

# Étude de la dynamique océanique à fine échelle en Méditerranée Nord-Occidentale par comparaison entre données *in situ* MVP et mesures altimétriques du satellite SWOT

Melvil Bessière

Institut Méditerranéen d'Océanologie, Andrea M DOGLIOLI

## Mots Clés

Océanographie, mesure *in situ*, altimétrie, circulation océanique

## 1 Introduction

L'étude de la dynamique océanique est cruciale pour comprendre le rôle du phytoplancton dans les écosystèmes marins. Malgré l'importance d'observations *in situ* sur ce sujet, leur acquisition est limitée par la constante évolution, spatiale et temporelle, des processus physiques de petite échelle. C'est alors qu'intervient le consortium international ([www.swot-adac.org](http://www.swot-adac.org)) qui coordonne l'étude de la dynamique de la surface océanique grâce au nouveau satellite SWOT-*Surface Water and Ocean Topography* qui permet des mesures altimétriques à haute résolution, ce qui est une révolution dans le monde de l'océanographie. La campagne BIOSWOT-Med (<https://doi.org/10.17600/18002392>) en Méditerranée Nord-Occidentale se base sur l'opportunité offerte par le satellite SWOT pour allier mesure *in situ* et altimétrie. Elle vise à explorer la diversité du phytoplancton dans cette région, caractérisée par sa biodiversité, ses faibles concentrations de nutriments et sa circulation océanique limitée. En se concentrant sur les structures de fine échelle telles que les tourbillons et les filaments, cette étude vise à suivre leur évolution temporelle, notamment dans la région du Front Nord Baléare où on observe différentes communautés microbiennes. Ce front est la zone de rencontre des eaux issues de l'océan Atlantique (qui sont chaudes et peu salées) avec des eaux ayant circulé au sein de la Méditerranée qui sont poussées vers le front par les vents tels que le Mistral et la Tramontane (Millot Taupier-Letage (2005)[4]). En plus de cette étude bio-physique, la mission BIOSWOT-Med vise à valider les données acquises par le satellite.

## 2 Objectif du Stage

Mon stage s'inscrit dans le cadre du projet BioSWOT-Med et vise à reconstruire la circulation océanique à fine échelle dans la zone nord-ouest de la Méditerranée en comparant les données *in situ* et altimétriques de la campagne. Mon travail avait pour objectif final d'identifier les différents phénomènes observés durant la campagne. Il a également participé à une analyse plus détaillée des données *in situ*, mais je ne traiterai pas ce point dans le rapport.

## 3 Méthode

### 3.1 Mesure *in situ*

Les mesures *in situ* ont été réalisées à l'aide d'un instrument nommé MVP-*Moving Vessel Profiler*, équipé d'une sonde tractée et oscillante MSFFF-*Multi-Sensor Free Fall Fish*. Pour effectuer ces mesures, le MVP effectuait ce que l'on appelle des plongées, durant lesquelles il réalisait plusieurs échantillonnages de la colonne d'eau. Pour réaliser un échantillonnage, la sonde était lâchée dans l'eau à proximité de la surface, coulant rapidement pour réaliser ces mesures pendant la descente, puis était remonté. Cette opération était répétée de manière périodique tout au long de la plongée. Lors de ces profils à haute résolution de la colonne d'eau plusieurs paramètres étaient mesurés. Dans notre cas, nous nous intéressons particulièrement aux mesures de température, de vitesse du son, de conductivité et de pression.

### 3.2 Mesures altimétriques

Les mesures altimétriques ont été réalisées par le satellite SWOT qui était équipé de deux altimètres. Un altimètre radar nadir classique et un altimètre révolutionnaire : KaRIn. Le KaRIn-*Ka-band interferometer* se base sur le principe de l'interférométrie radar en bande Ka en mesurant le retard relatif pour l'observation d'une même

zone entre deux antennes légèrement décalées. Il fonctionne dans un mode dit bistatique, c'est-à-dire qu'une seule des deux antennes émet le signal mais les deux le reçoivent au retour. Cette caractéristique offre une précision de l'ordre du centimètre aux mesures. Il prend comme référence une approximation brute de la forme de la Terre (avec un aplatissement aux pôles) appelée ellipsoïde de référence. Pour pouvoir ensuite estimer les différentes perturbations du niveau de la mer, il prend comme référence la géoïde.

