

Développement d'un modèle numérique de simulations de trajectoires lagrangiennes dans le cadre de la campagne PROTEVS-GIB

Présenté par : Volorio-Galéa Anastasia

L3 SVT

Parcours Océanographie Physique et Biogéochimique

Année 2020-2021

Mémoire de stage en Laboratoire de recherche

Début février - fin avril 2021

Responsable de stage : M. Andrea Doglioli

Structure d'accueil : MIO

Remerciements

Je tiens tout d'abord, à exprimer toute ma gratitude envers mon maître de stage, M. Andrea Doglioli, enseignant-chercheur à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie de Marseille, pour m'avoir aidée tout au long de ce stage, en me faisant part de ses connaissances, aussi bien pratiques que théoriques.

Les différents échanges, en particulier les réunions en visioconférence auxquelles j'ai pu assister avec les chercheurs et étudiants, m'ont permis de me sentir d'avantage impliquée dans la campagne PROTEVS-GIB. En outre, en m'incitant à travailler sur L^AT_EX, M. Doglioli m'a permis d'anticiper des méthodes de travail qui me seront utiles dans la poursuite de mon cursus universitaire.

Je remercie également les intervenants de la campagne PROTEVS-GIB, notamment Lucie Bordoïs et Roxanne Tzortis, ainsi que M. Frederic Le Moigne, chef de mission de la campagne PARTY, pour leur bienveillance.

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 1.1 | La campagne PROTEVS-GIB | 1 |
| 1.2 | La mer d’Alboran | 3 |
| 2 | Matériels et méthodes | 5 |
| 2.1 | Les outils numériques employés | 5 |
| 2.1.1 | Langage de rédaction | 5 |
| 2.1.2 | Langage de script | 5 |
| 2.2 | Les données satellitaires | 6 |
| 2.2.1 | Les variables de vitesse et topographiques | 6 |
| 2.2.2 | La cartographie | 6 |
| 2.3 | Les données <i>in situ</i> | 7 |
| 2.4 | Le modèle numérique | 8 |
| 2.4.1 | Fenêtre spatio-temporelle | 8 |
| 2.4.2 | Approximations physiques | 8 |
| 2.4.3 | Approximations numériques | 9 |
| 2.4.4 | Notions essentielles à prendre en considération | 10 |
| 3 | Résultats | 11 |
| 3.1 | Modèle d’advection-diffusion | 11 |
| 3.2 | Simulation des trajectoires lagrangiennes basée sur le modèle advection uniquement | 11 |
| 3.3 | Tests de sensibilité du pas de temps | 12 |
| 3.3.1 | Dans un champ stationnaire | 12 |
| 3.3.2 | Dans un champ variable | 13 |
| 3.4 | Simulation des trajectoires lagrangiennes basée sur le modèle advection- diffusion | 14 |
| 3.5 | Trajectoires simulées et trajectoires des bouées de la campagne | 15 |
| 4 | Discussion | 18 |
| 4.1 | Précision du modèle numérique | 18 |
| 4.1.1 | Comparaison des trajectoires des bouées à celles simulées | 18 |
| 4.1.2 | Des approximations à l’origine de sources d’erreurs | 18 |
| 4.2 | Application du modèle pour la campagne PARTY | 20 |
| 5 | Conclusion et perspectives | 23 |

1 Introduction

1.1 La campagne PROTEVS-GIB

Dans le cadre de l'étude de la circulation océanique dans le détroit de Gibraltar et la mer d'Alboran, une campagne d'océanographie PROTEVS-GIB¹, a été conduite par le SHOM², en partenariat avec de nombreux laboratoires tels que LEGOS-IRD³ de Toulouse, MIO⁴ de Marseille, LOPS⁵ de Brest, et la DHOC⁶ marocaine. Cette campagne s'est déroulée du 3 au 23 octobre 2020, à bord du navire océanographique, L'Atalante, de l'IFREMER⁷. Après avoir quitté le port de Brest le 3 octobre, le navire a mouillé dans sa zone d'étude 5 jours plus tard, puis a rejoint le port de la Seyne sur Mer, le 23 octobre 2020, une fois la mission accomplie.

Le détroit de Gibraltar et la mer d'Alboran suscitent un vif intérêt pour les scientifiques océanographes. Situé entre l'Espagne et le Maroc, le détroit est bordé par des chaînes montagneuses au nord et au sud du détroit, connues sous le nom de colonnes d'Hercule, dont la symbolique antique désigne la séparation entre le monde civilisé de la Méditerranée et l'au-delà. Au point de passage le plus étroit, la largeur du détroit n'excède pas 15 km et constitue une des voies maritimes les plus fréquentées au monde, avec en moyenne un flux de 300 navires par jour. La mer d'Alboran quant à elle, se situe à l'est du détroit, en mer Méditerranée, entre la péninsule ibérique au nord et le Maghreb au sud (Figure 1).



FIGURE 1 – Vue satellite du détroit de Gibraltar et de la mer d'Alboran.

© Rapport d'Écologie et d'activités humaines dans la mer d'Alboran

-
1. PROTEVS réfère à Protée, divinité marine dans la mythologie grecque ; GIB réfère à la zone d'étude de la campagne, le détroit de Gibraltar
 2. Service hydrographique et océanographique de la Marine
 3. Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales sous tutelle de l'Institut de recherche pour le développement
 4. Mediterranean Institute of Oceanography
 5. Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale
 6. Division Hydrographie, Océanographie et Cartographie
 7. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

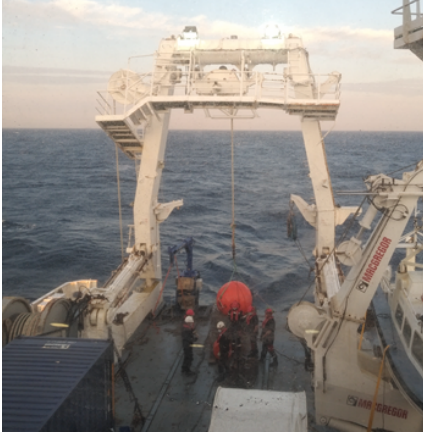
Du point de vue de l'aspect océanographie physique de cette zone d'étude, il s'agit d'une zone d'échanges intenses entre la mer Méditerranée et l'océan Atlantique [Naranjo et al., 2015], [Millot et al., 2006]. Les échanges s'effectuent au niveau des masses d'eau entrant en mer Méditerranée, avec 1 million de $m^3.s^{-1}$, et l'équivalent pour les masses d'eau sortant de la Méditerranée. En plus des échanges de masses d'eau, s'ajoutent d'autres éléments, tels que : le phénomène de la marée, le rétrécissement du détroit, une bathymétrie très accidentée, avec notamment, le seuil de Camarinal situé à environ 200 m de profondeur. Tous ces facteurs contribuent à favoriser une courantologie et des processus spécifiques entraînant la formation de courants très intenses souvent supérieurs au $m.s^{-1}$.

La campagne PROTEVS-GIB se donne comme objectif d'étudier les phénomènes océanographiques susmentionnés, et en particulier, la marée avec le ressaut hydraulique, les processus à méso-échelles et fine échelles, tels que la gyre d'Alboran, ainsi que les phénomènes d'upwelling et downwelling [Stanichny et al., 2005]. L'ensemble non exhaustif de ces études vise à affiner les modèles de prévision déjà existants des processus océanographiques de cette zone. A cet effet, l'équipage composé de techniciens, d'ingénieurs et de scientifiques, disposent de moyens océanographiques non négligeables pour mener cette étude :

- Cinq mouillages déployés à des emplacements stratégiques pour l'obtention de séries de profils de courant, température, salinité, et ce sur plusieurs semaines (Figure 1a),
- Des sondeurs acoustiques, comme les profileurs de courant de coque ADCP⁸, pour saisir les structures dynamiques,
- Des engins oscillants comme le Seasoar dont le remorquage permet de compléter les informations obtenues lors de précédentes études (Figure 1b),
- Des bouées dérivantes lagrangiennes larguées trois par trois, à différentes profondeurs. Seules les données de ces bouées dérivantes ont été utilisées dans le cadre de ce stage,
- Des données satellites relatives à l'altimétrie, la température, et la couleur de l'eau, ainsi que des données issues des modélisations utilisées dans le cadre du déroulement des opérations.

La campagne a été confrontée à différents obstacles, au nombre desquels, un environnement très énergétique lié aux courants intenses, à un trafic maritime chargé, à la présence de pêcheurs à la palangre, et à une bathymétrie accidentée.

8. Acoustic Doppler Current Profiler



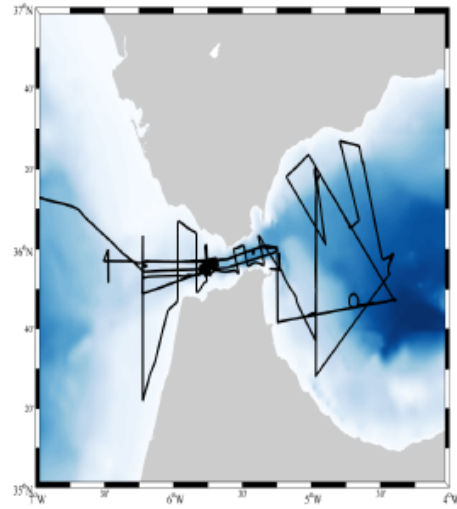
(a) Mise à l'eau du mouillage.
© MIO TZORTZIS Roxane



(b) Le Seasoar
© MIO TZORTZIS Roxane



(c) L'Atalante à la Seyne sur Mer
© MIO TZORTZIS Roxane



(d) Route de L'Atalante dans le détroit de Gibraltar et la mer d'Alboran
© MIO TZORTZIS Roxane

FIGURE 2 – Instruments et données complémentaires de la campagne PROTEVS-GIB.

1.2 La mer d'Alboran

La plupart des bouées lagrangiennes ont été larguées à l'entrée est du détroit de Gibraltar, et ont dérivé jusqu'en Mer d'Alboran. L'objectif des scientifiques était d'acquérir avec le plus de précision possible, un suivi des masses d'eau aux différents niveaux de profondeurs où sont immergés les ancrs flottantes des bouées.

La mer d'Alboran présente des caractéristiques de courantologie particulières. Suite à un fort gradient de densité entre le bassin de l'Atlantique et celui de la Méditerranée, les eaux de l'Atlantique se jettent dans la mer d'Alboran ce qui génère des courants étroits, très intenses de l'ordre du $m.s^{-1}$. Ce courant finit par s'enrouler formant deux gyres, une à l'est et l'autre à l'ouest de la mer. Ces gyres ont tendance à occuper la zone pendant de longues périodes, ce qui permet de dire que la circulation de la mer d'Alboran est dans

un état quasi-stationnaire [Peliz et al., 2015]. La Figure 3 présente la carte de la situation de surface en mer d’Alboran, et plus particulièrement la gyre ouest, gyre anticyclonique comme le signale la topographie surélevée formant un dôme au-dessus du gyre. Le repère rouge en haut à droite de la figure a été ajouté pour permettre de vérifier la dimension du vecteur vitesse du champ de courant.

