

Mémoire

Auteur : Hanssen, Norine

Promoteur(s) : Troupin, Charles; Alvera Azcarate, Aida

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en océanographie, à finalité approfondie

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16500>

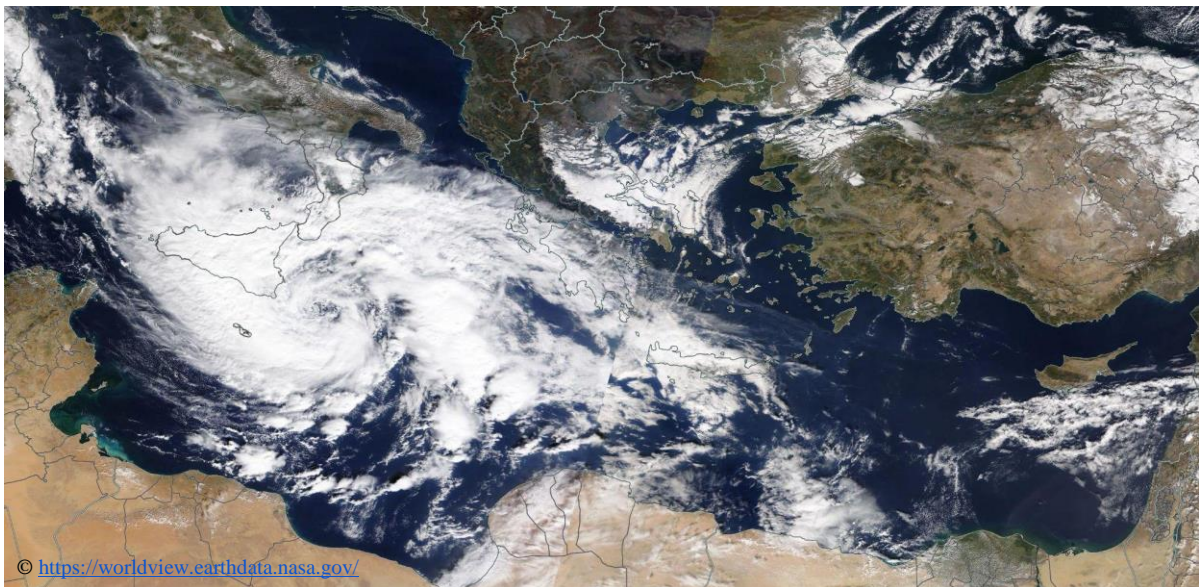
Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du titre de Master en Océanographie,
à finalité approfondie

Ouragans en mer Méditerranée : évolution des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau



Année académique 2021 – 2022

Par **HANSSEN Norine**

Promoteurs :

TROUPIN Charles, ALVERA AZCARATE Aida

Lecteurs :

MOUCHET Anne, CAPET Arthur, BORGES Alberto

« Conformément aux règles imposées à la rédaction, ce mémoire ne doit pas dépasser 50 pages, rédigées en Times 12 ou équivalent. »

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps mes co-promoteurs, Charles Troupin et Aida Alvera Azcarate, qui m'ont permis de faire ce mémoire au sein du GHER. Leur soutien et leurs réponses à mes questions m'ont permis d'avancer sereinement dans ce travail.

En second temps, je remercie les membres de l'équipe du GHER qui m'ont accueillie et donné des conseils lors des réunions "Cafés GHER". Ceux avec qui j'ai pu également discuter sur le sujet des *Medicanes* et qui m'ont donné des idées sur l'élaboration de ce mémoire. Ceux qui m'ont aidé avec le langage de programmation qui fut un grand défi au départ pour moi.

Papa, Maman, merci d'avoir payé mes études, de m'avoir logé, nourri et surtout d'avoir assuré le stock de chocolat pour mon moral ! Merci de m'avoir soutenu toutes ces années. Ces remerciements ne seront jamais assez à la hauteur pour tout ce que vous faites pour moi et ne décriront jamais assez bien les parents formidables que vous êtes.

Merci à mes grandes sœurs qui m'ont permis de m'évader lorsque j'avais besoin de pauses.

Merci à Victoria pour ta relecture, ainsi que pour tes rappels sur la grammaire et l'orthographe française. Mais avant tout, merci pour ton amitié depuis les bancs de la maternelle et qui durera encore longtemps. Nos fous rires m'ont remonté le moral plus d'une fois et m'ont aidé à relativiser sur cette période parfois stressante.

Enfin et surtout, merci à mon amoureux. Ton soutien m'a tellement été précieux et tu sais déjà tout.

Table des matières

Remerciements	2
Abstract	6
Résumé	6
1. Introduction	7
1.1 Généralités	7
1.2 La mer méditerranéenne	8
1.3 Formation d'un ouragan - <i>Medicane</i>	10
1.4 Historique du <i>Medicane</i> Apollo	12
1.5 Objectifs du mémoire	14
2. Méthodologie	15
2.1 Flotteurs Argo	15
Principe & fonctionnement	15
Base de données SeaDataNet	17
Traitement des données Argo	17
Comment se présentent les données Argo ?	18
Prétraitement des données	19
2.2 Bouées dérivantes	19
Principe & Fonctionnement	19
Traitement des données de bouées dérivantes	20
2.3 Données satellites	21

Principe et fonctionnement	21
Traitement des données satellite - L'interpolation DINEOF	21
2.4 Données de vents	22
Base de données REMSS	22
Traitement des données	23
3. Résultats	24
3.1 Les vents - suivi du <i>Medicane</i>	24
3.2 Les Profils de la colonne d'eau	28
Profil - Tendence générale dans la colonne d'eau	28
Étude statistique des données interpolées des flotteurs Argo	32
3.3 Température de surface (SST) - Tendence générale	34
Résultats bouées dérivantes	34
Résultats DINEOF	36
Comparaison DINEOF vs. données <i>in situ</i>	38
DINEOF vs. Argo	38
DINEOF vs bouées dérivantes	40
4. Discussion	41
4.1 Evolution des propriétés physico-chimiques de l'eau	41
Température	41
Schéma A :	41
Schéma B :	42

Schéma C :	43
Schéma D :	43
Salinité	43
Concentration en oxygène dissous	44
4.2 Comparaison des deux méthodes : <i>in situ</i> vs. satellite	45
5. Conclusions	46
6. Références	48
7. Annexes	53
Annexe 1 - Exemple d'un DataFrame	53
Annexe 2 - Coordonnées géographiques de l'œil du cyclone	55
Annexe 3 - Vitesses du vent aux Argo	56
Annexe 4 - Profils de température	58
Annexe 5 - Profils de salinité	61
Annexe 6 - Différences entre les profils Argo	63
Annexe 7 - Statistiques	65
Annexe 8 - Trajectoire des bouées dérivantes et leurs mesures de la SST	67

Abstract

Hurricanes in the Mediterranean Sea are extreme meteorological events that influence the physico-chemical properties of the water column. This thesis focused on three variables: temperature, salinity and dissolved oxygen concentration for the *Medicane* “Apollo” that occurred at the end of October 2021. Their evolution is measured with *in situ* instruments (Argo floats and drifting buoys) and with satellites. The DINEOF software tool was used to reconstruct the gaps (clouds, etc) present in the satellite data. In general, temperature and salinity decrease in the mixed layer during the passage of the *Medicane*. The dissolved oxygen concentration increases in the mixed layer as well as the depth of the maximum dissolved oxygen concentration. The main reasons for these evolutions are the heat exchange and evaporation at the surface, the important precipitations and winds generated by the *Medicane*, and also the marine currents and the solar radiation at this time of the year. The decreased temperature, linked to the hurricane, also increases oxygen dissolution. A comparison between *in situ* and satellite data shows the complementarity of the two types of measurements.

Résumé

Les ouragans en mer Méditerranée sont des événements météorologiques extrêmes qui influencent les propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau. Ce travail s'est concentré sur trois variables : la température, la salinité et la concentration en oxygène dissous pour le *Medicane* “Apollo” qui a eu lieu fin octobre 2021. Leur évolution est mesurée à l'aide d'appareils *in situ* (flotteurs Argo et bouées dérivantes) et par satellites. Les données satellites ont subi une reconstruction à l'aide du logiciel DINEOF, qui permet de combler des données manquantes dues à la présence de nuages par exemple. De manière générale, la température et la salinité diminuent dans la couche de mélange lors du passage du *Medicane*. La concentration en oxygène dissous augmente dans la couche de mélange tout comme la profondeur du maximum de concentration en oxygène dissous. Les principales raisons de ces évolutions sont les échanges enthalpiques et l'évaporation à la surface, les importantes précipitations et les vents engendrées par le *Medicane*, ainsi que les courants marins et le rayonnement solaire à cette période de l'année. La diminution de la température liée au passage du cyclone augmente également la dissolution de l'oxygène. Une comparaison entre les données *in situ* et satellitaire montre la complémentarité des deux types de mesures.

1. Introduction

1.1 Généralités

La superficie des océans recouvre 70,8% du globe (Hebrard, 2019). Ces eaux salées jouent un rôle primordial pour l'équilibre écologique sur Terre.

Premièrement, la présence d'océans est en partie responsable de la température relativement constante au fil des saisons sur la planète. En effet, une colonne d'eau de seulement trois mètres de profondeur absorbe autant de chaleur que l'épaisseur de l'atmosphère située juste au-dessus (Griffies, 2018). Ceci est dû à la capacité calorifique de l'eau (environ 4 000 J/kg°C; (Copin-Montégut, 2002)), plus élevée que celle de l'air (environ 1 000 J/kg°C ; (Michaud, 1999)). Ainsi, tout au long de l'année, des flux thermiques entre les océans et l'atmosphère ont lieu, donnant à ceux-ci un rôle de réservoir de chaleur (Faizal & Rafiuddin Ahmed, 2011).

Deuxièmement, des flux chimiques ont également lieu entre l'atmosphère et la surface des océans (Liss & Johnson, 2014). Ces derniers contribuent à la dynamique des cycles de nombreux composés chimiques comme par exemple les gaz à effet de serre (Williams & Follows, 2011). Par ailleurs, de l'oxygène est produit par la photosynthèse de la flore marine. Cet oxygène est ensuite rejeté dans l'atmosphère grâce aux flux chimiques. Par contre, lors d'une forte houle, la concentration en oxygène tend à augmenter à la surface des océans, à la suite d'une tempête par exemple (Emerson & Bushinsky, 2014). Le sens du flux entre l'atmosphère et les océans dépend donc principalement de la pression partielle en oxygène à la surface. Outre la pression partielle du gaz, le taux de dissolution d'un composé chimique dans un milieu aqueux est également influencé par la température.

Troisièmement, les océans fournissent d'importantes ressources, telles que des ressources alimentaires, matérielles ou énergétiques, essentielles à la vie sur Terre. Cependant, la bonne préservation de ces ressources dépend de la bonne santé des océans et des équilibres physico-chimiques qui y règnent.

Bien que l'équilibre des océans soit fortement compromis par les activités anthropiques (Bourgeois, 2017), certains événements naturels ont également un impact sur l'équilibre de la

colonne d'eau. C'est le cas d'événements météorologiques extrêmes, tels que des cyclones, qui peuvent modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau.

1.2 La mer méditerranéenne

Grâce à sa morphologie particulière, la mer Méditerranée est un bassin propice à la formation de tempêtes cycloniques (Emanuel, 2005). Ces tempêtes, à l'échelle synoptique (échelle spatio-temporelle d'un minimum de 1 000 kilomètres et de plusieurs jours), sont d'origine baroclinique où la différence de pression entre deux masses d'air entraîne d'intenses vents horizontaux. Cependant, des phénomènes à méso-échelle (échelle spatio-temporelle de quelques centaines de kilomètres et d'un à deux jours) d'intensité plus importante sont parfois observés. Ces derniers présentent des caractéristiques similaires aux cyclones tropicaux. En effet, des images satellites de la mer Méditerranée lors de ces événements montrent une structure axisymétrique des nuages identique aux structures tropicales avec un œil circulaire dégagé au centre du cyclone entouré d'un mur de nuage (Figure 1 ; (Tous & Romero, 2013)). En fonction du bassin où un même phénomène de cyclone tropical se déclare, il se verra appelé « cyclone », « ouragan » ou encore « typhon ». Dans l'océan Atlantique et l'océan Pacifique Nord-Est (jusqu'à la ligne du changement de date), ce type de tempête est appelé un ouragan. Ainsi, une tempête cyclonique de forte intensité en mer Méditerranée est un ouragan méditerranéen, ou « *Mediterranean Hurricanes* » en anglais. La contraction « *Medicane* » est couramment utilisée par la communauté scientifique pour représenter ce phénomène. Cependant, au sein de la communauté scientifique compétente, la définition d'un *Medicane* pose encore question. Pour certains, leurs similitudes avec les cyclones tropicaux les classent dans une catégorie bien spécifique des ouragans méditerranéens (Tous & Romero, 2013). Pour d'autres, il s'agit d'une sous-catégorie de tempêtes sub-tropicales en raison de leur position géographique sur le globe (Fita & Flaounas, 2018; Gaertner *et al.*, 2018). Une tempête subtropicale est définie comme une dépression se développant entre les tropiques et les latitudes moyennes (maximum 50°), entraînant des vents dans une circulation cyclonique (sens anti-horloger). Ces tempêtes développent un noyau chaud, de même que les cyclones tropicaux. Elles se forment dans une zone frontale où deux masses d'air de température différente se rencontrent.



Figure 1 : Symétrie caractéristique des cyclones tropicaux, retrouvée dans les *Medicane*. Image satellite (Terra) du 29 octobre 2021. Le cercle rouge entoure l'œil du *Medicane* Apollo. Couche : MODIS Corrected Reflectance imagery (True Color) ©<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

Une étude menée par (Bakkensen, 2017) a recensé 86 événements durant 62 ans. Selon cette étude, la vitesse moyenne des vents des *Medicanes* s'élève à 67,28 km/h (18,69 m/s) avec une vitesse maximale de 104,03 km/h (28,90 m/s). L'échelle de Saffir-Simpson permet de classer les cyclones tropicaux dans différentes catégories allant de 1 à 5 afin de décrire leur intensité. Elle se base sur les paramètres suivants : la chute de pression barométrique, la vélocité moyenne des vents, l'augmentation du niveau de la mer ainsi que les dégâts à la végétation et aux infrastructures humaines.

Les ouragans méditerranéens ne dépassent généralement pas la catégorie 1. D'importants dégâts et répercussions économiques sont souvent déclarés à la suite du passage d'un *Medicane* dans les régions méditerranéennes. Par exemple, l'Italie est un des pays méditerranéens victime du plus gros taux de dommage, s'estimant à 33 millions de dollars par an (Bakkensen, 2017). En effet, ce pays possède la plus longue côte en contact avec la mer Méditerranée et se situe en plein centre de cette dernière. Les ouragans impactant les côtes italiennes sont donc plus fréquents. Si l'étendue de la ligne de côte n'est pas prise en compte, les îles méditerranéennes sont alors les plus vulnérables. Le plus grand risque de *Medicanes* est au niveau de Malte (Bakkensen, 2017).

Les vents et les précipitations lors d'un *Medicane* engendrent d'importantes conséquences sociétales et économiques. C'est pourquoi, de nombreux chercheurs se sont penchés sur la question. Leur but est de pouvoir prédire et modéliser les *Medicanes* afin de

mettre en place de meilleures stratégies et politiques face aux risques encourus par les populations et les infrastructures côtières (Bakkensen & Mendelsohn, 2016; Foti *et al.*, 2020). Les modèles permettent également de mieux comprendre les mécanismes de formation et de mettre en évidence les éléments qui influencent l'intensité d'un ouragan en mer Méditerranée (Miglietta *et al.*, 2011; Ricchi *et al.*, 2017). Un second point important concernant les *Medicanes* dans la littérature scientifique, est leur évolution avec les changements climatiques. (Gaertner *et al.*, 2018) déclarent que l'intensité des *Medicanes* devrait augmenter suivant les conditions du changement climatique.

1.3 Formation d'un ouragan - *Medicane*

Les *Medicanes* se forment grâce au flux enthalpique entre la mer et l'atmosphère. L'eau de surface, plus chaude que l'atmosphère, transmet sa chaleur à cette dernière. L'air se réchauffe et se sature en vapeur d'eau grâce à l'évaporation en surface. Étant donné que l'air chaud est moins dense que l'air froid avoisinant, cette masse d'air monte en altitude créant ainsi une zone de basse pression (Figure 2). Ce déplacement d'air est un mouvement convectif ascendant (Universalis, s. d.). Afin de conserver l'équilibre atmosphérique, un mouvement convectif descendant se produit, créant alors une zone de plus haute pression au voisinage.

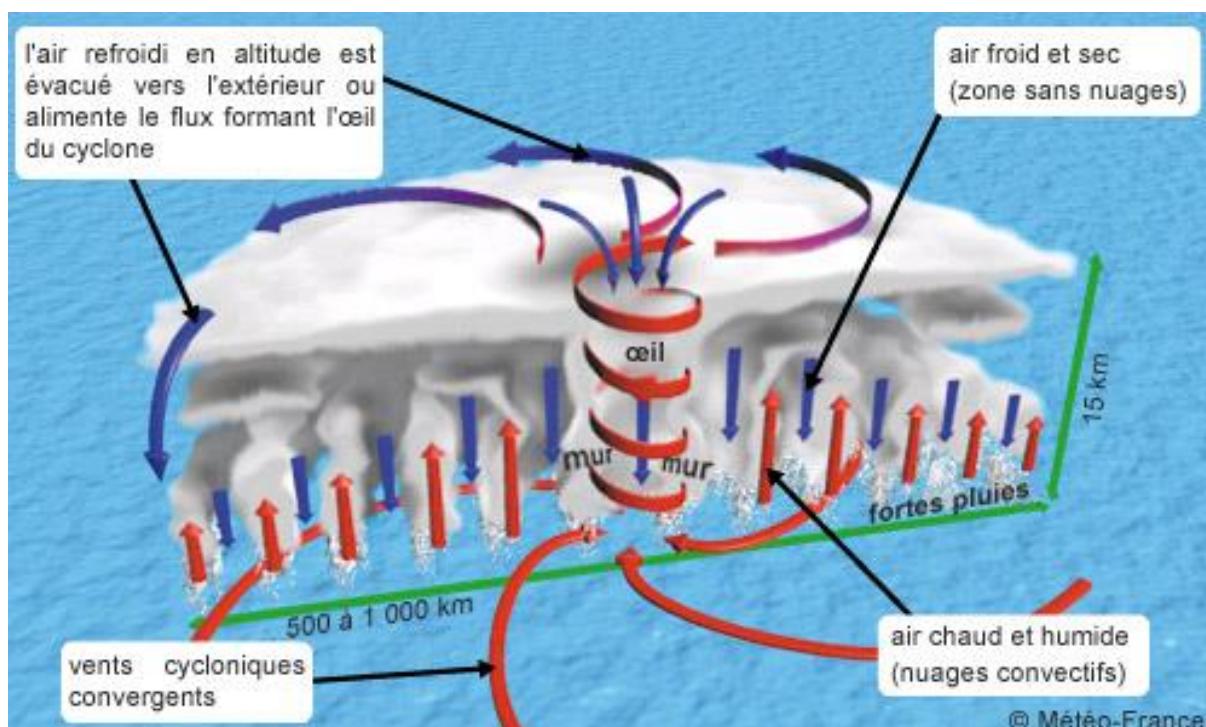


Figure 2 : Schéma d'un cyclone tropical. Un ouragan méditerranéen possède la même structure à plus petite échelle, de l'ordre de 100 – 200 km. ©Météo-France

Lors de son ascendance, la masse d'air chaud saturée atteint son point de condensation. Ainsi, la vapeur d'eau se condense et des nuages se forment. Ce changement de phase libère de la chaleur latente et forme un noyau chaud dans la haute troposphère. Les cumulonimbus ainsi formés dans ces zones d'ascendance provoquent de fortes précipitations. Au contraire, dans les zones de descendance, l'air est sec et le ciel est dégagé (Universalis, s. d.).

L'axisymétrie des *Medicanes*, qui leur confère une allure de cyclones tropicaux, est due au gradient de pression entre deux masses d'air et à la rotation de la Terre. En effet, la baroclinicité entraîne des mouvements horizontaux de la haute pression vers la basse pression. Plus le gradient de pression est important, plus une masse d'air subit une accélération importante. À grande échelle spatio-temporelle de plusieurs centaines de kilomètres et de plusieurs jours, la force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre, se manifeste. Cette force dévie les mouvements vers la droite dans l'hémisphère Nord (Figure 2). L'air chaud continue donc à monter en formant une spirale. Un tourbillon cyclonique se crée autour de la basse pression, donnant ces images caractéristiques des cyclones, avec des murs de cumulonimbus et un œil clair au centre (Emanuel, 2005; Kouroutzoglou et al., 2021; Universalis, s. d.).

Les *Medicanes* se produisent à la méso-échelle. Autrement dit, l'échelle temporelle est d'un à deux jours et l'échelle spatiale s'étend sur quelques centaines de kilomètres. Cette caractéristique les différencie quelque peu des cyclones tropicaux. En effet, ces derniers se produisent à l'échelle synoptique, donc sur plusieurs jours et au minimum sur 1 000 kilomètres. De plus, les cyclones tropicaux se forment au-dessus d'une eau de surface de plus de 26 °C. Ce n'est pas forcément le cas pour les *Medicanes*. Leur mécanisme de formation dépend davantage du gradient de pression que de la température de surface de la mer. En effet, lorsqu'une masse d'air froid provenant des pôles arrive dans le bassin Méditerranéen, l'eau de surface est suffisamment chaude par rapport à l'air que pour entraîner des flux enthalpiques air-mer capables de former un ouragan. Cependant, plus les eaux de surface sont chaudes, plus l'ouragan peut y puiser de l'énergie lors de son mécanisme d'intensification (Emanuel, 2005; Kouroutzoglou et al., 2021; Universalis, s. d.).

(Miglietta & Rotunno, 2019)) mettent en évidence l'importance de la température de surface de la mer et la chaleur latente de condensation au niveau du point chaud dans les mécanismes d'intensification du cyclone. L'évolution d'un *Medicane* dépend fortement des interactions air-mer et de la température de surface (« *Sea surface temperature* » en anglais ou SST). D'après Miglietta *et al.* (2011), une diminution de la SST fait perdre au *Medicane* ses

caractéristiques de cyclone tropical. En effet, les flux enthalpiques air-mer diminuent et réduisent les mouvements de convection ascendants. Le cyclone perd en intensité. Au contraire, lorsque la SST augmente, le minimum de pression est plus faible, traduisant un important mouvement convectif ascendant de la masse d'air au-dessus de la mer et une meilleure symétrie du noyau chaud.

