

Mémoire

Auteur : Heuls, Hugo

Promoteur(s) : Gregoire, Marilaure; 16450

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en océanographie, à finalité approfondie

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16292>

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.

Analyse de la modification de l'écoulement dans la couche limite de fond autour de populations de corail noir : Quantification de l'effet canopée.

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



Hugo HEULS

Année académique 2021-2022

Superviseure : Mme. GUIZIEN

Promotrice : Mme. GRÉGOIRE



Remerciements

Je remercie Mme Katell GUIZIEN, pour son aide et les connaissances qu'elle a su partager avec moi. Je la remercie aussi pour la disponibilité et la qualité de son encadrement.

Je désire aussi remercier ma promotrice Mme Marilaure GREGOIRE, qui m'a fait confiance et qui m'a soutenu lors de la réalisation de mon travail.

Je remercie également tous les chercheurs et doctorants du Laboratoire Arago avec qui j'ai eu la chance d'évoluer pendant 4 mois.

Enfin, un grand merci à ma famille, pour leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel.

Table des matières

1	Introduction	2
2	Matériel et méthodes	6
2.1	Expériences menées	6
2.2	Aquadopp Profiler 2MHz	8
2.3	Analyse de marée	10
2.4	Pré-traitement	14
2.4.1	Enroulement de phase et vitesse d'ambiguïté	15
2.4.2	Suppression des profils sans données et burst_lim	16
2.5	Méthodes de détection et de quantification de la hauteur de la canopée	17
2.5.1	Profils logarithmiques	18
2.5.2	Contraintes de Reynolds et énergie cinétique de turbulence	21
2.5.3	Analyse des profils de vitesse verticale	22
3	Résultats	23
3.1	Analyse de sensibilité	23
3.1.1	Choix du paramètre <i>vit_lim</i>	23
3.1.2	Choix du paramètre <i>burst_lim</i>	25
3.1.3	Données filtrées	28
3.2	Contraintes de Reynolds	30
3.3	Analyse logarithmique	31
3.3.1	Analyse de sensibilité aux différents ajustements	31
3.3.2	Hauteurs de déplacement	36
3.4	Analyse des vitesses verticales	39
4	Discussion	42
5	Conclusion	44

Résumé

Le but de ce travail est d'analyser le comportement de la couche limite de l'écoulement au sein de coraux noirs et d'observer ou non la présence d'un effet canopée, représenté par une atténuation du courant ainsi qu'une augmentation de la turbulence. A l'aide d'un courantomètre hydroacoustique (ADCP), des données de vitesses ont été prélevées sur différents sites à Lanzarote. Des ajustements linéaires ont été effectués sur les profils de vitesse horizontale afin de déterminer la hauteur de déplacement de la couche limite au contact de corail noir. La deuxième méthode utilisée se base sur les profils d'énergie cinétique de turbulence afin de quantifier cette hauteur de déplacement. Enfin, les profils de vitesse verticale ont été étudiés pour déterminer les différentes zones d'atténuation du courant dans les forêts de corail noir.

Les résultats indiquent que la couche limite de l'écoulement est déplacée et que le courant au sein des coraux noirs est atténué, signe de la présence d'un effet canopée. Les ajustements et les profils d'énergie cinétique de turbulence nous ont aussi permis de revoir et améliorer la technique d'échantillonnage utilisée à Lanzarote.

Abstract

The aim of this work is to analyse the behaviour of the boundary layer of the flow within black corals and to observe or not the presence of a canopy effect, represented by an attenuation of the current as well as an increase in turbulence. Using an acoustic Doppler current profiler (ADCP), velocity data were collected from different sites in Lanzarote. Linear adjustments were made to the horizontal velocity profiles in order to determine the displacement height of the boundary layer in contact with black coral. The second method used is based on the turbulence kinetic energy (tke) profiles to quantify this displacement height. Finally, vertical velocity profiles were studied to determine the different regions of current attenuation in the black coral forests.

The results indicate that the flow boundary layer is displaced and the current within the black corals is attenuated, indicating the presence of a canopy effect. The adjustments and turbulence kinetic energy profiles also allowed us to review and improve the sampling technique used in Lanzarote.