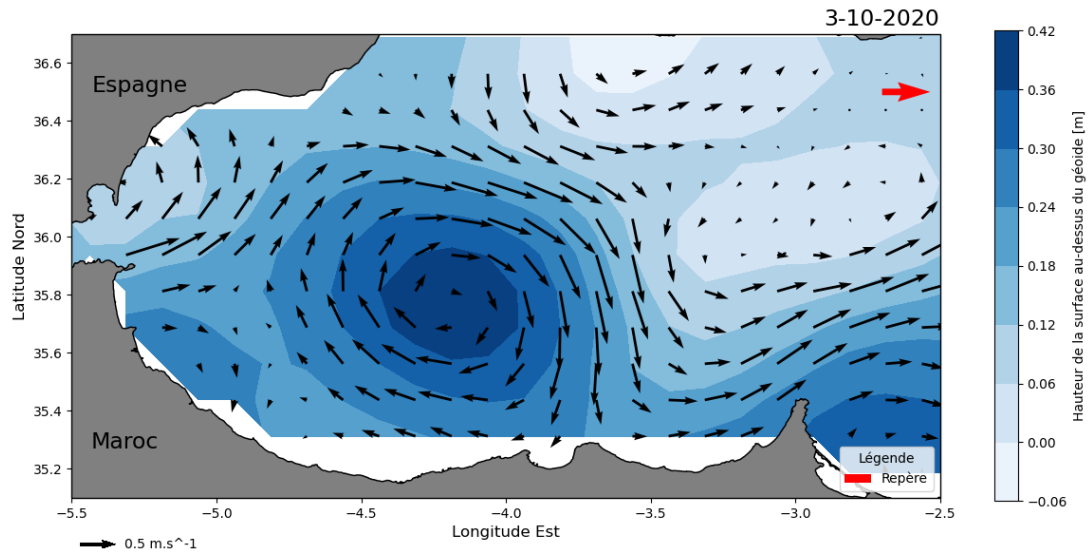


FIGURE 3 – Situation de surface de la mer d’Alboran en date du 3/10/2020.
Résolution spatiale : 0.125°

Le stage s’inscrit dans ce contexte géographique et océanographique. À partir de l’exploitation des données de courantologie satellitaires et celles issues de la campagne PROTEVS-GIB, le stage se donne pour objectif de simuler numériquement des trajectoires de particules lagrangiennes, dans la région de la mer d’Alboran, durant la période de la campagne. La méthode repose sur l’élaboration d’un modèle advection-diffusion, qui suit le schéma Euler Forward. Une fois les trajectoires simulées, ces dernières peuvent alors être comparées aux trajectoires des bouées dérivantes de la campagne, permettant ainsi de déduire si le modèle numérique développé est assez précis ou non, et les éventuelles améliorations à y apporter. Enfin, la dernière partie du stage consiste à appliquer ce modèle à une autre campagne océanographique, la campagne PARTY, qui s’est déroulée au cours du mois de mai 2021, afin d’aider les chimistes à sélectionner une zone de déploiement idéale, pour leurs lignes dérivantes.

2 Matériels et méthodes

2.1 Les outils numériques employés

2.1.1 Langage de rédaction

L^AT_EX est un langage informatique utilisé dans des logiciels de traitement de texte adaptés comme TeXworks, dans le but de faciliter la rédaction de documents, en particulier les documents scientifiques. Le système de ce langage informatique, se compose d'une bibliothèque de macro-commandes permettant la réalisation automatique de mise en page, respectant les normes typographiques, à partir de document rédigé initialement en langage L^AT_EX. C'est ce langage qui a été utilisé pour la rédaction du rapport du stage.

Les avantages de L^AT_EX reposent sur de nombreux critères. Outre sa gratuité, il permet aux rédacteurs, de se focaliser sur le contenu de leur dossier, sans se soucier de la mise en forme puisqu'elle est réalisée de manière automatique. De plus, il permet la création de documents variés tels que des articles, des thèses, des présentations, des diagrammes, etc. L^AT_EX se distingue également des autres systèmes de traitement dans la mesure où il permet de formuler des équations mathématiques complexes. Ces critères font de L^AT_EX un outil très utilisé dans divers domaines comme la physique, les mathématiques, l'informatique, aussi bien dans les universités que dans les centres de recherche. En contrepartie, il requiert un apprentissage plus conséquent que celui nécessaire à l'utilisation de logiciel de traitement de texte, comme Word.

2.1.2 Langage de script

Le langage de programmation interprété, Python (version 3.7), a été employé pour l'élaboration du code numérique, dans l'environnement de développement Spyder.

Python présente l'avantage d'être gratuit, et offre un large panel de librairies prédéfinies qui regroupent un ensemble de fichiers appelés modules, lesquels contiennent du code en langage Python. L'ensemble de ces éléments fonctionnent sur tous les principaux systèmes d'exploitation, et permettent d'accroître les possibilités de programmation : calcul numérique, élaboration de cartes et animations, etc. D'un apprentissage pratique, il présente néanmoins l'inconvénient d'être plus lent que des langages compilés.

Dans le cadre du stage, les librairies suivantes ont été utilisées :

- `matplotlib` et plus précisément le module `pyplot` destiné à l'élaboration et la personnalisation de graphiques,
- `numpy` utilisé pour manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels,
- `cartopy` dédié à la cartographie,
- `xarray` permettant de travailler sur des fichiers au format `netCDF`,
- Le module `os`, qui accède au système d'exploitation, et ainsi au contenu d'un dossier pour travailler sur certains fichiers.

2.2 Les données satellitaires

2.2.1 Les variables de vitesse et topographiques

Pour l'élaboration du code numérique, des données scientifiques de la mer d'Alboran ont été téléchargées à partir de la plateforme de Copernicus.

Le service Copernicus est un Programme d'observation de la Terre de l'Union européenne qui concentre les informations basées sur l'observation de notre planète et de son environnement. Ces informations sont recueillies à l'échelle mondiale, à partir de satellites et de systèmes de mesure terrestres, aériens et maritimes puis mises gratuitement à la disposition, de toute personne susceptible d'avoir besoin de ces données, comme les étudiants et scientifiques par exemple. Il existe six flux thématiques de services Copernicus, notamment les services atmosphère, terrestre et marin.

Copernicus Marine Service ou CMEMS⁹ est une des composantes du programme Copernicus, liée à l'étude de la mer. Elle propose régulièrement des données fiables sur l'état de l'océan, à l'échelle mondiale et régionale, et se subdivise en thématiques : le Bleu représente l'aspect physique maritime, le Blanc représente les banquises, et le Vert, la biogéochimie.

Dans le cadre du stage, seules les données satellitaires ont été téléchargées sur le site du CMEMS, à partir du fichier au format `netCDF` dont l'identifiant du produit est : **SEALEVEL_EUR_PHY_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_060**. Ce fichier couvre une large zone géographique de surface, qui comprend l'ensemble de la mer Méditerranée ainsi qu'une partie de l'océan Atlantique et de la mer du Nord, avec une résolution spatiale de 0.125° . Pour ce qui est de la période, ce fichier rassemble les données de 2019 jusqu'à nos jours, avec une fréquence de mise à jour quotidienne. Pour les besoins du stage, trois variables ont été extraites :

- Les vitesses géostrophiques absolues de surface, à savoir les variables `ugos` pour la composante horizontale, et `vgos` pour la composante verticale, qui permettent de tracer le champ de courant,
- La variable `adt` qui permet de représenter la topographie dynamique absolue, i.e. la hauteur de la surface de la mer au-dessus du géoïde.

2.2.2 La cartographie

En plus de l'affichage du champ de vitesse et de la topographie, il est intéressant d'afficher la ligne de côtes des pays qui délimite la mer d'Alboran, par l'intermédiaire des modules `feature` et `crs` de la librairie `cartopy`. Cependant, en utilisant seulement les données géographiques préprogrammées de Python, la carte affiche des lignes de côtes peu représentatives des pays, en raison d'une résolution trop faible. Il est donc préférable de

9. Copernicus Marine Environment Monitoring Service

télécharger des fichiers supplémentaires fournis par la NOAA ¹⁰, l'agence américaine en charge de l'étude de l'océan et de l'atmosphère, contenus dans le dossier GSHHG ¹¹ lequel comprend un ensemble de données géographiques littorales de haute-résolution. Pour une exécution optimale du code, il est nécessaire en amont d'extraire l'ensemble des fichiers contenus dans le dossier au format **zip**. Ces données permettent également à l'utilisateur de choisir la résolution de la carte. Ici la résolution choisie est maximale.

2.3 Les données *in situ*

Pour ce qui est des données *in situ*, il s'agit des trajectoires de certaines bouées déployées à différentes périodes de la campagne PROTEVS-GIB (Tableau 1), fournies par deux chercheurs présents à bord de L'Atalante. Ces données sont contenues dans des fichiers tableurs au format **csv** ¹², dont les valeurs sont séparées par des virgules, ce qui facilite l'importation des données sur Python à l'aide du module **os**. Ces fichiers contiennent entre autres, les coordonnées géographiques longitude et latitude des positions des bouées étudiées, ainsi que l'heure, relevée toutes les cinq minutes.

TABLEAU 1 : Quelques bouées dérivantes larguées durant la campagne et étudiées dans le cadre du stage.

| Numéro Argos ou IMEI | Type de bouée | Date de début des données | Date de fin des données | Profondeur d'immersion |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| 300234066470770 | Code reconditionné en WOCE | 16/10/2020 | 23/10/2020 | Surface |
| 300234066472780 | | | | |
| 300234066477720 | | | | |
| 300534060067270 | CODE I | 16/10/2020 | 23/10/2020 | 1 m |
| 300534060265380 | | | | |
| 300534060266310 | | | | |
| 300534060226420 | SC40 Iridium | 15/10/2020 | 23/10/2020 | 7 m |
| 300534060229410 | | | | |
| 300534060352880 | | | | |
| 300534060228420 | SC40 Iridium | 15/10/2020 | 23/10/2020 | 15 m |
| 300534060351990 | | | | |
| 300534060901370 | | | | |
| 300534060220400 | SC40 Iridium | 19/10/2020 | 23/10/2020 | 50 m |
| 300534060222410 | | | | |
| 300534060226400 | | | | |
| 300534060222430 | SC40 Iridium | 14/10/2020 | 23/10/2020 | 75 m |
| 300534060227400 | | 15/10/2020 | | |
| 300534060223410 | SC40 Iridium | 13/10/2020 | 23/10/2020 | 100 m |
| 300534060229390 | | 14/10/2020 | | |
| 300534060359730 | SC40 Iridium | 13/10/2020 | 23/10/2020 | 200 m |
| 300534060354750 | | 14/10/2020 | | |

10. National Oceanic and Atmospheric Administration

11. Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database; accessible en ligne sur <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/>

12. Comma-Separated Values

2.4 Le modèle numérique

2.4.1 Fenêtre spatio-temporelle

Pour développer le modèle numérique, il est nécessaire dans un premier de définir la fenêtre spatio-temporelle.

