
Analyse de données courantologiques et identification d'anomalies de vitesses verticales au mouillage JULIO

MÉMOIRE DE STAGE EN LABORATOIRE DE RECHERCHE
SOUS LA DIRECTION D'ANNE PETRENKO

TINO BELLAYER

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2021-2022

LICENCE 3 SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

PARCOURS MER - SPÉCIALISATION PHYSIQUE ET BIOGÉOCHIMIE

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à mon encadrante, Anne Petrenko. Tout au long de ce stage, et malgré tous les imprévus, elle a fait preuve de beaucoup d'enthousiasme, de présence et de patience, pour me guider, me motiver et m'encourager dans mon travail. Grâce à cette expérience, j'ai pu découvrir le quotidien du métier d'océanographe physicien, et mon intérêt pour la profession a grandi.

Je remercie de même ma camarade de promotion et amie, Léa Criado, stagiaire de Stéphanie Barrillon, pour son aide apportée et son soutien. Ensemble, nous avons pu nous entraider sur nos programmes Python et LaTeX, et avancer bien plus vite que si nous avions été seuls. Avec Yohan Esteves, autre stagiaire de Stéphanie Barrillon, nous avons pu échanger sur nos sujets respectifs, et mettre en pratique nos connaissances apprises en cours ces deux dernières années. Enfin, je remercie tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire et des travaux qui y sont exposés.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériels et méthodes	3
2.1	Principe d'un courantomètre ADCP	3
2.2	Le mouillage JULIO	4
2.3	Traitement et corrections apportées aux données	4
2.4	Sélection d'anomalies négatives de la composante verticale de la vitesse	6
3	Résultats	7
3.1	Evolution de la vitesse verticale sur l'ensemble de la série	8
3.2	Histogrammes des vitesses verticales	8
3.3	Isolement par choix d'un seuil	10
3.4	Mise en évidence des anomalies	11
3.5	Distribution des anomalies sur l'ensemble de la série	12
3.6	Cas de la période du mois de Juin 2021	13
3.7	Confrontation au contexte courantologique	15
4	Discussion des résultats	16
5	Conclusions	18

1 Introduction

La courantologie, ou l'étude et la caractérisation des courants marins, notamment la mesure de leur vitesse, est une composante majeure de l'océanographie physique. Les nombreux travaux réalisés sur la circulation océanique à différentes échelles depuis le vingtième siècle ont permis de formuler des hypothèses sur leur rôle dans le renouvellement des masses d'eau, ainsi que dans la régulation du climat global [7]. Toutefois, il est rare que la dimension verticale du mouvement des masses d'eau fasse l'objet d'une attention particulière ; pour la raison principale que ces mouvements sont nettement plus faibles qu'à l'horizontale. En effet, leur magnitude relève généralement de 10^{-3} à 10^{-2} mètres par seconde (m/s), contre 10^{-1} à 1 m/s pour les composantes horizontales d'un courant marin [5].

Les principaux phénomènes physiques associés à des courants verticaux sont appelés upwellings et downwellings. Ils sont souvent générés par des excès et défauts de masses d'eau résultant de transports Lagrangiens horizontaux [11]. Les upwellings sont des mouvements ascendants, et sont le fait d'un défaut de masse d'eau en surface, tandis que les downwellings sont des plongements d'eau par excès de masse en surface. Compte tenu des forçages météorologiques, ces phénomènes peuvent se produire à grande échelle ou à méso-échelle, en milieu côtier ou hauturier [7].

Les mouvements d'eau verticaux ne sont pas toujours d'origine physique, mais peuvent être également dûs à des migrations nyctémérales de certaines espèces zooplanctoniques, c'est à dire suivant un rythme journalier [3, 9]. Ces migrations sont alors généralement observées au coucher du soleil (mouvement vers la surface) et au lever du soleil (mouvement vers les zones plus profondes). Des migrations descendantes sont aussi certaines fois observées lors de phases de pleine lune [2].

Si les courants verticaux sont difficiles à quantifier, il est aujourd'hui admis que leur rôle dans les échanges de matière entre les strates de la colonne d'eau et avec l'atmosphère est majeur. En effet, les apports de sels nutritifs dans les eaux de surfaces, couplés à un éclaircissement solaire suffisant, sont indispensables au développement des organismes phytoplanctoniques photoautotrophes - et, *a fortiori*, à la stabilité des écosystèmes planctoniques littoraux [9, 15]. Par conséquent, selon s'ils provoquent un mouvement ascendant ou descendant, les courants verticaux ont une influence positive ou négative sur les écosystèmes concernés [8].

La rade de Marseille est située à l'extrémité Est du golfe du Lion (GL), qui s'étend jusqu'au cap de Creus en Catalogne (Espagne). Il s'agit d'un prolongement du plateau continental, de faible profondeur (de l'ordre de la dizaine à la centaine de mètres). Au sud de cette rade, le courant

Liguro-Provençal, ou Courant Nord (CN), longe le talus continental sous l'action de la force de Coriolis [1]. Dans des conditions particulières, une veine du CN peut empiéter sur le golfe et provoquer des mouvements d'eau descendants [4, 14], modifiant ses conditions biogéochimiques [11]. Deux régimes de vents dominants sont susceptibles de favoriser ce phénomène d'intrusion : le vent d'Est et le Mistral (de provenance Nord-Ouest) [1]. Lors d'épisodes de vent d'Est, la tension du vent s'exerce dans le sens du CN, et induit un transport d'Ekman de 90 degrés sur sa droite, à l'origine d'un empilement des masses d'eau contre le littoral. Cette eau accumulée s'introduit dans le GL lorsque la masse continentale ne s'oppose plus à son déplacement. Lors d'épisodes de Mistral, le transport est dirigé vers le Sud, ce qui entraîne un défaut de masse le long de la côte et un upwelling (mouvement ascendant) sur le littoral [12]. Ces phénomènes d'intrusion peuvent avoir des impacts sur le littoral Méditerranéen Nord, sur les plans biologique et biogéochimique [11]. Plusieurs événements apparentés ont déjà été observés en rade de Marseille [13].

Pour étayer les connaissances existantes concernant ces intrusions, il a été proposé en 2008 par Gatti un emplacement idéal au sud de la rade de Marseille pour identifier ces intrusions [6]. Le mouillage JULIO, pour JUDicious Location for Intrusion Observation, fournit des données *in situ* de vitesse tridimensionnelle du courant. Il s'inscrit dans le cadre plus large des réseaux d'observation SOMLIT, pour Service d'Observation en Milieu Littoral, et MOOSE, pour Mediterranean Ocean Observing System for the Environment. Ils sont notamment constitués de plusieurs points d'observation Eulériens et d'appareils mobiles Lagrangiens, dont JULIO fait partie, dans et autour du GL. Les données de vitesse du courant sont mesurées par un courantomètre à effet Doppler, ou Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Le présent mémoire de stage s'inscrit dans la continuité de ces travaux et s'attache à décrire la dernière série disponible de JULIO, allant du 07 décembre 2020 au 31 août 2021. L'objectif est ici de profiter des mesures de vitesse verticale effectuées au mouillage, pour identifier des périodes avec une forte concentration de vitesses verticales plus importantes, appelées anomalies. Dans un second temps, ces anomalies sont caractérisées et mises en relation avec les données de courant horizontal. Il s'agit ici de vérifier si nos résultats sont cohérents avec la survenue d'épisodes de Mistral ou de vent d'Est.

2 Matériels et méthodes

2.1 Principe d'un courantomètre ADCP

La mesure de vitesse du courant au mouillage JULIO est réalisée avec un courantomètre à effet Doppler, ou ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). A partir d'un ou plusieurs transducteurs piezo-électriques, cet instrument émet et reçoit des ondes acoustiques ultrasonores, c'est-à-dire d'une fréquence théoriquement supérieure à 20 000 Hertz (Hz), à des intervalles de temps réguliers. Les ondes émises, partiellement réfléchies sur les particules composant la colonne d'eau, sont captées par l'instrument avec un décalage de fréquence proportionnel à la vitesse de celles-ci (Annexes). Ce phénomène est appelé "effet Doppler", et permet d'obtenir une valeur de vitesse radiale à partir d'une fréquence de retour.



FIGURE 1 – Photographie de l'ADCP du mouillage Julio dans son flotteur (A. Petrenko).

Afin d'obtenir un profil tridimensionnel de la vitesse d'une colonne d'eau, un courantomètre ADCP doit comporter au moins 3 faisceaux. Pour obtenir une quantification de la précision de la mesure, un quatrième faisceau est nécessaire. Certains appareils en possèdent même plus - jusqu'à 9 - pour des mesures de houle et de turbulence, ou des mesures de vitesse plus précises. Le courantomètre ADCP utilisé pour le mouillage JULIO est un modèle RDI Ocean Sentinel (300kHz) à quatre faisceaux. L'appareil réalise une mesure tous les 5 mètres (4 mètres jusqu'en 2016) dans une colonne d'eau profonde d'une centaine de mètres, avec un pas temporel de 30 minutes. Le traitement d'une mesure fournit la valeur au même instant des 3 composantes de la vitesse Ouest-Est, Sud-Nord et Nadir-Zénith. Elles sont respectivement notées u , v et w , comme les trois composantes d'un vecteur courant.

