée en 2005, pour le financement des bouées de surface. EGYPT a lui été soutenu successivement par le PATOM, puis IDAO et le GMMC.

La phase d'acquisition des observations in-situ de EGYPT/EGITTO a commencé fin 2005 et aurait dû s'achever dans le courant du 1^{er} semestre 2008 avec le relevage des mouillages, qui étaient prévus pour rester deux ans, d'une part et avec la fin de vie des bouées dérivantes et profileurs d'autre part.

La première difficulté rencontrée a été relative à l'absence d'autorisation de travail dans la ZEE revendiquée par les Egyptiens qui a été finalement notifiée 3 jours seulement avant le début de la campagne EGYPT-1 prévue pour la mise en place des mouillages au large des côtes égyptiennes.

Ceci nous a donc interdit la zone des ~100 milles au large de ces côtes et nous n'avons pas pu déployer nos mouillages dans la zone prévue (entre ~25°E- et 28°E) pour l'étude de l'influence de la fosse d'Hérodote sur la circulation et les trajectoires des tourbillons. Ce réseau a donc été déployé au large de la Libye. De même, la quasi totalité des stations CTD ont été réalisées au large de la Libye.

DATE	ACTIONS
Apr. 05	Visite à Alexandrie pour rencontrer les intervenants Egyptiens (AUDO et NIOF) et leurs tutelles pour mettre en place une collaboration formelle (draft d'un Memorandum of Understanding)
Sep. 05	Réunion à Tunis (INSTM) de tous les participants (potentiels) pour harmoniser les actions
Nov. 05	Campagne EGITTO-1 : transit Trieste-Port Said, RV OGS-Explora (I) Largages d'XBT, bouées dérivantes et profileurs 11-18nov2005 8j ETP 1C (ITL) (2post doc + 2IE + 3T + 1 C Italiens)
Jan. 06	Campagne EGYPT-0 : transit Toulon-Port Said, NO L'Atalante (F) Largages d'XBT, bouées dérivantes et profileurs 27/01- 04/02 2006 9j ETP 1C (ITL) (+1 post doc Italien)
Mar. 06	Campagne EGYPT-1 : Messine/Italie-Héraklion/Grèce, FS Poseidon (D) Mise en place des mouillages, réseau CTD, largages d'XBT, bouées dérivantes et profileurs 08-26/04 2006 18j ETP 2C+3IE +1 post doc Italien + 2IE espagnol +2 C égyptiens
Oct. 06	Réunion à Trieste (OGS) de tous les participants pour un premier bilan et harmonisation des analyses. Préparation du congrès CIESM (Commission Internationale pour l'Exploration de la Méditerranée)
Oct. 06	Campagne EGITTO-2 : transit Chypre -Port Said, ferry Princessa Marissa (CY)
Mar. 07	Campagne EGYPT-2 : transit Héraklion/Grèce – Toulon, NO Le Suroît (F) Récupération anticipée des mouillages, largages d'XBT, bouées dérivantes et profileurs 12-24/03/2007 12j 08-26/04 2006 18j ETP 2C+2IE+1étudiant + 1IE espagnol
Apr. 07	Congrès international de la CIESM, Istanbul. Premières présentations des résultats
Nov. 07	Rencontres à Alexandrie de différents intervenants : Marine Egyptienne (récupération de matériel de nos mouillages), Université d'Alexandrie et College of Maritime Transport and Technology/AAST (collaboration potentielle).
de Sep.05 à Mar.07	<i>Largages périodiques de bouées dérivantes dans le Canal de Sicile (SALTO-EGITTO) à partir de navires d'opportunité</i>

La deuxième difficulté a été d'ordre technologique. En effet, dès septembre 2006, un premier mouillage s'est retrouvé en surface après rupture de la ligne. Deux autres mouillages ont eu le même sort au cours de l'hiver. Il est vraisemblable que ces lignes faites de parafil, comme tous les mouillages que nous avons réalisés par le passé (plus de soixante en Méditerranée occidentale) ont

été sectionnées par des requins, maintenant nombreux au large de la Lybie. Nous avons donc pris la décision de mettre à profit un transit du Suroît en mars 2007 pour récupérer les lignes encore intactes et ce qui restait des trois lignes sectionnées, quelques jours supplémentaires de bateau nous ayant été accordés à cette fin.

Le tableau ci-dessus donne la liste et la nature des opérations à la mer réalisées avec la composition de l'équipage scientifique et les bateaux utilisés, ainsi que les réunions internationales d'organisation qui les ont précédés. Les autres réunions de projet ont toutes eu lieu au LOPB ou au LOCEAN, ou bien à l'occasion des journées LEFE ou GMMC et de la CIESM en 2007.

1.2 Les moyens mis en oeuvre

La figure 1 montre la distribution des stations (CTD ou XBT) pour 2005-2007 lors des différentes campagnes et les positions des mouillages, la figure 2 les plans des lignes de mouillages.

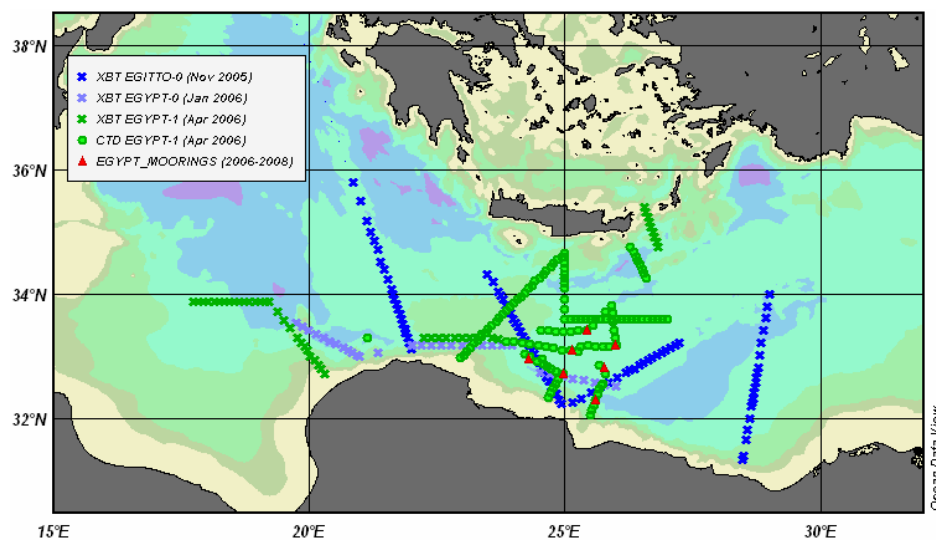


Figure 1 : principales phases d'échantillonnage d'EGYPT et EGITTO. La campagne EGYPT-2 de mars 2007 n'est pas figurée ici.

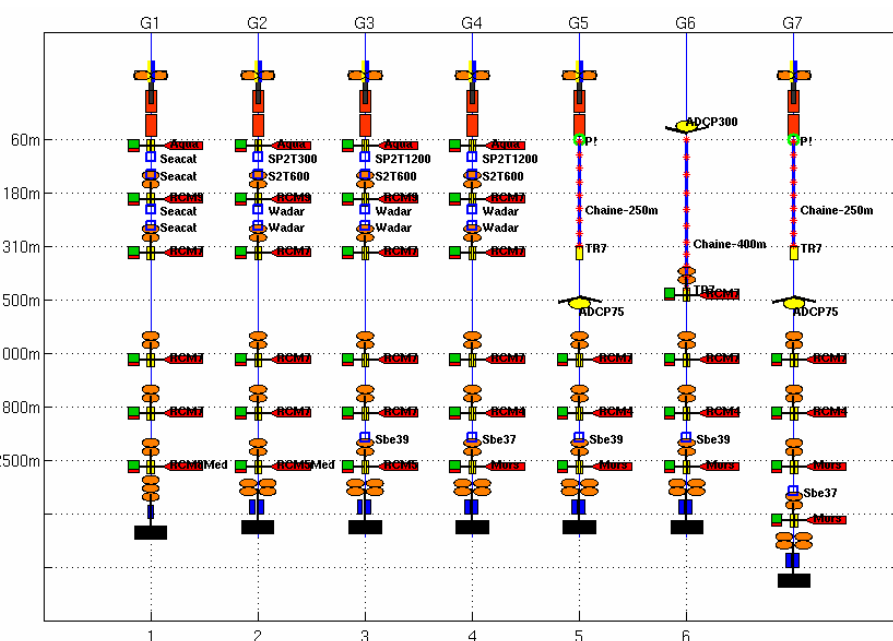


Figure 2: Instrumentation des lignes de mouillages EGYPT.

Le bilan comptable du temps bateau et du matériel mis en œuvre est détaillé dans les rapports des différentes campagnes. Il fait apparaître :

- ~ 50 jours de mer (4 valorisations de transit et une campagne dédiée)
- 7 lignes de mouillages (38 courantomètres et ~20 sondes hydrologiques)
- 125 stations CTD
- 270 tirs XBT
- acquisition continue de la température, salinité (thermosalinomètre) et courant (profileur ADCP)
- 97 bouées dérivantes SVP http://poseidon.ogs.trieste.it/sire/drifter/egitto_data.html
- 14 profileurs CTD ARGO (PROVORs) <http://doga.ogs.trieste.it/sire/medargo/trajectories.html>

1.3 Le financement du programme

Le financement en a été assuré par ordre d'importance :

- Soutien de campagne INSU (y compris la mise à disposition des moyens nationaux, navires et parc national d'instrumentation de l'INSU (DT Brest))
- Programme national LEFE IDAO (Interactions Dynamique Atmosphère-Océan)
- Programme national GMMC (Groupe de Mission Mercator Coriolis)
- Subvention Région PACA

Le tableau suivant en donne la répartition du budget consolidé, y compris des personnels français et étrangers, et des co-financements dont nous avons assuré la gestion, évalués avec les bases comptables proposées par le programme LEFE.

BUDGET CONSOLIDE		CO-FINANCEMENTS (hors personnels et moyens nationaux)				
	Coût total	Aide INSU	GMMC	Region PACA	Autre 3 à préciser	Autre 4 à préciser
Moyens nationaux	510000	-	-	-	-	-
Personnel permanents	228139	-	-	-	-	-
Personnel temporaire	57359	-	-	-	-	-
Fonctionnement	51900	17500	20400	14000	à préciser	à préciser
Equipement	16000	16000	à préciser	à préciser	à préciser	à préciser
TOTAL	863399	33500	20400	14000	0	0

EGYPT a également bénéficié de moyens supplémentaires, via :

- Le parc d'instrumentation de l'ICM/CSIC Barcelona
- Le parc d'instrumentation du COM (UMS 2196)
- Le programme EGITTO (74 des 97 bouées dérivantes larguées)
- Le programme mondial ARGO (14 profileurs PROVORs CTD ARGO)
- Le programme CORIOLIS (valorisation de transits, sondes XBT, localisations ARGOS et traitement de données)
- Le programme MFSTEP (sondes XBT)
- Les transits valorisés des navires du SHOM et de la Marine Nationale

- La fourniture des images satellitaires en temps réel par le service SATMOS INSU/Météo-France
- La CIESM pour une sonde CTD (Hydro-Changes)

2. Résultats scientifiques

Le point 2.1. donne une analyse qualitative de la circulation à partir des données lagrangiennes (bouées de surface et profileurs), des mesures CTD et XBT lors des différentes campagnes. A ce stade, les données courantométriques ne sont pas encore analysées. Les points suivants (2.2 à 2.4) donnent un résumé de résultats plus spécifiques ayant fait l'objet de publications à ce jour.