Étant donné que les données téléchargées couvrent l'ensemble de la mer Méditerranée, il faut restreindre ces données à la mer d'Alboran uniquement. Pour ce faire, dans le programme, les coordonnées longitudinales de -5.5°E à -2.5°E , ainsi que les coordonnées latitudinales de 35.1°N à 36.7°N ont été sélectionnées.

Pour ce qui est de la fenêtre temporelle, différentes dates ont été retenues au cours de cette campagne du 3 au 23 octobre 2020, en fonction des besoins attendus.

2.4.2 Approximations physiques

L'objectif de ce stage consiste à réaliser un code de simulation des trajectoires lagrangiennes de particules, lesquelles sont associées aux bouées dérivantes larguées en mer. Ici, seules les vitesses horizontales sont prises en compte, les vitesses verticales étant négligées. Ceci implique que les trajectoires sont modélisées dans un plan Cartésien en seulement deux dimensions, suivant x et y . Ainsi, les trajectoires des particules au cours du temps dans cet espace 2D sont régies par l'équation suivante :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \text{ avec } \vec{r} = (x, y) \text{ et } \vec{v} = (u, v) \quad (1)$$

où \vec{v} correspond à la vitesse vectorielle et non constante des particules et \vec{r} correspond aux positions successives des particules dans l'espace.

La mer d'Alboran est considérée comme un fluide dont l'écoulement est turbulent et non laminaire, i.e. écoulement dont la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire. Ainsi, d'apparence très désordonnée et d'un comportement difficile à prévoir, il n'est pas possible de mesurer une unique vitesse dans ce type d'écoulement. Cette constatation permet d'introduire la Décomposition de Reynolds, méthode qui consiste à chercher une vitesse lissée dans le temps, en décomposant la vitesse en une partie moyenne, appelée composante advective, ainsi qu'un écart à la moyenne, appelé composante diffusive. Cette dernière caractérise le déplacement non prévisible que ferait la particule d'un pas de temps à l'autre, en raison de la turbulence. Les vitesses lissées sont notées de la façon suivante : $u = \bar{u} + u'$ et $v = \bar{v} + v'$, avec la moyenne des écarts $\bar{u}' = 0$.

C'est à partir de la relation des positions successives des particules au cours du temps et de la Décomposition de Reynolds, que le modèle advection-diffusion peut être réalisé.

2.4.3 Approximations numériques

Afin de numériser le modèle advection-diffusion, le code a été développé selon une méthode simple de résolution d'équations différentielles, connue sous le nom de méthode d'Euler, plus précisément, la méthode d'Euler Forward, traduit en français par méthode d'Euler Explicite. À partir du développement limité de $\frac{d\vec{r}}{dt}$ de l'équation (1), la méthode utilisée permet de discrétiser les positions successives des particules au cours du temps. En voici les étapes :

Développement limité de $\frac{d\vec{r}}{dt}$ de l'équation (1) :

$$\vec{r}^{t+\Delta t} = \vec{r}^t + \vec{v}\Delta t \Rightarrow \vec{v} \simeq \frac{\vec{r}^{t+\Delta t} - \vec{r}^t}{\Delta t} \quad (2)$$

Discrétisation de l'équation (2) avec utilisation des vecteurs $\vec{r} = (x, y)$ et $\vec{v} = (u, v)$:

$$x^{t+\Delta t} = x^t + u\Delta t \quad \text{et} \quad y^{t+\Delta t} = y^t + v\Delta t \quad (3)$$

Décomposition de Reynolds insérée dans l'équation (3) avec $u = \bar{u} + u'$ et $v = \bar{v} + v'$:

$$x^{t+\Delta t} = x^t + (\bar{u} + u')\Delta t \quad \text{et} \quad y^{t+\Delta t} = y^t + (\bar{v} + v')\Delta t \quad (4)$$

Ainsi, en numérisant l'équation (3) dans le code numérique, il est possible d'obtenir les coordonnées x et y des positions des particules dans le plan Cartésien 2D au cours du temps. Mais pour numériser cette équation, il est nécessaire de définir en amont, les valeurs des variables \bar{u} , \bar{v} , u' , v' et Δt .

Tout d'abord, des tests de sensibilité doivent être effectués pour déterminer la valeur appropriée du Δt (en s). Dans le cas de la méthode d'Euler, le Δt doit être assez petit pour mener à une approximation satisfaisante. Ces tests doivent être réalisés sans la partie diffusive, afin de prendre en compte seulement l'impact du temps d'intégration sur la simulation.

Pour ce qui est des composantes advectives \bar{u} et \bar{v} (en $m.s^{-1}$), ces valeurs sont récupérées à partir des données satellitaires du champ de vitesse du CMEMS.

Enfin, s'agissant des composantes diffusives u' et v' (en $m.s^{-1}$), elles doivent être numérisées. Dans la mesure où ces variables représentent des déplacements non prévisibles liés à la turbulence, elles sont donc dites, variables pseudo-aléatoires. Pour générer ce type de variable, le module `random.normal` de la librairie `numpy` est utilisé. Cette fonction permet de donner des valeurs aléatoires - autrement dit, elle permet de générer du bruit, ou du mouvement brownien - à partir de la Loi normale de paramètre $N(\mu, \sigma)$, aussi connue sous le nom de Loi de Gauss. Il est donc nécessaire de lui attribuer en amont deux paramètres, à savoir l'espérance μ ainsi que l'écart-type σ . Dans le cadre du modèle

advection-diffusion, la valeur $\mu = 0$ a été choisie. Pour ce qui est de l'écart-type, ce dernier est lié au coefficient de diffusion K_H (en $m^2.s^{-1}$) et au pas de temps Δt par la relation suivante :

$$\sigma = \sqrt{2K_H\Delta t} \quad (5)$$

De même que pour le pas de temps Δt , des tests seront nécessaires pour déterminer la valeur adéquate du coefficient de diffusion K_H afin d'assurer le bon fonctionnement du modèle.

2.4.4 Notions essentielles à prendre en considération

Afin d'appliquer ce modèle numérique aux données satellitaires de manière fiable, trois notions importantes ont dû être prises en compte.

En premier lieu, il n'est pas possible de calculer directement les trajectoires des particules dans le modèle numérique à partir des coordonnées géographiques (en degré) choisies. Une étape intermédiaire est donc indispensable, laquelle consiste à calculer les trajectoires au sein de coordonnées de grille (sans dimension). Une fois les positions successives des particules obtenues, il ne reste plus qu'à convertir ces coordonnées de grille en coordonnées géographiques afin de pouvoir afficher les trajectoires dans la mer d'Alboran.

Une seconde étape à ne pas négliger est celle de la conversion des unités. En effet, les vitesses géostrophiques horizontales et verticales récupérées sur le site CMEMS, sont en $m.s^{-1}$. Cependant, les coordonnées géographiques sont en degré et non en mètre. Ainsi, il est nécessaire de convertir les vitesses en $degré.s^{-1}$, au risque d'induire une erreur. Ici, une méthode de conversion simple a été choisie, qui consiste à réaliser un produit en croix à partir de l'approximation suivante : la circonférence de la Terre, de 40 000 km, équivaut à 360°.

Enfin, il est important de prendre en compte les différents formats de coordonnées géographiques existants, et de convertir si besoin des coordonnées qui doivent être insérées dans le programme, au format adéquat. En effet, aujourd'hui trois formats sont utilisés :

- Degrés, minutes et secondes (DMS) : 35°24'12.2"N ; -3°10'26.5"E
- Degrés et minutes décimales (DMM), utilisé par les marins : 35° 24.2028'N ; -3° 10.4418'E
- Degrés décimaux (DD), employé dans les programmes scientifiques : 35.40338°N ; -3.17403°E

Dans le programme du stage, seul le dernier format ci-dessus est utilisé.

3 Résultats

3.1 Modèle d'advection-diffusion

La première étape de l'élaboration du modèle consistait à réaliser un programme exécutant un modèle d'advection-diffusion, pour en comprendre le fonctionnement général, et pouvoir ainsi l'appliquer au cas d'étude de la mer d'Alboran (Annexe I). La Figure 4, obtenue après exécution du programme, présente les trajectoires de cinq particules dans un référentiel cartésien, pour un nombre total de 333 pas chacune et un pas de temps $\Delta t=3600s$, soit 1h00. Afin de pouvoir effectuer des calculs pratiques pour vérifier la fiabilité du programme, un courant uniforme a été choisi, pour lequel la composante horizontale u s'élève à $0.3 m.s^{-1}$, et où la composante verticale v est nulle. Après calcul de la distance théorique de la trajectoire effectuée par ces particules, le résultat obtenu correspond à la distance mesurée, qui est de 359 640 m. Ainsi, ce programme est validé, et peut-être adapté aux besoins du stage.

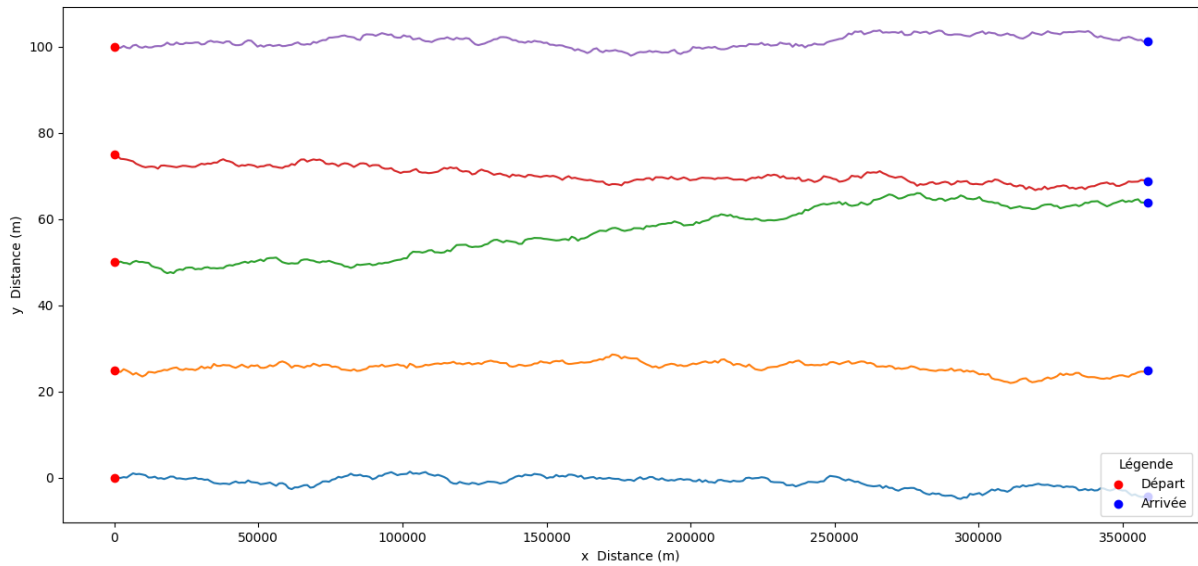


FIGURE 4 – Modèle advection-diffusion ;
 $u=0.3 m.s^{-1}$, $v=0 m.s^{-1}$, $\Delta t=3600s$, nombre de particules=5

3.2 Simulation des trajectoires lagrangiennes basée sur le modèle advection uniquement

Le modèle advection-diffusion a ensuite été adapté au champ de vitesse de surface de la mer d'Alboran, en deux étapes ; il s'agissait d'abord, de ne prendre en compte que la composante advective, puis d'y associer la composante diffusive, dans une seconde étape.