2.2 Le mouillage JULIO

La ligne de mouillage JULIO, pour JUDicious Location for Intrusion Observation, est composée d'un flotteur dans lequel est placé l'ADCP (Figure 1). Le flotteur est relié à un corps mort de 200kg, par une corde en nylon et une chaîne galva de 2 m chacun, lesquels le maintiennent au fond (Figure 2). Le largueur acoustique présent sur la corde en nylon détache le flotteur de la partie de lestage lorsqu'il reçoit un signal spécifique de la surface, facilitant ainsi sa récupération pour analyse.

Depuis le lancement du projet JULIO pour les motivations mentionnées en introduction, 4 séries temporelles ont pu être obtenues entre 2012 et 2021, sur des périodes allant de 6 à 9 mois. La quatrième et dernière série, objet des présents travaux, court du 07 décembre 2020 au 30 août 2021.

La ligne de mouillage est par conséquent haute de 5 mètres environ. Si sa profondeur se situait au voisinage de l'isobathe des 100 mètres pour les 3 premières séries temporelles réalisées, elle est égale à 90 mètres pour la quatrième, ce qui place l'ADCP à une profondeur théorique de 85m. En effet, auparavant localisée aux $5^{\circ}15,28'E$; $43^{\circ}8,15'N$, la ligne a été repositionnée à $5^{\circ}14.074'E$; $43^{\circ}8.503'N$ (Figure 3) à l'occasion du mouillage de décembre 2020, car les activités halieutiques rendaient l'emplacement précédent dangereux pour l'utilisation d'instruments océanographiques. Le lancement s'est déroulé sur le navire Antedon-II lors d'une sortie locale, à l'instar de la récupération au terme de la série.

2.3 Traitement et corrections apportées aux données

Les données de la quatrième série temporelle JULIO ont été analysées avec le logiciel MATLAB, puis avec l'environnement de développement Spyder en langage Python (Annexe I).

Du fait de la mise à l'eau de l'ADCP et de sa remontée à la surface en fin de série, certaines données de vitesse ne sont pas représentatives des conditions de courant à quantifier. Il est par conséquent nécessaire de définir des bornes inférieure et supérieure de la plage temporelle à exploiter, afin de ne pas prendre en compte les premières et dernières mesures, celles-ci ayant été prises dans l'air sur le navire. La mise en route de l'ADCP ayant été effectuée à 06 :00 GMT le 07 décembre à terre, la série exploitable débute à 10h (à la neuvième mesure), après que le courantomètre ait atteint son point d'ancrage. (Le 7 décembre 2020, 10 :00 GMT correspond au jour ordinal 342,4167 environ. La série se termine le 31 août 2021 à 10 :00 GMT (609.416666 en jour ordinal, en prolongeant la série 2020 en 2021), juste avant que le flotteur soit détaché du corps mort sur commande de la surface, et entame sa remontée.

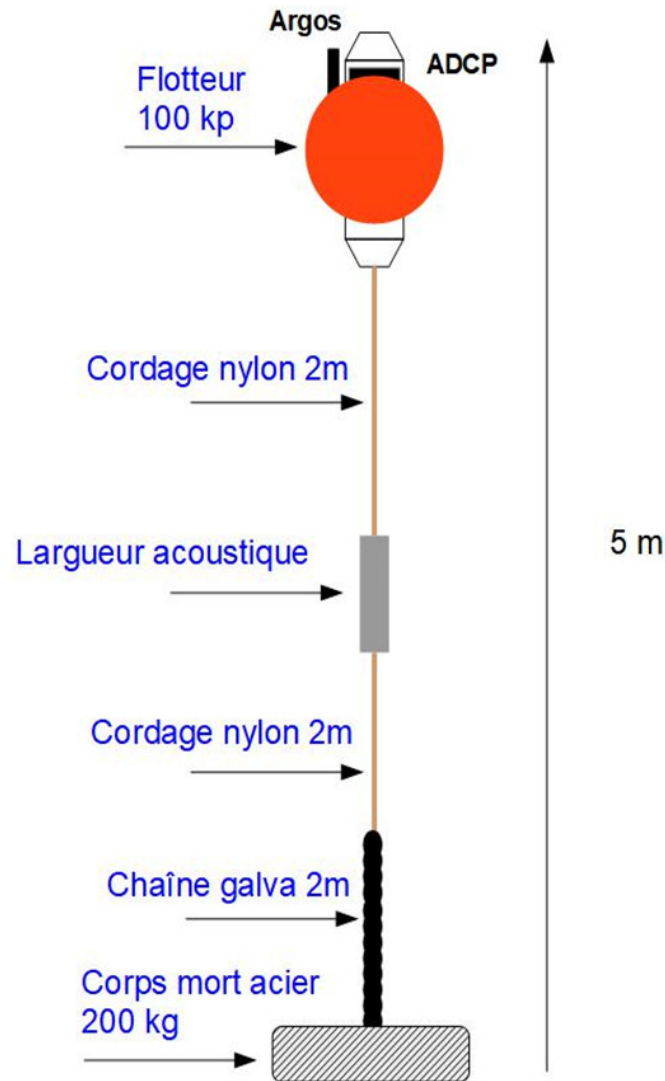


FIGURE 2 – Schéma structurel de la ligne de mouillage JULIO (J.L. Fuda).

De la même manière, la colonne d'eau faisant l'objet des mesures a été également bornée en termes de profondeur. En effet, les dalles acoustiques de l'ADCP ont un temps de stabilisation après émission. A proximité immédiate de l'ADCP, la réception d'ondes rétrodiffusées par les dalles est impossible car l'appareil doit se re-stabiliser, ce qui rend impossible toute mesure dans une certaine zone au-dessus de l'instrument. Les étages superficiels de la colonne sont également négligés en raison des perturbations de surface. La colonne d'eau mesurée à un instant donné s'étend ainsi de 11.5 à 76.5 m de profondeur, pour un total de 14 mesures espacées de 5m chacune.

Enfin, des valeurs aberrantes et isolées de vitesse verticale ($w = -32.768 \text{ m/s}$) ont été retirées de la série, remplacées par la mention "NaN" (Not a Number).

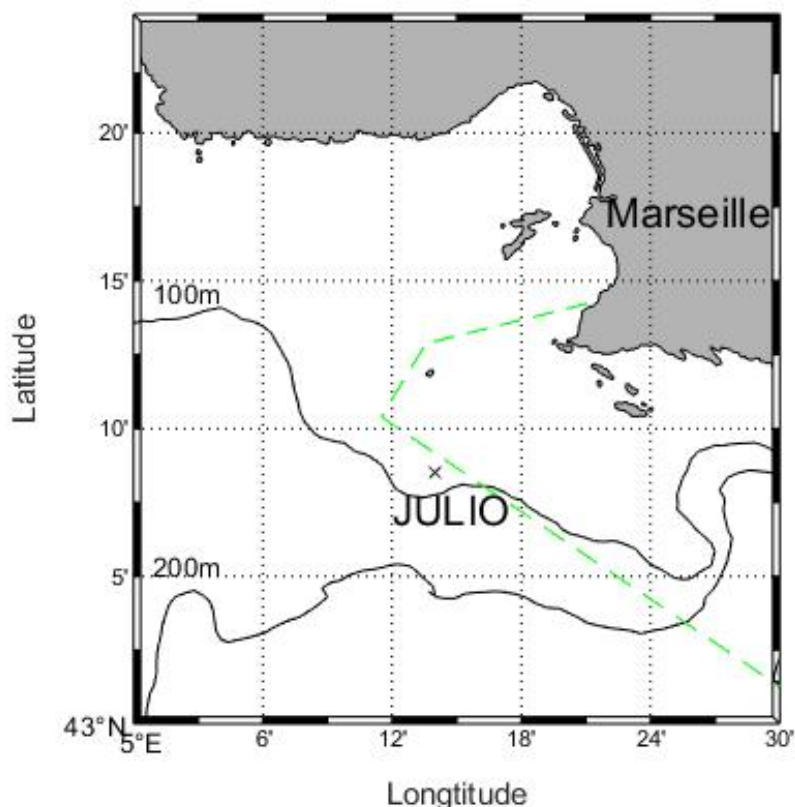


FIGURE 3 – Localisation de JULIO dans la rade de Marseille depuis 2020 (Petrenko, 2020). En vert, les limites maritimes du parc national des Calanques.

2.4 Sélection d'anomalies négatives de la composante verticale de la vitesse

Une fois la série temporelle corrigée, les travaux d'analyse se sont concentrés sur la série de la composante verticale de la vitesse (w). Comme cette dernière est *a priori* nettement moins importante - de 2 à 3 ordres de grandeurs - que ses homologues horizontales, une échelle différente (e.g. de coloration graphique) sera probablement nécessaire pour visualiser plus facilement ses fluctuations.

Dès lors, l'objectif général de ce travail est de démontrer la présence d'anomalies de la vitesse verticale sur la période (c'est-à-dire d'épisodes où les valeurs mesurées de w sont plus importantes qu'en moyenne) ; puis de les isoler et les caractériser pour y associer des processus physiques et/ou biologiques.