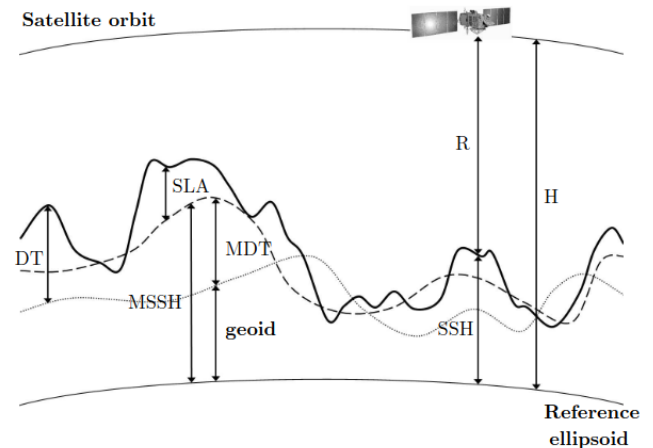


FIGURE 1 – Principes et nomenclature en altimétrie satellite, d'après Castruccio 2006 [2]

- R : distance entre le satellite et la surface de la mer. Obtenue grâce aux radars du satellite.
- H : distance entre le satellite et l'ellipsoïde de référence. Obtenue grâce aux consignes d'orbite du satellite.
- SSH-*Sea Surface Height* : niveaux des océans par rapport à l'ellipsoïde de référence,  $SSH = R - H$ . La hauteur SSH est en fait une combinaison de plusieurs effets :
  - la hauteur de la géoïde. cette hauteur a une très forte variabilité spatiale ( $\sim 100\text{m}$ ) mais une très faible et lente variabilité temporelle. En effet, le temps caractéristique de variations du champ de gravité terrestre et de masse est très long, à l'échelle que nous traitons nous pourrions considérer cette hauteur comme constante.
  - DT-*Dynamic Topography* : signature de la circulation océanique qui comprend une partie permanente stationnaire (circulation permanente liée à la rotation de la terre, aux vents permanents et le bilan radiatif) et une partie fortement variable (liée aux vents régionaux/locaux, à la variabilité saisonnière, etc.).

MSSH, MDT sont des moyennes temporelles des différents paramètres précédents.

C'est le niveau de la topographie dynamique DT et plus particulièrement ces anomalies qui nous intéressent pour pouvoir détecter et identifier les différents phénomènes. C'est également cette hauteur que nous utilisons pour réaliser les comparaisons avec le MVP.

### 3.3 Analyse données MVP

Dans un premier temps, il fallait convertir les données brutes renvoyées par le capteur en données exploitables, tout en vérifiant qu'elles n'étaient pas erronées. Pour ce faire, j'ai utilisé des scripts MATLAB développés par l'équipe du MIO. Le premier script demandait de choisir sur quelles données faire le contrôle qualité, je réalisais

toujours celui sur la température et la conductivité, car ce sont sur ces données que nous sommes le plus susceptibles d'avoir un problème. Ensuite, le script traçait ces deux paramètres ainsi que la profondeur en fonction du temps pour chaque échantillonnage. Pour chaque graphique il y avait deux problèmes possibles :

i) on observait que la sonde n'avait pas plongé suffisamment en profondeur, donc nous éliminions cette mesure ;

ii) il y avait une mesure de conductivité aberrante, alors j'envoyais les données à un chercheur pour qu'il les corrige à l'aide d'un autre script.