2.1 Analyse globale des observations

Les premières observations in situ ont été obtenues au cours d'EGITTO-1, valorisation du transit de l'« OGS Explora » en novembre 2005. Nous avons déployé 3 PROVORs, 2 APEX, 15 bouées de surface et tiré une centaine d'XBT, selon des radiales déterminées d'après l'analyse de l'imagerie IR (et des sorties des modèles MFSTEP et Mercator/PSY2V2). La première analyse de la situation est illustrée par la figure 3 :

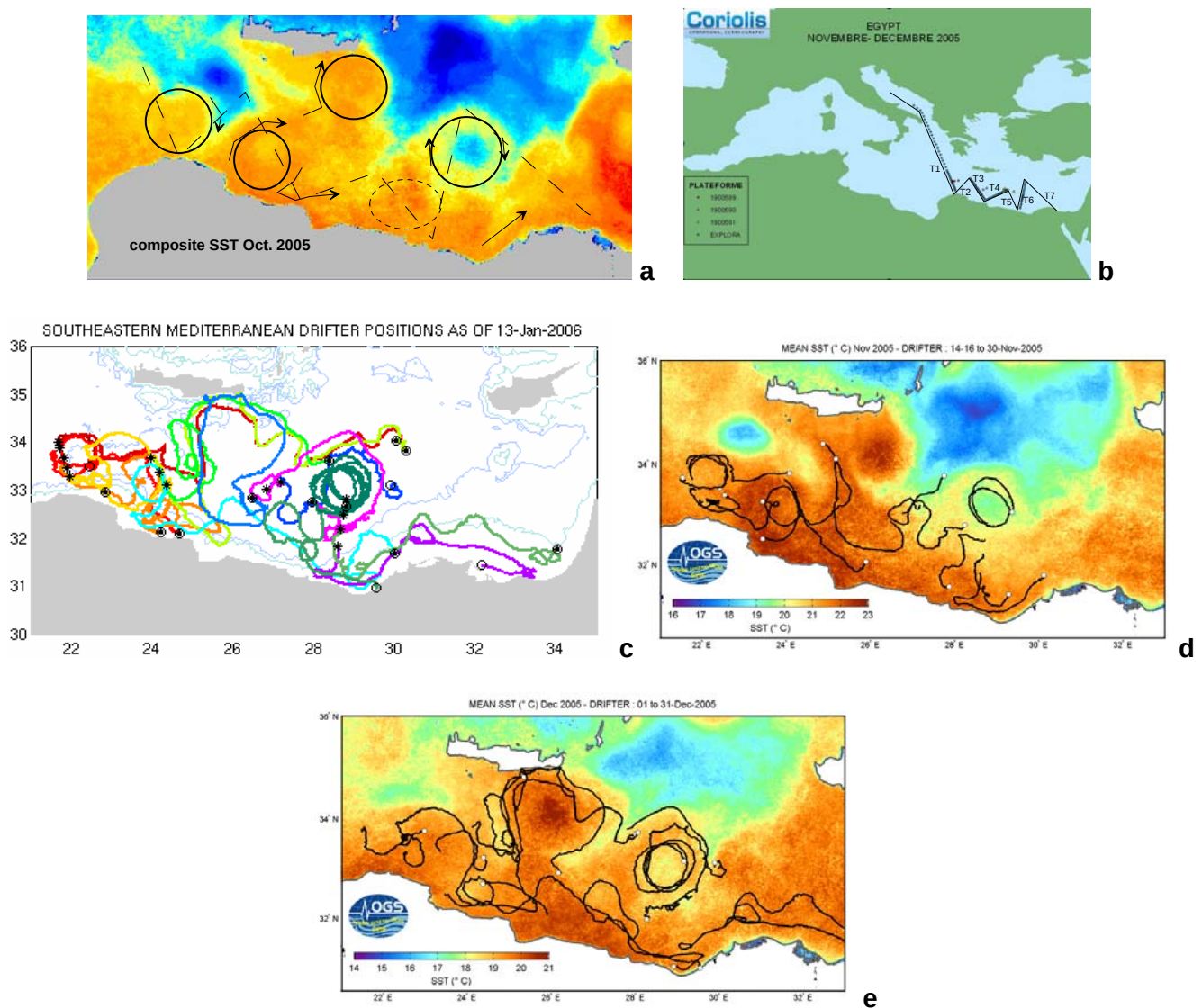


Figure 3 : Observations et analyse de la situation pendant EGITTO-1

L'analyse de l'image IR (Fig. 3a) faisait apparaître 3 tourbillons le long de la pente continentale (celui en pointillés sur 28°E est confirmé depuis), le tourbillon Ierapetra (induit par les vents Etésiens) au

SE de la Crète, et un autre au large entre 27 et 29°E. Sur la figure 1b les transects XBT qui ont donc été réalisés sont schématisés par les pointillés. Les trajectoires des bouées (Fig. 3c ; étoile : position de largage ; rond : position mi- janvier 2006 ; from OGS EGITTO web site ; Fig. 3d-e ; trajectoires des bouées en novembre et décembre 2005 superposées à l'image SST composite correspondante ; from P. Poulain/OGS-SIRE) montrent des boucles correspondant aux tourbillons, certaines fermées et même répétées. A la côte les points de rebroussement (e.g. trajectoires cyan, vers ~23°E, et violette vers 28°E) indiquent le bord SE des tourbillons. Comme cela avait été observé dans le sous-bassin algérien, les tourbillons proches peuvent agir comme une roue à aube (Taupier-Letage et Millot, 1988 ; Millot, 1992 ; Taupier-Letage *et al.* 2003) : c'est le cas par exemple avec la trajectoire brune de la bouée larguée vers 34°N-22°E, qui est successivement passée sur les bords nord des 2 tourbillons les plus à l'ouest, puis qui a été entraînée vers 25°E vers le nord par l'apettra qu'elle a contournée, pour atteindre ensuite le bord nord du tourbillon situé au large vers 29°E. Autrement dit, ces phénomènes de moyenne échelle que sont les tourbillons libyo-égyptiens jouent un rôle fondamental pour la (perturbation de la) circulation de AW. La majorité des trajectoires orientées zonalement se trouve dans une bande côtière, alors qu'au large les trajectoires orientées longitudinalement prévalent.

Rien ne montre ni même n'évoque un jet direct puissant qui traverserait le bassin en son centre, ce qui devrait être le cas avec un Mid-Mediterranean Jet (MMJ). Les données d'ADCP et du thermosalinomètre sont en cours de traitement pour valider cette analyse visuelle. Les premiers résultats sont inclus dans le rapport de campagne, accessible sur <http://poseidon.ogs.trieste.it/doga/sire/pdf/cruisereportEGITTO1.pdf>).

Lors de cette campagne EGITTO-1, nous bénéficions de l'assistance du GMMC, qui nous transmettait sur demande des zooms spécifiques des dernières prévisions des sorties de PAM PSY2 V2.

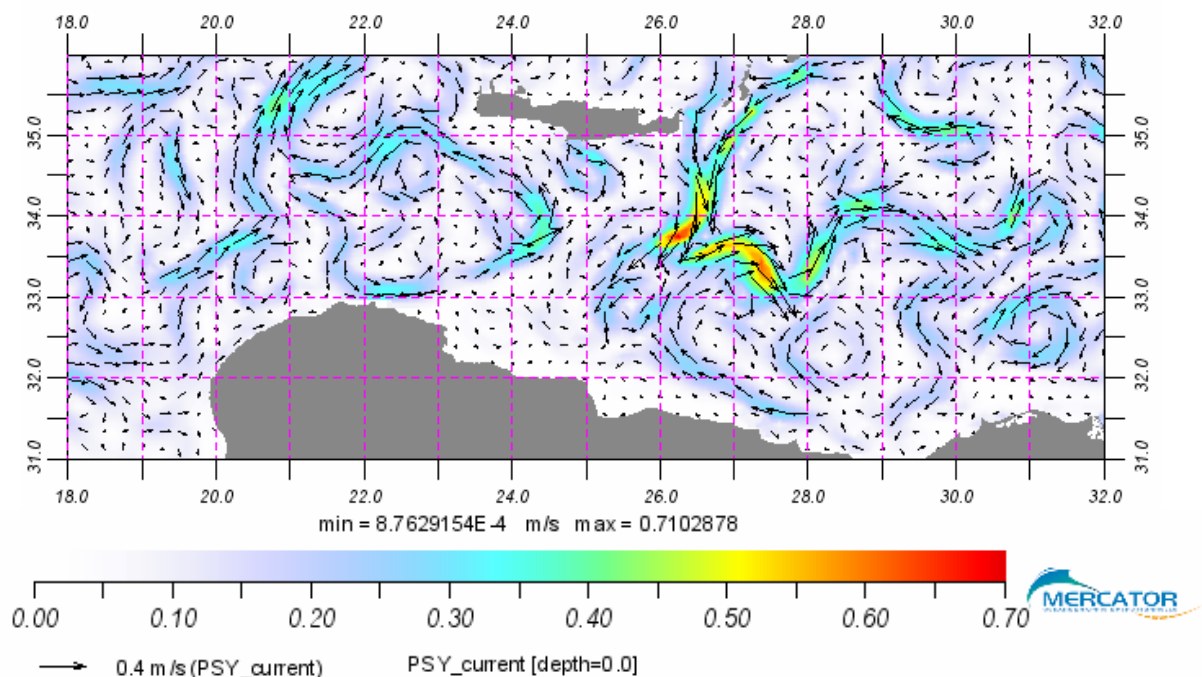


Figure 4 : Prévisions du courant de surface pour le 15 novembre 2005 (D. Palin, Mercator).

Cette analyse est à comparer avec celle de MFSTEP, parue dans le bulletin de novembre 2005 (Fig. 5) :

Alors que le modèle MFS reproduit plutôt bien les structures de moyenne échelle que sont les tourbillons libyo-égyptiens, l'analyse met en avant un MMJ. Il est évident que de l'AW récente est advectée sur les bords ouest des tourbillons vers le nord/le large ... mais il est tout aussi évident (ne serait-ce que par les trajectoires des bouées) que l'advection de l'AW récente continue vers le sud sur leurs bords est. Ce « MMJ » correspond donc clairement aux bords nord des tourbillons.