Pour ce faire, nous avons commencé par étudier l'évolution globale de la vitesse verticale au mouillage, puis par périodes plus restreintes (d'un mois puis d'une semaine). Cette décomposition permet essentiellement de déterminer quelles sous-périodes présentent des motifs d'anomalie remarquables. Ensuite, l'analyse de la répartition de la vitesse verticale en fonction de

son intensité par histogramme permet de déterminer les seuils à choisir pour isoler les épisodes d'anomalies. Si l'histogramme d'intensité des vitesses verticales présente une dissymétrie, il existe probablement une anomalie sur la période observée. La valeur de la vitesse verticale de l'anomalie est négative si la dissymétrie se trouve en-dessous de la valeur moyenne théorique (0m/s dans le cas présent).

Afin d'isoler les anomalies si elles sont présentes, une valeur de seuil (- 5 cm/s) a été déterminée à partir de l'observation de la répartition générale des histogrammes de vitesses verticales. Ceci fait, deux seuils supplémentaires (- 1 cm/s et - 0.5 cm/s) peuvent être introduits pour préciser l'observation.

Toutefois, cette méthode présente l'inconvénient de détecter aussi des mesures de w importantes mais isolées. Ce sont par conséquent des motifs de quasi-bruit, car elles ne sont pas considérées comme significatives dans ces travaux. Pour une sélection plus précise des anomalies escomptées, une méthode de traitement basée sur un test de groupement, utilisée par Charlotte Cunci [3] a été utilisée et adaptée, en faisant glisser un rectangle sur la verticale (profondeur) puis sur l'horizontale (temps) de la période choisie. Ses dimensions correspondent à celles des motifs d'anomalie observées *a prima vista*. Les zones couvertes par le rectangle comportant plus de 30 pourcents de valeurs inférieures au seuil de -5 cm/s ne sont pas prises en compte. Les zones couvertes par le rectangle comportant plus de 70 pourcents de valeurs inférieures au seuil sont conservées et considérées comme de fortes anomalies de vitesses verticales négatives, objets de cette étude.

Enfin, leurs caractéristiques (à savoir : durée, fréquence, profondeur et intensité) ont été déterminées et confrontées entre elles, et une discussion sera faite pour identifier leurs agents causaux.

3 Résultats

En premier lieu, une visualisation générale de l'évolution de la vitesse du courant sur l'ensemble de la série a été réalisée (Figure 4). La série temporelle met en évidence une dominance de vitesse négative de la composante u (vers l'ouest), ainsi que quelques périodes de vitesse négative, mais plus sporadiques et moins intenses, pour la composante v (vers le sud). Ces mesures ne sont pas surprenantes compte-tenu de la présence du CN, qui coule à cet endroit vers l'Ouest ou le Sud-Ouest. Les prochains résultats se concentrent sur la composante verticale de la vitesse (w).

3.1 Evolution de la vitesse verticale sur l'ensemble de la série

La visualisation graphique de la série temporelle de w (Figure 4) dans son ensemble à l'échelle de couleurs de la vitesse horizontale ne permet pas d'observer les anomalies de vitesse verticale à l'oeil nu, mais la réduction de l'échelle de couleurs (de $[-0,2; 0,2]$ à $[-0,02; 0,02]$ m/s) les rend nettement plus visibles. En réduisant la fenêtre temporelle à un mois, des motifs marqués semblant être périodiques peuvent être identifiés à plusieurs périodes de l'année, aux mois d'Avril et Juin 2021 notamment (Figure 5, Annexe II). À noter que les valeurs mesurées sont de l'ordre de 10^{-2} m/s, tandis que les vitesses horizontales sont de l'ordre de 1 à 10 m/s, ce qui corrobore l'hypothèse initiale de ces travaux.

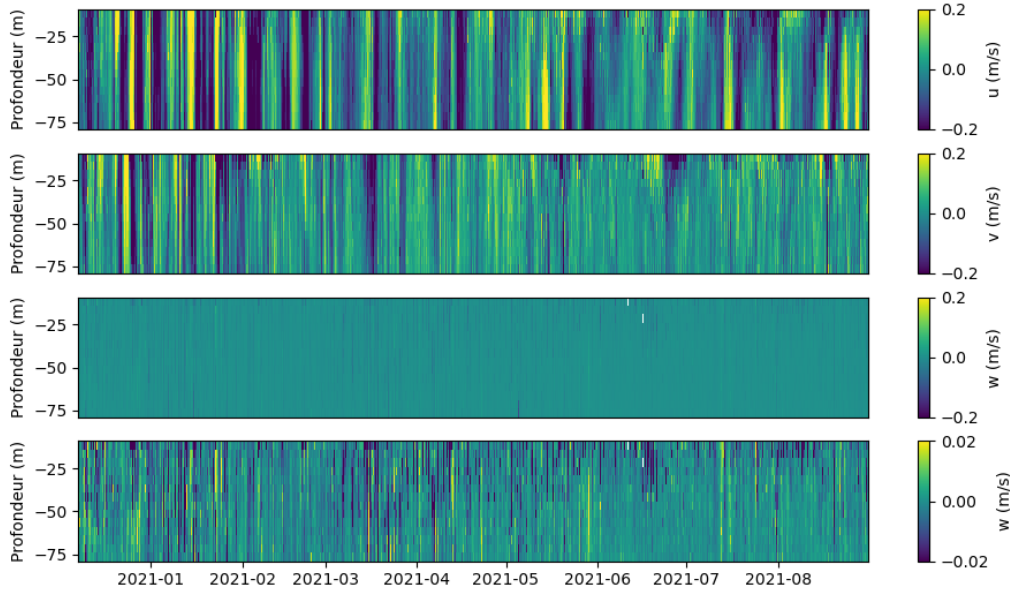


FIGURE 4 – Evolution temporelle des composantes u , v , et w de la vitesse du 07 décembre au 31 août. Les vitesses des trois panneaux supérieurs sont de $-0,2$ à $0,2$ m/s ; celle du panneau inférieur a été restreinte au dixième ($-0,02$, $0,02$ m/s).

3.2 Histogrammes des vitesses verticales

La présence d'anomalies de la vitesse verticale est indiquée par l'allure de leur histogramme (Figure 6). Ce dernier, qui devrait prendre une apparence de distribution gaussienne centrée sur 0 m/s, présente en effet une dissymétrie à dominante négative : la moyenne empirique de la série est égale à $-0,0018$ m/s, et sa vitesse médiane à -0.001 m/s. Cela traduit une surreprésentation de vitesses négatives, induisant un mouvement descendant. L'écart-type, qui vaut 0.008 m/s, est quand à lui cohérent par rapport aux valeurs mesurées et à leur étendue (0,268 m/s), c'est-

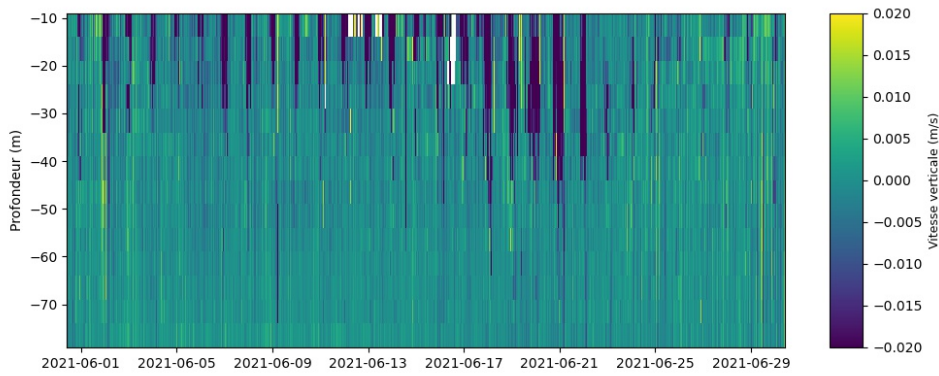


FIGURE 5 – Evolution temporelle de la composante verticale w de la vitesse au mois de Juin.

à-dire l'écart entre les valeurs minimale (-0.223 m/s) et maximale (0.235 m/s) de la série. Par souci de lisibilité, la fenêtre de valeurs affichées a été restreinte à $(-0,02; 0,02)$ m/s, car les valeurs situées en dehors sont suffisamment rares.