Les *Medicanes* se forment principalement durant les mois d'automne et d'hiver, lorsqu'il existe une grande différence de température entre les basses couches de la troposphère et l'eau de surface de la mer Méditerranée. Ces événements se produisent à raison de une à trois fois par an (Cavicchia *et al.*, 2014; Nastos *et al.*, 2018).

1.4 Historique du *Medicane* Apollo

La dernière semaine du mois d'octobre 2021, une tempête se déclare en mer Méditerranée (Lagasio *et al.*, 2022). Le 22 octobre 2021, un système de basse pression est visible au niveau des îles Baléares (Figure 3). Ce système se déplace vers le centre de la mer Méditerranée dans la mer Ionienne. Le 24 octobre, des orages s'abattent sur la ville de Catane en Sicile (Figure 3 ; (Faranda *et al.*, 2022)). Les précipitations sont extrêmes. Le SIAS (*Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano*) estime que plus de 400 mm sont tombés en 48 heures. Le 25 octobre 2021, l'intensité de la tempête est telle qu'elle est considérée comme un ouragan méditerranéen (*Weather and Climate Change*, s. d.).



Figure 3 : Section de la mer Méditerranée. © Google Earth

L'organisme intergouvernemental européen Eumetnet a pour objectif de rassembler et coordonner les différents organismes météorologiques au sein de l'Europe. Il a également créé en 2015 le projet « *Storm naming* » qui, comme son nom l'indique, permet de nommer les différentes tempêtes qui ont lieu en Europe. « *Storm naming* » permet au pays où la tempête s'est déclarée de lui attribuer un nom. Chaque pays fait partie d'un groupe qui possède une liste de noms alternants entre masculin et féminin. Le pays suit tout simplement cette liste. Étant donné que les Italiens ont été les premiers impactés par l'ouragan, ils lui ont donné le nom "Apollo".

Le *Medicane* Apollo continue à s'intensifier toute la dernière semaine du mois d'octobre. Il touche la Tunisie, l'Algérie, Malte et l'Italie. Le cyclone Apollo a engendré d'importantes inondations, emportant sous ses eaux dix vies humaines. Les plus fortes rafales de vent mesurées durant le phénomène s'élèvent à 104 km/h (29 m/s). La pression minimale est estimée à 999 hPa. Dans la région de Syracuse, plus de 200 mm de précipitations sont tombés en 24 heures (Faranda *et al.*, 2022).

Le 30 octobre 2021, Apollo s'affaiblit en entrant dans les terres à Bayda en Libye (Figure 3). Quelques heures plus tard, le cyclone retrouve les eaux de la mer Méditerranée. Cependant, il continue à s'affaiblir et se dissipe le long des côtes turques. Il disparaît le 2 novembre 2021. Des images satellites permettent de visualiser l'évolution journalière de l'ouragan méditerranéen Apollo (Figure 4).

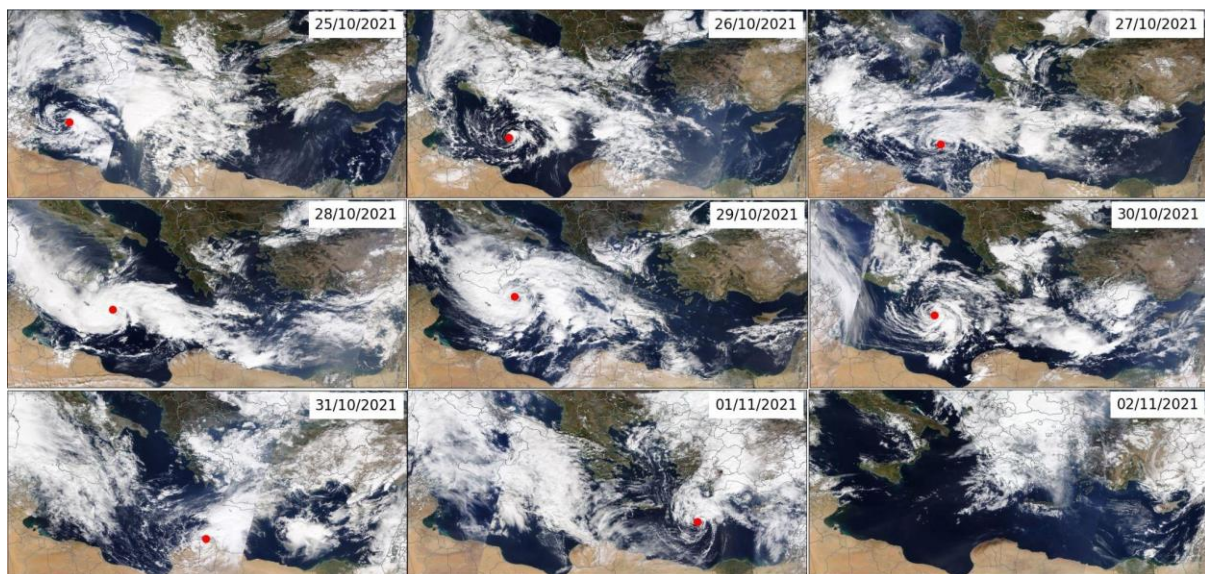


Figure 4 : Ouragan Apollo en mer Méditerranée du 25 octobre au 2 novembre 2021. Le point rouge représente l'œil du *Medicane* Apollo. Image prise par le satellite Terra. Couche : MODIS Corrected Reflectance imagery (True Color) © <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

1.5 Objectifs du mémoire

Les *Medicanes* entraînent non seulement d'intenses vents et d'importantes précipitations, mais aussi une variation de la température de l'eau de mer, de sa salinité, de la concentration en oxygène dissous et de bien d'autres propriétés physico-chimiques. Ces variations dans la colonne d'eau en mer Méditerranée peuvent influencer la dynamique régionale du bassin.

Un des objectifs de ce mémoire est de visualiser et évaluer l'évolution de la température, de la salinité et de l'oxygène dissous suite à un *Medicane*. Pour ce faire, un traitement de données *in situ* est réalisé afin de mettre en évidence les impacts du *Medicane* Apollo sur ces propriétés physico-chimiques dans la colonne d'eau. Dans ce but, divers outils seront utilisés. D'une part, des flotteurs Argo fournissent des données sur ces propriétés dans la colonne d'eau. D'autre part, des bouées dérivantes informent sur la température de l'eau de surface. Ensuite, des données satellites seront traitées afin de les comparer avec les mesures effectuées par les deux sources de données *in situ* citées précédemment. De plus, les satellites fournissent aussi des données de vent, utiles pour suivre et caractériser le *Medicane*.

Ce mémoire a également pour objectif de démontrer l'importance des données *in situ* vis-à-vis des données satellitaires pour des événements météorologiques extrêmes capables de modifier des propriétés physiques des océans.

A l'heure actuelle, les *Medicanes* sont principalement étudiés à travers des modèles. L'avantage de cette méthode est la possibilité de faire varier les valeurs de divers paramètres, ce qui permet de mieux comprendre les mécanismes de formation et d'intensification des ouragans. Cependant, le passage d'un *Medicane* est une opportunité considérable pour mesurer ces paramètres en réalité et non via de la modélisation. Le dernier objectif de ce mémoire est donc de recenser les valeurs de certaines variables physico-chimiques qui sont potentiellement influencées lors du passage d'un cyclone. Répertoire de la sorte des mesures réelles permettrait alors, lors d'un travail ultérieur, de vérifier différents modèles de prédictions.

2. Méthodologie

2.1 Flotteurs Argo

Principe & fonctionnement

Argo est un programme international de collecte de données sur les océans. Ce programme utilise des flotteurs Argo dérivant avec les courants marins. Ces flotteurs collectent des données océanographiques selon la verticale dans la colonne d'eau, telles que la température, la salinité et l'oxygène dissous dans l'eau de mer.

Le programme Argo a vu le jour afin de mieux comprendre le rôle des océans dans le climat de la Terre. Ainsi, les estimations et les projections futures sont plus précises grâce à ces sets de données supplémentaires. Le programme Argo présente l'avantage d'être international puisque chaque pays peut contribuer au développement du réseau Argo et rendre leurs mesures accessibles aux scientifiques du monde entier. (*Argo*, 2022 ; Roemmich *et al.*, 2009)

La vie d'un flotteur Argo commence lors de son déploiement en pleine mer à partir d'un bateau (Figure 5). Une fois à la surface de la mer, le flotteur effectue ses premières mesures afin de se calibrer et communiquer une première fois avec un satellite. Cette première communication a pour but d'envoyer les paramètres de calibration du flotteur et d'enregistrer sa position GPS. Ensuite, le flotteur entame sa première descente avant de se stabiliser à une certaine profondeur, théoriquement à 1 000 mètres mais cette valeur peut varier suivant le flotteur. À cette profondeur, le flotteur voyage au gré des courants marins. Ce n'est que lors de sa remontée que le flotteur Argo enregistre des données océanographiques pour les transmettre au satellite une fois à la surface. Un flotteur Argo répète ce cycle, d'une durée de 10 jours, jusqu'à la fin de sa vie. Cependant, les avancées technologiques permettent aux nouveaux flotteurs Argo de travailler plus rapidement par rapport aux premiers flotteurs déployés. Ceux utilisés dans ce travail remontent à la surface tous les cinq jours (*Argo*, 2022).

La flottabilité d'un flotteur Argo repose sur la présence d'une pompe hydraulique (Figure 6). Suivant la profondeur souhaitée, un piston régule la quantité d'huile présente dans une vessie flexible externe et dans un réservoir interne. Plus l'huile est poussée dans la vessie

flexible externe, plus la densité du flotteur diminue et grâce à la poussée d'Archimède, celui-ci remonte à la surface. Chaque flotteur Argo est muni au minimum d'une sonde CTD (acronyme de « *conductivity temperature depth* »). Cet appareil permet de mesurer la salinité, la température et la pression du milieu marin où il se trouve. Suivant la complexité du flotteur Argo, d'autres senseurs y sont intégrés afin de mesurer par exemple la concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer, la concentration en nitrate, le pH ou d'autres propriétés physico-chimiques. Une batterie alimente ces senseurs, la pompe hydraulique, ainsi que les instruments permettant la télécommunication. Par conséquent, cette batterie détermine la durée de vie du flotteur Argo. Un petit ordinateur permet de coordonner et contrôler tous les composants mécaniques du flotteur à l'aide d'un programme. À la fin de sa vie, le flotteur est perdu (Argo, 2022).

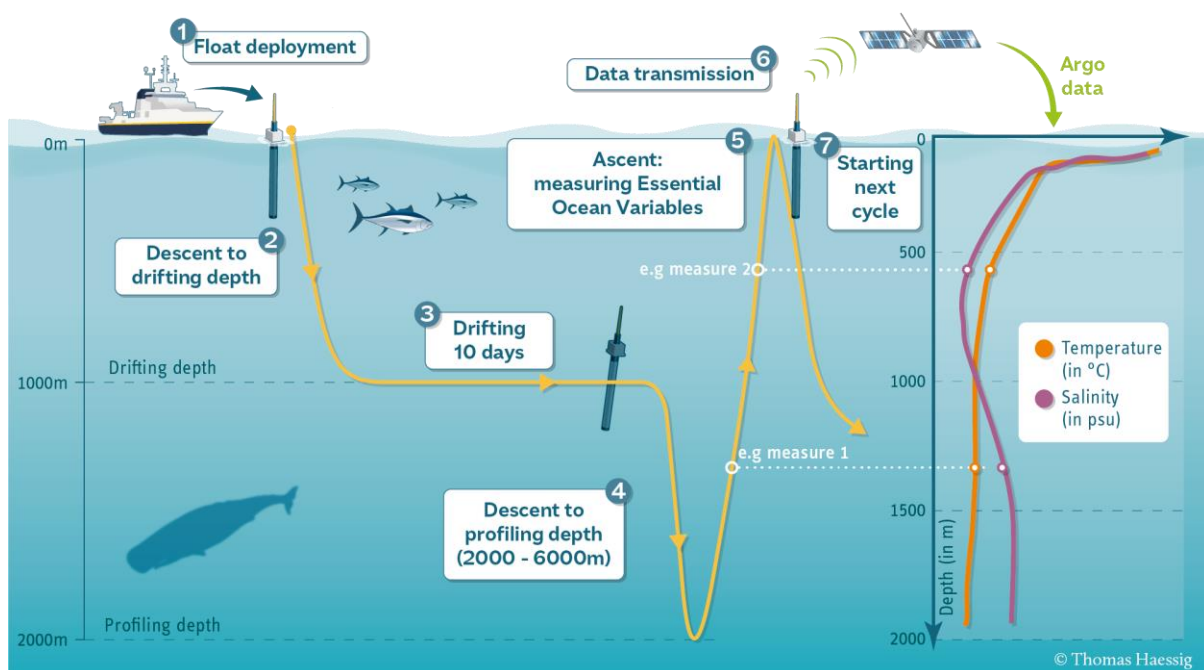


Figure 5 : Cycle de mesure d'un flotteur Argo et représentation du type de données récoltées avec cet instrument de mesure.
 © <https://argo.ucsd.edu/>

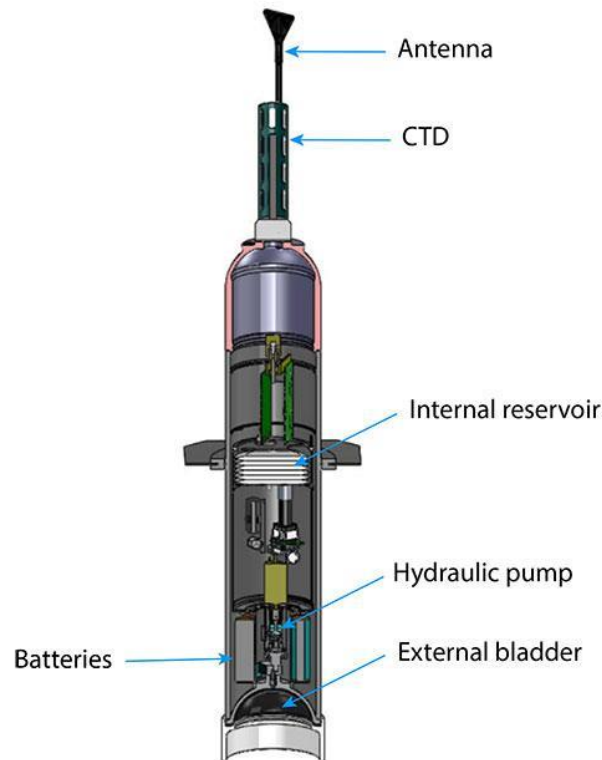


Figure 6 : Composition d'un flotteur Argo.

Base de données SeaDataNet

La base de données « *SeaDataNet* » collectionne des données marines mesurées *in situ*. Cette base de données est d'origine européenne mais contient des données sur le globe entier. Elle présente l'avantage d'une homogénéité dans la présentation des données et est coordonnée par l'Ifremer (Ifremer, 2022). Avec EMODnet (« *European Marine Observation and Data Network* ») et CMEMS (« *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* »), SeaDataNet fait partie des principaux gestionnaires de données en Europe. Ces organismes ont pour but de rendre accessibles les données océanographiques collectées par différents instituts européens, en respectant des standards pour les métadonnées et les données.

Traitement des données Argo

Les données Argo permettent de visualiser des variables océanographiques en fonction de la profondeur. Une zone est préalablement délimitée sur la base de données SeaDataNet, afin que cette dernière affiche tous les flotteurs Argo ayant effectué des mesures dans cette zone. Toutes les données récoltées par des flotteurs Argo dans cette aire sont téléchargées en

format netCDF (« *Network Common Data Form* »). Chaque set de données correspond à toutes les données attachées à un flotteur Argo. Le langage de programmation *Julia* est utilisé afin de sélectionner les données pertinentes pour cette étude en fonction de leur position géographique et leur couverture temporelle. Le langage *Julia* est également utilisé pour traiter et visualiser ces données océanographiques (Bezanson *et al.*, 2017).

Dans un premier temps, à l'aide d'un script *Julia*, la disponibilité des données d'un flotteur Argo est vérifiée. Celles-ci doivent contenir des mesures entre le 20 octobre 2021 et le 07 novembre 2021. Cette période recouvre le passage du cyclone, ainsi que cinq jours avant et après que le cyclone ne se déclare. Cette couverture temporelle de 19 jours permet d'avoir en moyenne quatre cycles de mesures effectués par le flotteur.

Dans un second temps, chaque variable physico-chimique disponible par le flotteur Argo est traitée individuellement. Pour l'ensemble des flotteurs, il s'agit de la température et de la salinité. Certains flotteurs proposent également des données de concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer. Le traitement des données est identique quelle que soit la variable et quel que soit le flotteur Argo qui fournit ces données.

Comment se présentent les données Argo ?

Les flotteurs Argo effectuent des cycles de mesure. Pour chaque cycle, une nouvelle série de données est ajoutée au set de données associées à l'Argo. Les variables fournies par le set de données possèdent donc trois dimensions : la longitude, la latitude et le temps.

La longitude et la latitude donnent la position du flotteur Argo lorsqu'il entre en communication avec le satellite. Cette position est considérée comme unique tout au long de sa remontée. Quant au temps, celui-ci est associé à la date de sortie du flotteur Argo. Autrement dit, cette date de sortie correspond au jour où le flotteur Argo remonte, effectue ses mesures et les transmet au satellite. Dans un set de données, il arrive régulièrement qu'un flotteur Argo enregistre de manière séquentielle ses mesures lors d'une même remontée. En effet, il existe au sein d'un set plusieurs vecteurs de données correspondant à la même date de remontée. Ces vecteurs représentent simplement une section de profondeur différente.

Les mesures correspondant à la même date sont rassemblées et concaténées dans un même vecteur pour chacune des variables (température, salinité, oxygène dissous). Ainsi, le vecteur représente toute la remontée effectuée par un flotteur à sa date de sortie. Il est alors plus aisé de traiter un seul vecteur par remontée dans *Julia*.

A ce stade, les vecteurs représentant les mesures de profondeur sont différents pour chaque sortie d'un flotteur Argo. Afin de pouvoir comparer mathématiquement les différents profils de variables, il est impératif de généraliser ces vecteurs de profondeur. Pour ce faire, un nouveau vecteur est construit. Il représente une profondeur de 0 à 200 mètres avec un intervalle de cinq mètres. Les mesures des variables physico-chimiques sont ensuite interpolées linéairement sur ce nouveau vecteur associé à la profondeur. Les résultats de l'interpolation sont recueillis dans un "*DataFrame*", qui n'est autre qu'un tableau de données construit dans le langage de programmation *Julia*. Des opérations mathématiques sont désormais possibles entre les différents vecteurs des propriétés physico-chimiques, étant donné que ces données reconstruites sont associées à une même profondeur.

2.2 Bouées dérivantes

Principe & Fonctionnement

Une bouée dérivante est un dispositif de mesure océanographique flottant et dérivant au gré des courants (Figure 7). Cet appareil permet principalement de mesurer la température de l'eau en surface. Cependant, suivant la complexité de la bouées, d'autres paramètres tels que la salinité ou la pression atmosphérique peuvent être mesurés. Cet instrument de mesure est suivi par satellites, généralement grâce à un signal GPS. L'avantage des bouées dérivantes est qu'elles donnent des informations presque en temps réel. De plus, elles sont facilement largables depuis un avion ou un bateau, ce qui, en cas de prédiction de *Medicane*, peut s'avérer utile.



Figure 7 : Aspect d'une bouée dérivante non déployée dans l'eau. Source : U.S. government website incorporating image: <https://www.climate.gov/news-features/climate-tech/doing-their-part-drifter-buoys-provide-ground-truth-climate-data>

Traitement des données de bouées dérivantes

Les données sont récoltées sur la base de données SeaDataNet, tout comme celles des flotteurs Argo. La base de données fournit des fichiers de données mensuelles au format netCDF. Ceux correspondant aux mois d'octobre et de novembre 2021 sont téléchargés pour chaque bouée dérivante se trouvant dans la mer Ionienne. Les données de température sont traitées et visualisées grâce au langage de programmation *Julia*. La couverture temporelle est bornée du 24 octobre 2021 à 00:00 jusqu'au 03 novembre 2021 à 23:00. Les mesures téléchargées sont concaténées afin de n'avoir aucune interruption dans les données. Ceci permet de visualiser l'évolution de la température de surface de la mer lors du passage du *Medicane* Apollo.

2.3 Données satellites

Principe et fonctionnement

Des radiomètres infrarouges emportés sur des satellites permettent de déterminer à distance la température de surface des océans. Ce type de senseurs mesure les rayonnements infrarouges émis par cette surface. Les images ainsi collectées sont parfois incomplètes à cause de la présence de nuages, d'aérosols ou tout autre élément capable d'absorber les rayonnements infrarouges. Lors du passage d'un *Medicane*, les cumulonimbus obstruent les mesures et les images satellites présentent des données manquantes.

L'analyse DINEOF (Data Interpolation Empirical Orthogonal Functions) est une méthode d'interpolation spatio-temporelle permettant de reconstruire des données manquantes sur les images satellites (Alvera-Azcárate *et al.*, 2005, 2009; Beckers & Rixen, 2003).

Traitement des données satellite - L'interpolation DINEOF

Les données sont téléchargées sur la base de données de CMEMS. Le produit choisi est "Mediterranean Sea - High Resolution and Ultra High Resolution L3S Sea Surface Temperature". Il s'agit d'un produit L3 donc non modifié par une interpolation ou un modèle. Ce produit a été téléchargé selon les paramètres suivants : longitude de 8 °E à 35 °E, latitude de 30,5 °N à 41 °N, dates du 15-09-2021 au 15-12-2021.

Ces longitudes et latitudes recouvrent la zone d'impact du *Medicane* et où une influence sur la température de surface est possible. Les dates sont choisies de manière large afin de permettre à l'analyse DINEOF de calculer l'interpolation spatiale et temporelle de façon optimale, soit au minimum 1 mois et demi avant et après le passage de l'ouragan.

Avant de lancer l'analyse DINEOF, une préparation des données est nécessaire. Tout d'abord, les 92 images satellites téléchargées doivent contenir au maximum 95 % de données manquantes. Si le pourcentage de données manquantes sur une image satellite dépasse ce quota, alors cette image est supprimée de l'ensemble des données. Lors de cette étape, toutes les images sont conservées. En effet, aucune d'entre elles ne possède moins de 5 % de données. Cette étape n'est donc pas nécessaire dans le cadre de cette étude. Ensuite, un masque est créé afin de différencier la partie terrestre et la partie marine sur les images satellites. Pour ce faire,

les pixels ayant plus de 98 % de données manquantes dans le temps, sont masqués car associés à des zones terrestres. Les valeurs des données restantes sont enregistrées dans un fichier netCDF et prêtes pour une analyse DINEOF.