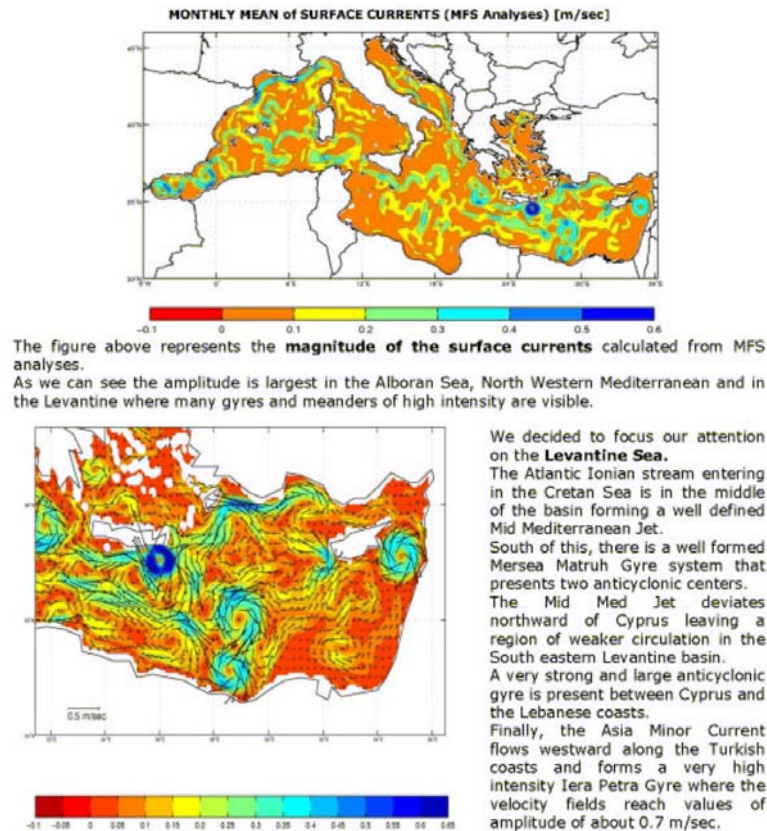
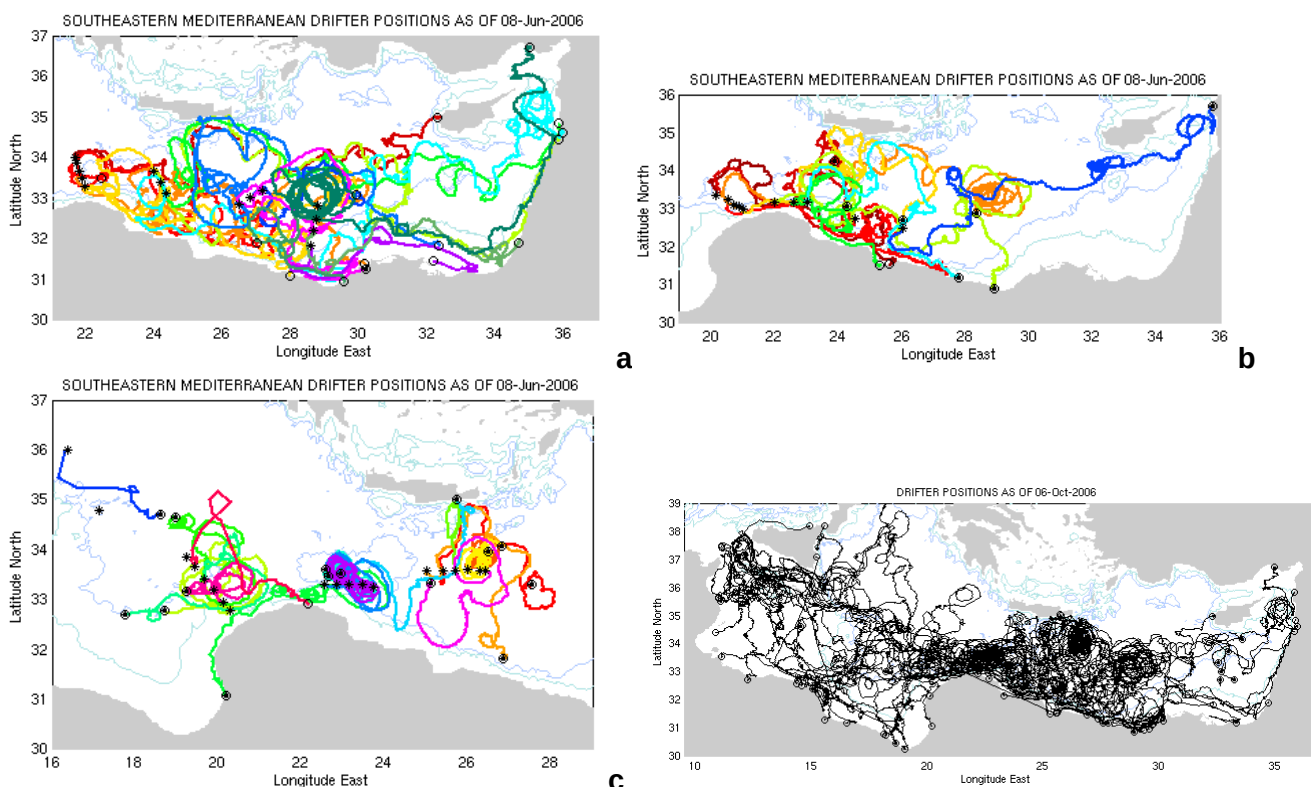


Figure 5 : Analyse MFS pour novembre 2005

Notre analyse de la situation est confirmée par les trajectoires des bouées qui ont été larguées successivement de novembre 2005 à Avril 2006 (Fig.6). L'image résultant de l'ensemble des largages dans le Canal de Sicile et le bassin oriental (Fig. 6d) montre l'importance de la circulation le



d *Figure 6 : Trajectoires des bouées dérivantes des programmes EGITTO et EGYPT larguées : a) en novembre 2005 (EGITTO-1); b) en Février 2006 (EGYPT-0) ; c) en Avril 2006 (EGYPT-1). d) : ensemble des trajectoires des bouées larguées dans le Canal de Sicile et le bassin oriental.*

long des pentes libyenne et égyptienne, ainsi que celle de la moyenne échelle. Il faut toutefois utiliser ces tracés provisoires avec prudence, car un nombre anormalement élevé de bouées ont fini par perdre leur drogue. Par conséquent la majorité des trajectoires à l'est de $\sim 30^\circ\text{E}$ n'est plus valide (ex. trajectoire bleue sur Fig. 6b). L'information sur la présence/absence de la drogue est accessible sur <http://poseidon.ogs.trieste.it/doga/sire/egitto/>.

Certaines portions de trajectoires des profileurs CTD ARGO (PROVORs) sont aussi affectées par la moyenne échelle (dans l'Égée, notamment, Fig.7). On remarque enfin des portions de trajectoires le long des pentes libyenne et égyptienne.

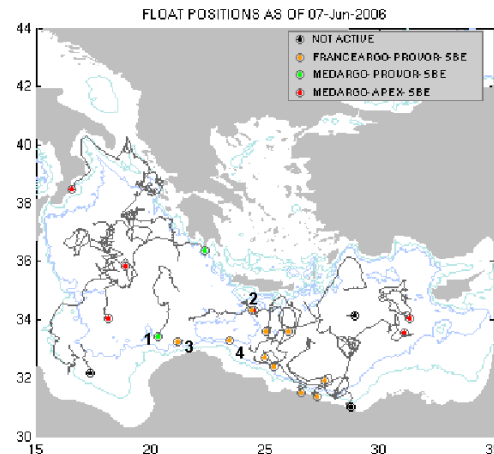


Figure 7 : Trajectoires des profileurs ARGO dans le bassin oriental, ceux d'EGYPT sont identifiés en orange (figure extraite du MFSTEP/MEDARGO web site)

Les valeurs de salinité de surface mesurées par le profileur MEDARGO 1900629 ayant dérivé principalement vers le sud entre $20\text{--}21^\circ\text{E}$ diminuent en allant vers la pente libyenne (Fig.8).

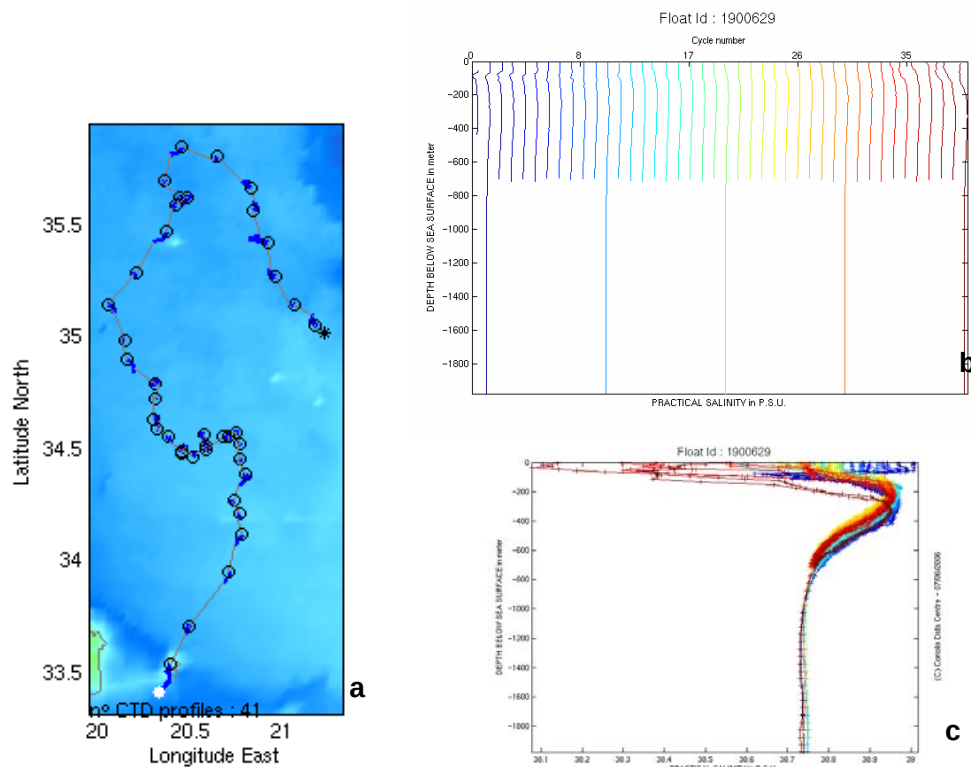


Figure 8 : (a) Détail de la trajectoire longitudinale du profileur 1 (1900629). Étoile noire: position de largage ; étoile blanche: position actuelle ; cercle : position d'un profil avec dérive de surface (figure extraite du MFSTEP/MEDARGO web site). (b et c) Evolution des profils de salinité de ce même profileur, du 16/11/2005 (bleu foncé, bleus = partie nord de la trajectoire) au 04/06/2006 (marron).

En surface dans le centre du bassin la salinité est supérieure à 38.8 (jusqu'à ~39), pour atteindre des valeurs inférieures à 38.5 dans la partie sud (jusqu'à ~38.1).