Puis, j'ai utilisé un autre script qui calculait la salinité à partir de la conductivité et de la température, ainsi que la densité. J'ai également adapté ce code en Python en utilisant la bibliothèque *GSW-Gibbs Sea-Water* basée sur les équations TEOS-10.

Pour vérifier les données récoltées par le MVP, je les ai comparées avec des données mesurées par la bathysonde qui permet des mesures plus précises, mais réalisables seulement lors des stations du bateau. Je les ai également comparé les données du thermosalinographe du bateau, en sélectionnant les mesures MVP les plus proches de la hauteur de la prise d'eau. Ces comparaisons n'ont révélé aucun décalage ou autre problème majeur sur les données MVP.

À partir des données traitées et vérifiées, je calcule l'anomalie de hauteur dynamique de la surface de l'eau (Meloni et al. (2019) [3]) en utilisant de nouveau la bibliothèque *GSW*.

### 3.4 Comparaison SWOT et MVP

Pour vérifier les améliorations attendues de SWOT je prends également les mesures obtenues par le produit satellite classique *DUACS-Data Unification and Altimeter Combination System*.

L'anomalie de hauteur dynamique calculée à partir des données MVP et les anomalies de la topographies dynamiques obtenues par les satellites n'ont pas les mêmes niveaux de références. En effet le niveau de référence du MVP correspond à la profondeur maximale atteinte par la sonde lors de la plongée ( $\approx 340\text{m}$ ) alors que celle des satellites correspond à leur géoïde de référence respective. Pour pouvoir les comparer on leur retire donc leur moyenne le long de la plongée pour qu'elles soient centrées.

## 4 Résultats

Durant la campagne il y a eu 24 plongées dont je présente ici seulement la PL13. Elle se trouve au sud du front proche de l'île de Minorque (cf. Figure 4).

La figure 2 présente les différentes hauteurs d'anomalies de la surface de la mer.

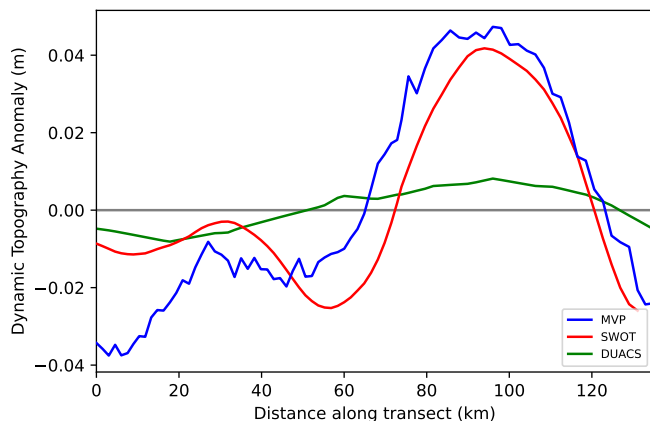


FIGURE 2 – Anomalie du niveau de la mer en fonction de la distance parcourue le long de la plongée, mesurée par les différents instruments

On observe dans les données SWOT et MVP une augmentation des anomalies entre 80km et 120km qui correspond à une surélévation de niveau de la mer ce qui est la signature de la présence d'un tourbillon. Par contre, on remarque que DUACS n'observe pas cette structure dynamique.

Pour caractériser plus précisément ce tourbillon, on observe les mesures MVP de salinité et de température :