L'analyse DINEOF est réalisée avec les paramètres suivant : alpha (la force du filtre) = 0.1, numit (le nombre d'itérations pour le filtre) = 3, nev (le nombre maximum de modes à calculer lors de l'analyse EOF) = 50, neini (le nombre minimum de modes à calculer lors de l'analyse EOF) = 1, ncv (la taille maximale de sous-espace de Krylov) = 55 = nev+5.

Les valeurs des autres paramètres sont prises par défaut. L'analyse DINEOF a permis de reconstruire des cartes de données de SST dont 44,34 % des données étaient manquantes.

2.4 Données de vents

Base de données REMSS

Les vents à la surface de l'océan ont une importance cruciale sur la dynamique des océans. En effet, ils influencent les échanges entre l'océan et l'atmosphère, ils agissent sur les mouvements des masses d'eau et ils impactent l'évolution des propriétés physiques de la colonne d'eau.

Afin de visualiser l'intensité de ces vents ainsi que l'œil du cyclone, des cartes de vents sont construites à partir des données récoltées dans la base de données « *Remote Sensing Systems* » (REMSS). Initialement, cette base de données a été créée pour suivre la vitesse et la direction des vents afin de mieux prédire les événements d'El Niño (*Remote Sensing Systems*, 2022). Cependant, la richesse de celle-ci est profitable à de nombreux projets scientifiques. REMSS fournit le produit d'analyse vectorielle du vent du « *Cross_Calibrated Multi-Platform* » (CCMP). Les vents du produit CCMP sont obtenus grâce à une combinaison de mesures satellitaires, de bouées ancrées et de données de vent modélisées (Atlas *et al.*, 2011).

Les mesures satellitaires proviennent de satellites disposant d'un diffusomètre (Figure 8). Cet instrument permet de mesurer la vitesse et la direction du vent grâce au phénomène de diffusion de micro-ondes. Le satellite envoie une impulsion d'une micro-onde qui est rétrodiffusée au contact de la surface terrestre (Liu, 2002). Une onde rétrodiffusée est la partie de l'énergie de l'onde qui est réfléchiée dans la direction incidente. Des radars disposés sur les satellites mesurent alors la puissance de cette onde rétrodiffusée qui dépend de la direction et

de la vitesse du vent à la surface de la Terre (Figure 8). Ainsi, il est possible de calculer, grâce à un modèle géophysique, cette vitesse et direction à un moment donné (Freilich *et al.*, 1994; Gelsthorpe *et al.*, 2000; Liu, 2002).

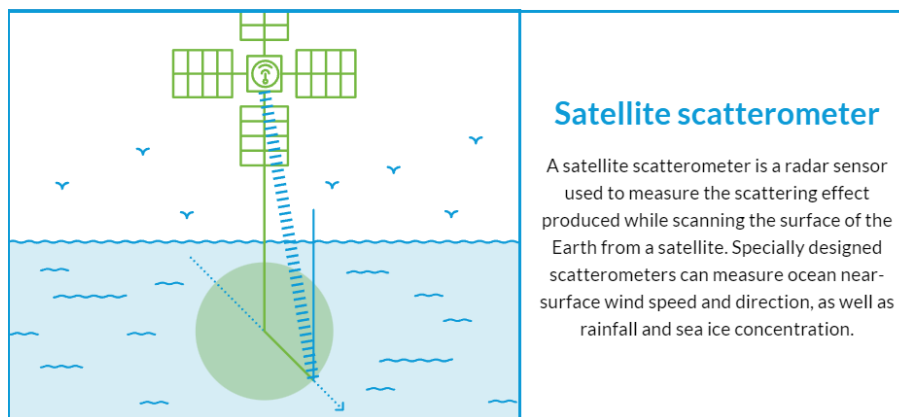


Figure 8 : Satellite composé d'un diffusomètre, explication et utilité. <https://marine.copernicus.eu/explainers/operational-oceanography/monitoring-forecasting/satellites>

L'intérêt de mesurer la vitesse et la direction du vent via des satellites se trouve dans la quantité d'acquisition et la résolution de celles-ci. En effet, un satellite équipé d'un diffusomètre récolte des données sur une surface beaucoup plus large par rapport à un instrument *in situ*. De plus, la télédétection permet d'acquérir des mesures continues en gardant une haute résolution.

Traitement des données

Le langage de programmation Julia permet de visualiser la vitesse et la direction des vents en mer Méditerranée. Les données de vent du 25 octobre 2021 au 03 novembre 2021 sont téléchargées, afin de couvrir la période du cyclone Apollo. Les mesures sont prises quotidiennement avec un intervalle de six heures (00:00, 06:00, 12:00, 18:00). Les sets de données recouvrent tout le globe, hormis les extrêmes Nord et Sud (jusqu'à environ 80°). La première étape consiste donc à réduire la représentation géographique à la zone de la mer Méditerranée où le *Medicane* s'est déclaré. Cette zone est définie de 7,375 °E à 32,375 °E pour la longitude et de 30,125 °N à 41,375 °N pour la latitude. En second lieu, un ensemble de graphes est construit afin de représenter l'évolution du cyclone jour après jour à la même heure. Seule une donnée sur deux est représentée sur les graphes afin de ne pas surcharger la représentation. Pour finir, la position de l'œil du cyclone est suivie à l'aide de cartes réalisées chaque jour avec quatre cartes par jour pour une meilleure couverture horaire (00:00, 06:00,

12:00, 18:00). Les coordonnées géographiques du centre du *Medicane* sont extraites de ces images puis sauvegardées. Ainsi, la trajectoire du cyclone peut être retracée.

3. Résultats

3.1 Les vents - suivi du *Medicane*

Le *Medicane* Apollo produit des vents cycloniques en mer Ionienne du 25 octobre 2021 au 01 novembre 2021 (Figure 9 ; Figure 11). Les vents observés tournent dans un sens anti-horloger autour d'un centre appelé l'œil du cyclone. Cet œil se déplace d'ouest en est. Son parcours débute au niveau du détroit de Sicile puis se poursuit dans le centre de la mer Ionienne. Le centre du cyclone rencontre les terres africaines le 31 octobre 2021, pour ensuite remonter dans la mer Méditerranée et terminer son parcours dans le bassin Levantin (Figure 9). La vitesse maximale des vents avoisine les 20 m/s autour de l'œil du *Medicane* les jours de plus grande intensité (Figure 10). Cette vitesse observée est exceptionnelle en mer Ionienne, où la vitesse moyenne des vents annuels ne dépasse habituellement pas 6 m/s (Soukissian *et al.*, 2017). Le 29 octobre 2021, la vitesse maximale mesurée vaut 22,89 m/s, ce qui correspond à 82,40 km/h (Figure 10). La vitesse diminue lorsque le *Medicane* rencontre les terres africaines, allant de 22,07 m/s le 31 octobre 2021 à 19,85 m/s le 01 novembre 2021 (Figure 10). En effet, l'intensité des vents diminue lorsque le cyclone rencontre des terres, étant donné qu'il puise son énergie dans les eaux chaudes de surface. Bien que le *Medicane* retourne au-dessus des eaux de la mer Méditerranée le 01 novembre 2021, la vitesse de ses vents continue à diminuer. Le 02 novembre 2021, la vitesse maximale mesurée vaut 16.84 m/s dans la zone où le *Medicane* Apollo s'est déclaré (Figure 10).

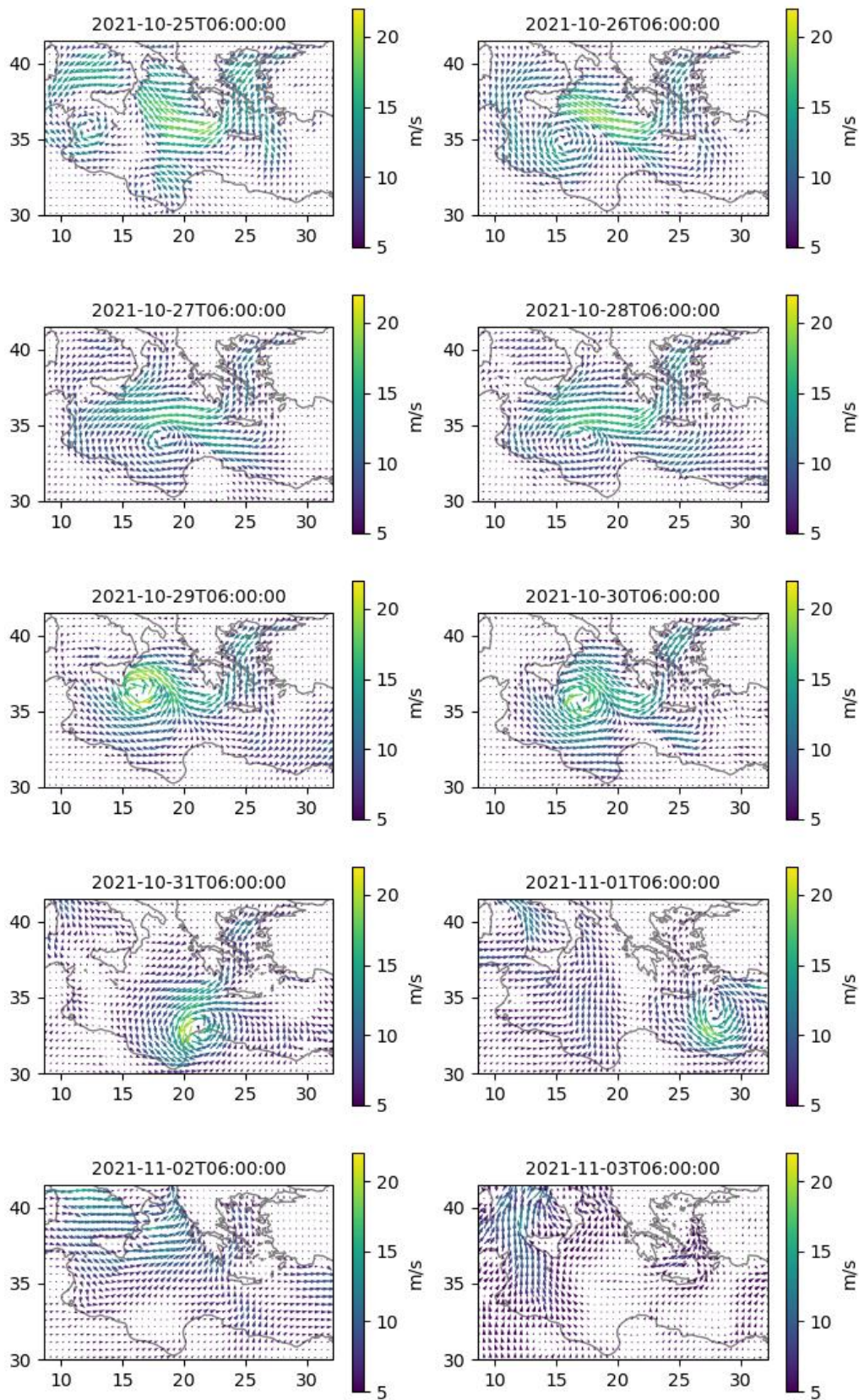


Figure 9 : Vents journaliers en mer Méditerranée du 25 octobre 2021 au 03 novembre 2021 à 6:00:00 AM d'après les données du produit CCMP de REMSS.

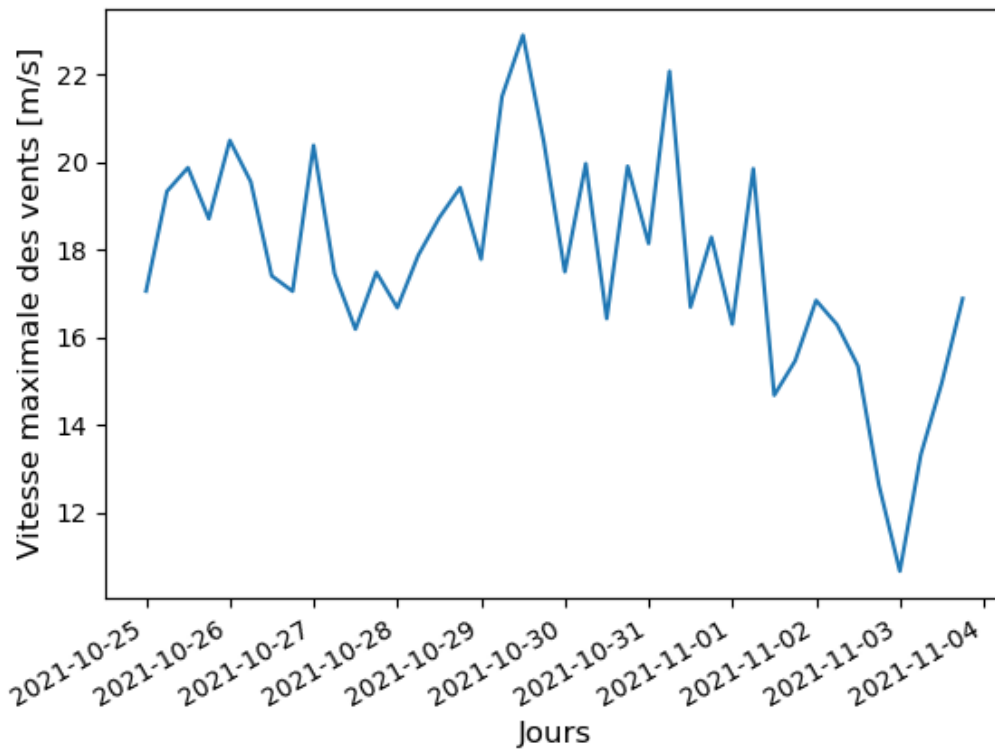


Figure 10 : Vitesse maximale du vent mesurée lors du passage du Mediane Apollo en mer Méditerranée.

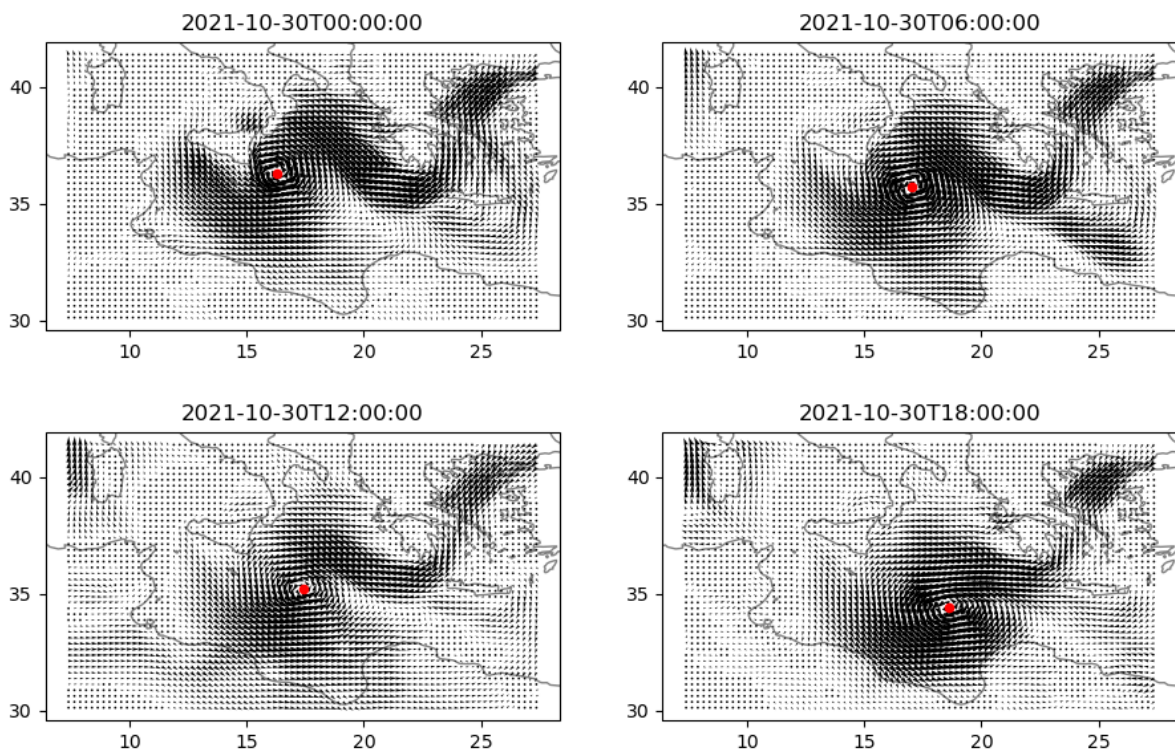


Figure 11 : Direction et vitesse du vent du 30 octobre 2021. Le point rouge sert de repère pour le centre du cyclone. Ces cartes sont construites à partir de toutes les données disponibles sur REMSS dans la zone géographique $30^{\circ}7'30''N-41^{\circ}22'30''N$, $7^{\circ}22'30''O-32^{\circ}22'30''O$.

La trajectoire du *Medicane* est reconstruite grâce aux données de vents. En effet, la position géographique de l'œil de cyclone est facilement visualisable sur des cartes de vents (Figure 11 ; Annexe 2). Les coordonnées ainsi identifiées permettent de classer les flotteurs Argo dans différentes catégories en fonction de leur distance avec la trajectoire du *Medicane* (Figure 12). Les données des flotteurs Argo utilisées sont des données téléchargées dans une zone de la mer Méditerranée Centrale et Est où le cyclone s'est manifesté. Cependant, certains flotteurs se trouvent trop éloignés par rapport au *Medicane*. En effet, dans certains cas, il est trop incertain de conclure d'un impact direct du cyclone sur l'évolution temporelle des variables physico-chimiques vu la distance entre le point de mesure et le *Medicane*.

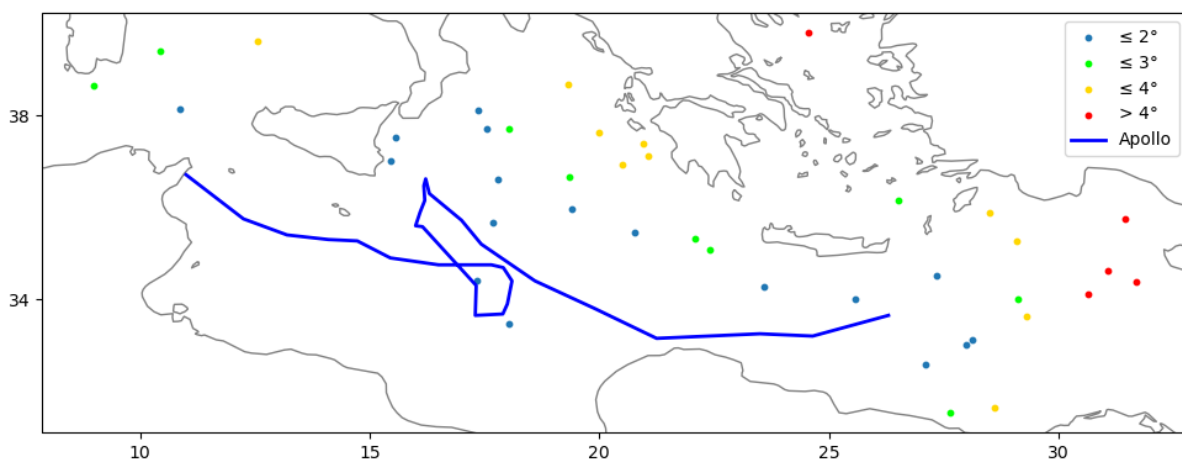


Figure 12 : Trajectoire de l'œil du cyclone Apollo et position des flotteurs Argo. Les flotteurs sont classés suivant leur distance avec l'œil du cyclone. Les points bleus représentent les Argo de trouvant à une distance inférieure ou égale à 2°. Les points verts représentent les Argo de trouvant à une distance inférieure ou égale à 3°. Les points jaunes représentent les Argo de trouvant à une distance inférieure ou égal à 4°. Les points rouges représentent les Argo de trouvant à une distance supérieure à 4°.

L'équivalent en kilomètre de 1° en latitude vaut 111,11 km. En ce qui concerne la longitude, étant donné que la Terre est sphérique, il faut prendre en compte le cosinus de la latitude sur laquelle la longitude est transformée en unité métrique. Par exemple, à 30 °N la longitude équivaut à 96,22 km, et à 42 °N la longitude vaut 82,57 km. Étant donné qu'un *Medicane* est un phénomène à méso-échelle (Emanuel, 2005), son diamètre s'étend de 100 kilomètres à quelques centaines de kilomètres. Il est nécessaire de faire un choix dans les flotteurs Argo disponibles (Figure 12). Les flotteurs Argo sélectionnés pour interpréter l'impact du *Medicane* Apollo sont ceux situés à moins de 2° de l'œil du cyclone à un moment donné de son histoire, soit 222,22 km en latitude et entre 165,14 km et 192,44 km pour la longitude (Figure 13).

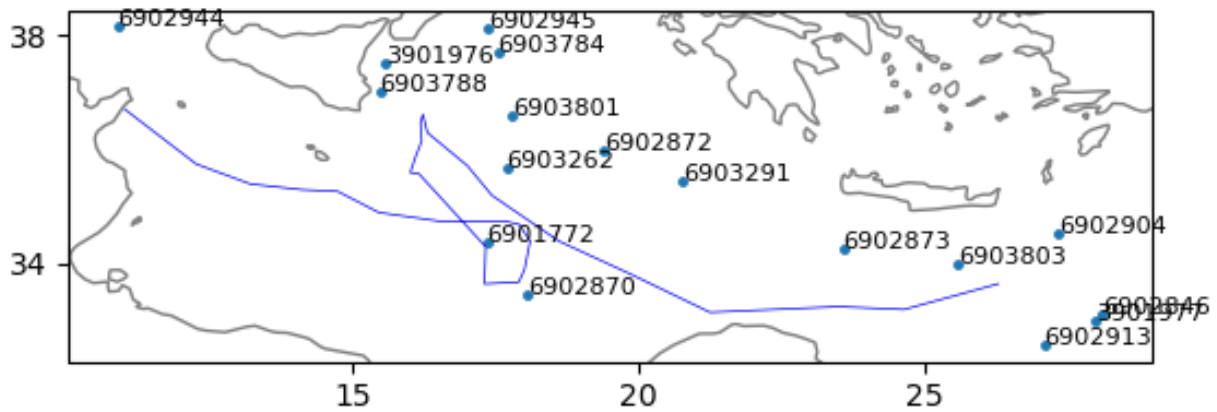


Figure 13 : Flotteurs Argo se situant à moins de 2° de la trajectoire (trait bleu) du *Medicane Apollo*, soit 222,22 km en latitude et entre 165,14 km et 192,44 km pour la longitude.