Ces observations sont confirmées par les faibles salinités de surface des 2 profileurs EGYPT devant la Libye vers 21 et 24°E (profileurs 1900605 et 1900602, Fig.7-9), et par celles du profileur qui a une trajectoire le long de ~34°N entre ~21°E et 25°E (profileur 2, Fig. 7-10), qui elles restent élevées

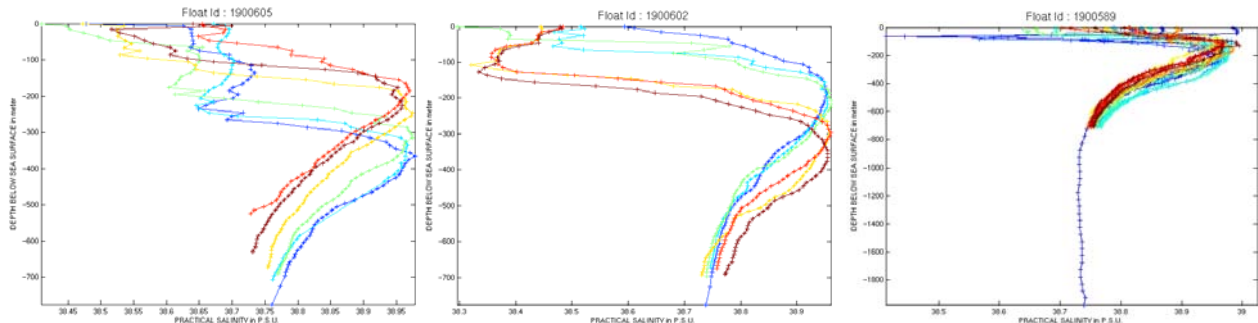


Figure 9 : Profils de salinité superposés des profileurs 900605 (gauche) et 1900602 (centre). Profils de salinité superposés du profileur 1900589 (droite).

Les résultats de la campagne EGYPT-1 en avril 2006 confirment l'impact des tourbillons sur la circulation de AW dans le sous-bassin Levantin. Les images satellitaires thermiques étaient en effet reçues en temps quasi-réel à bord afin de déterminer la stratégie d'échantillonnage optimale. C'est ainsi que nous avons pu localiser (Fig.10) un tourbillon libyen (I5) et le traverser par une section CTD à haute résolution (Fig.11), ainsi que Ierapetra (IE, Fig.12), dont la signature sur les modèles n'apparaissait pas significative.

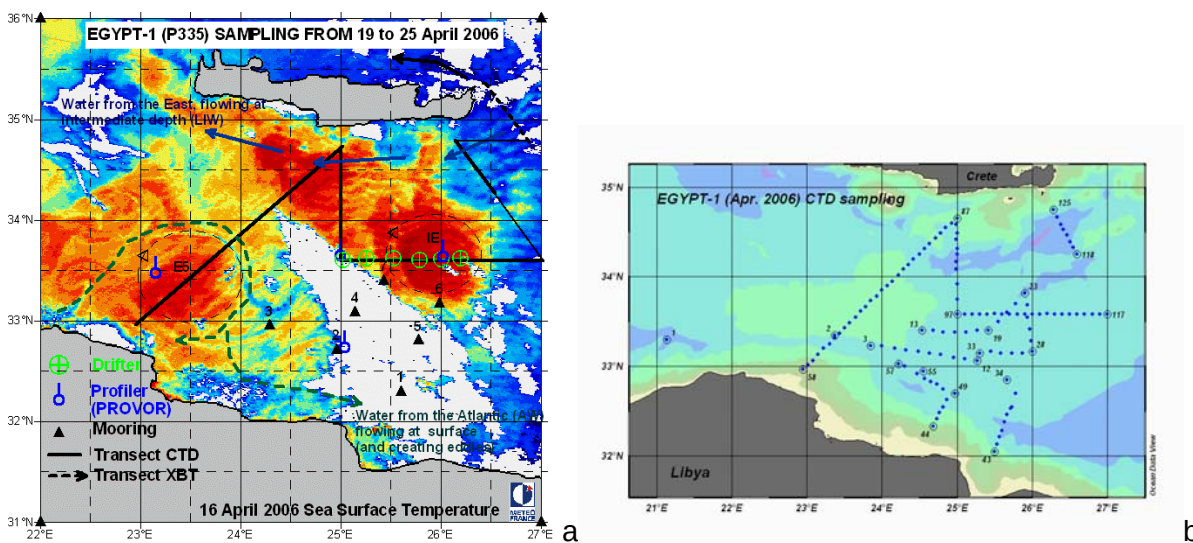


Figure 10 : (a) Image thermique du 16 Avril 2006 (provenance SATMOS/CMS/MétéoFrance) et stratégie d'échantillonnage d'EGYPT-1 ; (b) : réseau des stations CTD d'EGYPT-1

La section de salinité montre bien que la présence d'AW peu modifiée relativement loin au large (~34°N) est due à la présence du tourbillon E5. Il n'y a pas d'autre (veine de) AW plus au nord, ce qui devrait être le cas en présence d'un MMJ. Enfin, logiquement, E5 est associé à de l'AW relativement peu modifiée au sud, avec un courant portant à l'ouest. Son extension verticale excède 1000m.

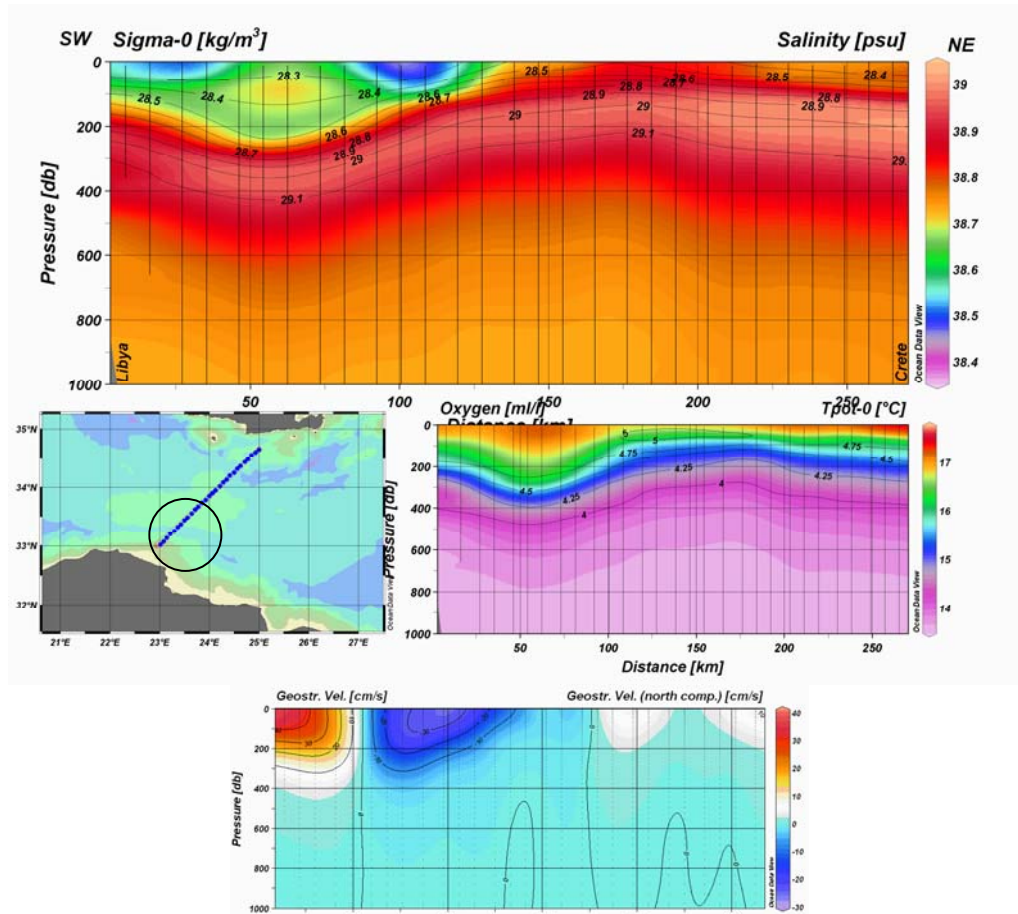


Figure 11 : Radiale CTD du plateau libyen à la Crète, traversant le tourbillon libyen E5 : haut : salinité (couleur) et densité potentielle (isolignes) ; milieu : température potentielle (couleur) et concentration en oxygène (isolignes) ; bas : composante Nord (couleur) et courant géostrophique (isolignes), référence 1000db.

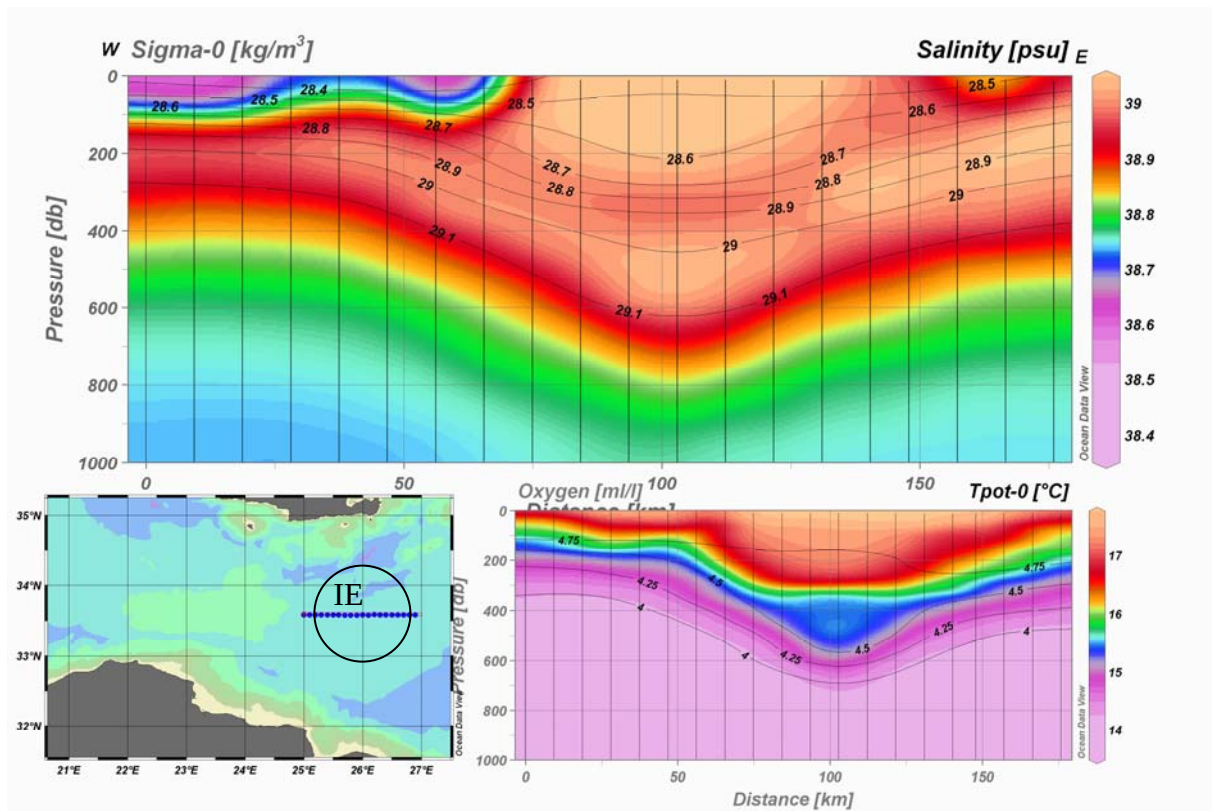


Figure 12 : Radiale CTD à travers le tourbillon de Ierapetra de l'été 2005 .(id. légende Fig.11)

Ierapetra (IE) a encore une extension qui excède 1000m (isolignes encore déformées à ce niveau). On observe l'entraînement de la Levantine Intermediate Water (LIW) sur son bord est.