Dans le cadre de la première étape, cette modification de programme vise à simuler

les trajectoires lagrangiennes quotidiennes des particules dans le champ de vitesse de la mer d'Alboran, tout en prenant en compte, toutes les 24h, la variation du champ de vitesse (Annexe II). Dans le cas de la Figure 5, la période s'étend du 14/10/2020 au 23/10/2020 inclu, soit un total de 10 jours. Étant donné que la résolution spatiale des données CMEMS est faible, il est intéressant de simuler par exemple, 50 particules à la fois, et non pas une particule unique, afin d'obtenir une trajectoire moyenne. Pour ce faire, les points de départ des 50 particules ont d'abord été sélectionnés autour du point de départ de la particule initiale, selon un cercle de rayon de la résolution spatiale, soit 0.125° . Puis, afin d'affiner cette moyenne, un rayon de 0.2° a été conservé. Enfin, il est intéressant de noter que ce programme intègre les conditions d'échouage des particules.

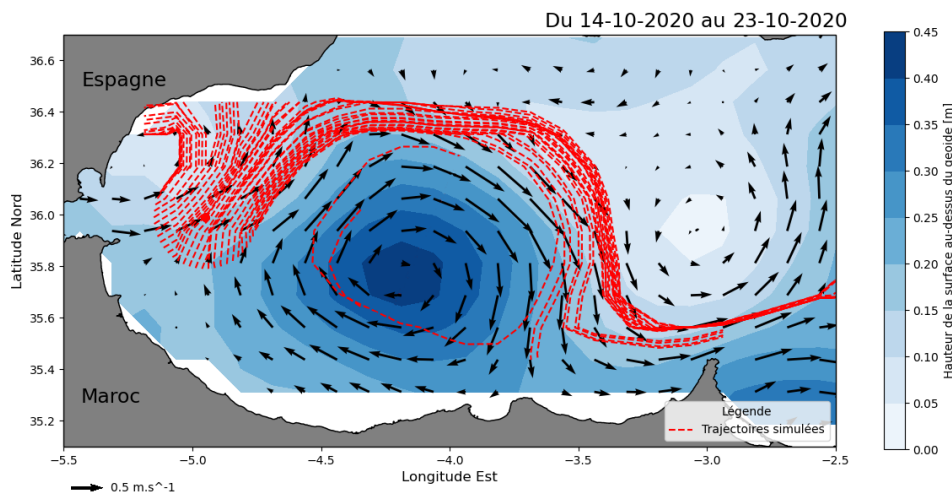


FIGURE 5 – Simulation de trajectoires lagrangiennes de 50 particules dans le champ de vitesse variable ; Résolution spatiale de 0.125° ; Départ selon un cercle de rayon 0.2° , centré sur -5.0°E ; 36.0°N .

3.3 Tests de sensibilité du pas de temps

Avant d'ajouter la composante diffuse, des tests de sensibilité du paramètre pas de temps Δt (en s) ont été réalisés dans l'optique d'améliorer le programme. Le principe de ces tests consiste à simuler les trajectoires à partir de différents temps d'intégration, et d'estimer *in fine*, quel pas de temps est le plus approprié pour être utilisé dans l'ensemble du code [Qiu et al., 2011].

3.3.1 Dans un champ stationnaire

Ce test de sensibilité s'est réalisé en 2 étapes. Tout d'abord, les trajectoires lagrangiennes ont été simulées dans un champ stationnaire sur trois mois, avec les valeurs de pas de temps suivantes : $\Delta t=1$ h, $\Delta t=3$ h, $\Delta t=1$ jour, $\Delta t=3$ jours, $\Delta t=10$ jours.

En considérant les trajectoires obtenues (Figure 6), les courbes rouge ($\Delta t=1$ h) et bleue ($\Delta t=3$ h) semblent mieux représenter les possibles trajectoires des particules dans

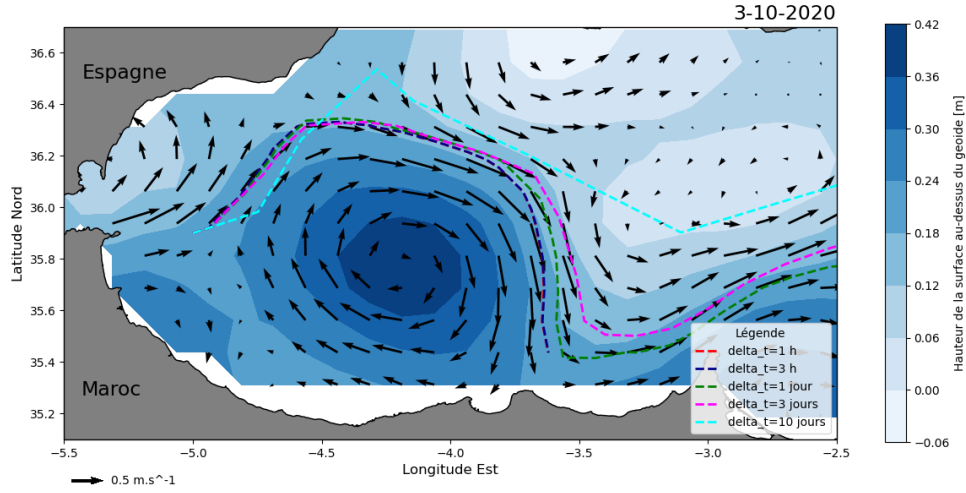


FIGURE 6 – Test de sensibilité du paramètre Δt dans un champ stationnaire sur trois mois; à noter que la courbe bleue est superposée sur la rouge

le champ de vitesse stationnaire. Ainsi, une présélection pour le second test permet de conserver les pas de temps de 1 h et de 3 h.

3.3.2 Dans un champ variable

La seconde étape consistait à réaliser ce même test, mais cette fois dans le champ de vitesse variable sur trois mois, avec uniquement les deux valeurs de pas de temps sélectionnées : $\Delta t=1$ h et $\Delta t=3$ h.

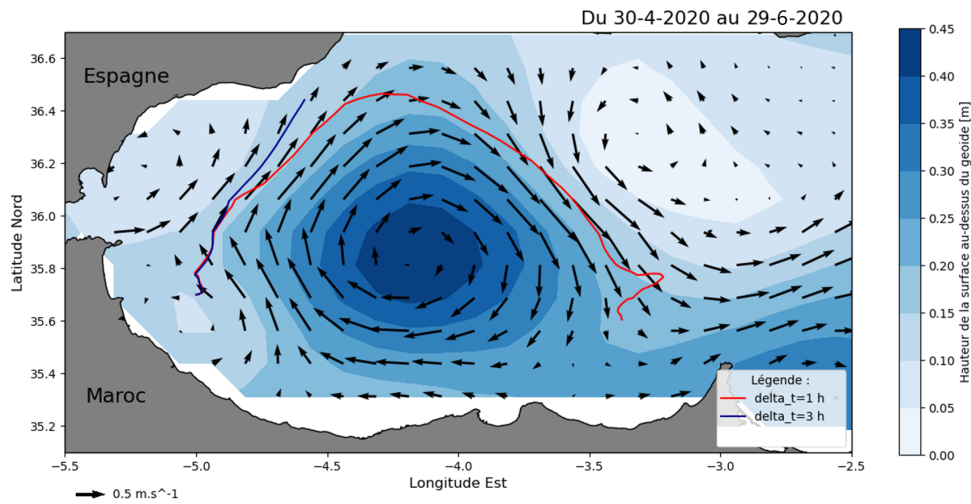


FIGURE 7 – Test de sensibilité du paramètre Δt dans un champ variable sur trois mois.

La Figure 7 présente deux trajectoires bien distinctes; la trajectoire la plus intéressante est celle correspondant au pas de temps de 1 h et est sélectionnée pour la suite.

3.4 Simulation des trajectoires lagrangiennes basée sur le modèle advection-diffusion

La composante diffusive a ensuite été ajoutée au programme (Annexe II). De nouveau, des tests ont dû être réalisés, pour déterminer cette fois, la valeur adéquate du coefficient de diffusion K_H (en $m^2.s^{-1}$). Ils ont été effectués dans le champ de courant variable sur 10 jours, à partir des valeurs suivantes (Figure 8) : $K_H=1 m^2.s^{-1}$, $K_H=10e-5 m^2.s^{-1}$, $K_H=10e-9 m^2.s^{-1}$ et $K_H=10e-10 m^2.s^{-1}$.

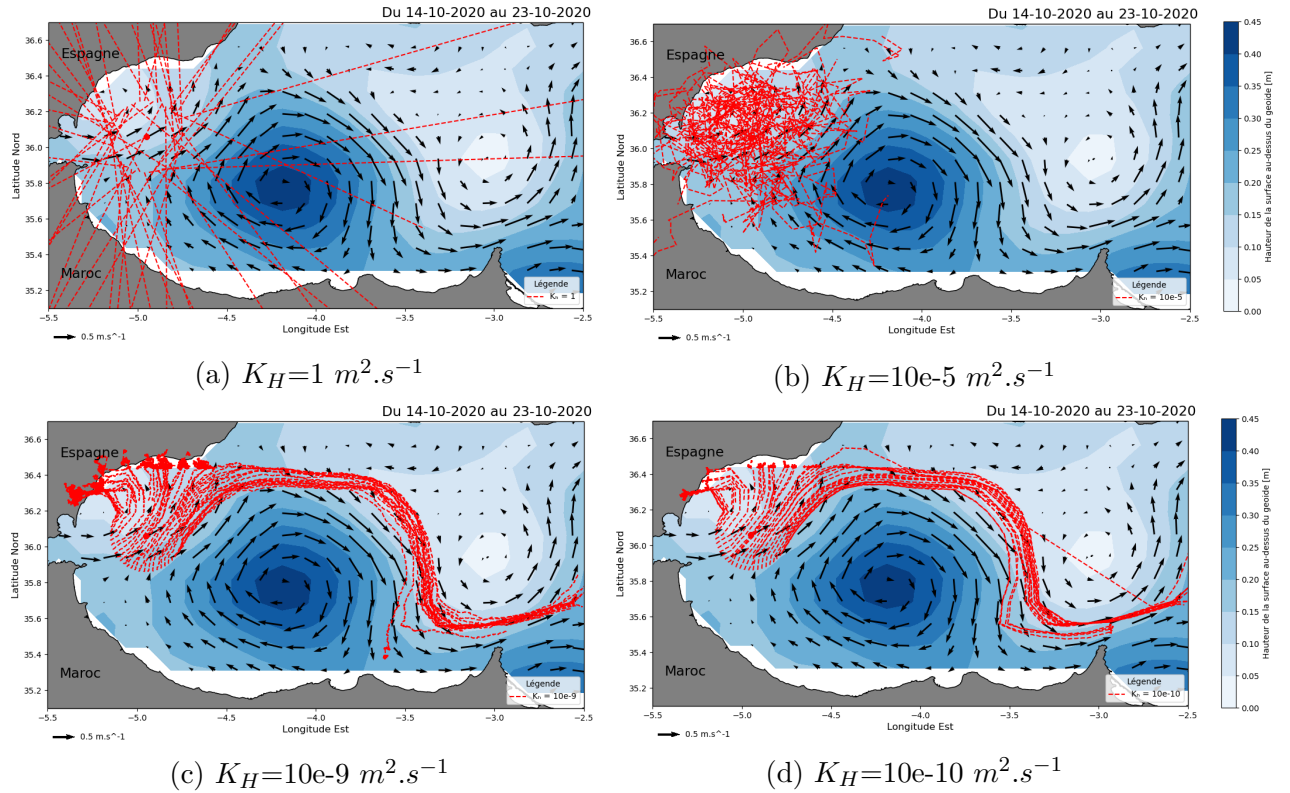


FIGURE 8 – Test du paramètre K_H dans un champ variable sur 10 jours avec $\Delta t=1$ h.