La vitesse des vents à la position des sorties des flotteurs Argo est calculée par interpolation linéaire grâce aux données journalières des vents fournies par la base de données REMSS. Ces vitesses varient entre 2,83 m/s et 15,89 m/s, avec une valeur moyenne de 8,36 m/s (Annexe 3).

3.2 Les Profils de la colonne d'eau

Profil - Tendances générales dans la colonne d'eau

Des profils sont construits à partir des données interpolées des flotteurs Argo. Ces profils représentent, selon la profondeur, les valeurs de température (Figure 14), de salinité (Figure 15) et du taux d'oxygène dissous dans l'eau de mer (Figure 16). La majorité des flotteurs Argo effectue des mesures tous les cinq jours. Il est alors possible, sur l'intervalle de temps sélectionné, de comparer plusieurs profils dont les données sont issues d'un même flotteur.

La température tend à diminuer dans la couche de mélange, de maximum 1,61 °C en moyenne, lors du passage du *Medicane Apollo*. Par exemple, les profils tracés à partir des données du flotteur Argo 3901976 (Figure 14A) montrent une diminution de la température au fil des jours sur la couche de mélange. Lorsque le *Medicane* est passé, les eaux de surface peuvent à nouveau se réchauffer de quelques dixièmes de degrés (0,43 °C pour le flotteur 3901976 ; Figure 14A). Ceci est observé sur les premiers mètres du profil du 05 novembre 2021. Ce schéma A, d'une diminution de la température sur l'ensemble de la couche de mélange lors du passage de l'ouragan, suivi d'une augmentation de la température de surface

lorsque l'ouragan est terminé, est également observé à l'aide de sept autres flotteurs Argo : 3901977, 6901772, 6902873, 6903291, 6903788, 6903801, 6903803 (Annexe 4 – Schéma A). Les profils construits à partir des données des flotteurs Argo 6902870, 6902872, 6902904, 6902945 et 6903262 (Annexe 4 – Schéma B) montrent uniquement une diminution de la température de la couche de mélange (Figure 14B). Sur ces profils, l'augmentation de température en surface après le passage du *Medicane* n'est pas observée. Les profils construits à partir des flotteurs Argo 6902846, 6902944 et 6903784 (Annexe 4 – Schéma C) présentent, quant à eux, une augmentation de la température de la couche de mélange au début de l'histoire du *Medicane* suivie d'une diminution de la température (Figure 14C). Seul le flotteur Argo 6902913 présente des profils dont l'évolution temporelle ne ressemble pas aux résultats apportés par les autres flotteurs. En effet, la température de la couche de mélange diminue dans un premier temps, pour ensuite augmenter et re-diminuer pour finir (Figure 14D).

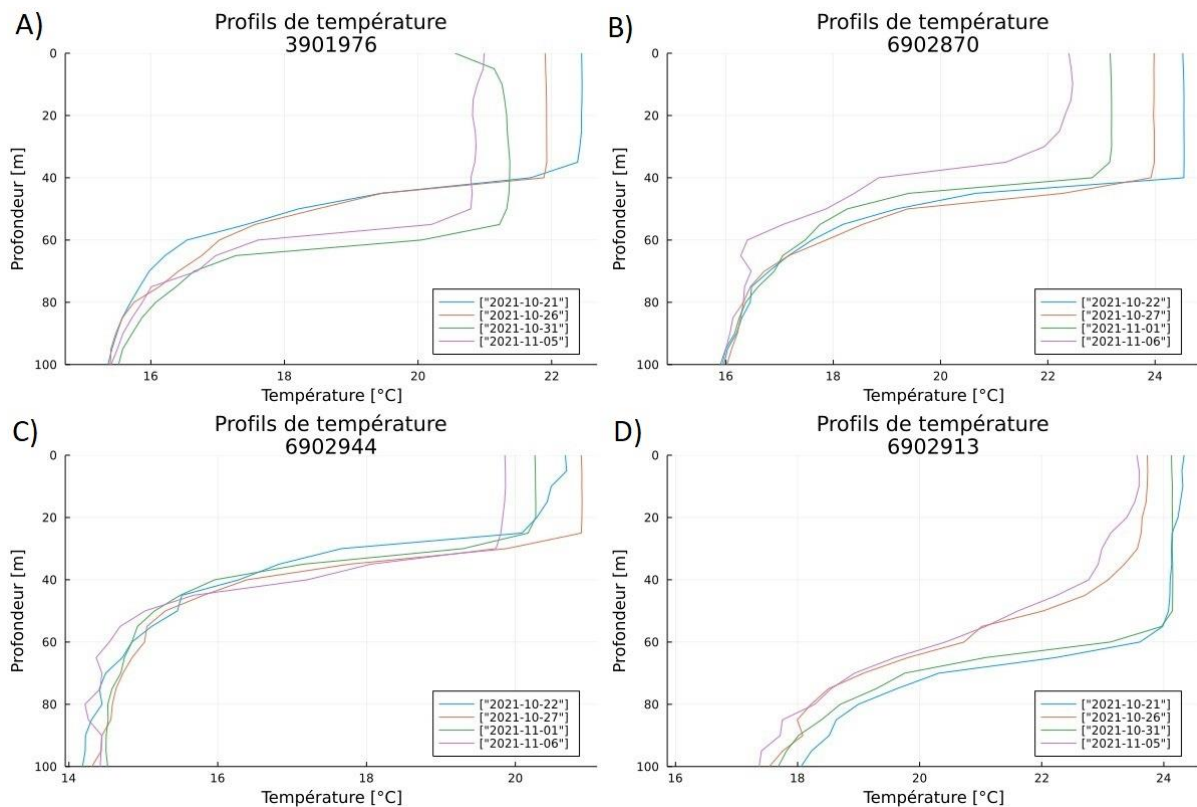


Figure 14 : Profils de température [°C] en fonction de la profondeur à partir des données interpolées des flotteurs Argo. Chaque graphe représente les différentes remontées d'un même flotteur. Chaque profil représente une date de sortie pour le flotteur Argo. A) Exemple du schéma A. B) Exemple du schéma B. C) Exemple du schéma C. D) Exception qui ne respecte pas les autres schéma, profils du flotteur Argo 6902913.

La salinité varie dans la couche de mélange au fil des jours jusqu'à perdre 0,31 en moyenne ou gagner 0,28 lors du passage du *Medicane* Apollo (Figure 15). Au-delà de la halocline, la salinité est moins impactée par la présence d'un *Medicane* en surface. Sa valeur

est donc relativement constante au fil des jours au-delà de 100 m, celle-ci est observée aux alentours de 39. De manière générale, l'évolution de la salinité suit les mêmes schémas que l'évolution de la température. La salinité tend à diminuer lorsque le *Medicane* se déclare pour ensuite augmenter dans les premiers mètres de la couche de mélange à la fin du phénomène météorologique (Figure 15A). Ce schéma est observé sur les profils construits à partir des données des flotteurs Argo suivant : 3901976, 3901977, 6902846, 6902872, 6902873, 6903291, 6903788 (Annexe 5 – Schéma A). Les profils construits à partir des flotteurs Argo 6902870, 6902904, 6902944, 6903262 et 6903803 (Annexe 5 – Schéma B) présentent uniquement une diminution de la salinité sur les 50 premiers mètres de la colonne d'eau (Figure 15B). Les profils construits à partir des données du flotteur Argo 6902913 montrent d'abord une augmentation de la salinité, suivis d'une diminution de cette dernière dans la couche de mélange (Figure 15C). Les données des flotteurs Argo 6902945, 6903784 et 6903801 présentent des profils dont l'évolution temporelle ne ressemble pas aux résultats apportés par les autres flotteurs (Figure 15 D, E, F). En effet, pour les flotteurs Argo 6902945 et 6903801, la salinité augmente dans un premier temps, pour ensuite diminuer et ré-augmenter pour finir (Figure 15 D, F). Quant aux profils construits à partir des données du flotteur 6903784, la salinité augmente de plus de 0,6 pour ensuite diminuer (Figure 15E). Ce schéma ressemble au schéma C, à la différence que la salinité continue à augmenter les jours de forte intensité du *Medicane* Apollo (28, 29, 30 octobre 2021).

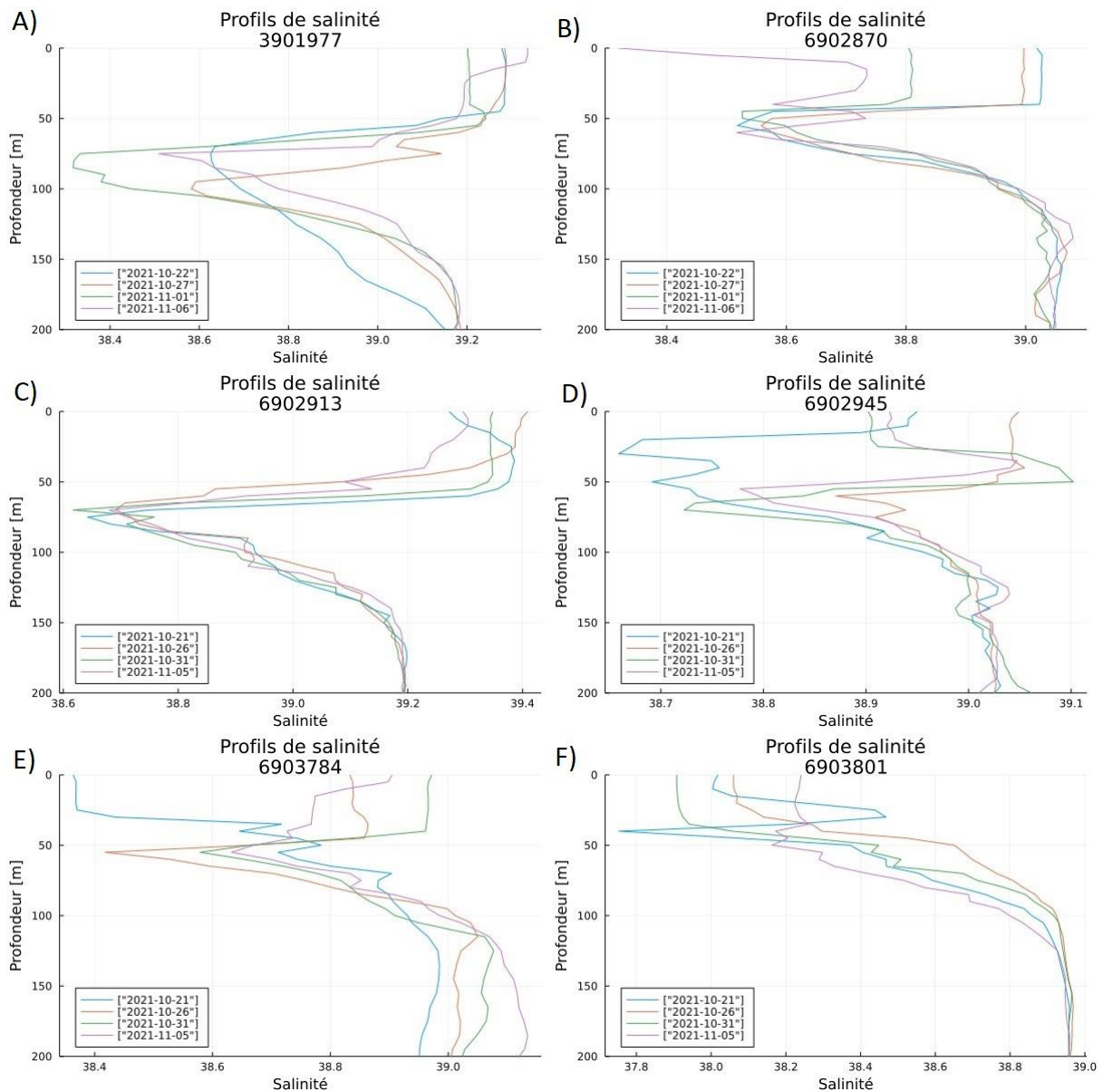


Figure 15 : Profils de salinité en fonction de la profondeur à partir des données interpolées des flotteurs Argo. Chaque graphe représente les différentes remontées d'un même flotteur. Chaque profil représente une date de sortie pour le flotteur Argo. A) Exemple du schéma A. B) Exemple du schéma B. C) Schéma C, profils construits à partir des données du flotteur Argo 6902913. D) E) F) Profils dont l'évolution temporelle ne respecte aucun schéma précédent.

La concentration en oxygène dissous tend à augmenter de 21,27 $\mu\text{mol/kg}$ en moyenne en surface au passage du *Medicane* Apollo (Figure 16 A, B, C, E, F). Les données fournies par le flotteur 6902904 (Figure 16D) présentent une exception à cette tendance. La profondeur où est mesurée le maximum de concentration en oxygène dissous dans l'eau est observé en moyenne à environ 45 m. Celle-ci tend également à augmenter, d'environ 10 m pour les profils Argo 6902904 (Figure 16D) et jusqu'à 20 m pour les profils Argo 6902872 et 6902873 (Figure 16 B, C). Autrement dit, l'épaisseur de la couche de surface pauvre en oxygène augmente. Cette tendance n'est pas suivie avec les données du flotteur Argo 6903803 (Figure 16F). En

effet, la profondeur du maximum de concentration en oxygène dissous diminue de 35 m pour ensuite revenir à sa profondeur initiale de 80 m. En profondeur, au-delà de 100 m environ, l'influence du *Medicane* est faible et les concentrations en oxygène dissous sont relativement constantes au cours du temps, entre 180 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ et 200 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ dans le cadre de cette étude.

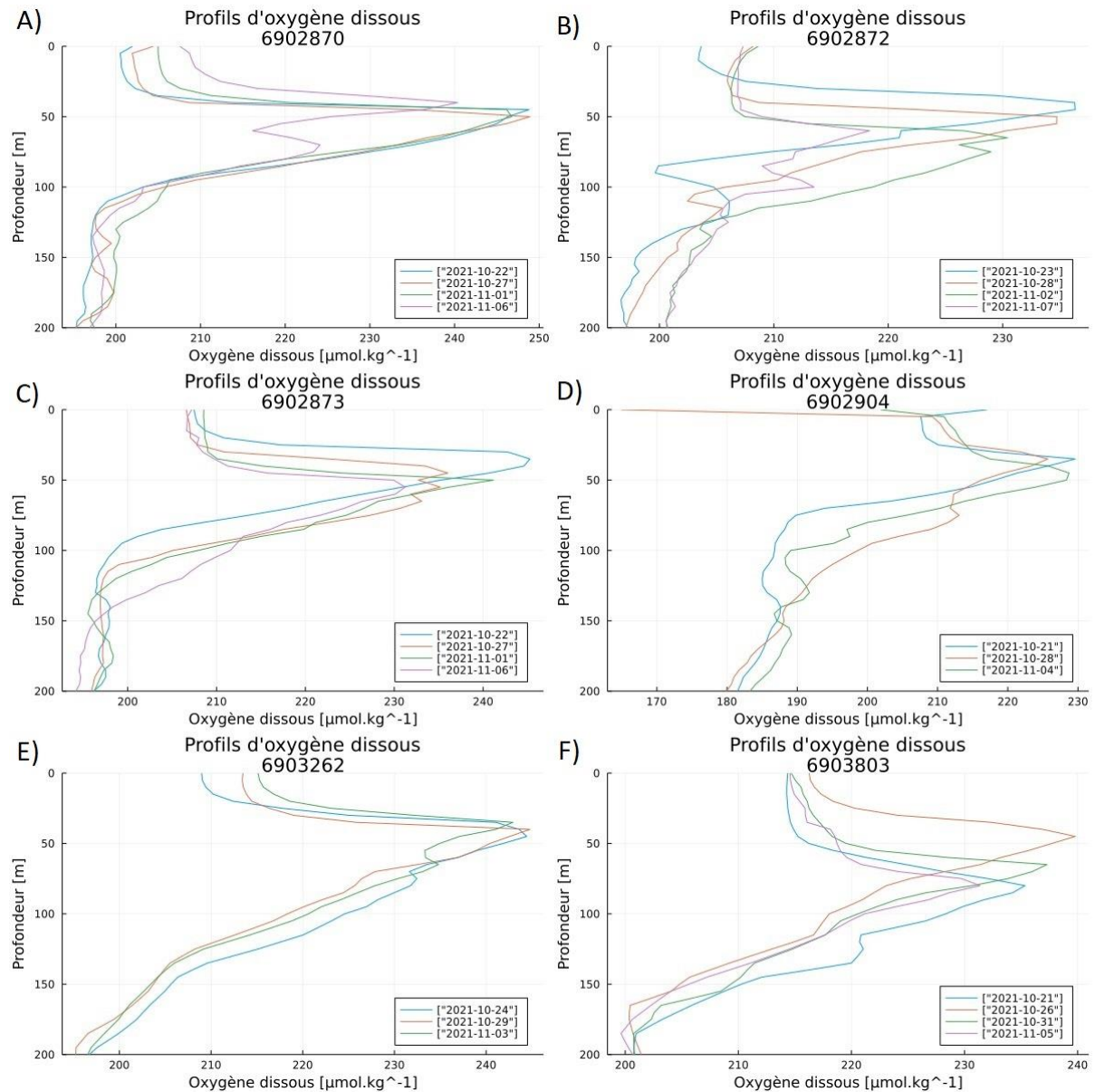


Figure 16 : Profils de concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer [$\mu\text{mol}/\text{kg}$] en fonction de la profondeur à partir des données interpolées des flotteurs Argo. Chaque graphe représente les remontées d'un même flotteur.

Étude statistique des données interpolées des flotteurs Argo

Des études statistiques sont réalisées directement grâce au langage de programmation de Julia. Ces calculs permettent de quantifier l'évolution des variables physico-chimiques lors du passage du *Medicane* Apollo. Pour ce faire, la différence totale est calculée en soustrayant

les valeurs obtenues lors de la première remontée d'un flotteur Argo et les valeurs obtenues lors de sa dernière remontée dans la couverture temporelle présélectionnée. Ainsi, un nouveau vecteur est construit représentant l'évolution totale d'une variable physico-chimique et ce pour chaque variable et chaque flotteur Argo. Hors de ce vecteur, la moyenne, le minimum, la médiane et le maximum sont relevés (Annexe 7). Chaque flotteur Argo possède donc une valeur correspondant à l'écart moyen, une valeur pour l'écart minimum, une valeur pour la médiane et une valeur correspondant à l'écart maximum. La moyenne sur chacune de ces valeurs de l'ensemble des flotteurs sélectionnés dans cette étude est réalisée (Tableau 1).

Tableau 1: Moyennes des valeurs moyennes, minimales, médianes et maximales des écarts de température, salinité et concentration en oxygène dissous calculées à partir des données des flotteurs Argo situé à moins de 2° de la trajectoire du Mediane Apollo.

	Moyenne des moyennes	Moyenne des minimums	Moyenne des médianes	Moyenne des maximums
Écart de température [°C]	0.07	-1.61	-0.03	1.78
Écart de salinité	-0.01	-0.31	-0.02	0.28
Écart de concentration en oxygène dissous [µmol/kg]	0.59	-20.12	-0.21	21.28

La plus grande perte de température, relevée par le flotteur Argo 6902872, est de -3,57 °C. Cette perte est mesurée entre le 23 octobre 2021 et le 07 novembre 2021. Lorsque la moyenne des plus grandes pertes pour chaque flotteur est prise en compte, la valeur de -1,61 °C est obtenue.

La plus grande perte de salinité, relevée par le flotteur Argo 6903291, est de -0,87. Cette perte est mesurée entre le 23 octobre 2021 et le 07 novembre 2021. Lorsque la moyenne des plus grandes pertes pour chaque flotteur est prise en compte, la valeur de -0,31 est obtenue.

La plus grande perte de concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer, relevée par le flotteur Argo 6902904, est de -52,13 µmol/kg. Cette perte est mesurée entre le 21 octobre 2021 et le 04 novembre 2021. Lorsque la moyenne des plus grandes pertes pour chaque flotteur est prise en compte, la valeur de -20,12 µmol/kg est obtenue.

La plus grande augmentation de concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer, relevée par le flotteur Argo 6902873, est de 35.53 $\mu\text{mol/kg}$. Ce gain est mesuré entre le 22 octobre 2021 et le 06 novembre 2021. Lorsque la moyenne des plus grands gains pour chaque flotteur est prise en compte, la valeur de 21.28 $\mu\text{mol/kg}$ est obtenue.

3.3 Température de surface (SST) - Tendances générales

Résultats bouées dérivantes

Les bouées dérivantes disponibles dans la mer Ionienne sont représentées sur une carte afin de visualiser leur trajectoire dans la mer Méditerranée (Figure 17). Sur cette carte, l'évolution de la température de la surface de la mer est également représentée. Le suivi de la température au cours du temps lors du passage du *Medicane* Apollo montre un refroidissement des eaux de surface (Figure 18).

C'est notamment très marquant pour la bouée dérivante 6102784 qui se trouve en plein centre de la mer Ionienne, où le *Medicane* a perduré plusieurs jours. En effet, un plateau à 24,4 °C est d'abord observé avant l'arrivée du *Medicane*. Ensuite, le 26 octobre 2021, une diminution de la température de surface de 1,3 °C se fait ressentir jusqu'au 02 novembre 2021 pour former un nouveau plateau à 23,1 °C (Figure 18). L'évolution journalière mesurée par la bouée dérivante 6102786 est quant à elle plus irrégulière (Figure 18). Néanmoins, une température relativement constante d'environ 22,1 °C peut être observée le 24 et 25 octobre 2021. La bouée mesure un refroidissement de la SST d'environ 1,2 °C à partir du 28 octobre 2021 jusqu'au 31 octobre 2021, lors des jours les plus intenses du *Medicane* Apollo. À partir du 02 novembre 2021, la température est observée à 21,3 °C. La bouée dérivante 6102787 présente une diminution continue de la température au fil des jours, avec quelques variations plus importantes à certains moments (Figure 18). Par exemple, le 27 octobre 2021, une diminution de 1 °C est relevée, pour ensuite ré-augmenter de 0,9 °C, le tout en 15 heures. À cet instant, la bouée est très proche des côtes siciliennes au niveau de la ville de Syracuse, où d'importantes inondations ont eu lieu (Figure 17 ; Faranda *et al.*, 2022; *Medicane* Apollo, 2022). Une hypothèse est que les eaux de ruissellement, plus froides, dues aux inondations, se déversent dans la mer qui elle est plus chaude. La bouée dérivante aurait donc mesuré cette arrivée d'eau froide. La bouée dérivante 6102788 mesure, elle aussi, une diminution de la SST lors du passage du *Medicane* Apollo. Cette diminution s'élève à environ 0,5 °C.