Les observations in situ et satellitaires confirment donc que la circulation de surface (Atlantic Water AW) se fait essentiellement le long de la pente continentale libyenne et égyptienne. Le courant est instable, et engendre des méandres et tourbillons de moyenne échelle qui sont détectés et suivis par l'imagerie satellitaire. Ces tourbillons (et leurs interactions) sont responsables de la dispersion de AW vers l'intérieur du bassin (ainsi que des eaux intermédiaires et profondes, comme observé lors de la campagne EGYPT-1 en avril 2006).

2.2 Bouées de surface

2.2.1 Analyse statistique : circulation moyenne

Dans le cadre de EGYPT/EGITTO, 97 flotteurs de surface drogués à 15m ont été déployés entre septembre 2005 et mars 2007, aussi bien à partir de bateaux d'opportunité comme dans le Canal de Sicile qu'à partir de navires de recherche lors des campagnes. Le nombre élevé de flotteurs et leur distribution a permis d'effectuer une analyse statistique du courant moyen et de sa variance couvrant une surface relativement importante du bassin oriental pendant deux saisons étendues (figure 13).

Plusieurs veines de courant ont été mises en évidence, de même que leur variabilité saisonnière, qui va jusqu'à un renversement de la circulation dans le sud du bassin Ionien, ce dernier point devant être modulé par le nombre relativement faible de données dans une région à la circulation très variable. Plus à l'est, la circulation moyenne est clairement cyclonique le long des talus Libyo-Egyptien et du Moyen Orient. Une partie de ce courant est défléchie vers le large par les anticyclones engendrés par le courant le long de la côte Libyo-Egyptienne, par le vent (tourbillon de Ierapetra) ou par piégé par la topographie (fosse d'Hérodote, mont sous-marin d'Eratosthenes et bassin de Lattaquié).

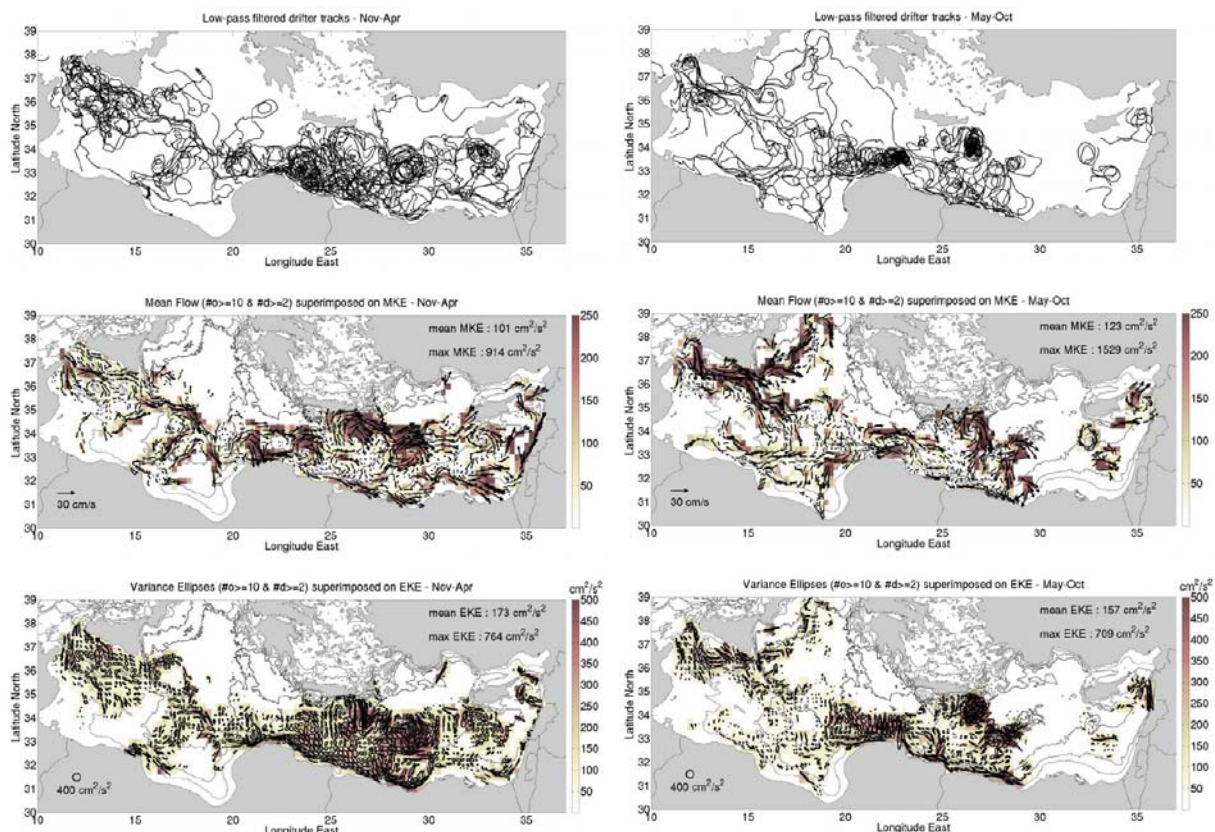


Figure 13 : Trajectoires (haut), vitesse et énergie cinétique moyenne (milieu) et énergie cinétique turbulente (bas) pour l'hiver étendu (nov-avr) et pour l'été étendu (may-oct).

Conformément à ce qui a déjà été synthétisé dans le paragraphe précédent, ces tourbillons entraînent l'eau de surface atlantique vers le large. Quand les tourbillons sont proches de la côte, le courant qu'ils engendrent vers l'ouest peut être supérieur au courant moyen vers l'est entraînant un renversement temporaire du courant à la côte. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication soumise à Ocean Science (Gerin et al., 2009).

2.2.2 Validation de la circulation de surface du modèle MED16

La comparaison des données de bouées de surface, instruments lagrangien, avec les données du modèle MED16 a été réalisée par l'intermédiaire de statistiques eulériennes. Ces statistiques permettent de synthétiser les données obtenues par les bouées de surface en dressant des cartes énergétiques du bassin oriental de la Méditerranée. Ces cartes permettent une comparaison qualitative simple des bouées de surface et du modèle. Le travail a mis en évidence un certain nombre de différences entre le modèle MED16 et les données issues des bouées de surface des campagnes EGYPT/EGITTO. L'ensemble est cependant encourageant, montrant une circulation semblable, bien que différente du point de vue énergétique dans certaines zones bien spécifiques, dues probablement à une sur évaluation par le modèle du courant moyen le long des cotes de la Libye, ce courant étant sans doute trop stable (fig. 14).

L'amélioration de ces résultats passe par une étude plus approfondie de la représentation du talus continental et de la dynamique du modèle sur le talus, là où les plus fortes différences sont observées.

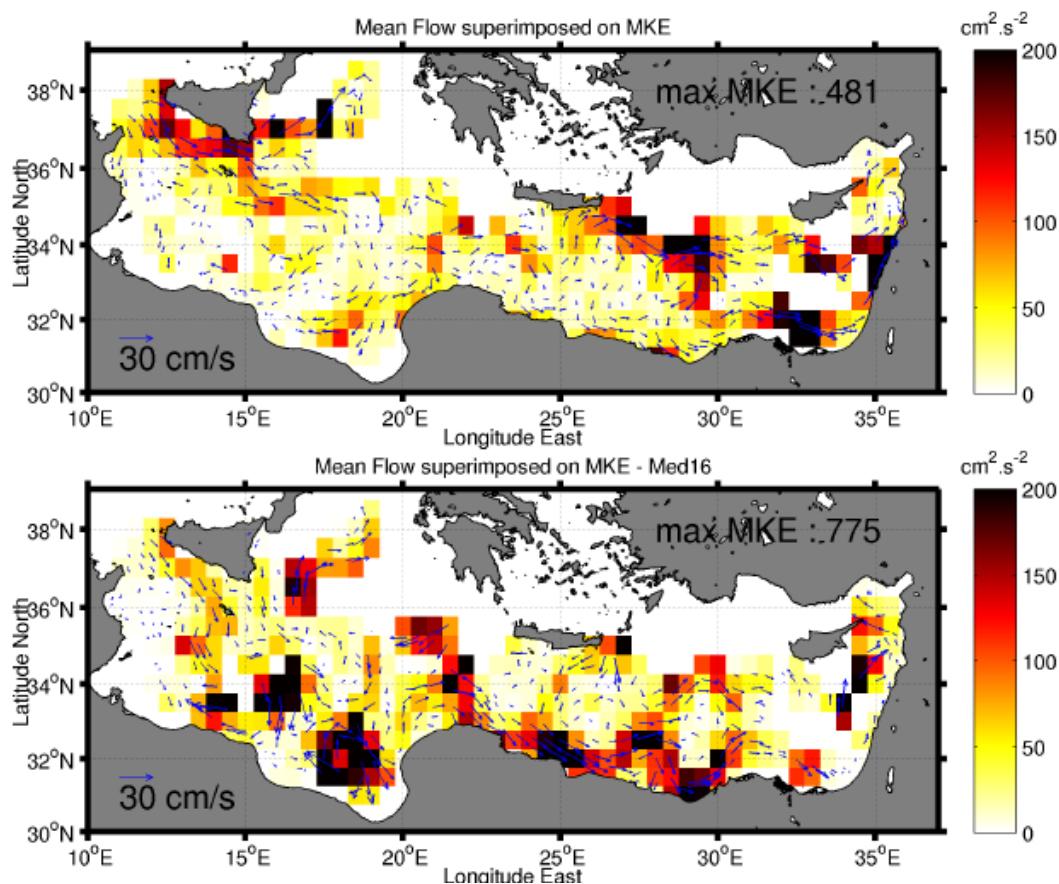


Figure 14 : Courant moyen et énergie cinétique moyenne dans les données (haut) et dans le modèle (bas).