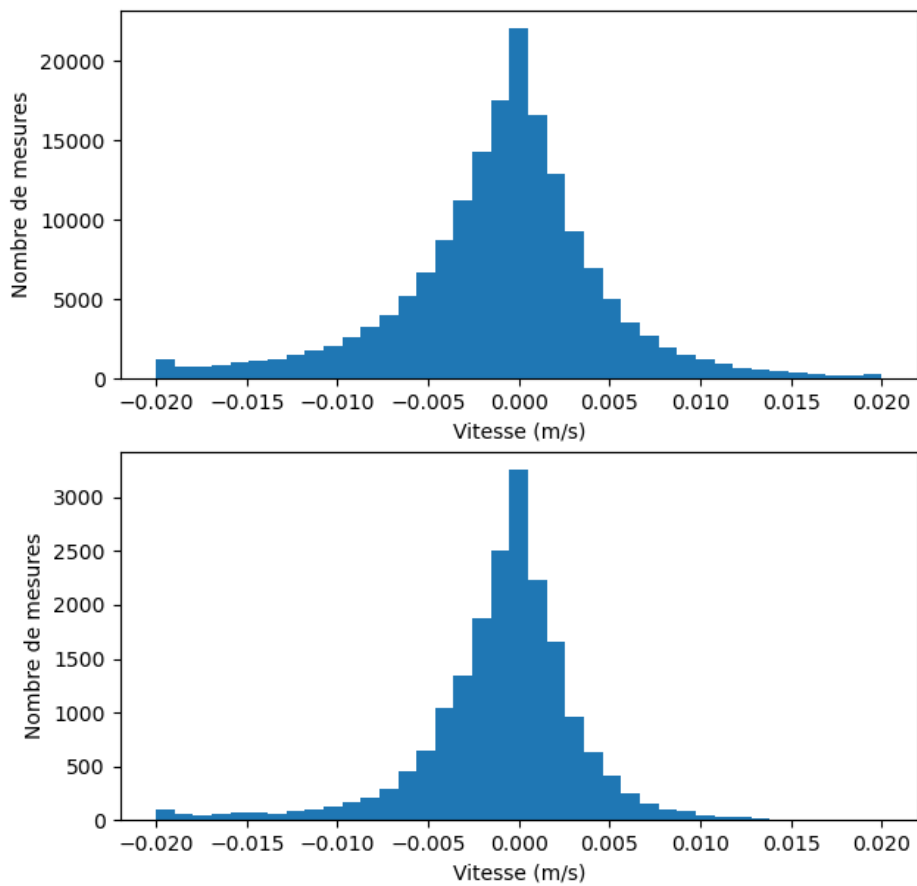


FIGURE 6 – Histogramme de répartition des vitesses verticales. En haut, la série du 07 décembre au 31 août ; en bas, celle du 01 au 30 Juin. L'échelle du panneau inférieur est grossie 7 fois par rapport à celle du panneau supérieur.

D'une manière générale, la distribution est également de forme quasi-gaussienne pour chaque pas de profondeur séparé. Cependant, les anomalies négatives semblent surtout présentes entre 11,5m (c'est-à-dire la première profondeur étudiée) et 41,5m de profondeur.

3.3 Isolement par choix d'un seuil

Dans le but de mettre en évidence les anomalies observées à l'oeil nu, et pour les observer plus facilement en supprimant les vitesses ne relevant pas des anomalies, une valeur de seuil a d'abord été mise en place. Comme l'anomalie supposée existante en partie 3.2 est négative, il s'agit ici d'un critère correspondant à une valeur maximale de vitesse que l'utilisateur doit observer. En l'occurrence, le premier seuil utilisé vaut $-0,01$ m/s. En-dessous de ce critère, la vitesse est considérée comme étant partie des anomalies et est conservée, et est supprimée dans le cas contraire (Figure 7, Vert).

L'imposition de ce premier seuil a permis de sélectionner des vitesses appartenant aux anomalies sur l'ensemble de la série. Toutefois, il est nécessaire de vérifier s'il n'existe pas d'anomalie pour des vitesses moins importantes en valeur absolue, afin de ne pas omettre d'autres valeurs plus faibles, mais significatives.

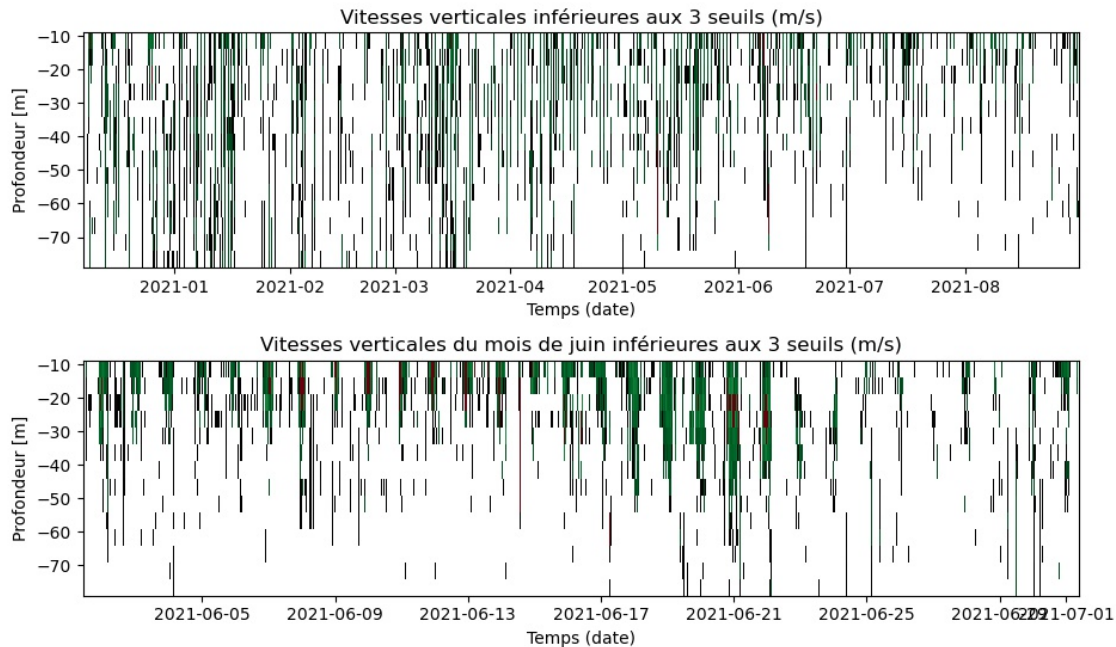


FIGURE 7 – Isolement de vitesses verticales négatives avec un premier seuil à $-0,005$ m/s (noir), un deuxième seuil à $-0,01$ m/s (vert) et un troisième seuil à $-0,05$ m/s (rouge).

Ce faisant, un second seuil a été établi à $-0,005$ m/s. Néanmoins, la tolérance importante de ce seuil ne permet pas de visualiser précisément des périodes marquées de courants verticaux (Figure 7, Noir). Le premier seuil est donc meilleur pour détecter les anomalies. De plus, un troisième seuil a été fixé à $-0,05$ m/s, pour obtenir la localisation des maximums négatifs de vitesse verticale (Figure 7, Rouge). Cette opération permet de savoir si ces valeurs extrêmes sont localisées dans les épisodes d'anomalie ou sont plus isolées. La superposition de ces trois critères avec des couleurs associées différentes pour chaque critère résulte en une différenciation relativement efficace des motifs de courants verticaux, et conforte les premières observations effectuées à l'oeil nu (Figure 4). La méthode démontre que les épisodes d'anomalie occasionnent les vitesses négatives les plus importantes.

La superposition de ces trois seuils s'avère donc suffisante pour détecter *a minima* l'ensemble des valeurs de vitesse appartenant à l'anomalie supposée. Ces premiers résultats suggèrent la présence d'épisodes réguliers, d'une durée de deux à six heures et dans la première moitié de la colonne d'eau, de 0 à 40m de profondeur.

3.4 Mise en évidence des anomalies

Toutefois, ce mode opératoire a le défaut de prendre en compte l'ensemble des valeurs de vitesse satisfaisant au seuil, y compris les valeurs plus isolées, pouvant être considérées dans cette étude comme du bruit. Pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser une méthode sélectionnant uniquement les valeurs groupées, que l'on considérera comme de véritables épisodes d'anomalies de vitesse verticale. Pour cela, la méthode de sélection par grille, mise en place par Charlotte Cunci en 2021 ([3], Annexe I), a été utilisée puis adaptée à la situation. En se basant sur les hypothèses concernant les caractéristiques des épisodes recherchés, un rectangle de 8 unités de nombre de colonnes (8 demi-heures, soit 4 heures) par 6 unités de nombre de lignes (6x5m, soit 40m en hauteur) a été défini (Figure 8). De cette manière, il est possible de déterminer avec une précision suffisante les événements d'importance dans le cadre de ce mémoire. L'application de cette méthode confirme la détection des épisodes d'anomalie présumés, et supprime les valeurs de bruit qui n'y sont pas liées directement (Figure 9).

Le seuil choisi par Cunci était -0.03 m/s. Dans le cas présent, en utilisant le seuil médian de -0.01 m/s, la méthode s'avère efficace pour détecter les épisodes d'anomalie pressentis en partie 3.1, aux mois d'Avril et de Juin. Elle met en évidence des événements survenant jusqu'à une quarantaine de mètres de profondeur. En observant les détections du mois de Juin, cinq épisodes remarquablement nets, observés du 17 au 23 Juin (Figure 9, panneau inférieur), font notamment

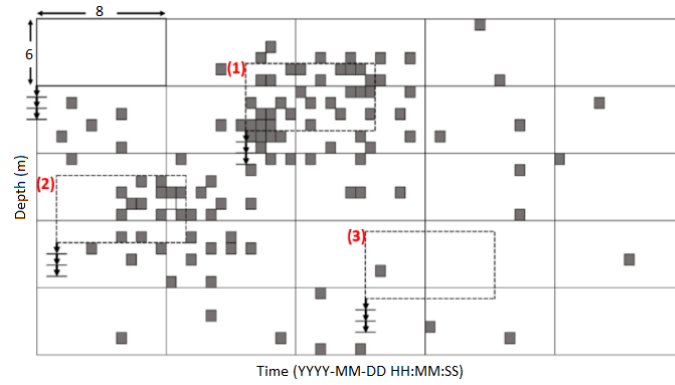


FIGURE 8 – Schéma décrivant le fonctionnement de la méthode de sélection par grille (Adapté de Cunci, 2021).

l'objet d'une attention particulière : ils semblent présenter une périodicité journalière, ainsi qu'une similarité d'un épisode à l'autre.