Au premier abord, il apparaît que le coefficient de diffusion est un paramètre sensible du modèle. En effet, pour une valeur de $K_H=10e-5 m^2.s^{-1}$ par exemple, les trajectoires simulées sont éclatées et ne suivent pas du tout le champ de vitesse de la mer. C'est à partir de valeurs de coefficient de diffusion bien plus faibles encore, que les trajectoires des particules suivent de nouveau le champ de vitesse de la mer d'Alboran. C'est ce que l'on peut observer dans les Figures 8(c) et 8(d). En outre, ces trajectoires moyennes semblent être très similaires, si ce n'est que l'une présente un caractère plus diffusif que l'autre. Ainsi, c'est le coefficient de diffusion de $10e-9 m^2.s^{-1}$ qui est retenu, dans la mesure où les trajectoires associées sont plus diffusives.

3.5 Trajectoires simulées et trajectoires des bouées de la campagne

Les bouées de la campagne PROTEVS-GIB ont été larguées à l'entrée est du détroit de Gibraltar, et en fonction de la profondeur et de la position géographique de largage, une partie de ces bouées a été emportée dans la gyre ouest d'Alboran, tandis qu'une autre partie a contourné cette gyre pour se retrouver dans la partie est de la mer d'Alboran (Figure 9).

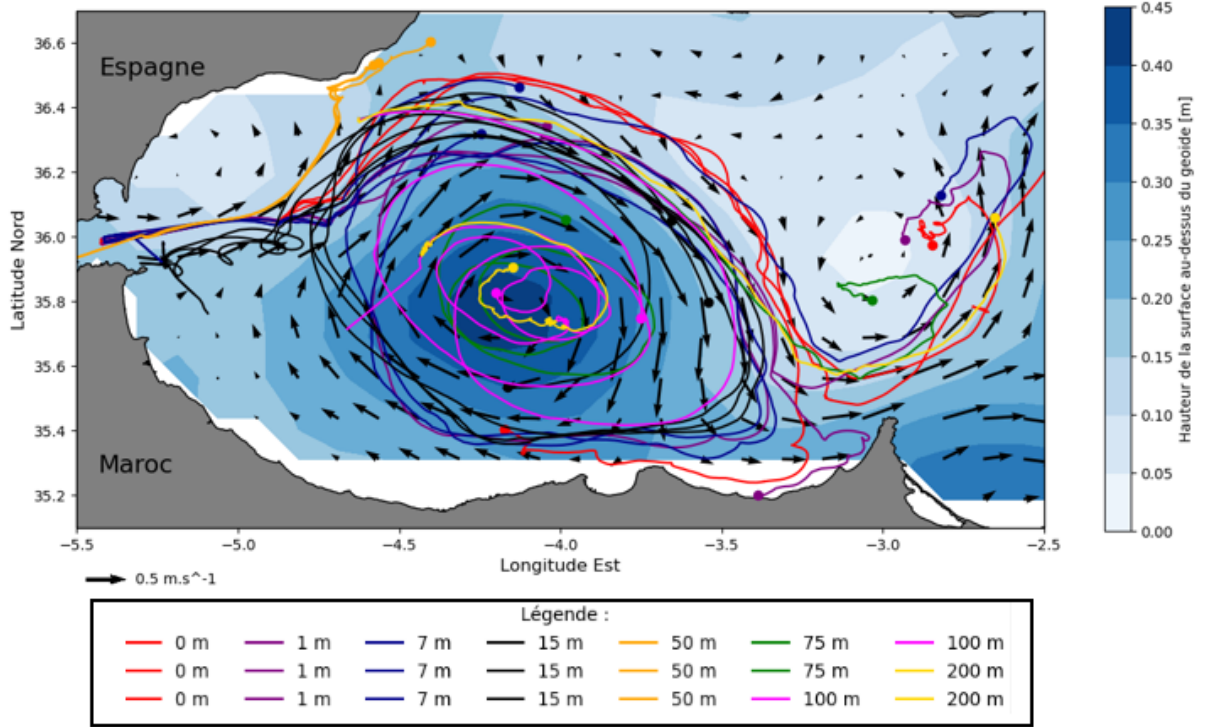


FIGURE 9 – Trajectoires effectuées par les bouées dérivantes, larguées durant la campagne PROTEVS-GIB à des périodes différentes.

A partir du programme basé sur le modèle advection-diffusion, et à partir du pas de temps $\Delta t = 1$ h et du coefficient de diffusion de $K_H = 10e-9 \text{ m}^2.s^{-1}$ sélectionnés précédemment, un travail de comparaison des trajectoires simulées et des bouées a été réalisé (Figure 10). Pour une comparaison optimale, l'affichage des trajectoires s'est effectué par profondeur, avec représenté sur chaque carte :

- Les trajectoires des bouées larguées à la même profondeur au cours de la même période,
- La simulation d'une trajectoire de particule, avec pour point de départ la position approximative du point de largage des bouées en question. Ceci permet d'obtenir des cartes plus épurées. Dans cette même optique d'optimiser l'affichage des cartes, certaines trajectoires moyennes ont été simulées non pas à partir de 50 particules, mais à partir de 10 particules, ce qui est le cas des bouées dérivant dans la gyre pour les profondeurs de 100 m et 200 m. Par ailleurs, pour ces mêmes profondeurs,

(Figures 10(i) et 10(j)) les cartes ont été réalisées en deux fois, puisque les bouées n'ont pas été larguées à la même période.

L'étude des cartes révèle que les trajectoires moyennes simulées sont très similaires aux trajectoires des bouées larguées pour de faibles profondeurs, i.e. de la surface à 7 m (Figures 10(a), 10(b) et 10(c)). La simulation à la profondeur de 50 m (Figure 10(e)) ne permet pas de tirer de conclusion dans la mesure où, bien que les trajectoires soient très similaires dans ce cas aussi, les bouées n'ont pas dérivé assez longtemps et ont rapidement échoué sur les côtes ibériques. Pour ce qui est des études menées à plus grande profondeur, deux situations se présentent : soit les trajectoires simulées se rapprochent en certains points des trajectoires des bouées, soit elles divergent totalement, comme c'est le cas à la profondeur de 100 m.

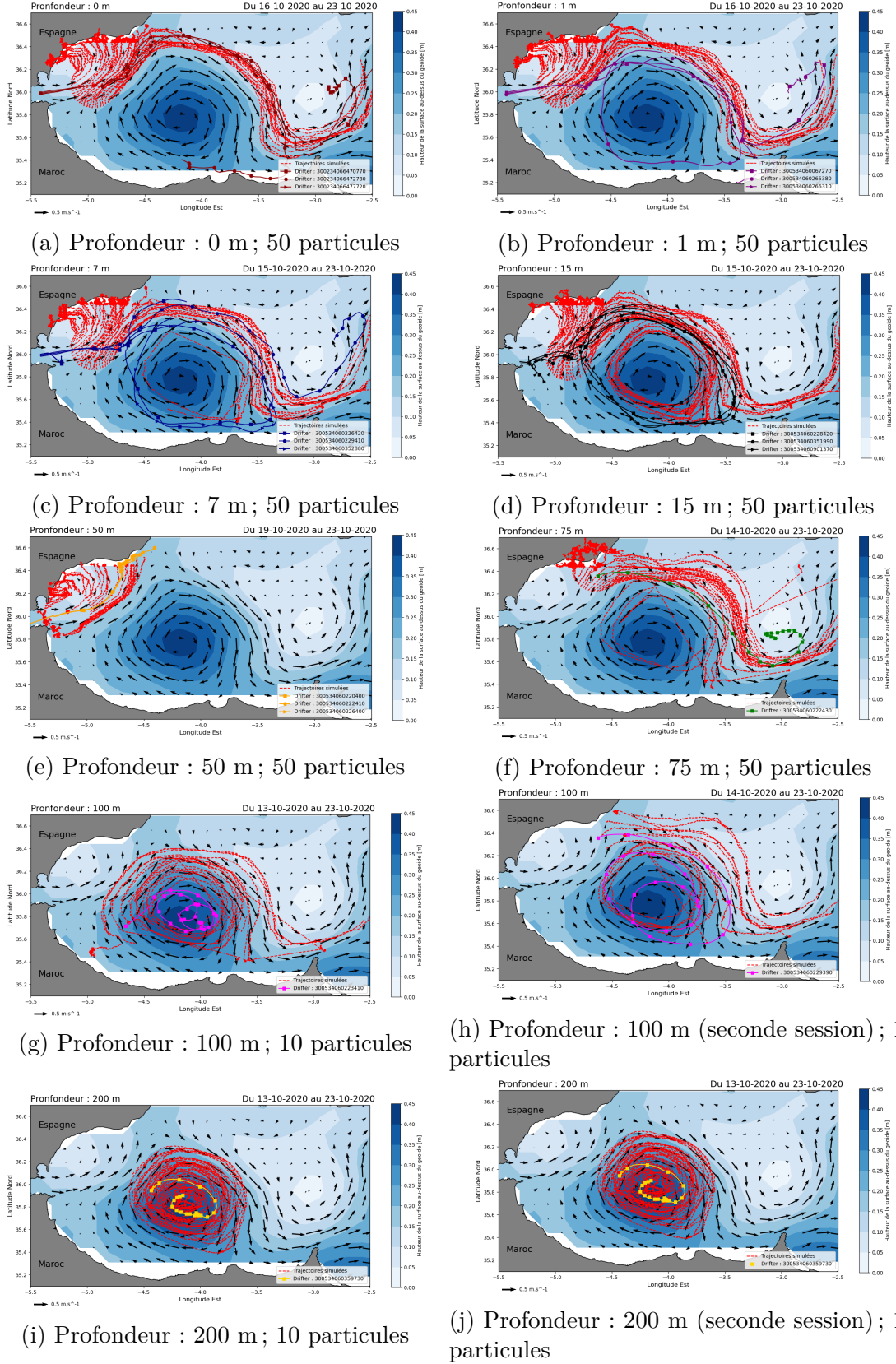


FIGURE 10 – Comparaison des trajectoires simulées dans un champ variable et des trajectoires des bouées de la campagne avec les paramètres suivants : $\Delta t=1$ h et $K_H=10e-9$ $m^2.s^{-1}$.