Une étude détaillée du comportement des bouées de surface vis à vis du vent et de comparaison de leur mouvement aux vitesses géostrophiques déterminées grâce à l'altimétrie a également été conduite. Cette étude devrait permettre de corriger les trajectoires de bouées de surface ayant perdu leur drogue. Ce travail a également montré que le comportement des bouées de surface est conforme à la théorie, notamment dans sa réaction au vent, ainsi que par le suivi des structures

détectées par l'anomalie de hauteur de la mer. L'association du vent et des vitesses géostrophiques permet d'expliquer un tiers de la variabilité des vitesses des bouées de surface.

2.3 Reconstruction de champs de surface

Grâce à l'altimétrie satellitaire, les écoulements océaniques de surface sont maintenant observés de manière routinière, et leur variabilité de mésoéchelle tend à être résolue dans la majeure partie des océans. Toutefois dans les bassins régionaux tels que ceux de la Mer Méditerranée, la précision de la mesure altimétrique s'avère dégradée à cause de l'influence sensible des côtes à l'échelle de lissage utilisée. C'est pourtant le long des côtes que l'activité turbulente est concentrée.

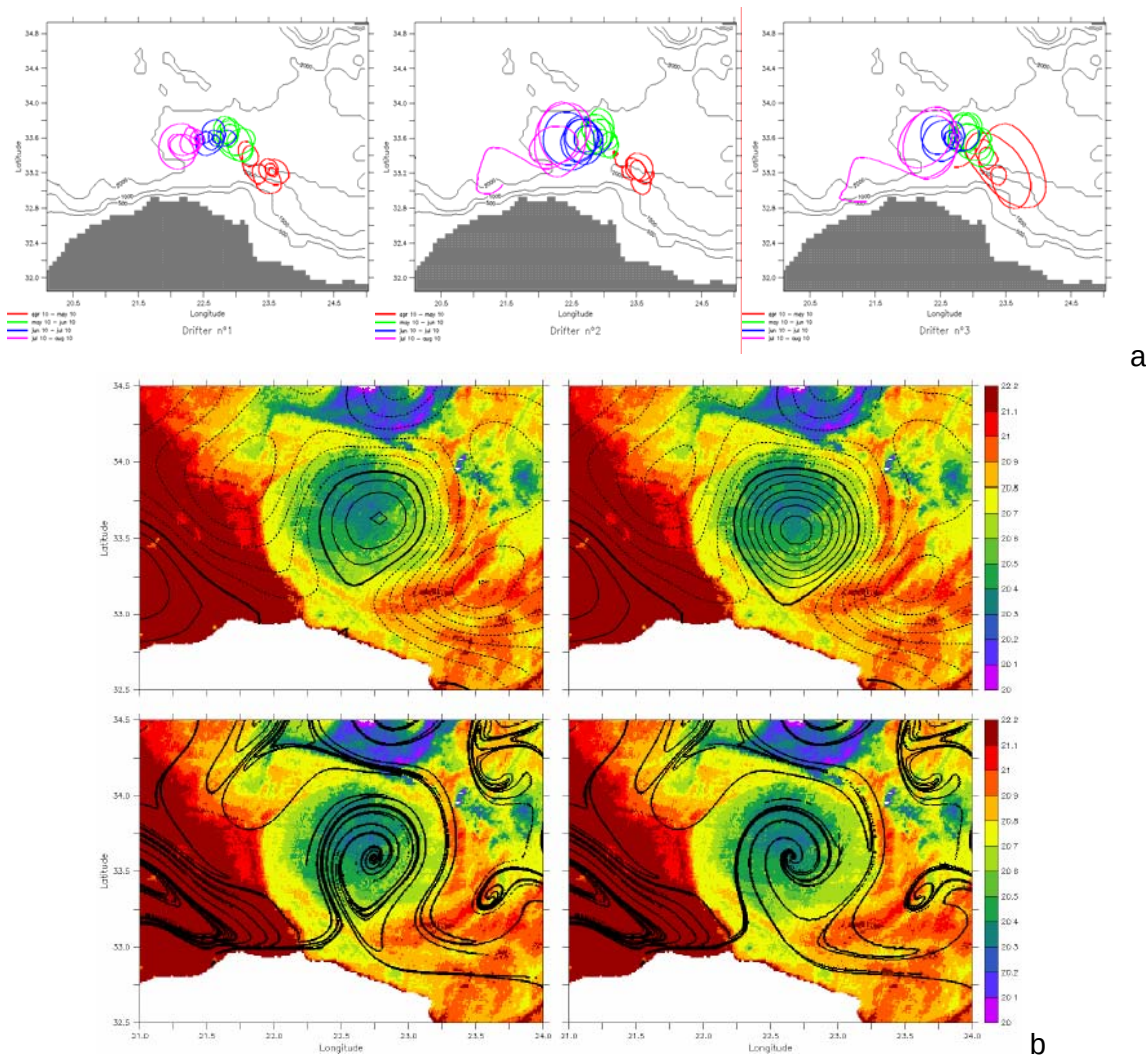


Figure 15 : (a) Trajectoires des 3 bouées utilisées sur la période du 10 avril au 10 août. (b) Panneaux du haut : SST du 4 juin 2006 le long des côtes libyennes, avec en superposition les lignes de courant de l'ébauche issue de l'altimétrie (gauche) et après assimilation des trajectoires des bouées (droite). (b) Panneaux du bas : idem, avec superposition des variétés associées aux exposants de Lyapunov (seules les variétés pour le décile supérieur des exposants sont représentées). On notera la meilleure localisation des fronts et l'intensification notable des courants.

C'est pourquoi d'autres sources de mesure sont à considérer pour échantillonner cette mésoéchelle Méditerranéenne. La signature thermique obtenue par imagerie satellitaire est potentiellement un bon proxy de la circulation de surface dans des conditions météorologiques favorables. Quoique routinière et avec un bon échantillonnage spatio-temporel, cette description reste toutefois subjective et les méthodes d'extraction des champs de courant à partir de la température de surface restent cantonnées à la résolution des altimètres. De manière ponctuelle, les trajectoires des bouées dérivantes permettent d'échantillonner ces structures de mésoéchelle, et d'obtenir aussi une information de plus fine échelle. Associées à des champs de courant issus de l'altimétrie avec

l'approche lagrangienne inverse développée par Vincent Taillandier, ces trajectoires permettent localement (i) de corriger les erreurs inhérentes au bruit et au traitement de la mesure satellitaire le long des côtes, (ii) de mieux quantifier l'intensité des courants en tenant compte des effets induits par le vent (dérive d'Ekman) et par la cyclostrophie dans les tourbillons, (iii) d'affiner la résolution des champs à une résolution de submésoséchelle.

Ces trois descriptions ont été confrontées dans le cadre de l'observation d'un tourbillon anticyclonique le long de la côte Libyenne : outre les produits satellitaires, trois bouées dérivantes déployées durant la campagne EGYPT-1 ont fourni un suivi de ce tourbillon pendant 4 mois. Une méthode de validation quantitative a été développée afin de mesurer la collocalisation des fronts thermiques avec deux types de fronts structurant l'écoulement. En utilisant les lignes de courants, l'information apportée par les trajectoires agit sur l'intensité du tourbillon. En utilisant les barrières de transport (identifiables aux lignes de convergence particulières tracées par les exposants de Lyapunov), cette information Lagrangienne améliore la description du tourbillon le long de la côte et induit un écoulement interne en spirale via un processus de filamentation, aussi représentée dans la signature thermique (figure 15).

L'intérêt de cette approche est de fournir un outil quantitatif, le plus proche possible des données, pour évaluer les caractéristiques cinématiques de l'écoulement, comme par exemple la vitesse et la trajectoire du centre du tourbillon (voir point suivant).

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication soumise à GRL (Taillandier et al., 2008) et d'une lettre « Mercator » (D'Ovidio et al., 2008).

2.4 Processus de dérive d'un tourbillon barocline côtier

Les données SST et lagrangiennes de surface d'EGYPT/EGITTO révèlent le déplacement important vers l'ouest d'un tourbillon anticyclonique le long des côtes libyennes. Les trajectoires de bouées de surface combinées avec la section CTD à travers ce tourbillon réalisée pendant la campagne EGYPT-1 permettent de quantifier avec précision la vitesse horizontale et de la structure verticale de cet anticyclone intensifié en surface. La dérive vers l'ouest est sensiblement plus élevée que celle prévue du fait de l'effet bêta uniquement.

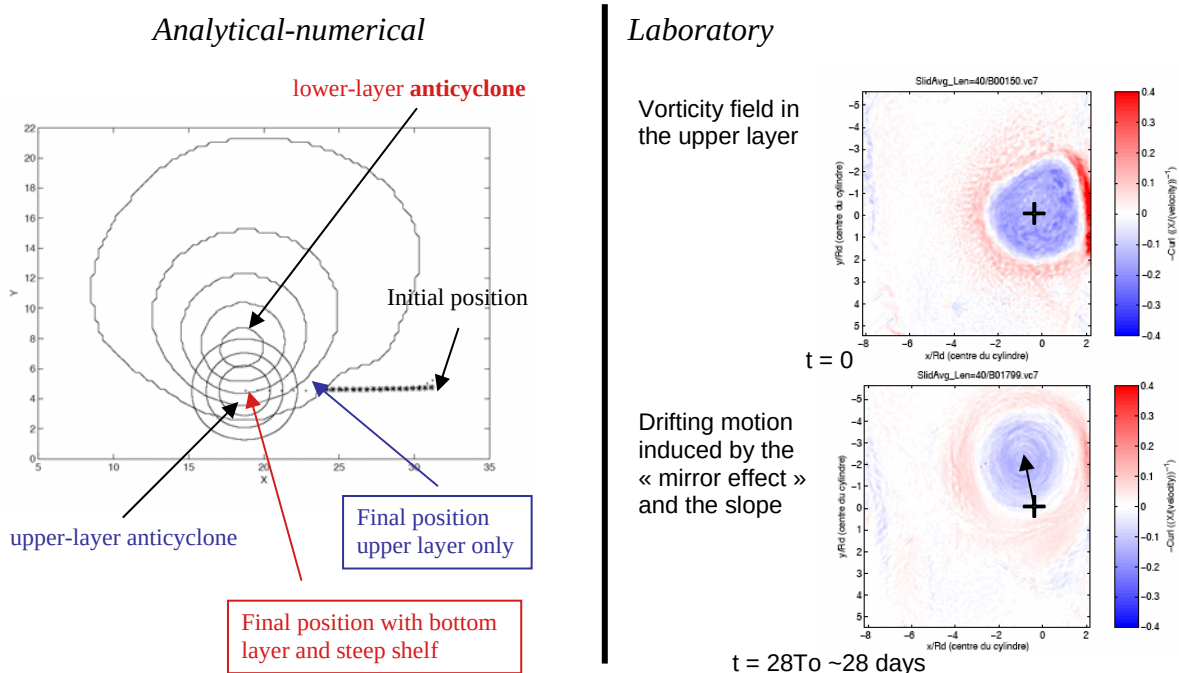


Figure 16 : (gauche) Fonction de courant dans chaque couche à la fin de l'expérience. La dérive totale vers l'ouest est indiquée et est de l'ordre de 50% plus élevée en présence d'un talus. (droite) Vorticité dans la couche supérieure à l'état initial et en fin d'expérience, la paroi se trouvant à droite. A noter que, la table de l'ENSTA tournant dans le sens inverse de celui de la terre, le tourbillon se déplace vers l'est.