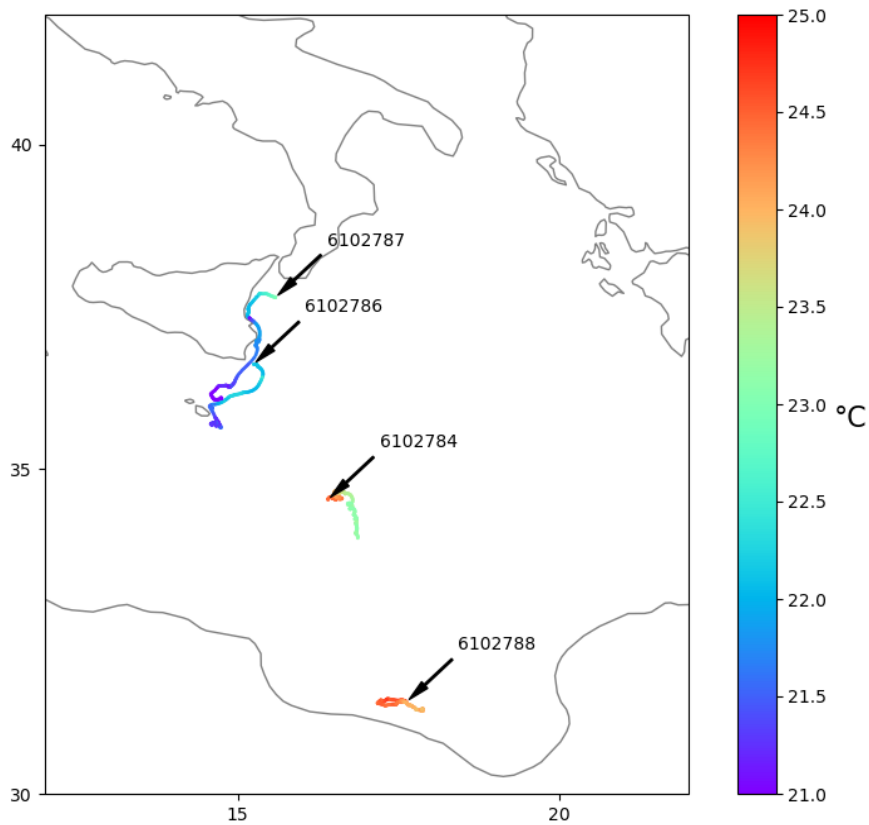


Figure 17 : Position géographique dans la mer Méditerranée des différentes bouées dérivantes sélectionnées pour cette étude, ainsi que leur trajectoire et la SST mesurée. La flèche représente le point de départ de la trajectoire des bouées dérivantes.

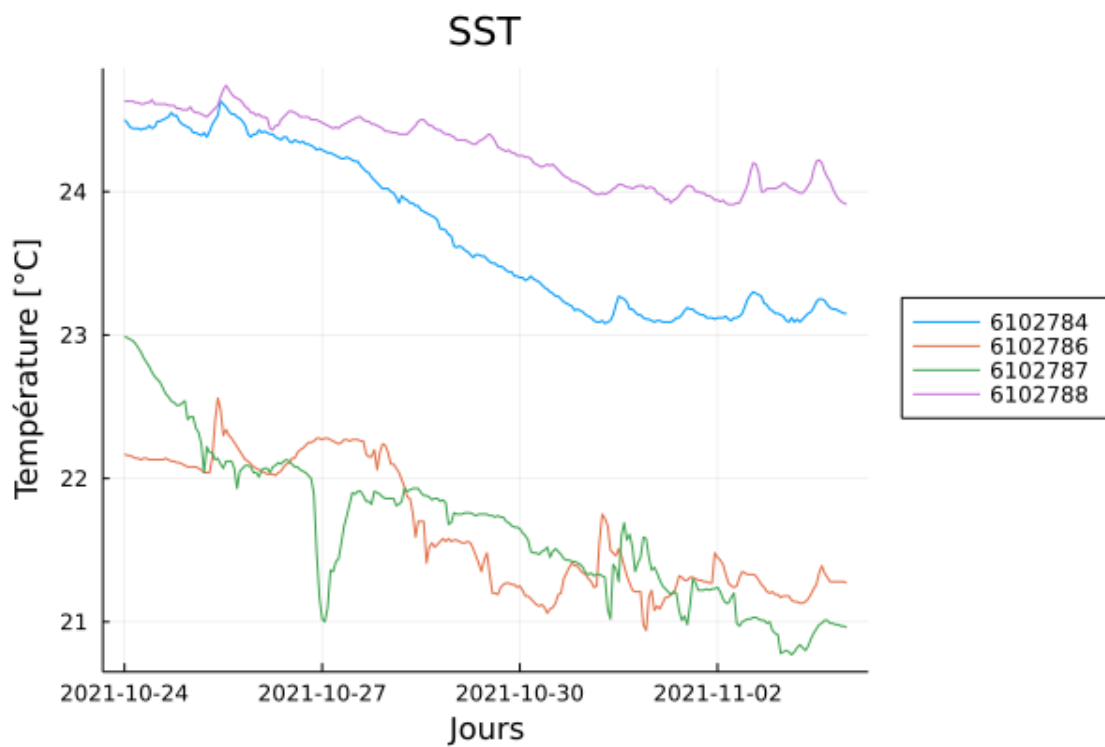


Figure 18 : Evolution de la SST au cours du temps. Les données correspondent à la moyenne de l'heure écoulée et sont mesurées par des bouées dérivantes.

Résultats DINEOF

L'analyse DINEOF permet de reconstruire des cartes de SST malgré des mesures manquantes à plus de 44 % dans les données initiales (Figure 19). L'analyse retient 12 EOF (« *empirical orthogonal functions* ») optimales pour sa reconstruction. Les données manquantes sont principalement dues à la présence de cumulonimbus formant le *Medicane* Apollo (Figure 4). Lors du passage du cyclone, les températures de surface diminuent au fil des jours. C'est notamment visible au Sud de la Sicile où un gyre d'eau froide se forme (Figure 19). Le 25 octobre 2021, une zone d'eau froide se forme au Sud de la Sicile. Le 28 octobre 2021, le *Medicane* Apollo s'approche de cette zone, influençant les courants de surface (Figure 9). Une légère circulation cyclonique commence à se former (Figure 19). Le 29 et 30 octobre 2021, les vents les plus intenses du *Medicane* soufflent juste au-dessus de cette zone (Figure 9). Le 31 octobre 2021, la circulation cyclonique des eaux froides au Sud de la Sicile sont observées grâce à la reconstruction DINEOF (Figure 19). Le 03 novembre 2021, cette circulation est toujours visible et plus marquée sur la carte construite à partir des données initiales par rapport à la carte construite à partir des données d'analyse DINEOF. En effet, le ciel est dégagé et les nuages n'obstruent plus les mesures satellites d'une part, et d'autre part, l'analyse DINEOF reconstruit l'entièreté des données, suivant les paramètres choisis pour cette étude, modifiant ainsi les données initiales.

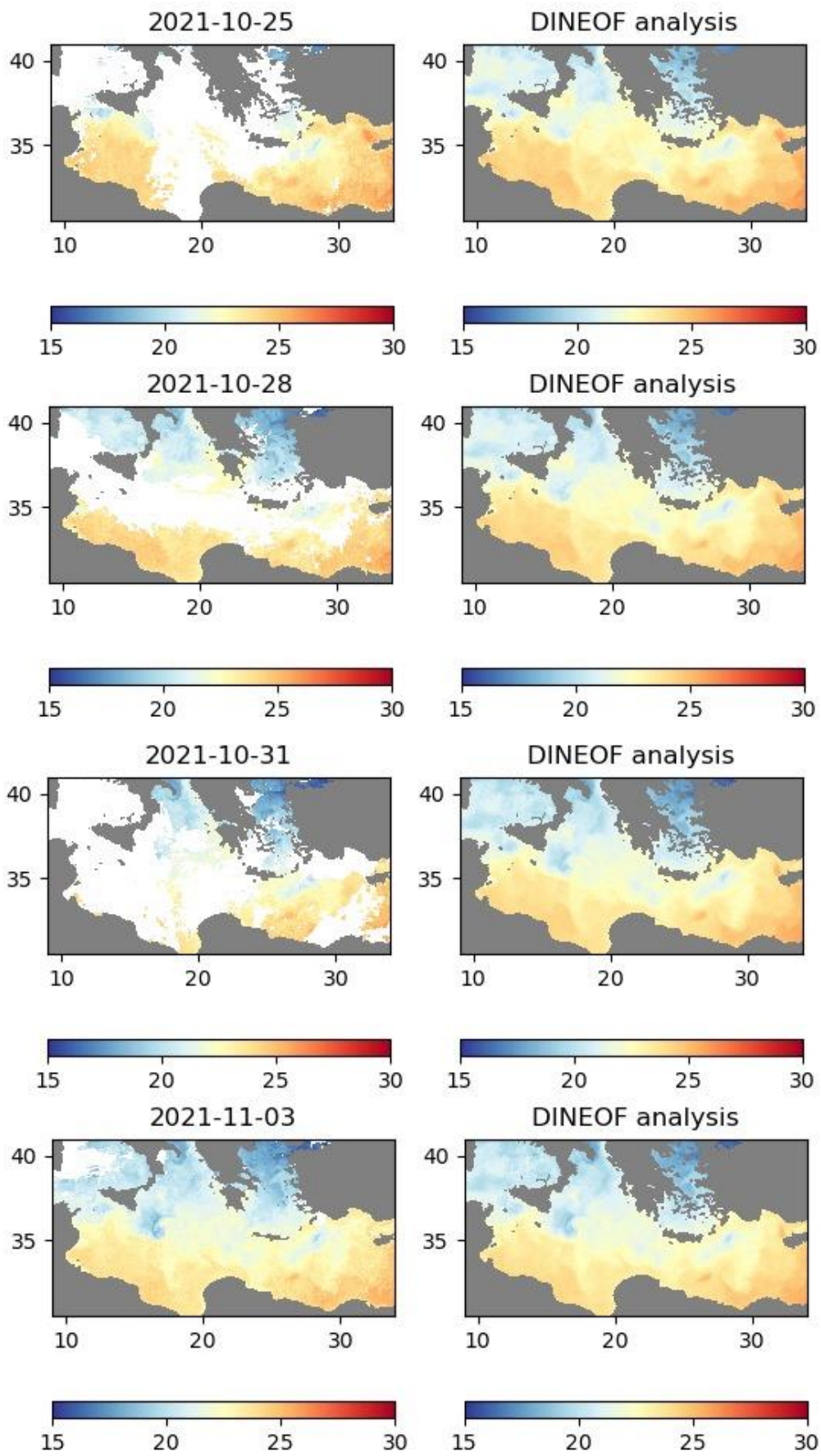


Figure 19 : Reconstruction DINEOF de la SST du 25, 28, 31, octobre 2021 et du 03 novembre 2021.

Comparaison DINEOF vs. données *in situ*

DINEOF vs. Argo

Les données satellites reconstruites grâce à l'analyse DINEOF sont comparées avec les valeurs de température mesurées par les flotteurs Argo à la surface. Pour ce faire, une évolution journalière des données satellitaires est construite sur base de la trajectoire des flotteurs Argo. Cette trajectoire est construite en reliant par une droite les différentes positions géographiques des sorties du flotteur. Les valeurs de la reconstruction DINEOF sont alors interpolées linéairement sur cette trajectoire. Il est désormais possible de comparer les valeurs de SST *in situ* et satellitaires (Figure 20). Les données initiales sont également ajoutées aux différents graphes afin de les comparer avec la reconstruction DINEOF. La plupart des graphes montrent une même tendance d'évolution de la SST, où cette dernière diminue au cours du temps. Le graphe construit à partir des données satellitaires et des positions du flotteur 6903784 présente une augmentation de la SST de 1,2 °C du 21 au 26 octobre 2021. En effet, l'eau de mer peut continuer de se réchauffer avant de ressentir les premiers impacts du *Medicane*.

La différence entre les valeurs *in situ* et la reconstruction DINEOF est parfois importante, allant jusqu'à 0,8 °C. Les graphes montrent également que des données manquantes sont nombreuses au niveau des données initiales sur l'intervalle de temps choisi pour cette étude (Figure 20). La différence entre ces données satellitaires initiales et la reconstruction DINEOF s'élève jusqu'à 0,4 °C dans certains cas. Lors de l'analyse DINEOF, tous les pixels (même ceux présents dans les données initiales) sont reconstruits, puis interpolés linéairement sur les coordonnées géographiques de la trajectoire des flotteurs Argo. Ceci fait perdre de l'exactitude aux valeurs DINEOF représentées (Figure 20). Les valeurs Argo subissent également une interpolation linéaire afin d'avoir la valeur de la SST à 0 m de profondeur. En effet, les données Argo initiales commencent en dessous de la surface environ entre 1 mètre et 2 mètres de profondeur. L'écart entre les valeurs calculées *in situ* et via satellites peut alors se creuser au fil des calculs. Les flotteurs Argo permettent de mesurer la température malgré les conditions météorologiques lors d'un *Medicane* où la présence de nuages n'impacte en aucun cas leurs collectes de données. L'avantage des satellites repose sur la couverture spatiale de leur mesure, là où les flotteurs Argo ne mesure que des valeurs ponctuelles.

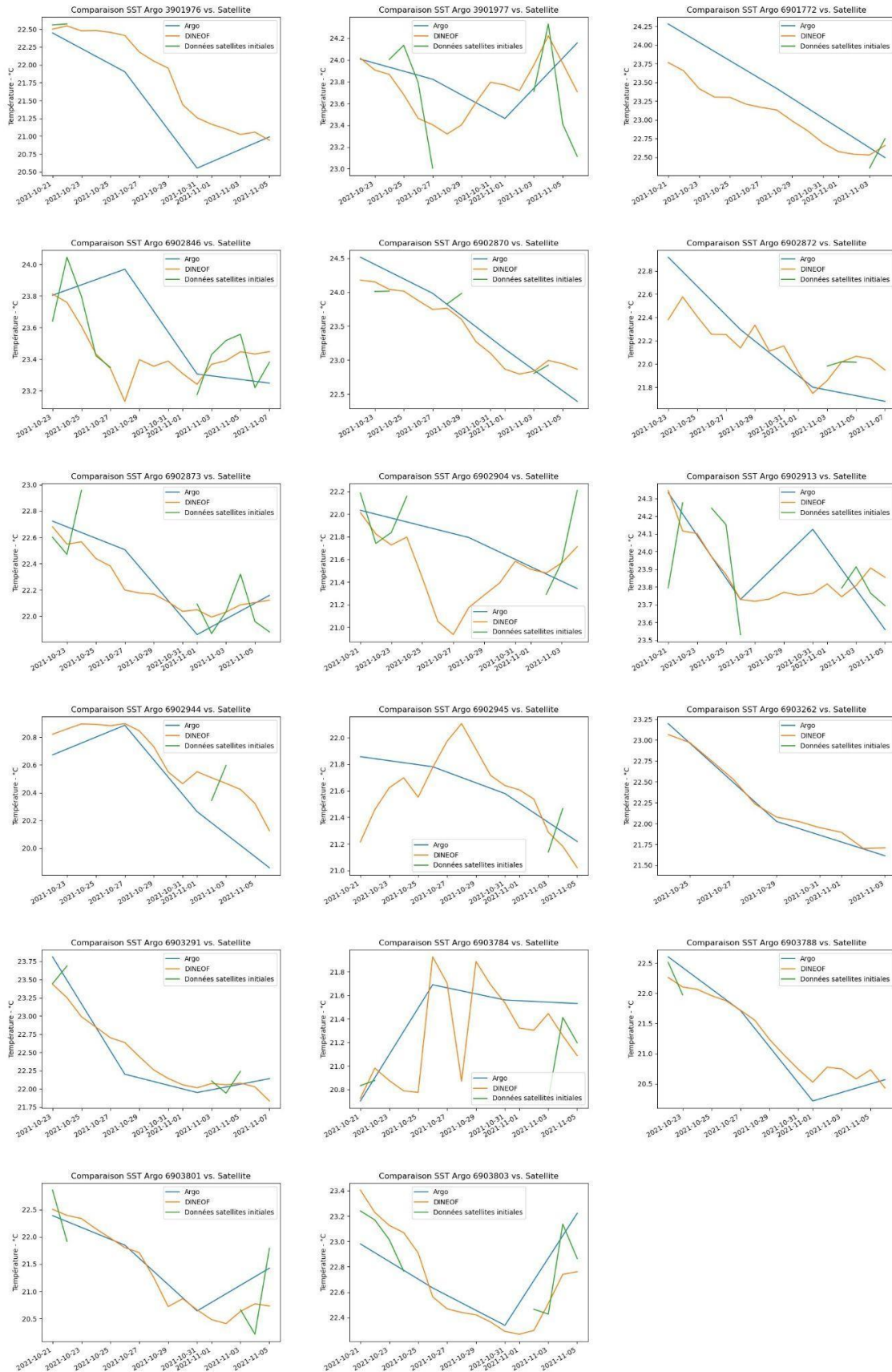


Figure 20 : Comparaison de la SST calculée à partir des données des flotteurs Argo, calculée par la reconstruction DINEOF et la SST mesurée par satellite initialement.

DINEOF vs bouées dérivantes

Les données satellites reconstruites grâce à l'analyse DINEOF sont comparées avec les valeurs de température mesurées par les bouées dérivantes à 0,5 m de profondeur (Figure 21). Les données satellitaires reconstruites sont interpolées linéairement sur la position quotidienne des bouées à 00:00. De même qu'avec les flotteurs Argo, la différence entre les valeurs données par ces deux types de mesures est parfois importante, allant jusqu'à 1 °C. Le principal avantage des bouées dérivantes est qu'elles fournissent des mesures chaque heure. L'évolution temporelle de leurs mesures est beaucoup plus précise. Les satellites, quant à eux, présentent l'avantage de couvrir une grande zone de mesure, tandis que les bouées sont utilisées pour des mesures ponctuelles. Les données satellitaires initiales sont également représentées sur les graphes, même si les données manquantes sont trop nombreuses.

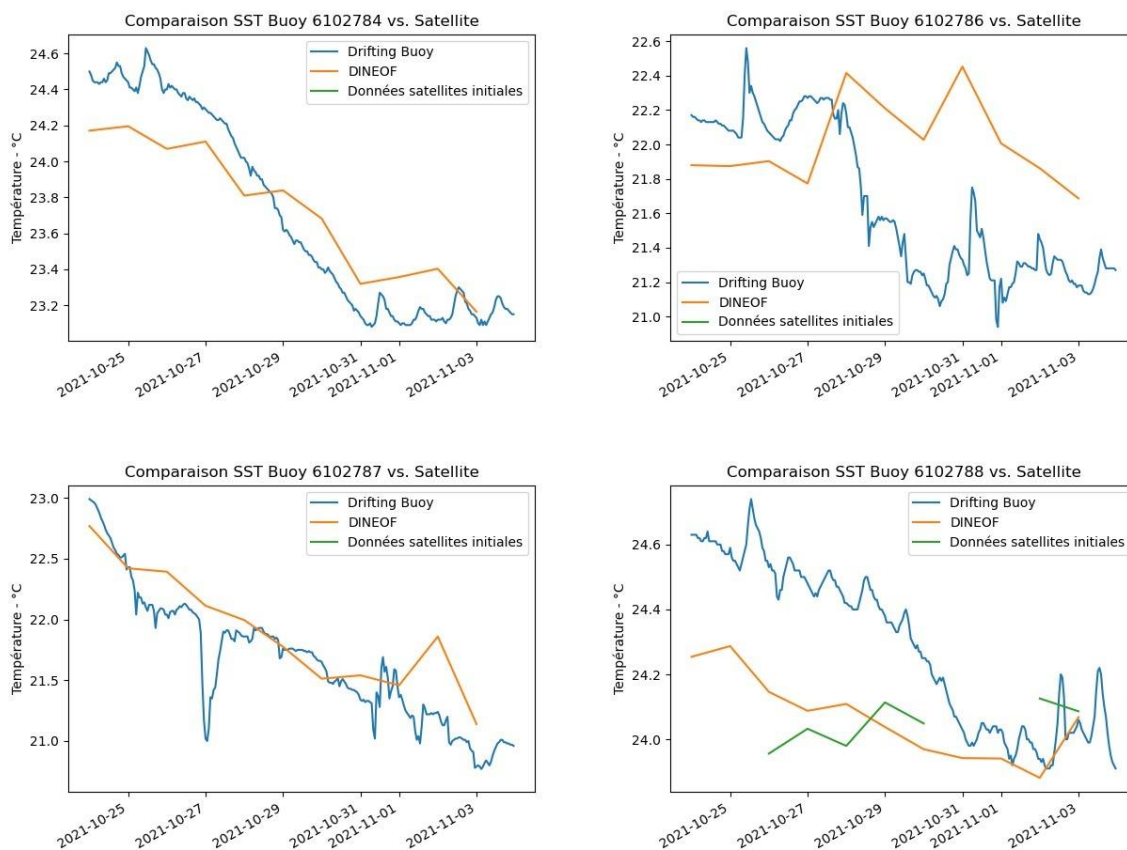


Figure 21 : Comparaison de la température mesurée par les bouées dérivantes à 0,5 m, la SST calculée par reconstruction DINEOF et la SST mesurée initialement via satellite. Les données satellites sont interpolées sur la position journalière des bouées à 00:00.

4. Discussion

4.1 Evolution des propriétés physico-chimiques de l'eau

Température

Les profils construits à partir des données des flotteurs Argo présentent plusieurs schémas d'évolution de la température. Le schéma A (Figure 14A) montre dans un premier temps une diminution de la température dans la couche de mélange lors du passage du *Medicane* Apollo. Ensuite, dans un second temps, un réchauffement des eaux est observé après la fin du *Medicane* jusqu'à environ 20 m de profondeur. Le schéma B (Figure 14B) montre uniquement une diminution de la température de la couche de mélange. Dans ce schéma B, l'augmentation après le passage du cyclone n'est pas observée. Le schéma C (Figure 14C) commence par une augmentation de la température de la couche de mélange avant que cette dernière ne diminue à nouveau les jours de grande intensité du *Medicane* vers le 28 octobre 2021. Le schéma D (Figure 14D), représenté uniquement par les valeurs du flotteur Argo 6902913, est différent de tous les autres schémas précédents.

Lorsque que les plus grandes pertes de température dans la colonne d'eau sont comptabilisées et que la moyenne est prise, la valeur de $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ est obtenue. Autrement dit, la couche de mélange perd en moyenne jusqu'à $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le flotteur Argo mesurant la plus grande perte de température lors du passage du cyclone est le flotteur 6902872 avec une diminution maximale de $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce flotteur appartient au schéma B. La vitesse du vent au niveau de ce flotteur vaut $15,31\text{ m/s}$ le 28 octobre 2021.