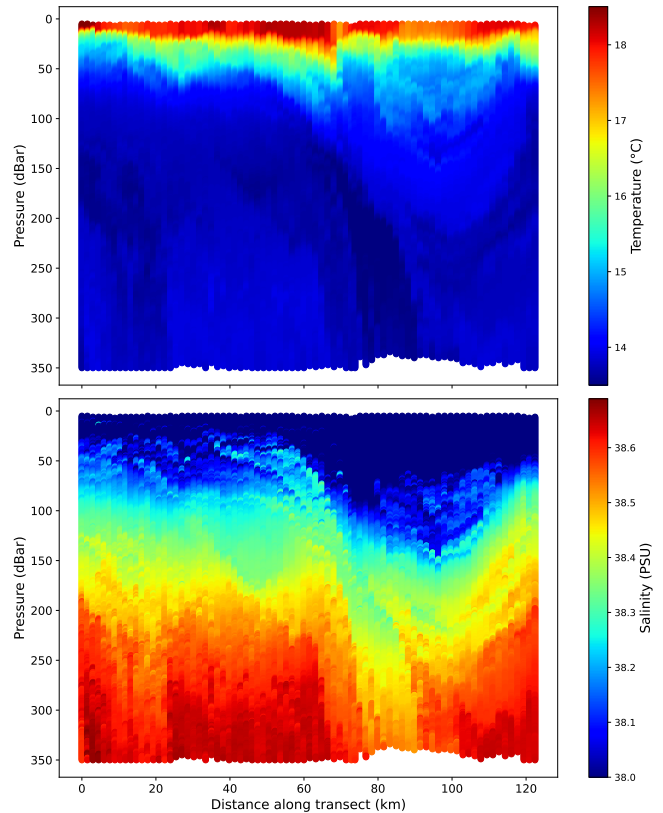


FIGURE 3 – Profil de température et de salinité le long de la plongée

On observe un approfondissement des thermoclines et des haloclines entre 80km et 120km.

Cette approfondissement associé avec l'élévation du niveau de la mer nous indique qu'il y a dans cette zone un tourbillon anticyclonique (Bakun (2006) [1])

## 5 Conclusion

On a pu, en faisant appel à l'altimétrie et aux données *in situ*, identifier un tourbillon cyclonique et observer que les mesures SWOT semblent être en meilleur accord avec les données *in situ* que les données DUACS.

Ayant consacré un certains temps à la vérification des données MVP, une tâche cruciale souvent négligée en océanographie en raison des incertitudes environnementales dominant celles liées aux instruments, il reste à réaliser un travail d'interprétation similaire à celui réalisé avec la PL13 pour toutes les plongées afin de reproduire la circulation océanique observée pendant la campagne et de valider les données SWOT.

Pour ajouter un élément de comparaison entre le MVP, SWOT et DUACS il pourrait être intéressant de comparer les vitesses géostrophiques des différents instruments. Cela permettrait également d'avoir une information encore plus complète sur la circulation océanique.

Ce stage m'a permis de découvrir les principes de base de l'océanographie. J'y ai acquis une compréhension des fondements théoriques, des méthodes de mesure, ainsi que des défis liés à la mesure *in situ*, avec une exploration des divers outils et techniques utilisés pour l'analyse des données.

Je rédige également un rapport en anglais pour le consortium SWOT-ADAC.

## 6 Annexe

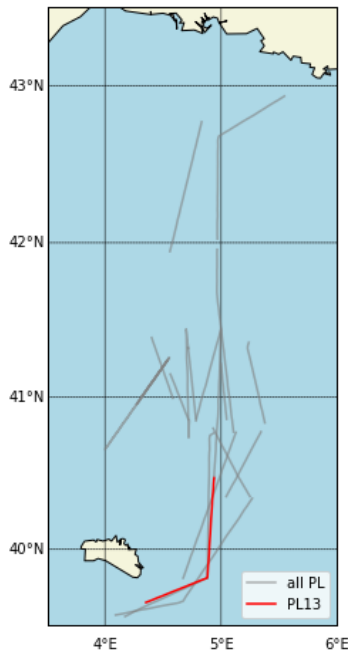


FIGURE 4 – Carte de toutes les plongées analysées (en rouge la PL13).