4 Discussion

4.1 Précision du modèle numérique

4.1.1 Comparaison des trajectoires des bouées à celles simulées

Comme il a été constaté précédemment, les trajectoires moyennes simulées des particules sont très similaires à celles des bouées larguées en surface par les chercheurs, à 0 m, 1 m et 7 m. Au premier abord, ceci concorde bien avec ce qui était attendu, puisque les champs de courant de la mer d’Alboran sont des champs de surface, et par conséquent le modèle numérique intègre des trajectoires de surface. Toutefois, deux problèmes sont à relever. Tout d’abord, les vitesses géostrophiques du CMEMS correspondent à des données satellitaires de surface, plus précisément à des données relevées à la profondeur de 15 m. Or, il apparaît que les trajectoires simulées et celles des bouées à cette profondeur, divergent fortement (Figure 10(d)). Bien que la simulation semble fonctionner pour des profondeurs de 0 m à 7 m, elle devrait également fonctionner pour des profondeurs de 15 m, ce qui n’est pas le cas. De plus, il a été nécessaire de déployer pour la plupart des cartes, 50 particules pour obtenir une trajectoire moyenne ; la simulation d’une seule particule n’aurait pas été concluante puisque la trajectoire aurait forcément divergé de celle des bouées. Ceci montre que dans ce modèle numérique, il existe des erreurs de précision.

4.1.2 Des approximations à l’origine de sources d’erreurs

Les erreurs de précision relevées sur les cartes ont pour origine de multiples approximations du code numérique, lesquelles peuvent être regroupées en deux catégories.

Tout d’abord, il y a des erreurs de précision qui concerne le modèle numérique utilisé, ici le schéma d’Euler Forward. Cette méthode d’Euler fait partie des méthodes de résolution des équations différentielles les plus simples à numériser, en raison des fortes approximations au niveau de la discrétisation, i.e. l’intégration des trajectoires des particules au cours du temps. Les fortes approximations conduisent inexorablement à des erreurs de précision, qui peuvent s’avérer très élevées lorsque le pas de temps sélectionné est trop grand. Nonobstant, il existe d’autres modèles, beaucoup plus précis, permettant d’affiner ces approximations numériques. C’est le cas par exemple, de la méthode Runge-Kutta. Développée par des mathématiciens allemands Carl Runge et Wilhelm Kutta, cette méthode repose sur le même principe que le schéma d’Euler, mais est bien plus complexe dans la mesure où elle fait intervenir quatre fois plus de calculs. Cela a pour conséquence d’obtenir plus de précision et plus de fiabilité. L’efficacité de la méthode Runge-Kutta peut être observée sur la Figure 11. Il apparaît clairement que, plus le pas de temps augmente, plus la courbe simulée à partir de la méthode d’Euler tend à s’écarter de la véritable solution, ce qui n’est pas le cas de la courbe simulée par la méthode Runge-Kutta, dont la quasi-superposition avec la solution est flagrante.

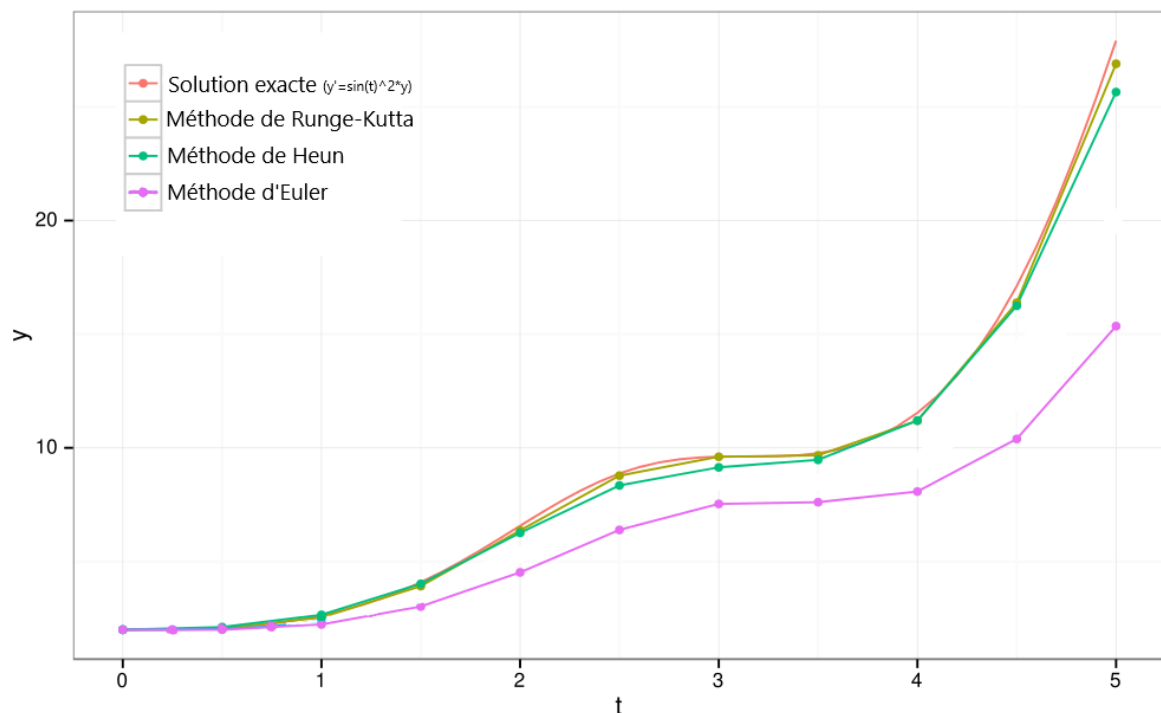


FIGURE 11 – Comparaison des méthodes d'Euler et Runge-Kutta, avec l'exemple de l'équation différentielle $y' = \sin(t)^2 y$, dont la solution exacte est en rouge.

Modifiée à partir de l'image tirée sur le site **Wikipédia**

Outre les erreurs liées aux approximations du modèle numérique, il existe également des erreurs liées à des approximations de la projection cartographique. En voici quelques exemples :

- Pour rappel, la résolution du champ de vitesse est de 0.128° , ce qui implique que les données satellitaires du champ de vitesse sont relevées tous les 14 km environ. Il s'agit d'une très forte approximation du champ. Il serait préférable d'avoir des relevés effectués en deçà du km.
- De plus, ces données satellitaires ont été mesurées et calculées à partir de l'approximation des équations de la dynamique océanique, connues sous le nom d'équations de Navier-Stokes.
- Enfin, une méthode très approximée de conversion des coordonnées a été utilisée dans le cadre de la détermination des positions des particules.

L'ensemble de ces approximations sont des sources d'erreurs ; elles ne permettent pas d'obtenir des trajectoires simulées qui soient identiques aux trajectoires des bouées. Ces erreurs n'empêchent cependant pas de pouvoir effectuer des comparaisons, et d'en tirer des conclusions dignes d'intérêt.

4.2 Application du modèle pour la campagne PARTY

Le code numérique développé dans le cadre de ce stage peut être adapté à d'autres besoins de campagnes, et ce dans n'importe quelle zone géographique. Cette démarche a été réalisée à la fin du stage, lorsqu'il a s'agit d'apporter une contribution à la campagne PARTY, dont le chef de mission est Frederic Le Moigne, chercheur au MIO.

Cette campagne se déroule dans la semaine du 03/05/2021 au 09/05/2021, au large de Saint-Tropez, et a pour but d'effectuer des analyses chimiques, dont des analyses à partir de prélèvement *in situ* de neige marine, à l'aide d'instruments océanographiques montés sur des lignes dérivantes. La question qui se pose au chef de mission est de déterminer l'emplacement idéal pour déployer ces types de bouées avec pour contrainte principale, d'éviter que les lignes dérivantes ne dérivent trop afin de pouvoir les récupérer le plus proche possible de la zone de largage.

Afin d'aider les chimistes à déterminer une zone idéale de largage, le code numérique basé initialement sur la mer d'Alboran a été adapté à cette nouvelle campagne. L'objectif était d'estimer les potentielles trajectoires que les lignes dérivantes effectueraient dans cette zone. Pour ce faire, de nouvelles données satellitaires ont été téléchargées sur le site CMEMS, et la fenêtre spatio-temporelle a été modifiée. Il est à noter que la composante advective a été intégrée ici sans la composante diffusive.

L'étude de la circulation au large de Saint-Tropez s'est réalisée en deux étapes. Une première simulation a été réalisée quelques jours avant le départ de la campagne en mer, soit du 17/04/2021 au 28/04/2021, pour 50 particules de la droite passant par les points de coordonnées suivants, sélectionnés par le chef de mission : $43^{\circ} 15'N$; $7^{\circ} 15'E$ et $43^{\circ} 10'N$; $7^{\circ} 30'E$ (Figure 12).

Puis, une seconde simulation a été réalisée. Cette fois, il s'agissait d'un modèle de prévision, dont les données ont été téléchargées le 29/04/2021, pour une prévision pour les quatre premiers jours de la campagne en mer, du 03/05/2021 au 06/05/2021 inclu (Figure 13). Il est intéressant de constater que les données de prévision présentent une plus grande résolution spatiale que les données satellites utilisées jusqu'à présent. En effet, alors que la résolution s'élevait à 0.125° , ici la résolution est de 0.042° , permettant ainsi de simuler des trajectoires avec une plus grande précision. À noter que les données satellitaires ne proposent pas de prévision pour la topographie. Par ailleurs, si les particules dérivent sur une très faible distance, ceci est dû au fait que le temps d'intégration est très court, en raison du peu de dates de prévision proposées.