Les images satellites reconstruites à partir d'une analyse DINEOF permettent de voir l'intensification d'une zone d'eau froide au Sud de la Sicile (Figure 19). Les cartes des vents révèlent une importante activité du *Medicane* au même endroit. L'impact du passage du *Medicane* Apollo sur la SST est la diminution de cette dernière.

Schéma A :

Lors du passage du *Medicane* Apollo, la couche de mélange tend à se refroidir. Cette couche peut perdre en moyenne jusqu'à $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ceci s'explique grâce aux flux enthalpiques à l'interface air-mer qui pompent la chaleur de l'eau pour la transmettre à l'atmosphère (Webster,

1994). L'intensité de ces flux est également responsable du maintien du *Medicane*. Plus ces flux sont importants, plus le cyclone est intense (Miglietta *et al.*, 2011).

Le refroidissement de la SST vaut en moyenne -0.98 °C d'après les mesures Argo et -1.25 °C d'après les mesures des bouées dérivantes. En plus des flux enthalpiques, ce phénomène peut s'expliquer par l'évaporation à la surface de la mer. En effet, ce processus est endothermique (Webster, 1994). Autrement dit, la transformation de l'état liquide à l'état gazeux consomme de la chaleur et l'eau liquide se refroidit. Lors de la formation d'un cyclone, l'évaporation est importante (Emanuel, 2005).

Toute la couche de mélange est impactée par ce refroidissement. Ceci s'explique par les vents intenses qui favorisent le mélange vertical dans la colonne d'eau (Chen & Sanford, 2009; Pollard *et al.*, 1973). En effet, ces vents dépassent les 20 m/s dans certaines régions de la mer Méditerranée.

Les observations montrent un réchauffement de la couche de mélange après le passage du *Medicane* Apollo (Figure 14A). En effet, les eaux de surface peuvent à nouveau absorber l'énergie solaire lorsque le ciel est dégagé (Figure 4 ; (White *et al.*, 1997). Les rayonnements solaires ne sont plus absorbés par les cumulonimbus et atteignent la surface de la mer. De plus, les vitesses maximales des vents observées se sont affaiblies, passant d'environ 22 m/s à environ 16 m/s. L'intensité des vents n'est alors plus suffisante pour effectuer un brassage important dans la couche de mélange (Pollard *et al.*, 1973).

Schéma B :

À la différence du schéma A, le schéma B ne présente aucune augmentation de température dans la couche de mélange ; au contraire, celle-ci diminue tout au long de la couverture temporelle sélectionnée (Figure 14B). Le flotteur Argo 6902945 se situe au Nord de la mer Ionienne, près de l'embouchure de la mer Adriatique. Une première hypothèse est que des courants d'eau froide arrivent de la mer Adriatique (Pinardi & Masetti, 2000) et renforcent le refroidissement de la colonne d'eau en mer Ionienne après le passage du *Medicane*. Une autre hypothèse est que les eaux de surface n'ont pas pu absorber suffisamment d'énergie solaire pour se réchauffer. A cette période de l'année, les rayonnements solaires sont moindres dans l'hémisphère Nord et la SST en mer Méditerranée diminue (Mohamed *et al.*, 2019; Skliris *et al.*, 2012). Ceci pourrait être une explication à cette absence de réchauffement des eaux de surface dans certaines situations.

Schéma C :

Le schéma C, quant à lui, montre une augmentation de la température de la colonne d'eau avant de subir les premiers effets de refroidissement dûs au passage du *Medicane* (Figure 14C). Ceci peut s'expliquer par le fait que le *Medicane* n'a pas directement impacté la zone où les flotteurs du schéma C se trouvent et les eaux de ces zones peuvent donc continuer à absorber de l'énergie solaire.

Schéma D :

Le flotteur Argo 6902913 montre une évolution temporelle de la température de la colonne d'eau qui ne ressemble pas aux évolutions présentées dans les schémas précédents (Figure 14D). En effet, les profils montrent d'abord une diminution de la température de la colonne d'eau, suivie d'une augmentation et pour finir une re-diminution. Cependant, la température diminue jusqu'à 3,2 °C entre le premier jour et le dernier jour de sortie du flotteur dans la couverture temporelle. Ainsi, l'influence du *Medicane* Apollo est toujours la même, la température de la colonne d'eau diminue lors de son passage par rapport à la température initiale.

Salinité

Les profils construits à partir des données des flotteurs Argo présentent plusieurs schémas d'évolution de la salinité. Le schéma A (Figure 15A) montre dans un premier temps une diminution de la salinité sur les 50 premiers mètres de profondeur lors du passage du *Medicane* Apollo. Ensuite, la salinité augmente à nouveau. Le schéma B (Figure 15B) montre uniquement une diminution de la salinité jusqu'à la halocline. Le schéma C (Figure 15C) débute par une augmentation de la salinité dans la couche de mélange avant que cette dernière ne diminue à nouveau les jours de grande intensité du *Medicane* après le 26 octobre 2021. Ce schéma n'est respecté que par le flotteur Argo 6902913. Les flotteurs Argo 6902945, 6903784 et 6903801 présentent des schémas indépendants aux tendances précédentes (Figure 15 D, E, F).

En moyenne, la salinité diminue de 0,3 avec une diminution maximale de 0,87 mesurée par le flotteur Argo 6903291.

De manière générale, les différents schémas présentent une diminution de la salinité au-dessus de la halocline entre l'état initial (avant le passage du *Medicane*) et l'état final (après le passage du *Medicane*). Pour rappel, la formation d'un *Medicane* induit d'importantes précipitations (Emanuel, 2005; *Medicane Apollo*, 2022). Plus de 200 mm sont tombés en 24 heures sur la ville de Syracuse et plus de 400 mm en 48 heures sur la ville de Catane en Sicile (Faranda et al., 2022; *Medicane Apollo*, s. d.). Ces précipitations sont donc un apport d'eau douce considérable à la surface de la mer, pouvant expliquer la diminution de la salinité lors du passage du *Medicane*.

De plus, les vents ont leur importance également car ils brassent la couche de mélange (Chen & Sanford, 2009; Pollard *et al.*, 1973). Plus les vents sont intenses, plus les eaux douces tombées à la surface vont descendre en profondeur. Ainsi, toute la couche de mélange subit une diminution de la salinité.

Concentration en oxygène dissous

Lors du passage du *Medicane Apollo*, la concentration en oxygène dissous dans les eaux de surface augmente au cours du temps (Figure 16). Ceci est en partie dû aux vents qui augmentent les interactions entre l'atmosphère et l'eau de mer. En effet, les vagues permettent d'introduire de l'air dans la couche de surface. Des micro-gouttelettes d'eau sont également formées, augmentant la surface de contact avec l'atmosphère (Bruch, 2021).

De plus, la température de la colonne d'eau tend à diminuer lors du passage du *Medicane Apollo* (Figure 14). Or, la solubilité de l'oxygène dans l'eau augmente lorsque la température de cette dernière diminue (Ricchi *et al.*, 2017). Ceci est une seconde hypothèse qui explique l'augmentation de la concentration en oxygène dissous dans la colonne d'eau.

La profondeur du maximum de concentration en oxygène dissous augmente dans la majorité des cas observés (Figure 16). En effet, l'intense mélange vertical induit par les vents permet aux eaux de surface riches en oxygène de se mélanger aux eaux pauvres en oxygène au niveau de l'oxycline, cline où un fort gradient de concentration en oxygène existe (Xu *et al.*, 2019). Dans d'autre cas, la profondeur du maximum de concentration en oxygène dissous diminue les premiers jours du *Medicane*. Cette situation est d'ailleurs observée à partir des données du flotteur Argo 6903803. Celui-ci se situe dans le bassin Levantin lorsque le *Medicane Apollo* se déclare. Dans cette zone les vents soufflent principalement d'est en ouest

les premiers jours du *Medicane* (Figure 9), déplaçant la masse d'air vers la basse pression formée par le cyclone. Les vents ainsi formés sont observés avec une vitesse relativement importante, ce qui a pour effet de déplacer les masses d'eau en surface. Dès lors, de l'eau plus profonde viendrait remplacer cette eau de surface déplacée, créant ainsi un upwelling (Bakun & Agostini, 2001). Un upwelling local pourrait donc être une hypothèse envisageable qui expliquerait cette diminution de la profondeur du maximum de la concentration en oxygène observée sur les profils construits à partir des données du flotteur 6903803 dans le bassin Levantin.

La concentration en oxygène dissous dépend également de la productivité de la production primaire (Xu *et al.*, 2019). En effet, l'efflorescence du phytoplancton produit de l'oxygène dans les eaux de surface. Le mélange vertical induit par les vents du *Medicane* apporte des nutriments à la surface, favorisant la croissance du phytoplancton. Afin de vérifier cette dépendance entre l'augmentation de la concentration en oxygène en surface et l'efflorescence de la production primaire, il serait intéressant de suivre l'évolution de la chlorophylle lors du passage d'un *Medicane*.

4.2 Comparaison des deux méthodes : *in situ* vs. satellite

Lors d'événements extrêmes, tels que des *Medicanes*, les données *in situ* présentent plusieurs avantages.

Premièrement, les appareils de mesure *in situ* collectent les valeurs des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau directement sur le terrain. Ils ne sont pas impactés par la présence de nuages comme le sont les données satellitaires. Ces dernières nécessitent une reconstruction car la présence de cumulonimbus lors d'un événement de *Medicane* obstrue la propagation des ondes infrarouges et de nombreuses données viennent donc à manquer. Lors de l'analyse DINEOF, plus de 44 % des pixels ont été reconstruits. L'exactitude des données satellitaires est donc impactée négativement (Figure 19 ; Figure 20 ; Figure 21).

Deuxièmement, la mise à l'eau des appareils de mesures *in situ* est plus aisée par rapport à l'envoi sur orbite d'un satellite lorsqu'une lacune de données est présente. En effet, les bouées dérivantes peuvent même être lâchées depuis un aéronef. Ceci peut être un grand avantage lorsqu'un *Medicane* est annoncé en mer Méditerranée. En effet, il serait intéressant de larguer plusieurs bouées dans la zone où la tempête cyclonique est annoncée pour tenter de collecter

des données en temps réel. Ainsi, la richesse des données permettrait de répondre avec plus d'exactitude sur l'évolution des paramètres physico-chimiques lors du passage d'un cyclone.

Troisièmement, les appareils de mesures tels que les flotteurs Argo permettent de suivre l'évolution des propriétés physico-chimiques dans la colonne d'eau, là où les satellites ne sont capables que de mesurer en surface. L'évolution des propriétés physico-chimiques d'une masse d'eau peut influencer toute la dynamique d'un bassin. Il est donc important de comprendre son évolution sur toute sa profondeur.

5. Conclusions

En conclusion, les ouragans en mer Méditerranée sont des événements météorologiques extrêmes qui influencent les propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau. Ce travail s'est concentré sur trois variables : la température, la salinité et la concentration en oxygène dissous. Leur évolution est mesurée à l'aide d'appareils *in situ* (flotteurs Argo et bouées dérivantes) et par satellites. Les données satellites ont subi une reconstruction DINEOF.

En ce qui concerne la température, il est observé de manière générale que celle-ci diminue en moyenne jusqu'à 1,6 °C dans la colonne d'eau lors du passage du *Medicane* Apollo. Les raisons de cette diminution sont principalement les échanges thermiques entre la mer et l'atmosphère, ainsi que la consommation de chaleur lors de l'évaporation. La salinité subit également une diminution de 0,3 en moyenne lors du passage du *Medicane* Apollo. Cette diminution est la conséquence d'importants apports d'eau douce liés aux précipitations engendrées par le cyclone. La concentration en oxygène dissous quant à elle tend à augmenter en surface. Cette augmentation est le résultat d'intenses vents capables d'oxygéner les eaux de surface. De plus, la diminution de la température de la couche de mélange augmente la solubilité de l'oxygène dans l'eau de mer. La profondeur du maximum de concentration en oxygène tend également à augmenter étant donné que les vents permettent un mélange des masses d'eau au niveau de l'oclyne. La productivité primaire, alimentée par l'apport de nutriments lors du cyclone, influence la concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer. Cette dépendance pourrait être l'objet d'une étude ultérieure visant à observer la variation de la chlorophylle lors d'un événement de type *Medicane*.

Les instruments de mesure *in situ* sont des outils essentiels lors d'événements extrêmes car leurs mesures ne sont pas obstruées par les conditions climatiques. Les données *in situ*

récoltées sont donc un bon complément aux données satellitaires. Lors de la prédiction d'un tel événement, il peut être envisageable de larguer des bouées dérivantes avant que la tempête ne se déclare. Ces déploiements permettraient d'observer une évolution à la surface de plusieurs propriétés physico-chimiques. Cependant, leurs mesures sont restreintes géographiquement à leur trajectoire, ce qui donne aux satellites leur avantage principal. En effet, ces derniers donnent une couverture spatiale plus intéressante par rapport à celle donnée par les instruments *in situ*. Les flotteurs Argo, quant à eux, permettent d'étudier l'évolution des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau, mais leur fréquence de remontée (théoriquement tous les 10 jours) peut être contraignante lorsqu'un événement à méso-échelle est étudié. Une bonne couverture spatiale de flotteurs Argo en mer Méditerranée augmenterait la probabilité que ceux-ci mesurent les propriétés de la colonne d'eau lors du passage d'un *Medicane*. Ainsi, ils sont un complément intéressant aux satellites qui ne mesurent que les propriétés de la surface de l'eau.

Les données récoltées lors de ce travail sont une représentation réelle de l'impact du *Medicane* Apollo sur les propriétés physico-chimiques de l'eau. Celles-ci pourraient être utilisées afin de vérifier et/ou d'améliorer des modèles de prédiction de ces événements.

6. Références

Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Rixen, M., & Beckers, J. M. (2005). Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions : Application to the Adriatic Sea surface temperature. *Ocean Modelling*, 9(4), 325-346. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.001>

Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Sirjacobs, D., & Beckers, J.-M. (2009). Enhancing temporal correlations in EOF expansions for the reconstruction of missing data using DINEOF. *Ocean Science*, 5(4), 475-485. <https://doi.org/10.5194/os-5-475-2009>

Argo. (s. d.). Argo. Consulté 24 août 2022, à l'adresse <https://argo.ucsd.edu>

Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K., & Gombos, D. (2011). A Cross-calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Meteorological and Oceanographic Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(2), 157-174. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2946.1>

Bakkensen, L. A. (2017). Mediterranean Hurricanes and Associated Damage Estimates. *Journal of Extreme Events*, 04(02), 1750008. <https://doi.org/10.1142/S2345737617500087>

Bakkensen, L. A., & Mendelsohn, R. O. (2016). Risk and Adaptation : Evidence from Global Hurricane Damages and Fatalities. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 3(3), 555-587. <https://doi.org/10.1086/685908>

Bakun, A., & Agostini, V. N. (2001). Seasonal patterns of wind-induced upwelling/downwelling in the Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 65(3), 243-257. <https://doi.org/10.3989/scimar.2001.65n3243>

Beckers, J. M., & Rixen, M. (2003). EOF Calculations and Data Filling from Incomplete Oceanographic Datasets*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(12), 1839-1856. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2)

Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., & Shah, V. B. (2017). Julia : A Fresh Approach to Numerical Computing. *SIAM Review*, 59(1), 65-98. <https://doi.org/10.1137/141000671>

Bourgeois, T. (2017). Effets des perturbations anthropiques sur la biogéochimie dans l'océan côtier à l'échelle globale. *Océanographie. Université Paris Saclay (COMUE)*, Français. (NNT : 2017SACLV015). (tel-01565302)

Bruch, W. (2021). Experimental and numerical study of sea spray generation and transport, and their consequences on the properties of the marine atmospheric boundary layer. *Earth Sciences. Université de Toulon*, English. (NNT : 2021TOUL0002). (tel-03635137)

Cavicchia, L., von Storch, H., & Gualdi, S. (2014). A long-term climatology of medicanes. *Climate Dynamics*, 43(5-6), 1183-1195. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1893-7>

Chen, S.-N., & Sanford, L. P. (2009). Axial Wind Effects on Stratification and Longitudinal Salt Transport in an Idealized, Partially Mixed Estuary*. *Journal of Physical Oceanography*, 39(8), 1905-1920. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4016.1>

Copin-Montégut, G. (2002). Propriétés physiques de l'eau de mer. *Caractérisation et propriétés de la matière*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-k170>

Emanuel, K. (2005). Genesis and maintenance of "Mediterranean hurricanes". *Advances in Geosciences*, 2, 217-220. <https://doi.org/10.5194/adgeo-2-217-2005>

Emerson, S. R., & Bushinsky, S. (2014). Oxygen concentrations and biological fluxes in the open ocean. *Oceanography*, 27(1), 168-171. <https://www.jstor.org/stable/24862132>

Faizal, M., & Rafiuddin Ahmed, M. (2011). On the ocean heat budget and ocean thermal energy conversion : Ocean heat budget and OTEC. *International Journal of Energy Research*, 35(13), 1119-1144. <https://doi.org/10.1002/er.1885>

Faranda, D., Bourdin, S., Ginesta, M., Krouma, M., Messori, G., Noyelle, R., Pons, F., & Yiou, P. (2022). A climate-change attribution retrospective of some impactful weather extremes of 2021, *Weather Clim. Dynam. Discuss*, [preprint]. <https://doi.org/10.5194/wcd-2022-9>

Fita, L., & Flaounas, E. (2018). Medicanes as subtropical cyclones : The December 2005 case from the perspective of surface pressure tendency diagnostics and atmospheric water budget. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(713), 1028-1044. <https://doi.org/10.1002/qj.3273>

Foti, E., Musumeci, R. E., & Stagnitti, M. (2020). Coastal defence techniques and climate change: A review. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 31(1), 123-138. <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00877-y>

Freilich, M. H., Long, D. G., & Spencer, M. W. (1994). SeaWinds : A scanning scatterometer for ADEOS-II-science overview. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994, pp. 960-963 vol.2. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1994.399313>

Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., Gallardo, C., Miglietta, M. M., Walsh, K. J., & Sein, D. V. (2018). Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: Impact of ocean-atmosphere coupling and increased resolution. *Climate dynamics*, 51(3), 1041-1057. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3456-1>

Gelsthorpe, R., Schied, E., & Wilson, J. (2000). ASCAT-Metop's advanced scatterometer. *ESA bulletin*, 102, 19-27.

Griffies, S. (2018). Fundamentals of ocean climate models. *Princeton university press*.

Hebrard, P. (2019). Mers et océans : Des espaces convoités. *Stratégique*, N°123(3), 31. <https://doi.org/10.3917/strat.123.0031>

Ifremer. Consulté 24 août 2022, à l'adresse <https://wwz.ifremer.fr/>

Kouroutzoglou, J., Samos, I., Flocas, H. A., Hatzaki, M., Lamarinis, C., Mamara, A., & Emmannouil, A. (2021). Analysis of the transition of an explosive cyclone to a mediterranean tropical-like cyclone. *Atmosphere*, 12(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/atmos12111438>

Lagasio, M., Fagugli, G., Ferraris, L., Fiori, E., Gabellani, S., Masi, R., Mazzarella, V., Milelli, M., Parodi, A., & Pignone, F. (2022). A complete meteo-hydrological chain to support early warning systems from weather scenarios to flooded areas : The Apollo medicane use case. *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-2622*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-2622>

Liss, P. S., & Johnson, M. T. (Éds.). (2014). Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles. *Springer Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25643-1>

Liu, W. T. (2002). Progress in scatterometer application. *Journal of Oceanography*, 58(1), 121-136.

Medicane Apollo. Consulté 24 août 2022, à l'adresse <https://www.jbarisk.com/flood-services/event-response/medicane-apollo/>

Michaud, L. M. (1999). Vortex process for capturing mechanical energy during upward heat-convection in the atmosphere. *Applied energy*, 62(4), 241-251. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00013-6)

Miglietta, M. M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G., & Rotunno, R. (2011). Numerical analysis of a Mediterranean 'hurricane' over south-eastern Italy : Sensitivity experiments to sea surface temperature. *Atmospheric research*, 101(1-2), 412-426. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.006>

Miglietta, M. M., & Rotunno, R. (2019). Development mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (medicanes). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(721), 1444-1460. <https://doi.org/10.1002/qj.3503>

Mohamed, B., Abdallah, A. M., Alam El-Din, K., Nagy, H., & Shaltout, M. (2019). Inter-Annual Variability and Trends of Sea Level and Sea Surface Temperature in the Mediterranean Sea over the Last 25 Years. *Pure and Applied Geophysics*, 176(8), 3787-3810. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02156-w>

Nastos, P. T., Karavana Papadimou, K., & Matsangouras, I. T. (2018). Mediterranean tropical-like cyclones : Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic patterns. *Atmospheric research*, 208, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.023>

Pinardi, N., & Masetti, E. (2000). Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling : A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158(3-4), 153-173. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00048-1)

Pollard, R. T., Rhines, P. B., & Thompson, R. O. R. Y. (1973). The deepening of the wind-Mixed layer. *Geophysical Fluid Dynamics*, 4(4), 381-404. <https://doi.org/10.1080/03091927208236105>

Remote Sensing Systems. Consulté 24 août 2022, à l'adresse <https://remss.com/>

Ricchi, A., Miglietta, M. M., Barbariol, F., Benetazzo, A., Bergamasco, A., Bonaldo, D., Cassardo, C., Falcieri, F. M., Modugno, G., Russo, A., Sclavo, M., & Carniel, S. (2017). Sensitivity of a Mediterranean tropical-like Cyclone to different model configurations and coupling strategies. *Atmosphere*, 8(5), 92. <https://doi.org/10.3390/atmos8050092>

Roemmich, D., Johnson, G. C., Riser, S., Davis, R., Gilson, J., Owens, W. B., Garzoli, S. L., Schmid, C., & Ignaszewski, M. (2009). The Argo Program : Observing the global ocean with profiling floats. *Oceanography*, 22(2), 34-43. <https://www.jstor.org/stable/24860957>

Skirris, N., Sofianos, S., Gkanasos, A., Mantziafou, A., Vervatis, V., Axaopoulos, P., & Lascaratos, A. (2012). Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics*, 62(1), 13-30. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0493-5>

Soukissian, T. H., Denaxa, D., Karathanasi, F., Prospathopoulos, A., Sarantakos, K., Iona, A., Georgantas, K., & Mavrakos, S. (2017). Marine renewable energy in the Mediterranean Sea : Status and perspectives. *Energies*, 10(10), 1512. <https://doi.org/10.3390/en10101512>

Tous, M., & Romero, R. (2013). Meteorological environments associated with medicane development . *International Journal of Climatology*, 33(1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/joc.3428>

Universalis, E. *ASCENDANCE, météorologie*. Encyclopædia Universalis. Consulté 24 août 2022, à l'adresse <https://www.universalis.fr/encyclopedie/ascendance-meteorologie/>

Weather and climate change. Met Office. Consulté 24 août 2022, à l'adresse <https://www.metoffice.gov.uk/>

Webster, P. J. (1994). The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Reviews of Geophysics*, 32(4), 427-476. <https://doi.org/10.1029/94RG01873>

White, W. B., Lean, J., Cayan, D. R., & Dettinger, M. D. (1997). Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C2), 3255-3266. <https://doi.org/10.1029/96JC03549>

Williams, R. G., & Follows, M. J. (2011). Ocean dynamics and the carbon cycle : Principles and mechanisms. *Cambridge University Press*.