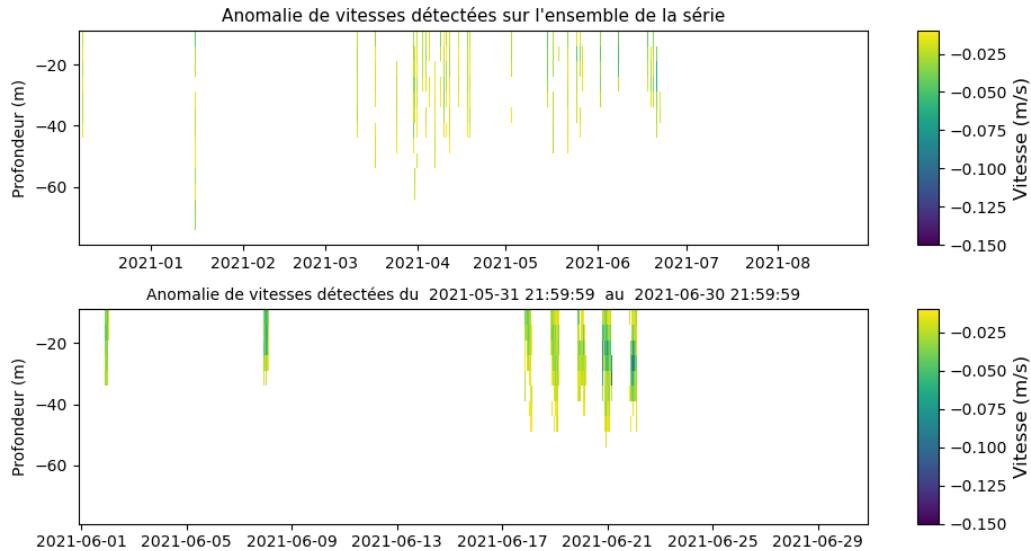


FIGURE 9 – Isolement des anomalies de vitesse verticale à l'aide de la méthode de sélection par grille, pour l'ensemble de la série (en haut) et pour le mois de Juin (en bas).

3.5 Distribution des anomalies sur l'ensemble de la série

L'isolement de l'anomalie grâce à la méthode de sélection par grille permet d'étudier la répartition des vitesses satisfaisant aux valeurs de seuil et relevant d'épisodes d'anomalie - et non de bruit. Les anomalies présentent une vitesse moyenne avoisinant -0.025 m/s. Bien que mineures, elles représentent une part non négligeable de l'ensemble des mesures (Figure 10(a)). Les histogrammes ont été restreints à $[-0.05, 0.05]$ m/s pour les mêmes raisons qu'en partie 3.2. L'histogramme de répartition des vitesses auxquelles ont été retirées les valeurs appartenant

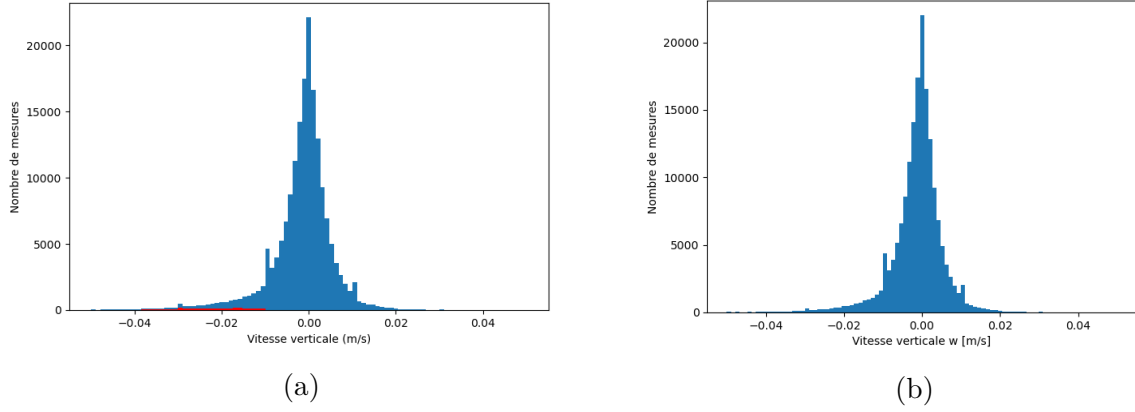


FIGURE 10 – [a] Histogramme de répartition des vitesses verticales (bleu) et de l’anomalie de vitesse (rouge) sur l’ensemble de la série ; [b] histogramme de répartition des vitesses verticales sans l’anomalie détectée.

à l’anomalie présente une forme gaussienne dont la valeur moyenne est très proche de 0, et dont la dissymétrie est moins prononcée que celle décrite concernant l’histogramme de la partie 3.2 (Figure 10(b)). Sa valeur médiane est nulle, ce qui signifie qu’anomalies à part, les vitesses négatives sont en égale quantité de mesures avec les vitesses positives. La méthode dite de la grille semble donc avoir efficacement détecté les événements à considérer dans le cadre de ce mémoire.

3.6 Cas de la période du mois de Juin 2021

Après obtention de l’évolution temporelle des épisodes d’anomalie, il est intéressant d’observer plus précisément la façon dont ces événements se déroulent et se maintiennent. En effet, à première vue, certaines périodes de dominance de l’anomalie semblent présenter un motif de répétition périodique, notamment aux mois d’avril et juin. Sur cette supposition, il a été établi une description caractéristique des épisodes selon quatre propriétés : leur durée, leur fréquence, leur profondeur maximale et leur intensité (valeurs de w lors de ces épisodes). Parmi les différentes périodes particulières de la série générale, les trois premières semaines du mois de juin s’avèrent particulièrement intéressantes, car elles semblent présenter les motifs périodiques les plus marqués en termes d’intensité et de profondeur (Figure 11, panneau supérieur).

L’imposition des trois seuils choisis en partie 3.3 fonctionne de manière satisfaisante. Le bruit présent sur la période est supprimé à l’aide de la méthode de sélection par grille, permettant d’obtenir une détection d’anomalies groupées (Figure 11, panneau inférieur). 5 épisodes sont observés sur la période, et sont numérotés de 1 à 5 par ordre d’apparition (Table 1).

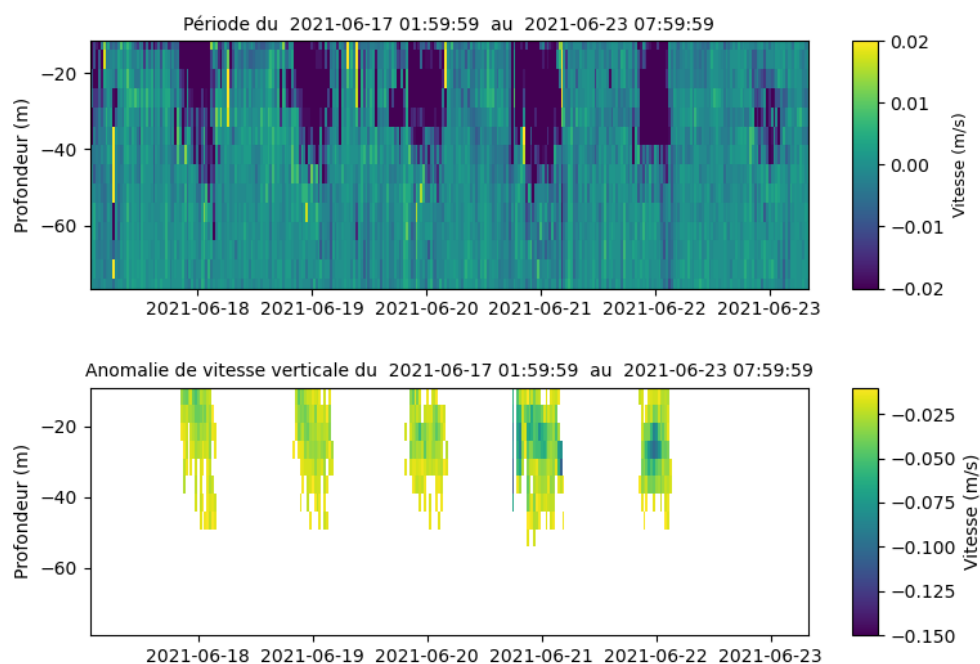


FIGURE 11 – Evolution de la vitesse verticale sur la période allant du 17 au 23 Juin (panneau supérieur), et anomalies détectées par la méthode de la grille sur cette même période (panneau inférieur).

TABLE 1 – Classification des caractéristiques de chaque épisode d’anomalie (GMT), du 17 au 23 Juin.