Les deux cartes obtenues permettent de constater la présence non négligeable d'un courant fort, avec une vitesse moyenne de 0.6 m.s^{-1} , et proche des côtes. Ce courant est connu sous le nom de courant Liguro-provençal ou Courant Nord [Meloni et al., 2019]. Ainsi, les scientifiques doivent impérativement larguer leurs lignes dérivantes bien loin des

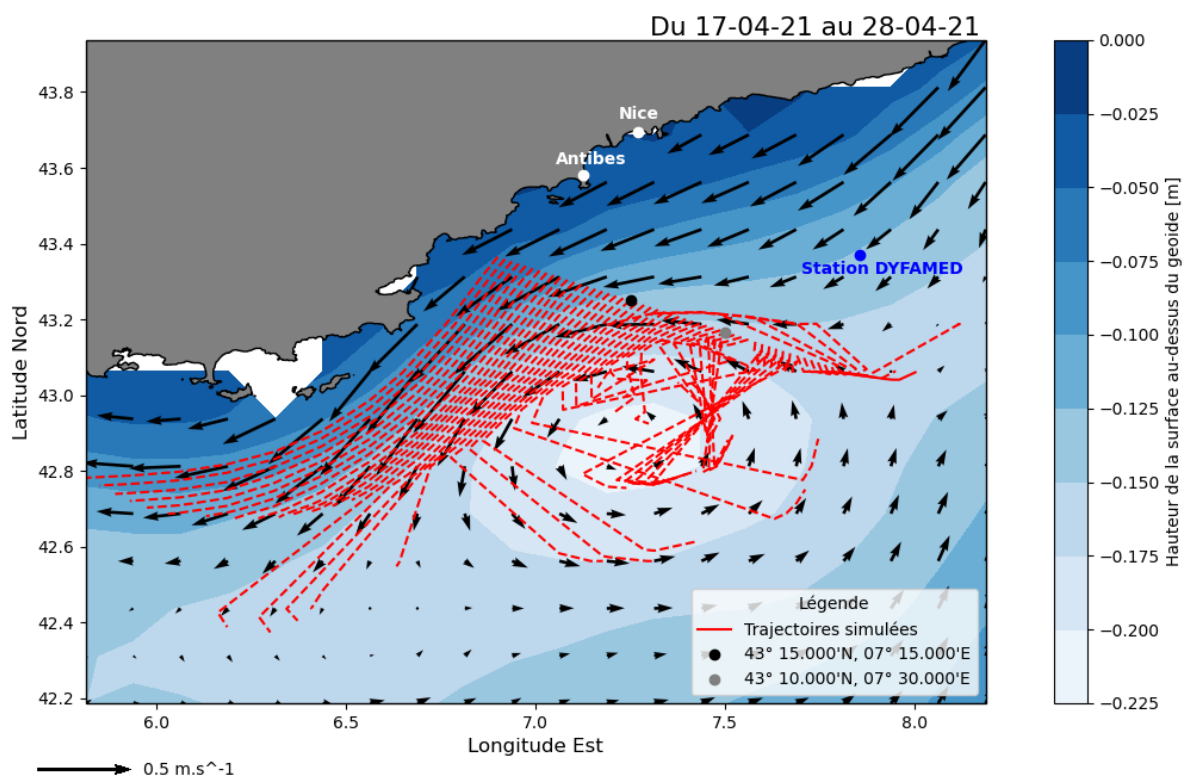


FIGURE 12 – Simulation de trajectoires de 50 particules au large de Saint-Tropez, dans le cadre de la campagne PARTY.

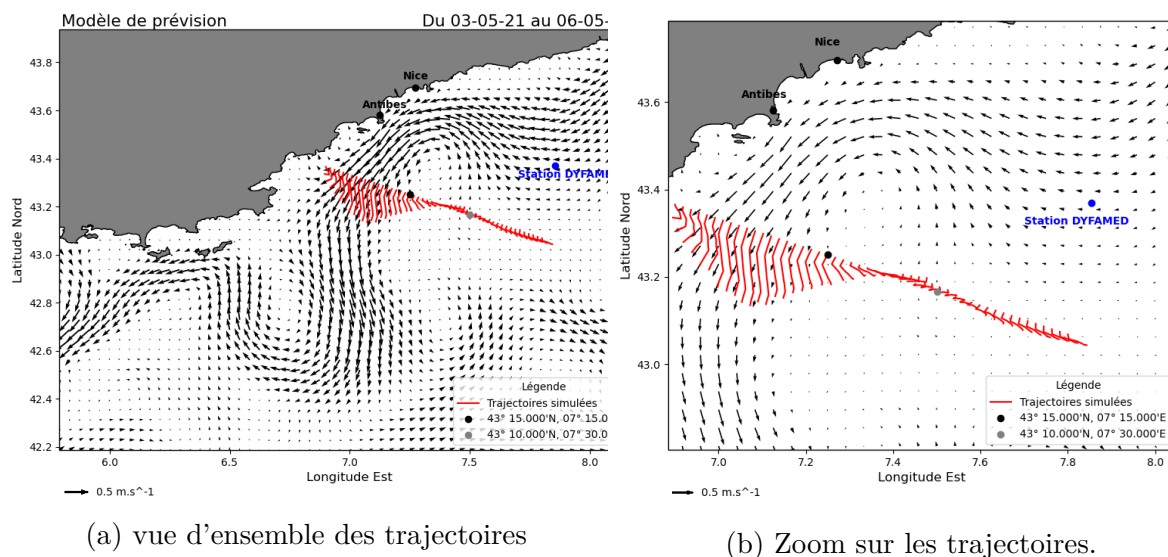


FIGURE 13 – Modèle de prévision de simulation de trajectoires de 50 particules au large de Saint-Tropez, dans le cadre de la campagne PARTY.

À noter que les trajectoires ont été tracées en trait plein pour plus de visibilité

côtes, afin d'éviter que les lignes ne dérivent trop à l'ouest, i.e loin de la zone d'étude. Il est possible d'affiner aussi le choix de la position, en trouvant des points stratégiques de largage. Les cartes présentent dans la zone de mouillage, une petite zone tourbillonnaire

au sud du Courant Nord. Ainsi, l'idéal serait de larguer les lignes dérivantes au niveau de cette zone, entre les deux points de coordonnées sélectionnés par le chef de mission, ce qui permettrait aux chercheurs de récupérer leurs lignes non loin de la zone de largage, ainsi que l'atteste le modèle de prévision.

Après discussion des résultats avec M. Andrea Doglioli et M. Frederic Le Moigne, le chef de mission a pris la décision de larguer les bouées au point de coordonnées géographiques : $43^{\circ} 15'N$; $7^{\circ} 15'E$.

Comme il a été précédemment admis, le code numérique développé manque de précision. Pour autant, il est à même d'apporter des contributions non négligeables dans certaines situations, à compter du moment où la précision au millimètre près n'est pas requise. Les résultats de cette campagne devraient être transmis à l'issue de la mission à M. Doglioli.

5 Conclusion et perspectives

La campagne PROTEVS-GIB réalisée en octobre dernier en mer d’Alboran, a été l’occasion de mettre en exergue les avantages et les faiblesses du schéma d’Euler. Il a d’abord s’agit de développer un code numérique de simulations de trajectoires lagrangiennes basé sur la méthode d’Euler. Ensuite, les trajectoires de particules ont été simulées et comparées aux trajectoires des bouées dérivantes larguées sur site, dans la mer d’Alboran. Le fait de comparer des données réelles aux données simulées a permis de montrer d’une part, que la méthode de discrétisation choisie est pratique, simple d’utilisation, et adaptable à d’autres domaines d’application, comme cela a été vérifié avec la campagne PARTY. D’autre part, la méthode d’Euler a montré ses limites dans la mesure où ce type de schéma ne permet pas de prédire avec précision les trajectoires des bouées dérivantes. Ceci s’explique en raison des fortes approximations du code numérique et de la projection cartographique.

Il en résulte de manière plus générale, qu’il est nécessaire de minimiser les approximations de tous types de modèles, afin de maximiser la précision. Si les approximations sont des moyens très pratiques pour approcher une solution, il n’en demeure pas moins qu’elles s’écartent de la réalité, et cet aspect n’est pas à négliger. Minimiser les approximations est d’autant plus important dans des modèles conséquents, tels que les modèles météorologiques sur des échelles de temps courtes, voire des modèles climatiques aux échelles de temps de l’ordre de la décennie et même du siècle.

Références bibliographiques

Alvaro, P., Dimitri, B. & Ana, T., 2013. The Alboran Sea mesoscale in a long term high resolution simulation : Statistical analysis. *Ocean modelling*, 72 :32-52

Claude, M., Julio, C., Jean-Luc, F., & Youssef, T., 2006. Large warming and salinification of the mediterranean outflow due to changes in its composition. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 53(4) :656–667.

Cristina, N., Simone, S., Jesús, G., María, J., & Isabelle, T., 2015. Mediterranean waters along and across the strait of gibraltar, characterization and zonal modification. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 105 :41–52.

Meloni, M., Bouffard, J., Doglioli, A. M., Petrenko, A., and Valladeau, G., 2019. Toward science-oriented validations of coastal altimetry : Application to the Ligurian Sea. *Remote Sensing of Environment*, 224 :275–288.

Qiu, Z., Doglioli, A. M., He, Y., & Carlotti, F., 2011. Lagrangian model of zooplankton dispersion : numerical schemes comparisons and parameter sensitivity tests. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(2) :438–445.

Sergey S., Tigny V., Stanichnaya R., & Salim D., 2005. Wind driven upwelling along the african coast of the strait of gibraltar. *Geophysical research letters*, 32(4).

Annexes

Annexe I : Script advection-diffusion

```
#####
#-----MODULES ET LIBRAIRIES NÉCESSAIRES POUR L'ENSEMBLE DES PROGRAMMES-----#
#####
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import xarray
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.feature as cf
import os
import imageio
#####
#-----MODELE ADVECTION-DIFFUSION-----#
#####
"""
# Ce programme consiste à réaliser un modèle advection-diffusion.
"""
plt.figure(figsize=[14.7,6.7])
plt.gcf().subplots_adjust(top=0.96,bottom=0.130,left=0.085,right=0.92,
                           hspace=0.2,wspace=0.2)

nb_particles=5
step=333      # Nombre de pas
delta_t=3600  # pas-de-temps (s)

### Courant uniforme (m.s-1)
u=0.3 ; v=0

### Initialisation des positions successives des particules (m)
x=np.zeros((step,nb_particles)); y=np.zeros((step,nb_particles))
# Tableaux remplis de 0 où chaque colonne représente les particules, et chaque
# ligne les positions des particules

### Choix des valeurs pour la partie diffusion
moy=0 ; sigma=0.3

### Position de départ des particules
start=np.linspace(0,100,nb_particles)
for ip in range(nb_particles):
    x[0,ip]=0 # Toutes les particules partent de x=0
    y[0,ip]=start[ip]

### Positions successives des particules à partir du modèle advection-diffusion
for it in range(step-1):
    for ip in range(nb_particles):
        x[it+1,ip]=x[it,ip]+u*delta_t+np.random.normal(moy,sigma)
        y[it+1,ip]=y[it,ip]+v*delta_t+np.random.normal(moy,sigma)
# x(t+dt) = x(t) + partie advection + partie diffusion (idem pour y)

### Affichage des trajectoires
plt.plot( x, y ,"-")
plt.plot(x[0,:],y[0,:],"o",color='red',label='Départ') #Point de départ
plt.plot(x[step-1,:],y[step-1,:],"o",color='blue',label='Arrivée') #Point d'arrivée

### Labels
plt.legend(loc = 'lower right',ncol = 1,frameon = True, title='Légende',
           facecolor='white')
plt.text(-17700,-25.1,'Fig. Modèle advection-diffusion dans un courant uniforme 2D',
         fontdict=font_title)
plt.xlabel('x Distance (m)')
plt.ylabel('y Distance (m)')

### Vérification des trajectoires obtenues
# =====
# On a V=d/t soit d=V*t avec V=u=0.3m/s et t=nb de pas x pas-de-temps=3600*333
# dmesuré = 0.3*3600*333 = 359 640 m
# Les particules partent d x=0 et arrivent bien à la position x=3.59e+05
# Donc le code correspond bien à ce qui est attendu
# =====
#####
```