Xu, H., Tang, D., Sheng, J., Liu, Y., & Sui, Y. (2019). Study of dissolved oxygen responses to tropical cyclones in the Bay of Bengal based on Argo and satellite observations. *Science of The Total Environment*, 659, 912-922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.384>

7. Annexes

Annexe 1 - Exemple d'un DataFrame

DataFrame pour le flotteur Argo 6901772 sur des mesures de températures interpolées de 0 à 200 m à intervalle régulier de 5 m.

Des tableaux de données sont créés à partir des mesures des flotteurs Argo. La première colonne du tableau correspond à la profondeur. Ensuite, les colonnes suivantes représentent les valeurs interpolées en fonction de la profondeur, chaque colonne correspond à un jour parmi les remontées effectuées par le flotteur Argo. Les dernières colonnes correspondent à la différence entre deux colonnes successives, autrement dit entre les valeurs correspondant à des remontées consécutives. La toute dernière colonne contient la différence entre la première remontée et la dernière remontée après le passage du cyclone. Chaque variable physico-chimique est représentée dans un tableau différent.

Pression	21/10/21	28/10/21	04/11/21	28/10-21/10	04/11-28/10	Différence Totale
0	24.282667	23.420002	22.494003	-0.8626652	-0.9259987	1.7886639
5	24.029001	23.377556	22.4865	-0.6514454	-0.8910561	1.5425014
10	24.0144	23.380093	22.487911	-0.6343079	-0.8921814	1.5264893
15	23.996	23.383911	22.452183	-0.6120892	-0.9317284	1.5438175
20	24.021502	23.391273	22.136002	-0.630228	-1.2552719	1.8855
25	24.12	23.404669	22.159	-0.715332	-1.2456684	1.9610004
30	24.100273	23.417112	22.152779	-0.6831608	-1.2643337	1.9474945

35	24.049501	23.445091	22.168001	-0.6044102	-1.2770901	1.8815002
40	24.064503	23.477001	22.164001	-0.5875015	-1.3129997	1.9005013
45	23.932503	23.5	20.858501	-0.4325028	-2.6414986	3.0740013
50	22.265001	21.138111	18.093224	-1.1268902	-3.0448875	4.1717777
55	19.414001	19.0795	18.525002	-0.3345013	-0.5544987	0.88899994
60	18.70111	18.3875	18.2205	-0.3136101	-0.1669998	0.4806099
65	18.397999	17.604	17.693201	-0.7939987	0.08920097	0.70479774
70	17.435001	17.113728	17.453909	-0.3212738	0.34018135	-0.0189075
75	17.076221	16.9505	17.093	-0.125721	0.14249992	-0.0167789
80	16.232445	16.525501	16.7455	0.2930565	0.21999931	-0.5130558
85	15.947779	16.7635	16.0755	0.8157215	-0.6879997	-0.1277218
90	16.239002	16.605	15.810001	0.3659973	-0.7949982	0.42900085
95	16.431334	16.2495	15.734001	-0.1818333	-0.5154991	0.6973324
100	16.3735	16.2688	15.7395	-0.1047001	-0.5293007	0.6340008
105	16.273003	16.249111	15.921501	-0.0238914	-0.32761	0.35150146
110	16.2154	16.211334	16.058002	-0.0040665	-0.1533318	0.15739822
115	16.1106	16.140182	15.966455	0.02958298	-0.173727	0.14414406
120	16.071001	16.111637	15.837001	0.04063606	-0.2746363	0.2340002
125	16.043728	15.989111	15.962502	-0.0546169	-0.0266094	0.08122635
130	15.913501	15.901501	15.921501	-0.0120001	0.02000046	-0.0080004
135	15.986	15.925001	15.839001	-0.0609989	-0.0860004	0.14699936
140	15.997001	15.878	15.782501	-0.1190004	-0.095499	0.21449947
145	15.917001	15.8255005	15.785637	-0.0915003	-0.0398636	0.13136387
150	15.6695	15.747501	15.743401	0.07800102	-0.0041008	-0.0739002
155	15.786333	15.574501	15.7332	-0.2118321	0.15869904	0.05313301
160	15.809501	15.603001	15.714001	-0.2065001	0.11100006	0.09549999
165	15.854501	15.671112	15.71891	-0.1833887	0.04779816	0.13559055
170	15.8325	15.713001	15.761501	-0.1194992	0.04850006	0.07099915

175	15.809001	15.665182	15.662201	-0.1438189	-0.0029812	0.14680004
180	15.783501	15.642	15.593224	-0.1415005	-0.0487766	0.1902771
185	15.678001	15.592501	15.528801	-0.0855007	-0.0636997	0.14920044
190	15.622501	15.5685005	15.450001	-0.0540009	-0.1184998	0.17250061
195	15.585001	15.517	15.458201	-0.0680008	-0.0587988	0.12679958
200	15.519001	15.466547	15.452446	-0.052454	-0.014101	0.06655502

Annexe 2 - Coordonnées géographiques de l'œil du cyclone

Date	Longitude	Latitude	Date	Longitude	Latitude
25-10-21T00:00	11	36.71	28-10-21T18:00	16	35.6
25-10-21T06:00	12.25	35.75	29-10-21T00:00	16.1	35.9
25-10-21T12:00	13.2	35.4	29-10-21T06:00	16.2	36.15
25-10-21T18:00	14.1	35.3	29-10-21T12:00	16.18	36.47
26-10-21T00:00	14.73	35.27	29-10-21T18:00	16.22	36.62
26-10-21T06:00	15.45	34.9	30-10-21T00:00	16.3	36.3
26-10-21T12:00	16.5	34.75	30-10-21T06:00	17	35.72
26-10-21T18:00	17.65	34.75	30-10-21T12:00	17.43	35.2
27-10-21T00:00	17.91	34.69	30-10-21T18:00	18.6	34.4
27-10-21T06:00	18.1	34.4	31-10-21T00:00	19.9	33.8
27-10-21T12:00	18	33.9	31-10-21T06:00	21.25	33.15
27-10-21T18:00	17.9	33.68	31-10-21T12:00	23.5	33.25
28-10-21T00:00	17.3	33.65	31-10-21T18:00	24.65	33.2
28-10-21T06:00	17.32	34.3	01-11-21T00:00	26.3	33.65
28-10-21T12:00	16.15	35.58			

Annexe 3 - Vitesses du vent aux Argo

Tableau : Vitesses des vents mesurées à la position des flotteurs Argo aux jours de leur sortie, ainsi que les coordonnées géographiques de ces flotteurs. Seuls les flotteurs à moins de 2° de la trajectoire du Medicane ont été considérés.

Argo	Date	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Vitesse du vent (m/s)
3901976	26-10-21	15.50	37.52	10.65
3901976	31-10-21	15.45	37.43	5.10
3901977	27-10-21	27.95	33.18	4.38
3901977	01-11-21	27.90	33.26	11.90
6901772	28-10-21	17.36	34.32	7.38
6902846	28-10-21	28.50	33.14	7.99
6902846	02-11-21	28.62	32.85	6.96
6902870	27-10-21	18.04	33.40	9.91
6902870	01-11-21	17.95	33.29	7.09
6902872	28-10-21	19.33	36.15	15.31
6902872	02-11-21	19.25	36.38	9.94
6902873	27-10-21	23.58	34.32	11.37
6902873	01-11-21	23.52	34.36	7.87
6902904	28-10-21	27.30	34.37	8.01
6902913	26-10-21	26.85	32.41	6.17
6902913	31-10-21	26.70	32.36	5.08
6902944	27-10-21	10.86	38.16	6.74
6902944	01-11-21	10.84	38.18	7.23
6902945	26-10-21	17.23	38.14	10.78
6902945	31-10-21	17.14	38.14	2.83
6903262	29-10-21	17.80	35.61	10.49
6903262	03-11-21	17.92	35.84	5.08
6903291	28-10-21	20.44	35.83	15.89

6903291	02-11-21	20.18	35.89	9.70
6903784	26-10-21	17.31	37.53	13.63
6903784	31-10-21	17.37	37.32	2.93
6903788	27-10-21	15.54	36.90	11.13
6903788	01-11-21	15.57	36.62	5.92
6903801	26-10-21	17.71	36.61	14.21
6903801	31-10-21	17.68	36.56	3.75
6903803	26-10-21	25.60	33.94	4.91
6903803	31-10-21	25.60	33.93	7.27

Annexe 4 - Profils de température

Schéma A :

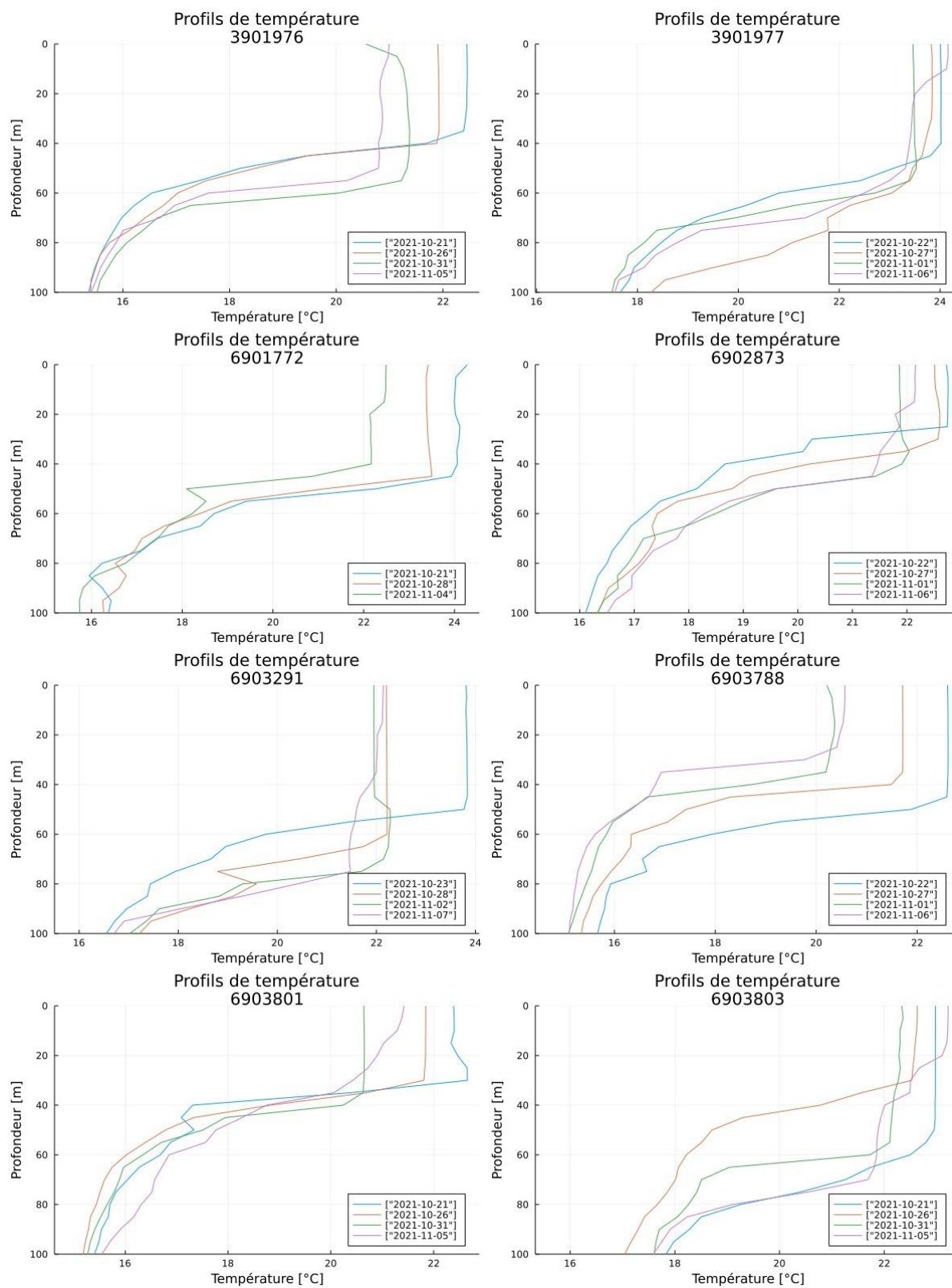


Schéma B :

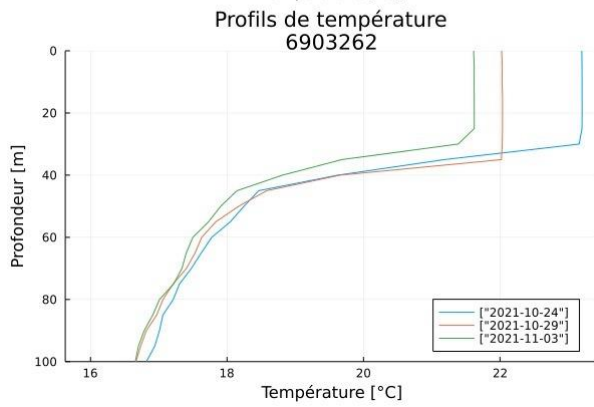
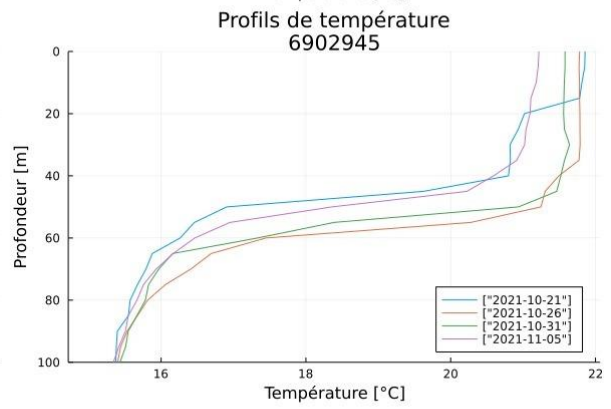
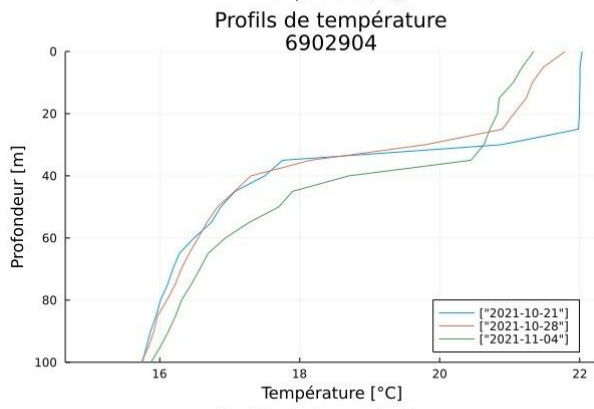
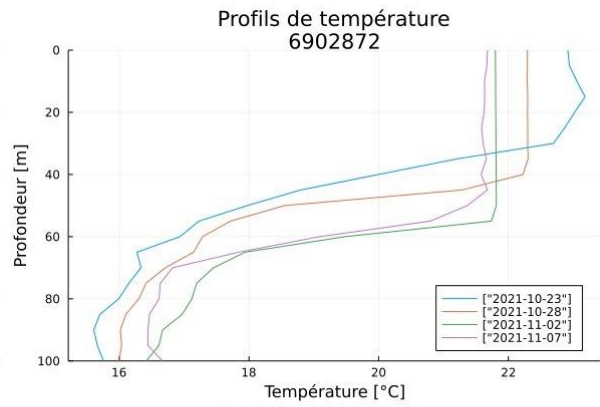
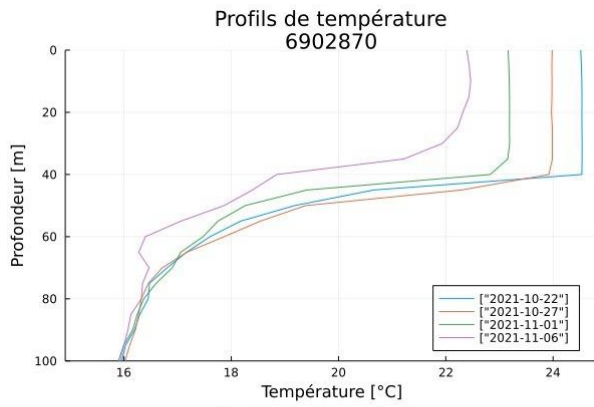


Schéma C :

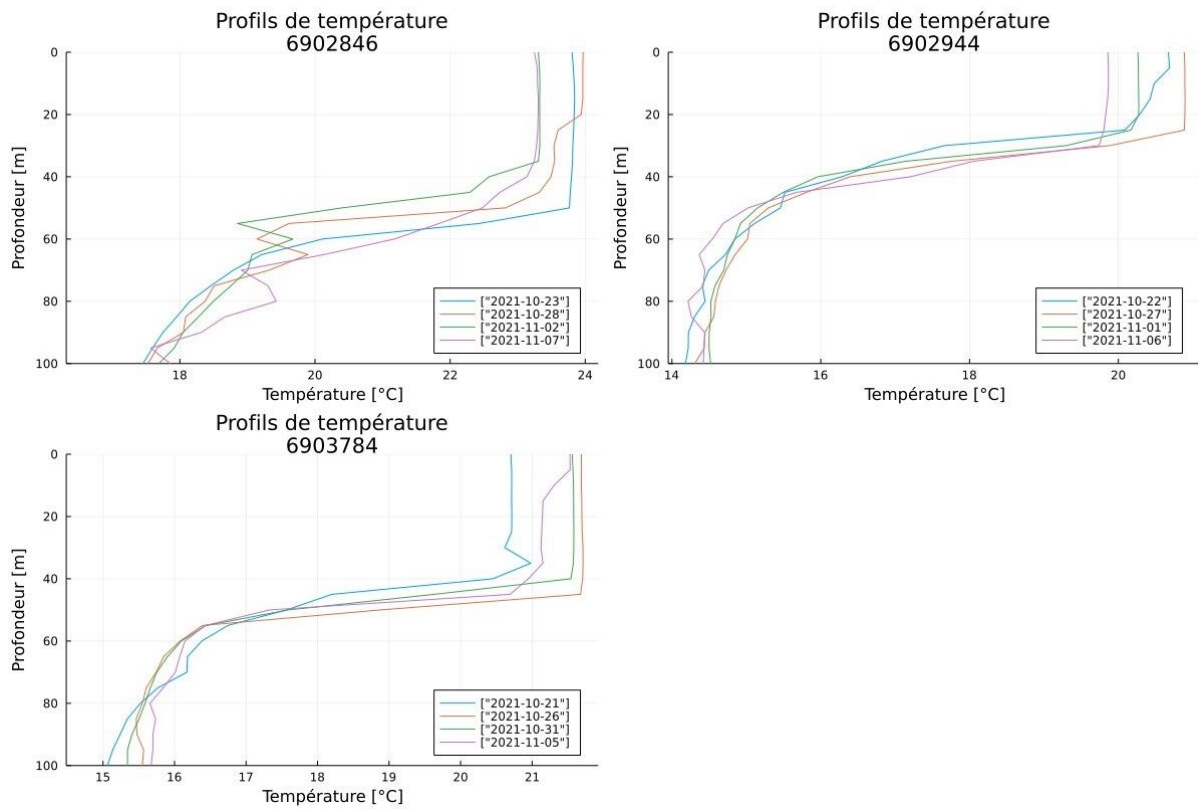
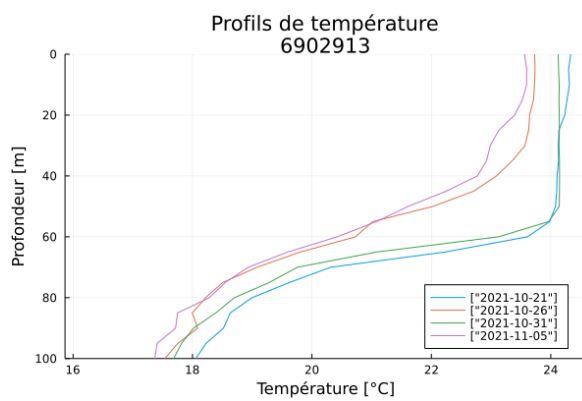


Schéma D :



Annexe 5 - Profils de salinité

Schéma A :