Anomalie	Début	Fin	Durée	Prof. Max (m)	Vitesse Moyenne (m/s)	Vitesse Négative Maximale (m/s)
1	2021-06-17, 20:15	2021-06-18, 03:45	7 h 30 min	51,5	-0,029	-0,109
2	2021-06-18, 19:45	2021-06-19, 04:15	8 h 30 min	51,5		
3	2021-06-19, 19:45	2021-06-20, 04:15	8 h 30 min	51,5		
4	2021-06-20, 18:45	2021-06-21, 04:45	10 h 00 min	56,5		
5	2021-06-21, 20:15	2021-06-22, 03:15	7 h 00 min	51,5		
Moyenne	Début à 19:45	Fin à 04:03	8 h 18 min	52,5		

Comme supposé précédemment, cette caractérisation des 5 épisodes d’anomalie met en évidence une périodicité journalière, avec une régularité remarquable - à l’heure près. Les épisodes sont profonds de 51,5 à 56,5 m, avec une intensité de - 2,9 cm/s en moyenne. Cette vitesse atteint même une valeur maximale de - 10.9 cm/s. La particularité observée de ces événements est qu’il se produisent tous la nuit, de 19 :00 à 04 :00 environ, et sont centrés sur minuit (Table 1).

3.7 Confrontation au contexte courantologique

Les caractéristiques des épisodes de la période du 17 au 23 juin ont suscité plusieurs interrogations, notamment quant à leurs origines. Dès lors, il est intéressant de visualiser l'évolution horizontale de la vitesse du courant, et de trouver d'éventuelles correspondances avec les motifs d'anomalie observés simultanément.

Sur la période allant du 17 au 23 Juin ; la figure 12 démontre l'existence d'une période simultanée à forte vitesse positive sur la composante Nord de la vitesse, ainsi qu'une dominante négative - quoique moins intense - sur la composante Est. Ces observations suggèrent la présence d'un courant ambiant de Nord-Ouest au mouillage JULIO lors de cette période. Toutefois, cette tendance marquée ne se vérifie pas sur l'ensemble du mois. Ce constat s'accorde avec la littérature [10] sur le fait que ces évènements ne sont pas continus, mais relativement brefs.

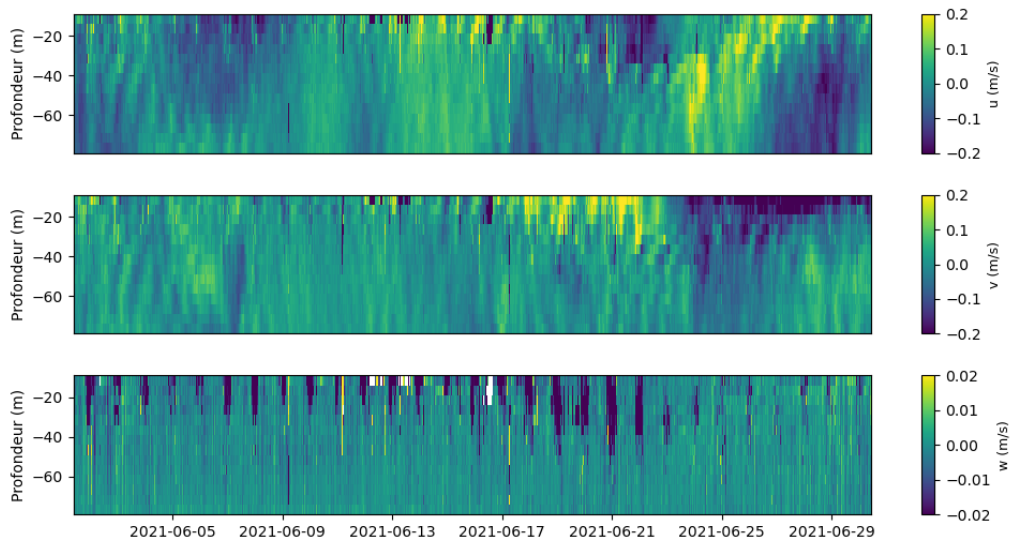


FIGURE 12 – Evolution des 3 composantes de la vitesse au cours du mois de Juin, Ouest-Est (u, panneau supérieur), Sud-Nord (v, panneau médian), et Nadir-Zénith (w, panneau inférieur).

L'observation successive par mois de l'ensemble de la période suggère également l'occurrence d'autres évènements atypiques, au mois d'Avril. Ceux-ci sont plus éphémères et plus intenses, mais ont une direction horizontale de Sud-Est, opposée à celle des évènements de Juin (Figure 13). Tandis que les épisodes du mois de Juin se superposent avec des phases d'anomalie de vitesse verticale remarquable, ceux du mois d'Avril sont liés à une perturbation de la colonne d'eau sur la verticale, ainsi qu'à une diminution de l'intensité des épisodes d'anomalie observés.

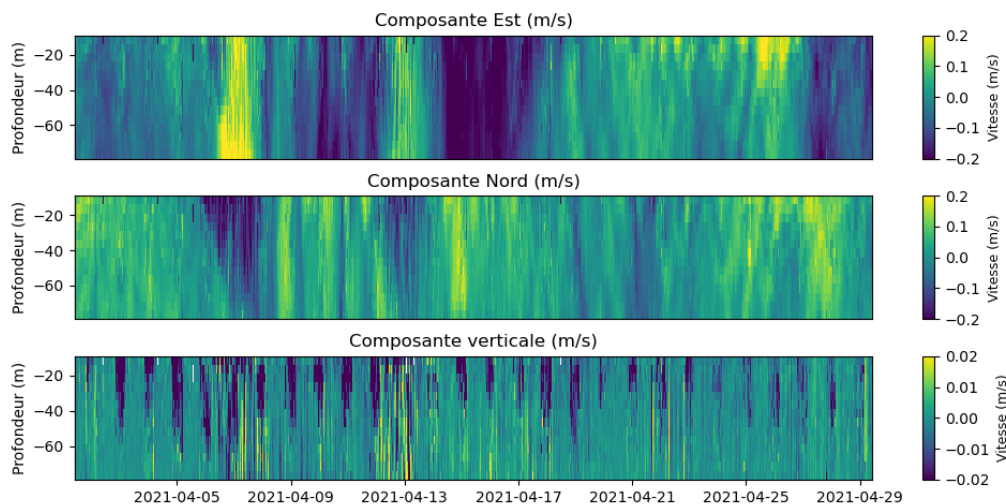


FIGURE 13 – Evolution des 3 composantes de la vitesse au cours du mois d'Avril, Ouest-Est (u, panneau supérieur), Sud-Nord (v, panneau médian), et Nadir-Zénith (w, panneau inférieur).

4 Discussion des résultats

L'application des méthodes d'isolement des épisodes d'anomalies, ainsi que l'analyse de périodes particulières comme celle du mois de juin 2021, a permis de mettre en évidence la présence de phénomènes réguliers et marqués d'anomalie négative de w, composante verticale de la vitesse du courant au mouillage. Ce constat permet de déduire que les épisodes isolés sont des courants descendants. Les phases de courant descendant ainsi détectées sont répartis de manière assez hétérogènes sur l'intégralité de la série. La majorité de ces évènements est détectée aux mois d'Avril et Juin 2021.

Les hypothèses formulées en introduction de ces travaux supposaient que ces courants horizontaux étaient le fait d'intrusions du CN dans le GL. Ces intrusions sont dues au forçage des vents d'Est ou du Mistral [1], vent dominant du bassin rhodanien. Ces suppositions impliquent non seulement des conditions météorologiques et saisonnières favorables, mais aussi une concordance des débuts et fins d'épisode avec la survenue des forçages éoliens, notamment en termes

de déphasage et d'intensité [12]. Les épisodes de vent d'Est se déroulent principalement en journée, en période hivernale, et les épisodes de Mistral sont à l'origine de convection profonde en hiver et d'upwellings en été. Il aurait donc été intéressant de comparer les résultats de l'étude avec les données du modèle météorologique WRF, pour Weather Research and Forecasting, notamment autour de minuit. Cependant, les données en question ont été reçues un jour avant la date de finalisation des travaux, et n'ont pas pu être étudiées pour vérifier la présence de forçages éoliens au cours de ces deux périodes. Dans tous les cas, la mise en relation des données de vitesse verticale avec la vitesse horizontale locale ne permettent pas d'affirmer l'existence d'une corrélation entre ces mouvements d'eau descendants et les intrusions du CN.

Les résultats des présents travaux sont surprenants : ils indiquent que les épisodes de courant descendant surviennent de nuit, entre 19 :00 et 04 :00 GMT le jour suivant, avec une profondeur maximale de plus de 50 mètres. Ces périodes correspondent aux horaires de coucher et de lever du soleil de la période dans la rade de Marseille, avec un coucher à 19 :23 et un lever à 3 :59 (GMT) le 24 Juin 2021, par exemple. Les observations ne font toutefois pas état de migrations ascendantes puis descendantes au lever et au coucher du soleil [9] ; mais seulement d'une zone fixe près de la surface, où la vitesse verticale est descendante. Une hypothèse plausible pouvant expliquer cette observation, avancée par Tarling et al. [16, 17, 18], serait un déclenchement de courants descendants par la dynamique natatoire de certaines espèces de krill, telles *Meganyctiphanes norvegica*. En effet, ces ptéropodes utilisent continuellement leurs membres moteurs pour se maintenir à une profondeur relativement constante. Cependant, ces interprétations ne supposent pas des variations en profondeur des épisodes d'anomalies, d'une semaine à l'autre.