Afin d'étudier l'impact d'une pente abrupte du talus continental sur la propagation d'un tourbillon intensifié en surface, un modèle à deux couches dans le plan β avec une pente continentale forte, et avec une frontière zonal comme c'est le cas le long des côtes libyennes. Une théorie de la perturbation développée par Sutyrin pour un tourbillon circulaire dans la couche supérieure avec une couche inférieure au repos comme un état de base a été généralisée pour une pente non uniforme, en présence de l'effet miroir qui représente la côte. Un bilan intégral de moment cinétique est utilisée pour calculer la vitesse de dérive du tourbillon de surface avec l'hypothèse principale d'existence d'une solution stationnaire du système à deux couches. L'interface représentant le tourbillon est imposée à l'ordre un. Cette approche permet de réduire le problème au calcul de l'écoulement d'eau profonde, en fonction de l'interface et de la topographie. Lorsque la pente topographique sous le tourbillon change rapidement depuis la pente forte du talus jusqu'à une pente faible dans la plaine abyssale, la plus grande partie de la circulation profonde est déplacée au large (figure 16). Cet écoulement anticyclonique profond donne une source supplémentaire de propagation le long de la pente, qui est proportionnelle à la vitesse de base de dérive du tourbillon (due à l'effet β planétaire) et à la pente. Les expériences faites sur la table tournante de l'ENSTA confirment qualitativement ce résultat. De même, la vitesse de dérive du tourbillon échantillonné par les flotteurs EGYPT/EGITTO que l'on peut calculer avec ce modèle, est bien consistante avec l'observation de cette dérive.

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication acceptée dans JPO (Sutyrin et al., 2008) et font partie des résultats de la thèse de Samuel Teinturier.

3. Conclusion, perspectives

Les difficultés d'ordre diplomatique (voir annexe) pour travailler au large de l'Egypte – et l'établissement d'une collaboration pour le long terme avec nos collègues égyptiens était aussi une des motivations d'EGYPT -, ont largement affectés les objectifs d'EGYPT/EGITTO. Notamment, l'objectif d'étudier le contrôle de la dynamique des tourbillons dans le fosse d'Hérodote avec des mouillages a du être abandonné. Néanmoins, la quantité de donnée hydrologiques et courantométriques (ADCP de coque et mouillages) et lagrangiennes (surface et profileurs), rassemblée dans le sud du bassin Levantin permet aujourd'hui de combler en partie l'absence de données qui préexistait dans cette région. Ces données permettent enfin de figer de façon claire des schémas de circulation des eaux de surface avec une bonne caractérisation de leur variabilité à mésoéchelle. : comme dans le bassin occidental, le transport vers l'Est de l'eau atlantique est le fait d'un courant côtier, instable qui engendre des tourbillons anticycloniques susceptibles de dévier les eaux vers le large et d'interagir ensuite avec les tourbillons résidants du large. EGYPT a également permis de montrer comment la topographie du talus contraint certains processus dynamiques sous-jacents.

Si la phase de collecte de données est terminée, et de premières analyses ont été produites, une analyse détaillée incluant les données hydrologiques et de courants des mouillages, en lien avec celles fournies par les profileurs ARGO, reste encore à réaliser.

Le chantier Méditerranée (notamment HYMEX et MERMEX), de même que la collaboration que nous avons établie avec le Cyprus Oceanographic Center pour l'établissement de radiales « glider » au sud de Chypre, pourraient aujourd'hui fournir le cadre pour élargir les premiers résultats acquis par EGYPT/EGITTO.

4. Stages, thèses, « postdoc »

La thèse de Bahjat Alhammoud (12/2005) et Najwa Hamad (03/2003) avaient établi suffisamment de résultats sur la circulation dans le Canal de Sicile et le long des cotes du bassin oriental de la Méditerranée, bassin Levantin notamment, pour nous permettre de formuler les objectifs de projet EGYPT et de son volet italien EGITTO. A l'OGS, Riccardo Gerin, dans le cadre de son postdoc toujours en cours, a réalisé l'essentiel des opérations de terrain pour le déploiement de bouées de surface, mais bien sûr aussi l'analyse des données ainsi collectées.

Trois nouvelles thèses en rapport direct avec EGYPT ont été soutenues ou sont en cours:

- Samuel Teinturier (soutenue le 25 janvier 2008) Dynamiques et stabilités de tourbillons océaniques en interaction avec la côte et la topographie. Doctorat Mécanique option Géophysique, ENSTA / UME - Laboratoire de Mécanique - Laboratoire de Météorologie Dynamique (ENS - X), EP/X p.198.

Il s'agissait en particulier d'étudier le rôle des courants et tourbillons de surface, situés dans les cent ou deux cents premiers mètres de profondeur, dans les échanges entre la zone côtière et la zone hauturière. Les mesures de la campagne EGYPT-1 ont permis de mesurer la dérive particulière d'un anticyclone de surface le long de la côte libyenne. Cette dérive vers l'est ne peut s'expliquer par la simple prise en compte de l'effet beta ou de l'effet miroir le long de la côte. Les expériences réalisées sur la table tournante de l'ENSTA ont permis de modéliser de façon simple l'interaction d'une côte ou d'un talus sur la dynamique d'un anticyclone, à la surface d'un dispositif bi-couche. La vitesse de ce tourbillon de surface voit notamment sa dérive doubler lorsqu'il se trouve initialement à la base de la pente, montrant ainsi l'existence d'une rétroaction possible de la couche du fond sur la dynamique de la couche de surface, résultat qui est en meilleur accord avec les observations EGYPT que si cette interaction n'est pas prise en compte.

- Romain Pennel (début en octobre 2008) Sa thèse porte sur l'identification des processus dynamiques qui contrôlent la taille, la structure verticale et la trajectoire des tourbillons qui se détachent d'un courant côtier le long d'un talus de forte pente. Ces structures tourbillonnaires contribuent largement aux échanges côtes-large au travers du talus continental. Cette thèse combine une approche numérique et une modélisation expérimentale (sur table tournante), et les résultats de ces modélisations sont confrontés aux observations in-situ faites dans le Courant Algérien en dans le cadre de la campagne ELISA et dans le Courant Egypto-Libyen en Méditerranée orientale dans le cadre d'EGYPT.

- Sana Ben Ismail (début juin 2006). Il s'agit d'une thèse co-encadrée par Chérif Sammari (Un. De Tunis) et Karine Béranger (Ec. Polytechnique). Cette thèse porte sur la dynamique de la Méditerranée Centrale (Canal de sicile et bassin Ionien) à partir de données hydrologiques et courantométriques, avec les modèles (MED16 et modèles opérationnels) en support de l'analyse.

A noter que dans le cadre de son stage de maîtrise comme élève ingénieur de l'ENSTA réalisé à l'OGS, Romain Pennel a démarré l'étude comparative des modèles vis-à-vis de leur circulation de surface. Ce stage a fourni l'essentiel des résultats sur cette question.

5. Publications et communications

- Thèses soutenues

Bahjat Alhammoud. Circulation générale océanique et variabilité à méso-échelle en Méditerranée Orientale: approche numérique. *Thèse de doctorat*, Université Aix-Marseille II, Décembre 2005

Samuel Teinturier Dynamiques et stabilités de tourbillons océaniques en interaction avec la côte et la topographie. *Doctorat Mécanique, option Géophysique*, Ecole Polytechnique, soutenue le 25 janvier 2008.

- Références des publications d'articles originaux dans des revues avec comité de lecture

Alhammoud Bahjat, Karine Béranger, Laurent Mortier, M. Crépon and I. Dekeyser. Surface circulation of the Levantine Basin: comparison of model results with observations. *Prog. Oceanogr.*, Vol. 66(2-4):299--320, 2005

Gerin R., Poulain P.-M., Taupier-Letage I., Millot C., Ben Ismail S. and Sammari C.: Surface circulation in the Eastern Mediterranean using Lagrangian drifters (2005-2007). Submitted to *Ocean Science*, 2009.

Hamad, N., C. Millot and I. Taupier-Letage, 2005. A new hypothesis about the surface circulation in the eastern basin of the Mediterranean Sea. *Prog. In Oceanogr.* , 66, 287-298.

Hamad N., C. Millot & I. Taupier-Letage, 2006. The surface circulation in the eastern basin of the Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 70(3), 457-503.

- Poulain P-M., R. Gerin, E. Mauri and R. Pennel, 2007. Wind effects on drogues and undrogued drifters in the Eastern Mediterranean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, doi: 10.1175/2008JTECH0618.1
- Sutyris G. G., A. Stegner, I. Taupier-Letage and S. Teinturier, 2009. Amplification of a surface-intensified eddy drift along steep shelf in the eastern Mediterranean sea. *Journal of Physical Oceanography*, doi: 10.1175/2009JPO4106.1.
- Taillandier V., F. D'Ovidio, I. Taupier-Letage, L. Mortier, S. Guinehut, P.-M. Poulain and P. Testor. Reconstruction and validation of a submesoscale surface flow from multiplatform data. In *Geophysical Research Letters*, 2008, in revision.
- Références des publications parues dans d'autres revues ou des ouvrages scientifiques
- D'Ovidio F., V. Taillandier, L. Mortier, I. Taupier-Letage, 2008. Lagrangian validation of the Mediterranean mean dynamic topography by extraction of tracer frontal structures. *Mercator Ocean Quarterly Newsletter #32*, 24-32.
- Taupier-Letage I., 2008. On the use of thermal infrared images for circulation studies: applications to the eastern Mediterranean basin. Chapter of the book: "Remote sensing of the European Seas", V. Barale and M. Gade Eds., Springer Verlag, 153-164.
- Taupier-Letage I., 2008. Observing the Mediterranean variability from meso- to decadal scales: how can we get the right picture? In: Towards an integrated system of Mediterranean marine observatories. N°34 in CIESM Workshop Monographs [F. Briand, Ed.], 144 pages, Monaco, 21-26. fichier.pdf
- Conférences et posters
- Alhammoud B., K. Béranger, L. Mortier and M. Crépon. Impact of mesoscale eddies on sub-basin scale circulation in the eastern Mediterranean Sea. In Proceedings of European Geoscience Union General Assembly, Vienna, Autriche, April 2006.
- Alhammoud B., K. Béranger, L. Mortier, Y. Dekeyser and M. Crépon. Long Life for the Eastern Mediterranean Mesoscale Eddies. In Proceedings, 38th CIESM Congress, Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Méditerranée, Istanbul, April 2007.
- Alhammoud B., K. Béranger, L. Mortier, Y. Dekeyser and M. Crépon. Does the Mid-Mediterranean Jet Exist ? In Proceedings, 38th CIESM Congress, Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Méditerranée, Istanbul, April 2007.
- Alhammoud B., K. Béranger, L. Mortier and M. Crépon. Upper circulation in the Ionian basin (Mediterranean sea) as inferred from a high-resolution numerical model. In *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9(09794), European Geosciences Union General Assembly 2007, Wien, Österreich, 16-20 April 2007.
- Béranger K., I. Taupier-Letage, Alhammoud B., J.-M. Lellouche, M. Emelianov, L. Mortier and C. Millot. Analysis of two mesoscale eddies in the southern Ionian and Cretan basins in 2006. In Proceedings, 38th CIESM Congress, Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Méditerranée, Istanbul, April 2007.
- Béranger K., B. Barnier and M. Crépon. Comparison of 10 precipitation climatologies over the global ocean. In Proceedings of WCRP/SCOR Workshop on Intercomparison and Validation of Ocean-Atmosphere Flux Fields, Washington, USA, May 2001.
- Taillandier V., I. Taupier-Letage, F. d Ovidio, S. Guinehut, Poulain P-M., K. Béranger, R. Gerin, P. Testor, S. Teinturier, L. Mortier and A. Stegner. A Reconstruction of surface currents with multiplatform data. In Proceedings of Rapid Environmental Assessment conference, coastal processes: challenges for monitoring and prediction, Lercici, Italy, September 2007.
- Béranger V., S. Ben Ismail, P. Testor, L. Mortier and C. Sammari. Interannual variability of dense-water formation in the Mediterranean Sea for the last decade. In 2nd HyMex international Workshop, Palaiseau, France , June 2008.
- Stegner A., S. Teinturier, R. Pennel, K. Béranger, G. Sutyris and I. Taupier-Letage. Topographic impact on coastal current and eddies. In 2nd Hymex International workshop, Palaiseau, France , June 2008.
- Teinturier S., G.Sutyris, A. Stegner and I. Taupier-Letage, 2008. Anomalous fast drift of a surface-intensified eddy near steep continental slope. Ocean Sciences Meeting, Orlando, FL, March 2-7 2008.