Annexe II : Script simulation des trajectoires lagrangiennes selon la méthode d'Euler Forward

```
#####
#-----DERIVE LAGRANGIENNE DANS LE CHAMP VARIABLE-----#
#####

## Fonction d'intégration des trajectoires des particules
def traj_particles(starting_point,step,delta_t,u,v,x_lim, y_lim):
    x = np.full(step,np.nan) # adimensionnel
    y = np.full(step,np.nan) # adimensionnel
    x[0] = starting_point[0] # adimensionnel
    y[0] = starting_point[1] # adimensionnel
    Kh=10e-9 #coeff de diffusion en m².s⁻¹
    mu=0
    sigma=np.sqrt(2*Kh*delta_t)
    for it in range(step-1):
        if x[it]<x_lim[1] and x[it]>x_lim[0] and y[it]<y_lim[1] and y[it]>y_lim[0]:
            x[it+1]=x[it]+int(x[it]),int(y[it]))*delta_t + np.random.normal(mu,sigma)
            y[it+1]=y[it]+int(x[it]),int(y[it]))*delta_t + np.random.normal(mu,sigma)
        return x,y

## Fonction qui relie les coordonnées de grille à celles géographiques
def linear_relation (coord_grid_x,coord_grid_y,lon,lat):
    a_x=(lon[1]-lon[0])/(coord_grid_x[1]- coord_grid_x[0]) #a pour Lon
    a_y=(lat[1]-lat[0])/(coord_grid_y[1]- coord_grid_y[0]) #a pour Lat
    b_x=lon[1]-a_x*coord_grid_x[1] #b pour Lon
    b_y=lat[1]-a_y*coord_grid_y[1] #b pour Lat
    return a_x,a_y,b_x,b_y

## Fonction qui permet de faire passer le point de départ des coordonnées de
# géographiques à celles de grille
def starting_point_grid (a_x,a_y,b_x,b_y,starting_point):
    starting_point_grid=np.zeros(2) #2 car 2 coordonnées: x et y
    starting_point_grid[0]=(starting_point[0]-b_x)/a_x
    starting_point_grid[1]=(starting_point[1]-b_y)/a_y
    # Il vaut mieux privilégier les tableaux avec np.zeros que les liste avec .append
    return starting_point_grid

## Fonction qui convertit les x/y de grille en x/y géographiques
def transit_coord_Alboran (a_x,a_y,b_x,b_y,x,y):
    x_alboran=np.zeros(x.shape[0]) #Tableau de même dimension que x (grille) en °
    y_alboran=np.zeros(y.shape[0]) #Tableau de même dimension que y (grille) en °
    for i in range(x.shape[0]):
        x_alboran[i]=a_x*x[i]+b_x
    for i in range(y.shape[0]):
        y_alboran[i]=a_y*y[i]+b_y
    return x_alboran,y_alboran

## Fonction qui permet d'obtenir 50 points de départ de particules autour du
# point de départ choisi, dans un rayon de 0.2
def circle (starting_point_circle):
    nb_particles=50
    angle=(2*np.pi)/nb_particles
    list_starting_point=starting_point_circle # inclu le point départ initial voulu
    for i in range(1,nb_particles):
        lon_position=starting_point_circle[0]+0.2*np.cos(i*angle)
        lat_position=starting_point_circle[1]+0.2*np.sin(i*angle)
        list_starting_point.append((lon_position,lat_position))
    return list_starting_point
# Liste de 50 coordonnées géographiques + point de départ initial voulu

## Fonction qui trace le champ de vitesse et la topographie de la mer d'Alboran
def velocity_field (currentsat,date,font,font_title):
    spain_lon, spain_lat = -5.1, 36.5 ; morocco_lon, morocco_lat = -5.20, 35.27
    plt.figure(figsize=[14,7,6.7])
    plt.gca().subplots_adjust(top=0.96,bottom=0.130,left=0.085,right=0.92,
                                hspace=0.2,wspace=0.2)

    # Lignes de côtes
    contours=plt.axes(projection=ccrs.PlateCarree())
    contours.set_extent([-5.5, -2.5, 35.1, 36.7])
    contours.add_feature(cf.GSHHSFeature(scale='full',edgecolor='black',
                                         facecolor='grey'))

    # Dates
    day=currentsat.time.dt.day.data[date]
    month=currentsat.time.dt.month.data[0]
    year=currentsat.time.dt.year.data[0]
    current_date='{0}-{1}-{2}'.format(day,month,year)
    # Coordonnées Lon/Lat (en °)
    lon=currentsat.longitude[196:222] ; lat=currentsat.latitude[121:136]
    # Topographie (en m)
    elev=currentsat.adt[date,121:136,196:222]
    plt.contourf(lon,lat,elev,cmap='Blues')
    plt.colorbar(label="Hauteur de la surface au-dessus du géoïde [m]",shrink=0.89)

    # Champ de courant de surface (en m.s⁻¹)
    u=currentsat.ugos[date,121:136,196:222] ; v=currentsat.vgos[date,121:136,196:222]
    q=plt.quiver(lon,lat,u,v,angles='xy')
    plt.quiverkey(q,X=0.05,Y=-0.1,U=0.5,label='0.5 m.s⁻¹',labelpos='E')
    # Labels
    plt.text(-5.55,34.8,'Fig. Champ de courant de surface (m.s⁻¹)' \
            ' et topographie (m) de la mer d\'Alboran', fontdict=font,title)
    plt.text(-2.90,36.73,'').format(current_date, fontdict=font)
    plt.xlabel('Longitude Est',size=12) ; plt.ylabel('Latitude Nord',size=12)
    plt.gca().xaxis.set_visible(True) ; plt.gca().yaxis.set_visible(True)
    plt.text(spain_lon,spain_lat,'Espagne',fontdict=font,horizontalalignment='right')
    plt.text(morocco_lon, morocco_lat, 'Maroc',fontdict=font,horizontalalignment='right')
    return day,month,year,lon,lat,u,v

## Tracé des trajectoires des particules au cours du temps dans le champ de courant
# variable - ici du 14 au 23 octobre 2020 soit 10 jours
# Attention : Les programmes suivants ne prennent pas en compte le dernier jour!
#-----Données initiales-----#
# Ouverture du fichier contenant les données
currentsat=xarray.open_dataset('currentvelocity_satellit_alboran_14_to_31_october_2020.nc',
                                decode_times=True)
# Point de départ des particules en °
starting_point_circle= (-4.8,36)
list_starting_point = circle(starting_point_circle)

list_colors=['red']*len(list_starting_point)
nb_particles=len(list_starting_point)

date=(23-14)+1 #important le +1 sinon dernier jour voulu pas pris en compte
period=date # en jours
delta_t=3600 # temps mis par la particule pour faire 1 pas - en s
step=int((86400*period)/delta_t) # nb de pas parcouru par la particule
# 86 000s car données quotidiennes

list_x=np.full((step*date,nb_particles),np.nan)
list_y=np.full((step*date,nb_particles),np.nan)

#-----Initialisation à partir du 1er jour du fichier-----#
day,month,year,lon,lat,u,v=velocity_field (currentsat,0,font,font_title)
plt.close()
u=np.where(np.isnan(u),0,u) ; v=np.where(np.isnan(v),0,v)
u=u.T ; v=v.T
u_degs=np.zeros((u.shape[0],u.shape[1])) ; v_degs=np.zeros((v.shape[0],v.shape[1]))
for ip in range(nb_particles):
    #####
    def starting_point_grid (a_x,a_y,b_x,b_y,starting_point): # répète sinon error
        starting_point_grid=np.zeros(2)
        starting_point_grid[0]=(starting_point[0]-b_x)/a_x
        starting_point_grid[1]=(starting_point[1]-b_y)/a_y
        return starting_point_grid
    #####
    starting_point=list_starting_point[ip]

    for i in range(u.shape[0]):
        for j in range(u.shape[1]):
            u_degs[i,j]=u[i,j]*(9*10**(-6))
    for i in range(v.shape[0]):
        for j in range(v.shape[1]):
            v_degs[i,j]=v[i,j]*(9*10**(-6))
    # Coordonnées de grilles (adimensionnelles)
    coord_grid_x=np.linspace(0,u.shape[0]-1,u.shape[0])
    coord_grid_y=np.linspace(0,u.shape[1]-1,u.shape[1])
    # Limites de la grille
    x_lim=(coord_grid_x[0],coord_grid_x[-1]) ; y_lim=(coord_grid_y[0],coord_grid_y[-1])
    # Les fonctions utilisées
    a_x,a_y,b_x,b_y=linear_relation (coord_grid_x,coord_grid_y,lon,lat)
    starting_point_grid=starting_point_grid (a_x,a_y,b_x,b_y,starting_point)
    x,y=traj_particles(starting_point_grid,step,delta_t,u_degs,v_degs,x_lim, y_lim)
    x_alboran,y_alboran=transit_coord_Alboran (a_x,a_y,b_x,b_y,x,y)

    list_starting_point[ip]=(x_alboran[-1],y_alboran[-1])

    list_x[0:step,ip]=x_alboran
    list_y[0:step,ip]=y_alboran
```

Résumé

Une campagne PROTEVS-GIB s'est déroulée en mer d'Alboran en octobre 2020, avec pour objectif de décrire les phénomènes océanographiques liés à cette zone. Dans le cadre de cette campagne, un modèle numérique advection-diffusion de simulation de trajectoires lagrangiennes a été réalisé selon la méthode d'Euler, à partir de données satellitaires issues du CMEMS. Des tests de sensibilité ont été effectués afin d'affiner le programme, ce qui a conduit à sélectionner les valeurs de pas de temps $\Delta t=3600$ s et le coefficient de diffusion $K_H=10\text{e-}9$ $m^2.s^{-1}$. Les trajectoires simulées, comparées aux trajectoires des bouées dérivantes larguées durant la campagne, ont permis de mettre en exergue les fragilités du code développé, en raison de fortes approximations liées à la méthode d'Euler, et à la projection cartographique. Cependant, la méthode d'Euler reste très pratique d'utilisation et adaptable à d'autres problématiques de campagne, comme cela a été le cas pour la campagne PARTY.

Mots-clés : Campagne PROTEVS-GIB, Mer d'Alboran, Trajectoires lagrangiennes, Schéma d'Euler Forward, Modèle advection-diffusion.

Abstract

A PROTEVS-GIB campaign took place in the Alboran Sea in October 2020, with the aim of describing the oceanographic phenomena linked to this area. As part of this campaign, a numerical advection-diffusion simulation model of Lagrangian trajectories was produced using the Euler method, from CMEM satellite data. Sensitivity tests were carried out in order to refine the program, which led to the selection of the time step values $\Delta t=3600$ s and the diffusion coefficient $K_H=10\text{e-}9$ $m^2.s^{-1}$. The simulated trajectories, compared to the trajectories of the drifting buoys released during the campaign, made it possible to highlight the weaknesses of the developed code, due to strong approximations linked to the Euler method, and to the cartographic projection. However, Euler's method remains very convenient to use and adaptable to other campaign issues, as it was done with the PARTY campaign.

Keywords : PROTEVS-GIB campaign, Alboran Sea, Lagrangian trajectories, Euler Forward method, Advection-diffusion model.