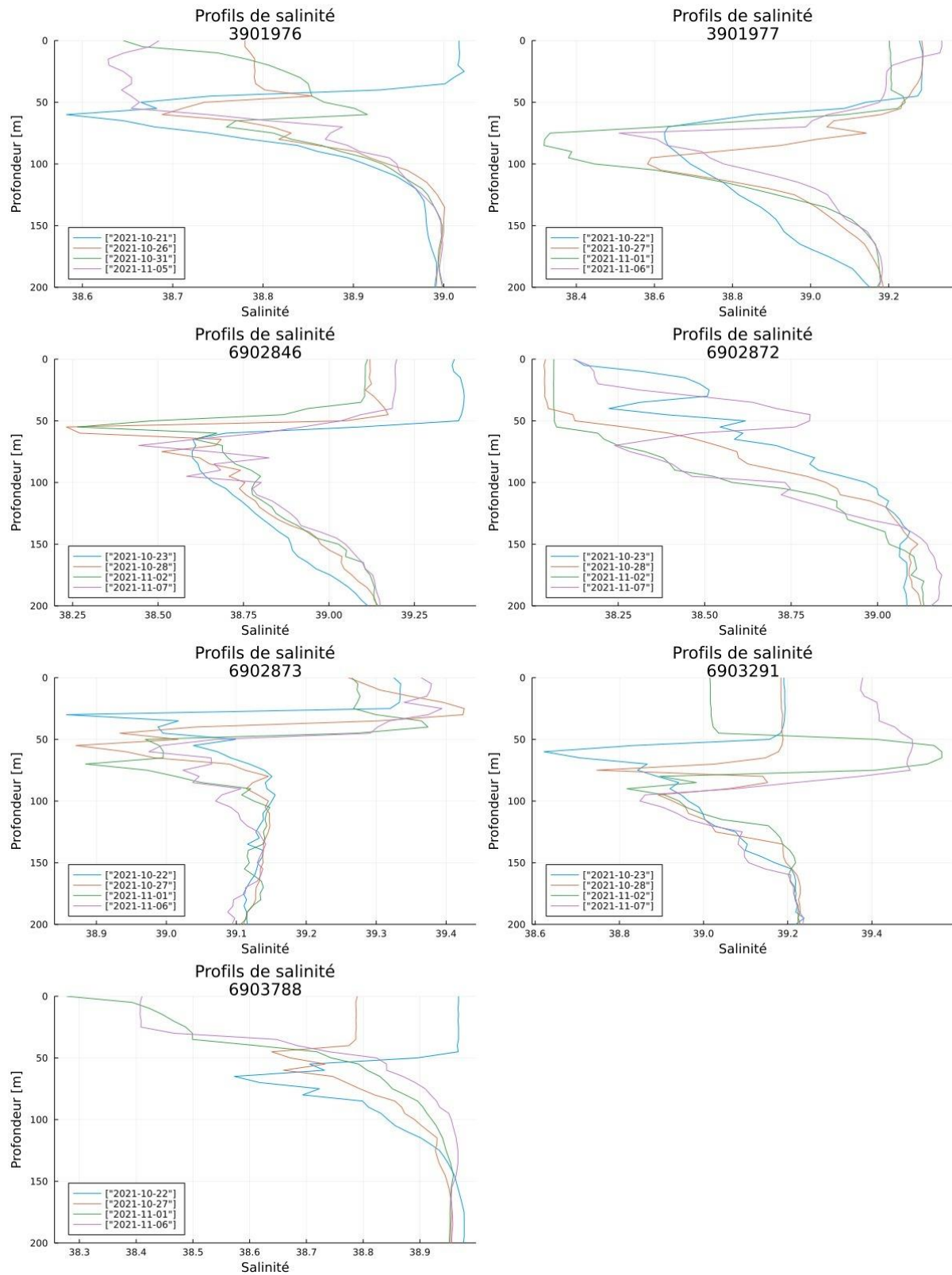
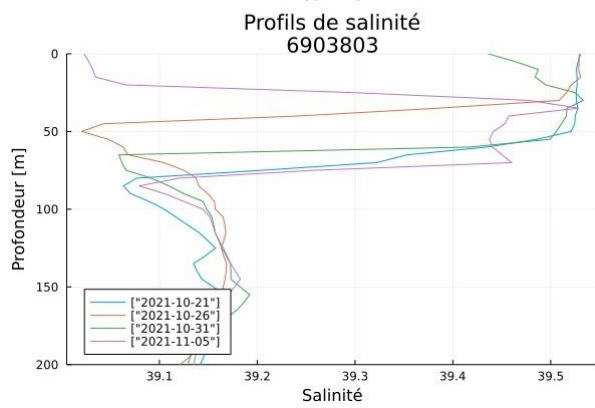
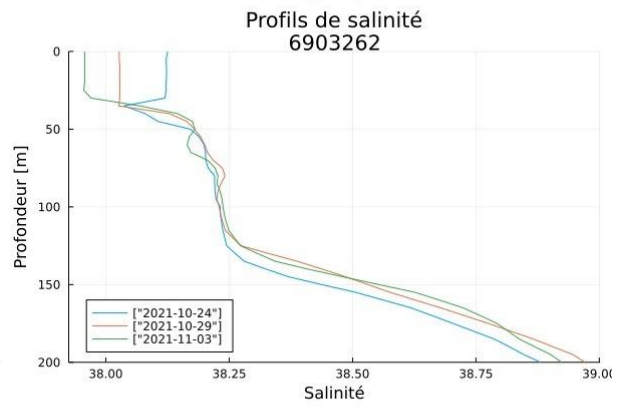
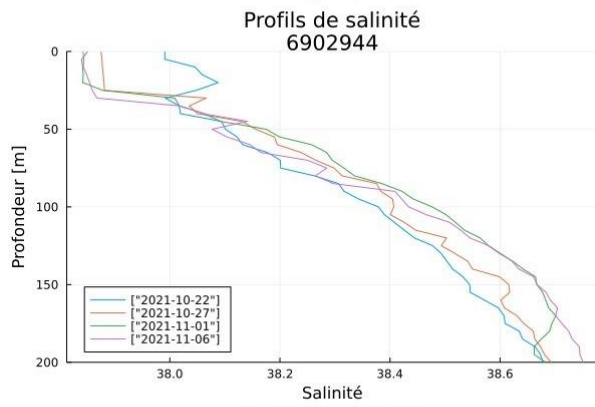
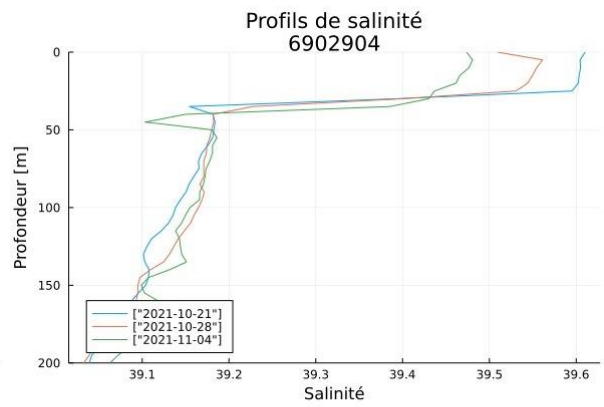
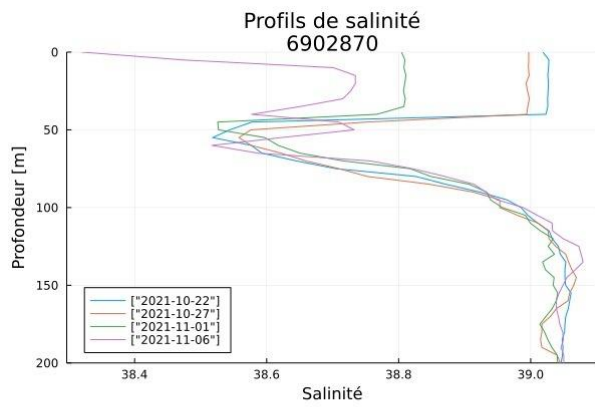


Schéma B :



Annexe 6 - Différences entre les profils Argo

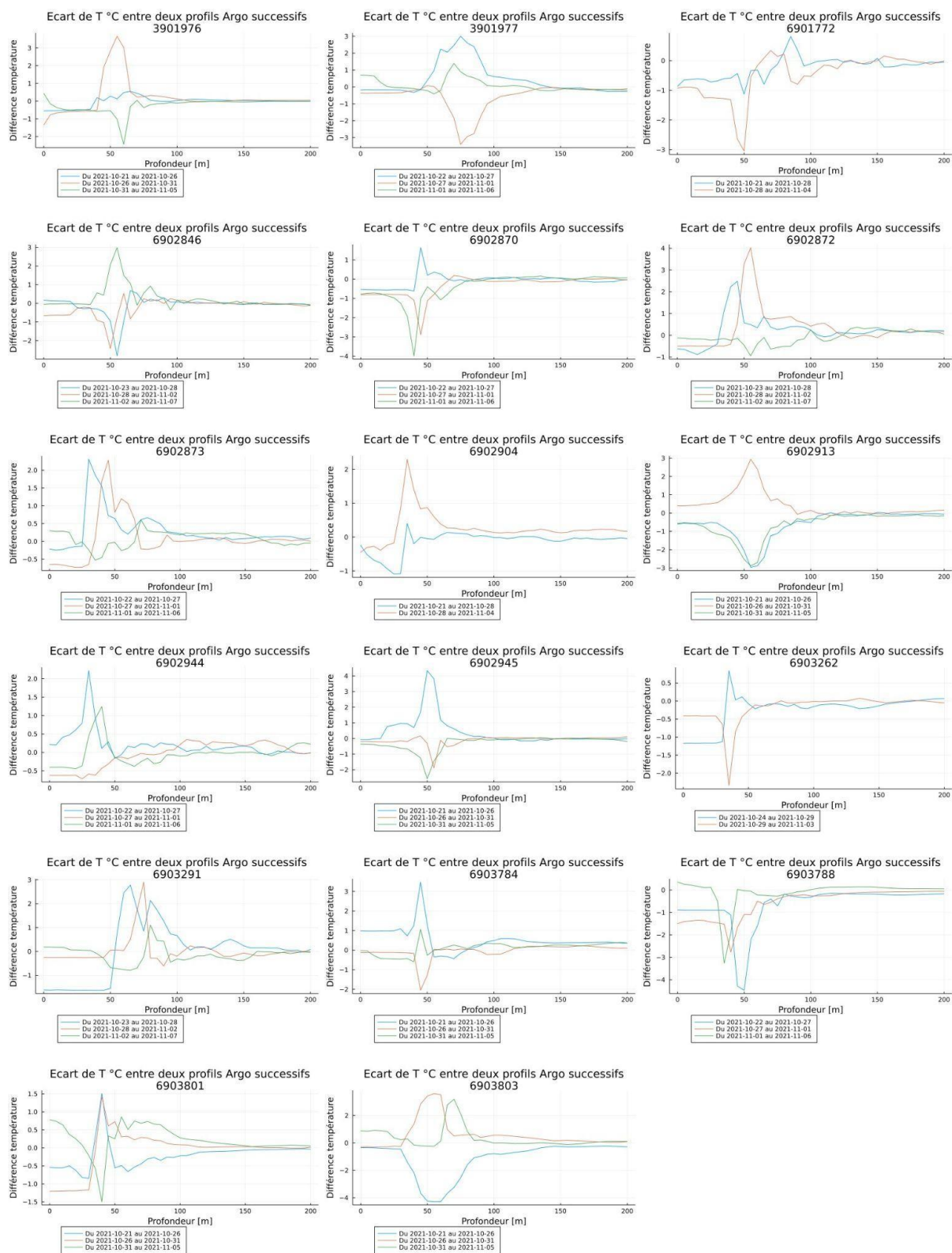


Figure : Différence entre deux profils successifs de température pour les flotteurs Argo se trouvant à moins de 2° de la trajectoire du Medicane Apollo.

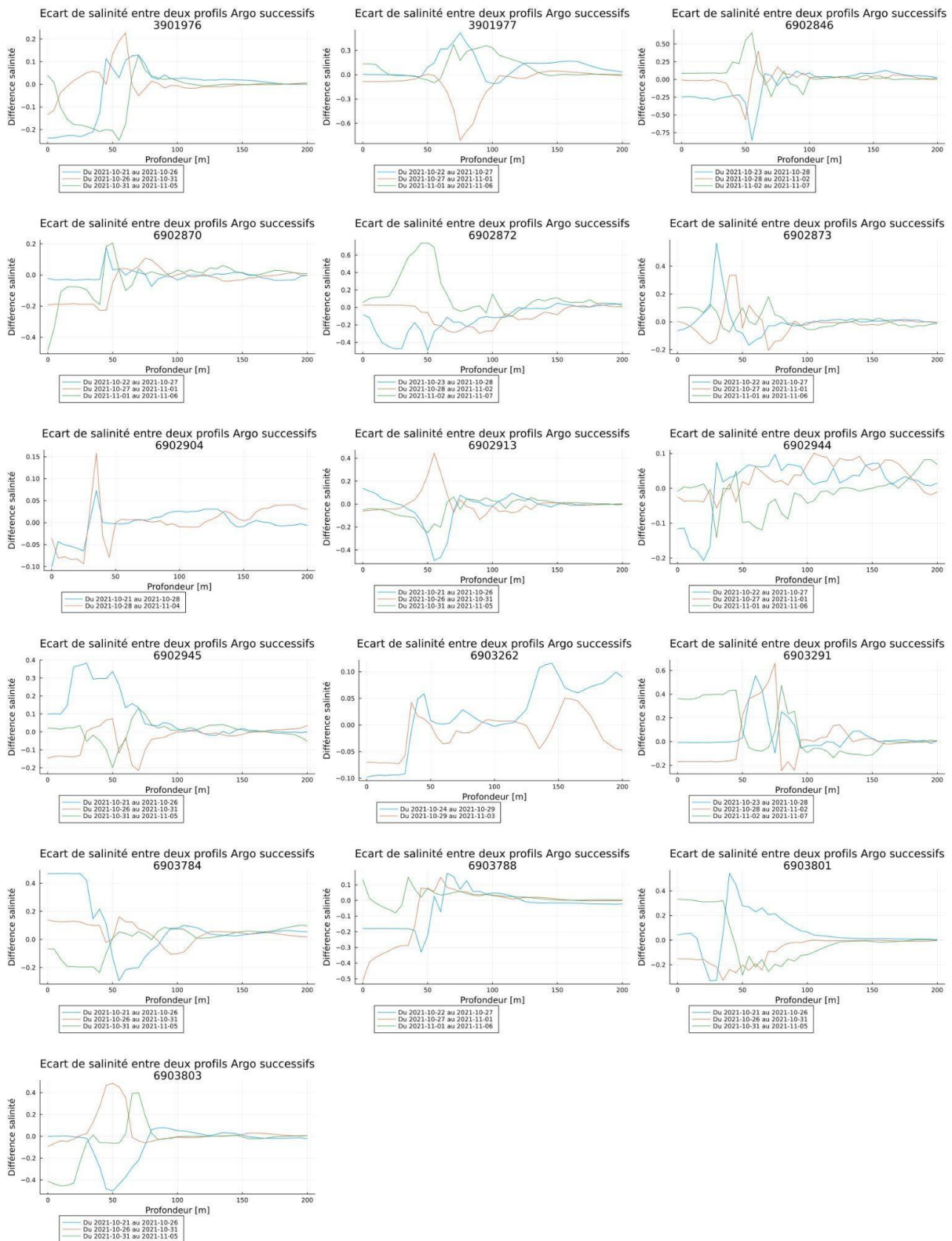


Figure : Différence entre deux profils successifs de salinité pour les flotteurs Argo se trouvant à moins de 2° de la trajectoire du Medicane Apollo.

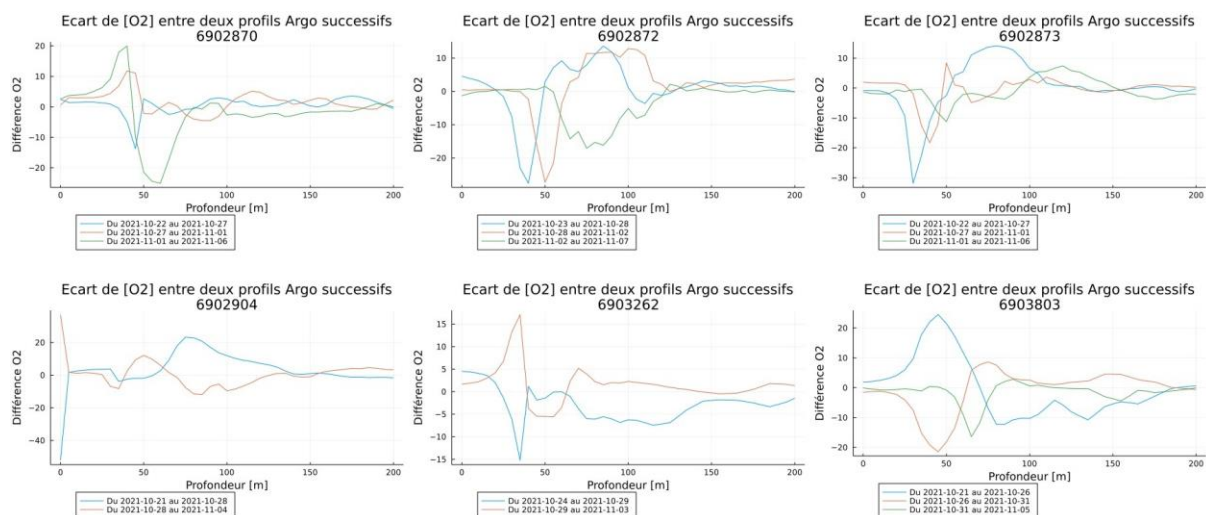


Figure : Différence entre deux profils successifs de concentration en oxygène dissous [$\mu\text{mol/kg}$] pour les flotteurs Argo se trouvant à moins de 2° de la trajectoire du Medicane Apollo.

Annexe 7 - Statistiques

Tableau A : Valeur moyenne, minimale, médiane et maximale des écarts de température entre la première et dernière date de sortie des flotteurs Argo sur une couverture temporelle allant du 20 octobre 2021 au 07 novembre 2021. Ces valeurs sont calculées pour chaque flotteur Argo se trouvant à moins de 2° de la trajectoire du Medicane. La moyenne est également calculée sur l'ensemble de ces valeurs.

Argo	Moyenne ($\Delta T^\circ\text{C}$)	Minimum ($\Delta T^\circ\text{C}$)	Médiane ($\Delta T^\circ\text{C}$)	Maximum ($\Delta T^\circ\text{C}$)
3901976	0.07	-2.77	-0.04	1.63
3901977	0.03	-2.02	0.21	0.62
6901772	-0.24	-1.13	-0.14	0.82
6902846	0.05	-1.28	0.03	1.29
6902870	0.79	-0.08	0.07	5.69
6902872	-0.48	-3.57	-0.51	1.55
6902873	-0.45	-2.95	-0.39	0.96
6902904	-0.13	-1.09	-0.04	0.40
6902913	0.77	0.05	0.69	3.19
6902944	-0.13	-2.08	-0.21	0.82
6902945	0.002	-1.45	0.03	0.67
6903262	-0.24	-1.17	-0.10	0.84

6903291	0.09	-3.53	0.03	2.17
6903784	-0.60	-2.49	-0.78	0.32
6903788	1.35	0.14	0.56	5.92
6903801	0.05	-1.44	-0.04	2.23
6903803	0.21	-0.43	0.18	1.07
Moyenne	0.07	-1.61	-0.03	1.78

Tableau B : Valeur moyenne, minimale, médiane et maximale des écarts de salinité entre la première et dernière date de sortie des flotteurs Argo sur une couverture temporelle allant du 20 octobre 2021 au 07 novembre 2021. Ces valeurs sont calculées pour chaque flotteur Argo se trouvant à moins de 2° de la trajectoire du Medicane. La moyenne est également calculée sur l'ensemble de ces valeurs.

Argo	Moyenne	Minimum	Médiane	Maximum
3901976	0.05	-0.21	-0.01	0.39
3901977	-0.09	-0.35	-0.08	0.12
6902846	0.00	-0.22	-0.06	0.34
6902870	0.07	-0.19	0.00	0.70
6902872	0.07	-0.48	0.01	0.48
6902873	-0.02	-0.52	0.00	0.12
6902904	0.00	-0.10	0.00	0.07
6902913	0.05	-0.07	0.01	0.39
6902944	-0.03	-0.14	-0.08	0.23
6902945	-0.06	-0.33	-0.02	0.03
6903262	0.02	-0.10	0.02	0.12
6903291	-0.16	-0.87	-0.02	0.11
6903784	-0.14	-0.54	-0.11	0.11
6903788	0.07	-0.30	0.01	0.56
6903801	0.01	-0.42	0.01	0.23
6903803	0.06	-0.14	0.00	0.51
Moyenne	-0.01	-0.31	-0.02	0.28

Tableau C - Valeur moyenne, minimale, médiane et maximale des écarts de concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer entre la première et dernière date de sortie des flotteurs Argo sur une couverture temporelle allant du 20 octobre 2021 au 07 novembre 2021. Ces valeurs sont calculées pour chaque flotteur Argo se trouvant à moins de 2° de la trajectoire du Medicane. La moyenne est également calculée sur l'ensemble de ces valeurs.

Argo	Moyenne ($\Delta \mu\text{mol/kg}$)	Minimum ($\Delta \mu\text{mol/kg}$)	Médiane ($\Delta \mu\text{mol/kg}$)	Maximum ($\Delta \mu\text{mol/kg}$)
6902870	-0.47	-26.88	-1.73	26.20
6902872	0.17	-10.26	-3.57	29.27
6902873	0.84	-12.99	0.89	35.53
6902904	3.38	-52.13	2.55	23.26
6903262	-2.98	-15.21	-2.48	4.50
6903803	2.57	-3.28	3.11	8.92
Moyenne	0.59	-20.12	-0.21	21.28

Annexe 8 - Trajectoire des bouées dérivantes et leurs mesures de la SST

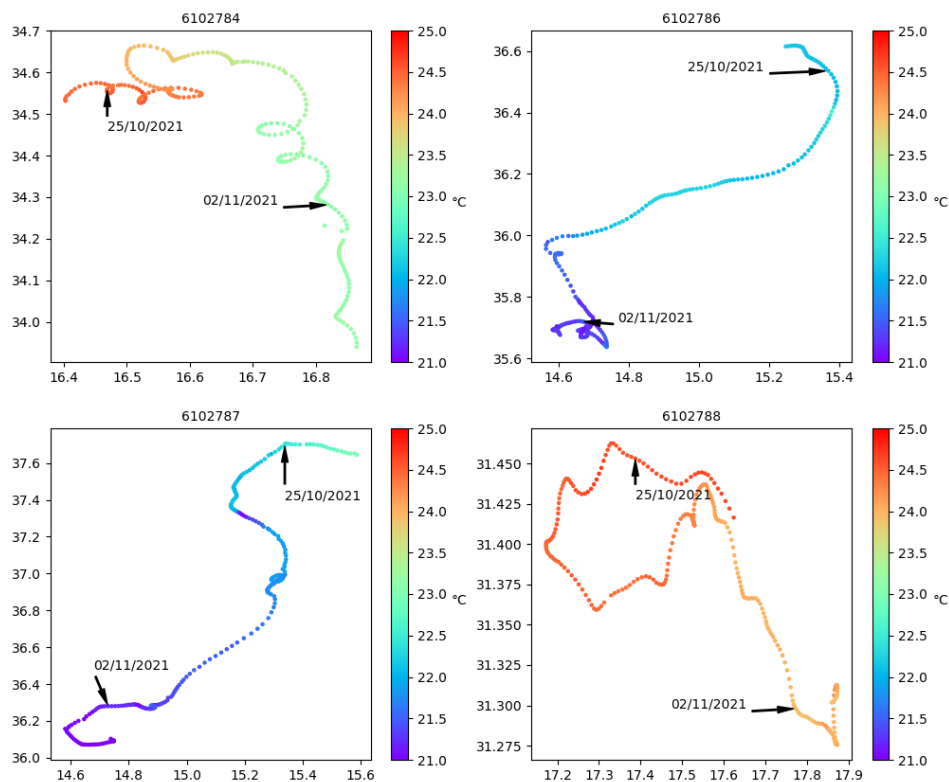


Figure : Evolution de la SST au cours du temps et suivis de la trajectoire des bouées dérivantes