1 Introduction

Les forêts sont considérées comme étant des écosystèmes complexes et riches, surtout terrestres et offrant d'innombrables habitats à diverses espèces mais également énormément de ressources. Les arbres dominant et composent cet écosystème. Ensemble, ils forment des structures tridimensionnelles complexes qui sont à l'origine de la haute biodiversité que l'on retrouve au sein des forêts. Sous la surface de l'eau, les arbres ne sont plus capables de se développer. Cependant, de nombreuses communautés megabenthiques présentent des similarités avec les forêts terrestres telles que nous les connaissons. Ces communautés sont dominées par des suspensivores sessiles comme des éponges, des coraux ou des bivalves, capables, tout comme les forêts terrestres, de développer des structures tridimensionnelles complexes fournissant un abri pour les autres espèces. De part leurs similarités avec les forêts terrestres mais aussi parce qu'elles sont composées d'animaux, ces communautés megabenthiques forment des écosystèmes que l'on appelle "forêts animales" (Rossi et al., 2017). Ces forêts animales sont diverses et variées, elles peuvent être dominées par une seule espèce ou par de nombreuses espèces de suspensivores différentes. On les retrouve partout, des eaux chaudes des tropiques aux eaux froides des pôles en passant par les eaux des zones tempérées. La distribution et la composition des forêts animales dépendent de différents facteurs tels que la topographie du fond ou les conditions environnementales des masses d'eau avoisinantes. D'autres facteurs comme les peuplements historiques ou la capacité des différentes espèces à résister et se remettre de perturbations influencent aussi la composition et la distribution de ces forêts (BRAMANTI et EDMUNDS, 2016).

Par exemple, dans les tropiques, les eaux sont chaudes et pauvres en nutriment. La lumière est le principal facteur influençant la distribution des espèces. Au sein de ces eaux, peu profondes, les récifs coralliens dominent grâce à leurs relations symbiotiques avec des algues microscopiques leurs fournissant de la nourriture par la photosynthèse. Les récifs coralliens sont essentiellement constitués de scléractinaires (coraux durs) à l'origine de la majeure partie de la structure tridimensionnelle des récifs. On y retrouve également de nombreuses éponges ainsi que des octocoraux. Comme le dit CONNELL, 1978, les récifs coralliens sont parmi les écosystèmes les plus productifs et divers sur Terre.

En mécanique des fluides, tout fluide s'écoulant le long d'une surface immobile telle que le fond d'une rivière ou une plaque plate comprend une couche limite. A cause des contraintes de

cisaillement provoquées par les frottements, la vitesse d'un fluide au contact de cette surface est nulle. La couche limite de l'écoulement est donc la zone, située à proximité de la surface de contact avec le fluide, dans laquelle l'écoulement passe d'une vitesse nulle à la paroi à une vitesse maximum correspondant au flux principal de l'écoulement. La figure 1 décrit cette zone de transition entre le flux principal et la surface en contact avec le fluide. D'amont vers l'aval, on distingue une évolution de la nature de la couche limite avec une augmentation de son épaisseur, d'une couche limite laminaire vers une couche limite turbulente. La nature de couche limite se caractérise par son nombre de Reynolds local au fluide. Ce nombre est adimensionnel et représente le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses du fluide. Un écoulement est considéré turbulent lorsque le nombre de Reynolds dépasse une certaine valeur (environ 300 000-500 000) et laminaire quand le nombre de Reynolds est en deçà de ce seuil. Le nombre de Reynolds se calcule en multipliant la vitesse du fluide U_0 par l'épaisseur de la couche limite H et en divisant par la viscosité cinétique du fluide ν . De plus, même les couches limites des écoulements turbulents présentent une sous-couche dite visqueuse ou laminaire proche de la paroi où les forces visqueuses dominent.