### Références

- [1] Andrew BAKUN. "Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae : opportunity, adaptive response and competitive advantage". In : *Scientia Marina* 70.S2 (oct. 2006), p. 105-122. DOI : 10.3989/scimar.2006.70s2105. URL : <https://scientiamarina.revistas.csic.es/index.php/scientiamarina/article/view/171>.
- [2] Frédéric CASTRUCCIO. "Apports des données gravimétriques GRACE pour l'assimilation de données altimétriques et in-situ dans un modèle de l'Océan Pacifique Tropical." Theses. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, déc. 2006. URL : <https://theses.hal.science/tel-00138506>.
- [3] M. MELONI et al. "Toward science-oriented validations of coastal altimetry : Application to the Ligurian Sea". In : *Remote Sensing of Environment* 224 (2019), p. 275-288. ISSN : 0034-4257. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.028>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719300264>.
- [4] Claude MILLOT et Isabelle TAUPIER-LETAGE. "Circulation in the Mediterranean Sea". In : *The Mediterranean Sea*. Sous la dir. d'Alain SALIOT. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 29-66. ISBN : 978-3-540-31492-9. DOI : 10.1007/b107143. URL : <https://doi.org/10.1007/b107143>.

### Glossaire

**altimétrie** : technique de mesure de la hauteur d'un point par rapport à une surface de référence. Utilisée pour mesurer le niveau des océans depuis l'espace. 1

**bathysonde** : instrument multiparamétrique permettant de réaliser des profils verticaux continus de la colonne d'eau. Il mesure les mêmes paramètres que le MVP avec une plus grande précision, mais n'est déployable qu'en station. 2

**circulation océanique** : mouvement à différentes échelles des masses d'eau à travers les océans, influencé par des facteurs tels que les vents, la température, la salinité et la force de Coriolis. 1

**colonne d'eau** : Selon l'IFREMER, le concept de colonne d'eau permet "de décrire les caractéristiques physiques (température, salinité, pénétration de la lumière) et chimiques (pH, teneur en oxygène dissous, sels nutritifs, métaux...) de l'eau de mer à différentes profondeurs pour un point géographique donné". 1

**filaments** : structures océanographiques proches de celles des tourbillons mais qui ne sont pas fermés. Ils peuvent être des bras partant de tourbillons. 1

**front** : zone géographique où deux masses d'eau différentes se rencontrent. 1

**géoïde** : modèle de la forme de la Terre qui reflète la forme de la surface de la mer en l'absence de perturbations (vents, vagues, ...). Il s'agit d'une surface très irrégulière et ondulée qui reflète les variations globales de la gravité. 1

**haloclines** : limites entre deux masses d'eau de salinité différentes. 2

**in situ** : mesure effectuée directement sur le site d'étude, par opposition à des mesures effectuées à distance ou en laboratoire. 1

**interférométrie** : technique de mesure qui utilise le phénomène d'interférence des ondes. 1

**phytoplancton** : ensemble de micro-organismes aquatiques végétaux, qui flottent en suspension dans les milieux marins et d'eau douce, et qui jouent un rôle crucial dans la photosynthèse et la production d'oxygène. 1

**TEOS-10** *Thermodynamic Equation Of Seawater - 2010*, équation utilisée par les océanographes et les climatologues pour réaliser les différents calculs et conversions. Elle relie les différents paramètres de l'eau de mer : salinité, température, densité.. 2

**thermoclines** : limites entre deux masses d'eau de températures différentes. 2

**thermosalinographe** : appareil de mesure de température et de salinité en surface de l'océan. Effectue des mesures à intervalle régulier, de l'ordre de la minute pour la campagne BioSWOT-Med. Il est branché sur un des circuits d'eau du navire. 2

**tourbillons** : structures océanographiques circulaires caractéristiques de la turbulence océanique à méso-échelle (10-100 km) et à subméso-échelle (1-10km) ayant la capacité de se déplacer. Pour les mêmes phénomènes à plus grandes échelles on utilisera le terme de "gyre". 1

**vitesses géostrophiques** : vitesses induites par la force de Coriolis et à la force associée au gradient de pression dans un plan horizontal. 2