Afin d'interpréter ces fluctuations, une explication également convaincante mentionne la lune, et non le soleil, comme agent causal. Elle tient au fait que ces organismes puissent descendre à des profondeurs plus importantes lors des phases de pleine lune, non pas par compensation de la quantité de lumière reçue, mais par une propriété intrinsèque de leur rythme biologique [2]. Lors d'Avril et Juin 2021, la pleine lune a été atteinte respectivement le vingt-septième et le vingt-quatrième jour du mois, selon le calendrier Lunaire. Ces observations sont en concordance avec les périodes de forte anomalie détectées en Juin. Le cycle lunaire est donc un facteur potentiel d'amplification de l'activité nocturne du krill, ce qui génère des mouvements d'eau descendants plus importants et plus profonds.

Toutefois, bien que la méthode de sélection des anomalies de vitesse verticale se soit avérée très efficace, ces déductions inattendues doivent être modérées par les biais méthodologiques de

cette étude. D'autres travaux et collectes de données doivent être menées dans la zone où se situe JULIO ; pour confirmer ou contrebalancer ces conclusions, et développer des connaissances plus fines sur le sujet.

5 Conclusions

L'objectif de ces travaux était, premièrement, de rechercher des anomalies de vitesse verticale présentes dans la quatrième et dernière série temporelle fournie par l'ADCP du mouillage JULIO, deuxièmement, de les isoler systématiquement, et troisièmement d'en étudier les caractéristiques principales (fréquence, durée, profondeur, intensité) afin d'identifier leur(s) origine(s) et leur(s) mécanisme(s) de déclenchement. Comme ces processus sont de l'ordre du cm/s ou du mm/s, il est difficile de mesurer leur intensité, d'où l'utilité de JULIO dont la position est presque fixe au fond d'une colonne d'eau de 90 mètres.

Afin d'isoler les périodes où la vitesse négative est maximale en valeur absolue, trois valeurs de seuil ont été déterminées pour isoler progressivement les vitesses faisant partie des épisodes concernés. Le bruit résultant de cette première méthode a pu être éliminé à l'aide d'une méthode de sélection de grille et il a ainsi été possible de détecter précisément les phases d'anomalie sur la série. Certains des épisodes d'anomalie s'avèrent être réguliers à des périodes de l'année, comme au mois de Juin, présentant une profondeur maximale de l'ordre de 55m, ainsi qu'une durée moyenne avoisinant 8 heures. Ces phases surviennent la nuit, principalement entre 19 :00 et 04 :00 (GMT) du jour suivant, soit entre 21 :00 et 06 :00 heure locale.

La mise en relation des données de la composante verticale de la vitesse avec les composantes horizontales ne peut pas permettre de supposer une corrélation entre ces courants descendants et les intrusions du CN. Le fait que les périodes d'anomalies soient totalement nocturnes permet en revanche de supposer que ces phénomènes peuvent être liés à des processus biologiques. L'hypothèse avançant des migrations nyctémérales du krill a été de suite avancée, car les horaires de début et de fin d'épisode corroborent le rythme solaire de la période, ainsi que les données de la littérature portant sur le sujet. De plus, celle du lien entre migrations verticales et phases lunaires, vérifiée par la concordance du calendrier lunaire, peut s'interpréter comme une amplification de l'activité du zooplancton, sous l'effet des phases de lune croissante. Ces deux hypothèses sont à privilégier comme déductions principales des résultats de ces travaux. Finalement, ce stage aura permis de détecter des anomalies inhabituelles dans la zone au sud de la rade de Marseille, et permettra à de prochains travaux de préciser les présentes conclusions, afin d'approfondir les connaissances déjà établies.

Références

- [1] Ourmières Y. Barrier N., Petrenko A.A. Strong intrusions of the northern mediterranean current on the eastern gulf of lion : insights from in-situ observations and high resolution numerical modelling. *Ocean Dynamics*, pages 1–15, 2016.
- [2] Wisdoma Daniel W. Benoit-Bird Kelly J., Au Whitlow W. L. Nocturnal light and lunar cycle effects on diel migration of micronekton. *Limnology and Oceanography*, 54(5) :1789–1800.
- [3] Cunci C. Etude des anomalies de vitesses verticales des courants obtenus par adcp de coque durant la campagne fumseck, Mai 2021.
- [4] Millot C. Mesoscale and seasonal variabilities of the circulation in the western mediterranean. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, (15) :179–214, 1991.
- [5] Petrenko A.A. Andrea M. Doglioli Bouffard J. Casella D., Meloni M. Coastal current intrusions from satellite altimetry. *Remote Sens.*, (3686) :12–22, 2020.
- [6] J. Gatti. *Intrusions du Courant Nord Méditerranéen sur la partie est du plateau continental du Golfe du Lion*. PhD thesis, Aix-Marseille 2, 2008.
- [7] Candela J. Mediterranean water and global circulation. In *International geophysics*, volume 77, pages 419–XLVIII. Elsevier, 2001.
- [8] Smith K.S Lévy M., Franks P.J. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nature communications*, 9(1) :1–16, 2018.
- [9] Treguier A.M. Lévy M., Klein P. Impact of sub-mesoscale physics on production and subduction of phytoplankton in an oligotrophic regime. *Journal of marine research*, 59(4) :535–565, 2001.
- [10] Doglioli A.M. Petrenko A.A. Valladeau G. Meloni M., Bouffard J. Toward science-oriented validations of coastal altimetry : Application to the ligurian sea. *Remote Sensing of Environment*, 224 :275–288, 2019.
- [11] B. Millet, C. Pinazo, D. Banaru, R. Pagès, P. Guiart, and I. Pairaud. Unexpected spatial impact of treatment plant discharges induced by episodic hydrodynamic events : Modelling lagrangian transport of fine particles by northern current intrusions in the bays of marseille (france). *Plos one*, 13(4) :e0195257, 2018.
- [12] Wald L. Millot C. The effect of mistral wind on the ligurian current near provence. *Oceanol Acta*, 3(4) :399–402, 1980.

- [13] Marsaleix P. Petrenko A., Leredde Y. Circulation in a stratified and wind-forced gulf of lions, nw mediterranean sea : in-situ and modeling data. *Continental Shelf Res.*, (25) :5–27, 2005.
- [14] Pinazo C. Pairaud I. Ross O.N., Fraysse M. Impact of an intrusion by the northern current on the biogeochemistry in the eastern gulf of lion, nw mediterranean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (170) :1–9, 2016.
- [15] de Verneil A. Pietri A. Della Penna A. Berline L. et al. Rousselet L., Doglioli A.M. Vertical motions and their effects on a biogeochemical tracer in a cyclonic structure finely observed in the ligurian sea. *Journal of Geophysical Research*, (124) :3561–3574, 2019.
- [16] Matthews J. B. L. Tarling G. A., Buchholz F. The effect of lunar eclipse on the vertical migration behaviour of meganyctiphanes norvegica (crustacea : Euphausiacea) in the ligurian sea. *Journal of Plankton Research*, 21(8) :1475–1488, 1999.
- [17] David P. Guerin O. Buchholz F. Tarling G.A., Matthews J.B.L. The swarm dynamics of northern krill (meganyctiphanes norvegica) and pteropods (cavolinia inyexa) during vertical migration in the ligurian sea observed by an acoustic doppler current profiler. *Deep-Sea Research*, 1(48) :1671–1686, 2001.
- [18] Thorpe S.E. Tarling G.A. Oceanic swarms of antarctic krill perform satiation sinking. *Proc. R. Soc, B* 284(20172015), 2017.

Résumé

La composante verticale de la vitesse des courants marins est rarement prise en compte en océanographie, du fait de son amplitude 10 à 1000 fois plus petite qu'à l'horizontale et de ses durées d'apparition courtes. Au sud de la rade de Marseille, cependant, il est intéressant d'étudier les intrusions du courant Nord dans le golfe du Lion conjointement avec les mouvements verticaux. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité d'études de ces processus de fine échelle, avec pour objectif de détecter et de caractériser des anomalies de vitesse verticale négative, en utilisant les dernières données ADCP du mouillage JULIO. Toutefois, la mise en relation de ces informations avec des données complémentaires met finalement en évidence des anomalies nocturnes, et suppose l'action de processus biologiques. Ces événements, d'une durée de 7 à 10 heures, centrés autour de minuit, sont probablement dus à la présence, accentuée par les phases de pleine lune, de zooplancton générant des vitesses verticales négatives.