– Références des publications électroniques

« site web » EGYPT et publications : <http://www.ifremer.fr/lobtln>

« site web » EGITTO : http://poseidon.ogs.trieste.it/sire/drifter/egitto_main.html

Database drifters EGYPT-EGITTO: http://doga.ogs.trieste.it/doga/sire/egitto/database_egitto/

– Références des rapports techniques

Poulain P-M., R. Barbanti and I. Taupier-Letage, 2007. Comparison between ship-based and ARGO CTD profiles in the Eastern Mediterranean Sea (April 2006). Report produced by the Mediterranean Argo Regional Centre (MED-ARC), OGS, Trieste, Italy. Report OGS 2007/20 OGA 5 SIRE, 45p.

Poulain P-M., I. Taupier-Letage, R. Gerin, R. Barbanti, D.Delpont AND G. Notarstefano, 2006. Oceanographic cruise EGITTO-1. Cruise report, Rel. 29/2006- OGA/14, OGS Borgo Grotta Gigante, 40p.

Taupier-Letage I., 2006. Rapport de campagne EGYPT-0.

Taupier-Letage I., 2006. Condensed report of the EGYPT-1 (FS Poseidon P335) cruise.

Taupier-Letage I., 2007. Rapport de campagne EGYPT-2.

Note on the problem of oceanographic sampling in the Mediterranean

June 2009

Dr Isabelle TAUPIER-LETAGE

Chargée de Recherche CNRS

Laboratoire d'Océanographie et Biogéochimie (CNRS UMR 6535)

Université de la Méditerranée, Centre d'Océanologie de Marseille

Antenne de Toulon, c/o IFREMER, BP330, F-83507 LA SEYNE Cedex

Tel : +33 4 94 30 49 13, Fax : +33 4 94 87 93 47

isabelle.taupier.letage@ifremer.fr

Rationale:

In the whole Mediterranean Sea the general circulation of the water masses describes a counter-clockwise circuit along the coasts¹. The currents are unstable and generate meanders and eddies (cf Fig.1): currents are thus highly variable in both space and time. Therefore to understand the functioning and the evolution of the Mediterranean, and to track the transport of nutrients, pollutants etc., it is mandatory to get data in the coastal areas, at least off the 12 miles (~22 km) of the national waters. Yet, oceanographic sampling in such areas has become an issue.

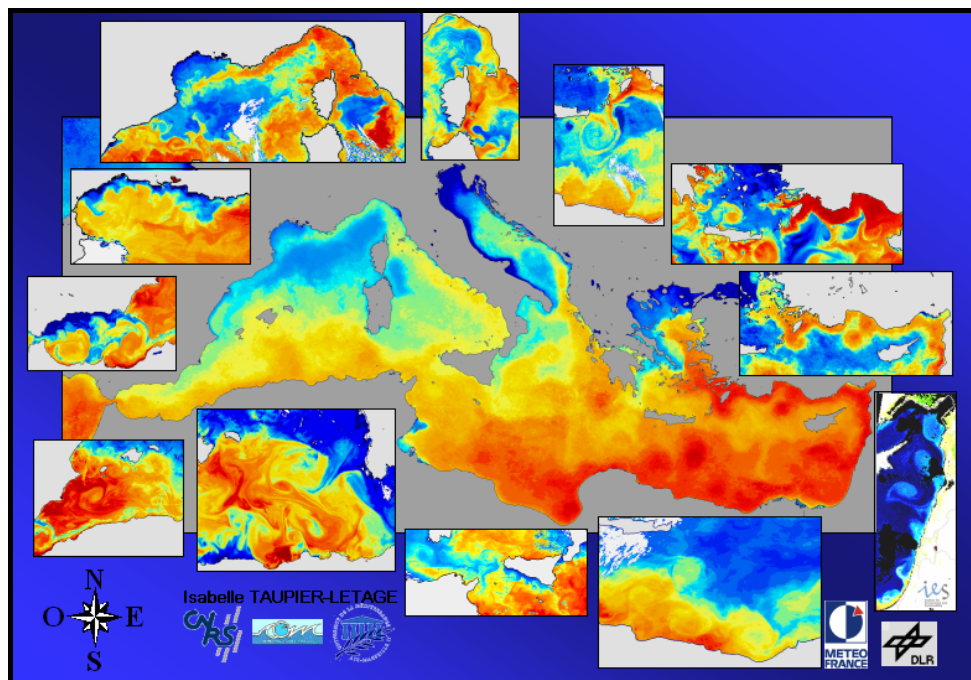


Fig. 1: The surface circulation, as seen from sea surface temperatures (increase from blue to red): its continuity and the variability of its paths ignore the political borders.

As the Mediterranean Sea is an enclosed sea, the claims for Exclusive Economic Zones (EEZ)² raise many problems, and no international consensus has ever been reached. When most of the countries used to consider that there was no restriction to sampling off the 12 miles (territorial waters), now more and more (EU) countries tend to consider the claims for EEZs. Thus they have to request an authorization to sample off that country, say for example in the band 12-50 miles. Such an authorization is unlikely to be granted, especially when the country has filed a claim for an EEZ 200 miles

¹ More precisely : along the continental slopes. However continental shelves are rare in the Mediterranean, therefore in most cases the slope is very close to the coastline.

² In the open seas the EEZ most often extends to 200 miles

(~370 km) wide ³. The necessary condition of an official cooperation, with scientists from that country invited and taking part to the oceanographic campaign, is not even a sufficient condition. This situation is most severe for the southern Mediterranean riparian countries, also because data are sparse, if existing at all (cf Fig.2).

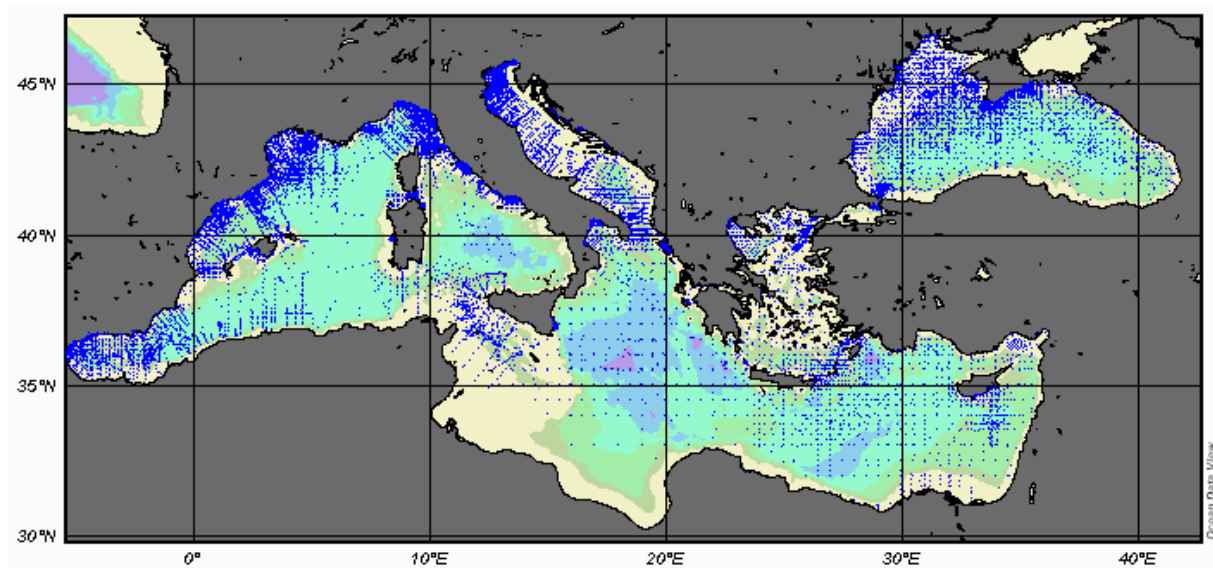


Fig. 1: Localization of the good salinity available data (as in 2000). From MEDAR/MEDATLAS project.

Questions:

- 1) Would it be possible to homogenize the policy of the EU countries regarding the issue of authorization requests for sampling off the 12 miles?⁴
- 2) Would it be possible to obtain a map with the limits of the territorial waters⁵, as well as of the EEZ claims for all riparian countries?
- 3) Would it be possible to foster a Mediterranean Sea-wide discussion to obtain a permanent authorization to deploy instruments (drifting, moored, shipborne...) which record basic parameters such as temperature, salinity (...), parameters covered moreover by the World Meteorological Organization agreement #40?⁶
- 4) Would it be possible to link EU co-funding and authorization to make oceanographic cruises and sampling off the 12 miles?

³ Most often reaching the coastline of the geographically opposite country!

⁴ It is politically delicate not to ask for an authorization when another EU country has done so already...

⁵ The angle of the limit is often not known (e.g between Libya and Egypt, between Greece and Turkey?)

⁶ No exploitations of resources, no samples