Mots-Clés : Vitesse verticale, Intrusion, Anomalie, JULIO, zooplancton

Abstract

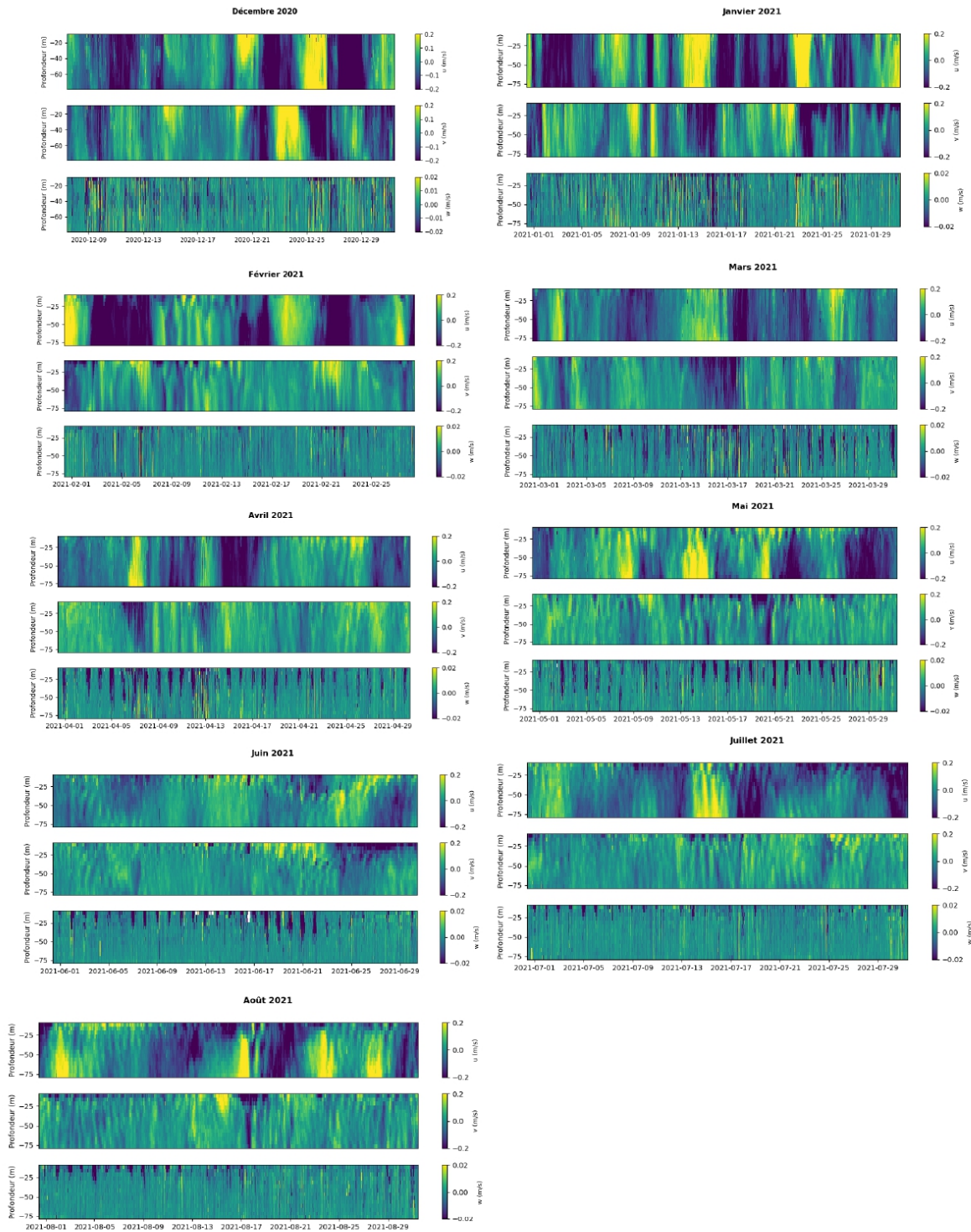
The vertical component of velocity is rarely considered in oceanography, because of its very small magnitude - 10 to 1000 times less than the horizontal ones - and its short durations. Nevertheless, south of Marseille bay, it is interesting to study the northern current intrusions in the Gulf of Lion, along with vertical motions. This work takes place as a continuation of studies on fine-scale processes. It aims to detect and characterize negative vertical velocity anomalies, using JULIO mooring's most recent ADCP data. However, the study of these anomalies with complementary data eventually shows nocturnal anomaly episodes, and assumes the action of biological processes. These events, during 7 to 10 hours, might be due to the presence of zooplankton, initiating vertical velocities, and amplified by full moon phases.

Keywords : Vertical velocity, intrusion, anomaly, JULIO, zooplankton

Annexe I : Programme Python

Cliquer sur ce lien pour accéder au script de ce stage, écrit en python.

Annexe II : évolution de la vitesse du courant pour chaque mois



Annexe III : Tableau des anomalies du 17 au 23 Juin, détectées par algorithme Matlab par Anne Petrenko

4 decembre 2020 (00) au 31 aout 2021 (01)		en jour ordinal >1 si passe minuit		
date beg	date_end	beg_hour	end_hour	dur_hour
'08-Dec-0000 16:00:00'	'08-Dec-0000 23:00:00'	0,6667	0,9583	0,2917
'09-Dec-0000 16:30:00'	'09-Dec-0000 21:30:00'	0,6875	0,8958	0,2083
'15-Jan-0001 18:00:00'	'16-Jan-0001 00:30:00'	0,75	1,0208	0,2708
'06-Mar-0001 23:30:00'	'07-Mar-0001 03:30:00'	0,9792	1,1458	0,1667
'11-Mar-0001 18:00:00'	'12-Mar-0001 03:00:00'	0,75	1,125	0,375
'17-Mar-0001 16:30:00'	'17-Mar-0001 23:30:00'	0,6875	0,9792	0,2917
'25-Mar-0001 00:00:00'	'25-Mar-0001 04:30:00'	1	1,1875	0,1875
'30-Mar-0001 17:00:00'	'31-Mar-0001 04:30:00'	0,7083	1,1875	0,4792
'31-Mar-0001 17:30:00'	'01-Apr-0001 00:30:00'	0,7292	1,0208	0,2917
'02-Apr-0001 18:30:00'	'03-Apr-0001 03:30:00'	0,7708	1,1458	0,375
'03-Apr-0001 19:00:00'	'04-Apr-0001 01:00:00'	0,7917	1,0417	0,25
'04-Apr-0001 17:30:00'	'05-Apr-0001 04:00:00'	0,7292	1,1667	0,4375
'05-Apr-0001 21:00:00'	'06-Apr-0001 03:30:00'	0,875	1,1458	0,2708
'06-Apr-0001 20:00:00'	'07-Apr-0001 02:30:00'	0,8333	1,1042	0,2708
'07-Apr-0001 17:30:00'	'08-Apr-0001 01:00:00'	0,7292	1,0417	0,3125
'08-Apr-0001 20:00:00'	'09-Apr-0001 03:30:00'	0,8333	1,1458	0,3125
'09-Apr-0001 20:00:00'	'10-Apr-0001 02:30:00'	0,8333	1,1042	0,2708
'10-Apr-0001 17:30:00'	'11-Apr-0001 01:30:00'	0,7292	1,0625	0,3333
'11-Apr-0001 17:30:00'	'12-Apr-0001 02:00:00'	0,7292	1,0833	0,3542
'14-Apr-0001 22:30:00'	'15-Apr-0001 03:00:00'	0,9375	1,125	0,1875
'15-Apr-0001 20:00:00'	'16-Apr-0001 01:00:00'	0,8333	1,0417	0,2083
'17-Apr-0001 18:00:00'	'18-Apr-0001 03:30:00'	0,75	1,1458	0,3958
'18-Apr-0001 18:00:00'	'19-Apr-0001 02:30:00'	0,75	1,1042	0,3542
'29-Apr-0001 20:59:59'	'30-Apr-0001 02:29:59'	0,875	1,1042	0,2292
'02-May-0001 17:59:59'	'03-May-0001 02:29:59'	0,75	1,1042	0,3542
'04-May-0001 18:29:59'	'05-May-0001 02:59:59'	0,7708	1,125	0,3542
'13-May-0001 21:59:59'	'14-May-0001 01:59:59'	0,9167	1,0833	0,1667
'14-May-0001 17:59:59'	'15-May-0001 02:29:59'	0,75	1,1042	0,3542
'15-May-0001 19:29:59'	'15-May-0001 23:29:59'	0,8125	0,9792	0,1667
'16-May-0001 17:29:59'	'17-May-0001 03:29:59'	0,7292	1,1458	0,4167
'17-May-0001 17:59:59'	'18-May-0001 00:29:59'	0,75	1,0208	0,2708
'18-May-0001 19:59:59'	'19-May-0001 02:29:59'	0,8333	1,1042	0,2708
'20-May-0001 18:29:59'	'21-May-0001 02:29:59'	0,7708	1,1042	0,3333
'21-May-0001 17:59:59'	'22-May-0001 02:59:59'	0,75	1,125	0,375
'23-May-0001 20:29:59'	'24-May-0001 00:59:59'	0,8542	1,0417	0,1875
'24-May-0001 20:29:59'	'25-May-0001 01:29:59'	0,8542	1,0625	0,2083
'25-May-0001 20:59:59'	'26-May-0001 02:59:59'	0,875	1,125	0,25
'26-May-0001 19:29:59'	'27-May-0001 00:29:59'	0,8125	1,0208	0,2083
'01-Jun-0001 19:29:59'	'01-Jun-0001 23:59:59'	0,8125	1	0,1875
'07-Jun-0001 20:29:59'	'08-Jun-0001 01:29:59'	0,8542	1,0625	0,2083
'17-Jun-0001 18:59:59'	'18-Jun-0001 02:29:59'	0,7917	1,1042	0,3125
'18-Jun-0001 18:29:59'	'19-Jun-0001 02:59:59'	0,7708	1,125	0,3542
'19-Jun-0001 17:59:59'	'20-Jun-0001 02:59:59'	0,75	1,125	0,375
'20-Jun-0001 16:29:59'	'21-Jun-0001 03:29:59'	0,6875	1,1458	0,4583
'21-Jun-0001 18:29:59'	'22-Jun-0001 02:29:59'	0,7708	1,1042	0,3333
'04-Aug-0001 21:29:59'	'05-Aug-0001 02:29:59'	0,8958	1,1042	0,2083