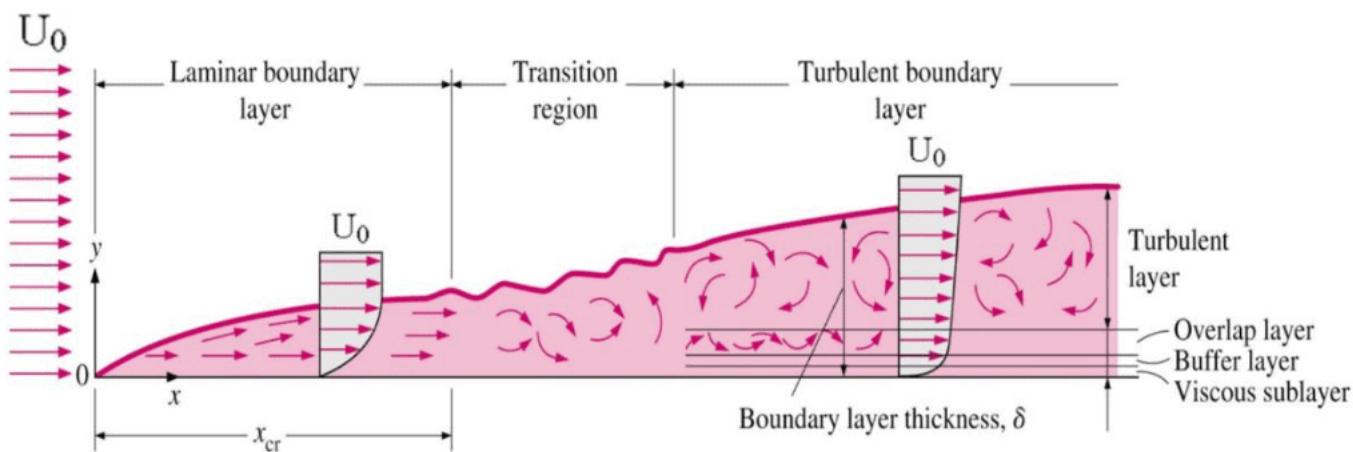


FIGURE 1 – Couche limite d'un écoulement. **Source : Nick CONNOR, 2019**

Lorsqu'un ou plusieurs obstacles sont présents (un caillou sur le lit d'une rivière par exemple) au sein de l'écoulement, ce dernier est perturbé. En effet, la couche limite présente sur le fond de l'écoulement sans obstruction va se déplacer afin de se retrouver à la surface des obstacles perturbant l'écoulement. La zone située en aval de l'obstacle aussi est modifiée. La figure 2 représente le comportement d'un fluide lorsqu'il rencontre un obstacle. On remarque

que derrière l'obstacle, l'écoulement n'est plus comme en amont. De fait, derrière l'obstruction, on va retrouver une zone de turbulence au sein de laquelle de nombreux tourbillons vont se former. L'écoulement dans cette région ne répond plus aux caractéristiques du flux que l'on observe en amont. Malgré cela, en s'éloignant d'une certaine distance de l'obstacle, l'écoulement retrouvera les caractéristiques observées en amont. La taille de la zone de turbulente est liée à la taille de l'obstruction.

Ainsi, à la surface de la Terre les arbres forment des obstacles pour l'air qui s'écoule. Lorsqu'ils sont regroupés, ils forment des forêts impactant d'avantage la dynamique de l'air à proximité.

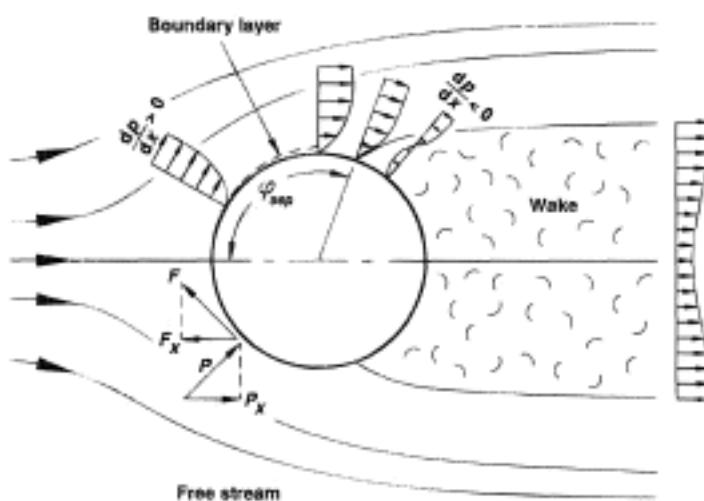


FIGURE 2 – Comportement d'un fluide à proximité d'un obstacle. **BEALE, STEVEN B., 2011**

La figure 3 décrit les modifications de l'écoulement apportées lors de la présence d'un obstacle de hauteur h . On remarque que le profil vertical de vitesse est déplacé vers le haut lorsqu'il rencontre un obstacle (c). Une nouvelle couche apparaît suite à ce déplacement. Elle est située à proximité du fond et est appelée "la sous-couche de rugosité". La présence d'obstacles comme les forêts produit des sillages créant de fortes variations spatiales dans l'écoulement. Ces variations se retrouvent essentiellement dans la sous couche de rugosité. On observe par exemple que la vitesse de l'écoulement y est grandement atténuée. Ceci explique pourquoi au sein des forêts, la vitesse de l'air est atténuée. L'atténuation du courant lors de la présence d'une forêt est appelée "effet canopée". La modification de l'écoulement

à proximité de forêts a de nombreux impacts écologiques, économiques et biogéochimiques. Par exemple, en atténuant les vitesses d'écoulement, les forêts servent d'abris pour de nombreuses espèces. La présence de forêts modifiant le comportement de l'atmosphère influence aussi les échanges entre l'atmosphère et le sédiment. Pouvoir décrire et quantifier ces changements permet de mieux comprendre l'impact des forêts sur l'environnement. C'est pourquoi de nombreuses études (DELON et al., 2000, BELCHER et al., 2012) tentent de quantifier la hauteur de déplacement du profil vertical de vitesse en fonction de la hauteur de l'obstacle. MACDONALD, 2000 a déterminé que la hauteur de déplacement du profil vertical de vitesses lors de la présence d'obstacles s'étendait d'une hauteur comprise entre 2 et 3 fois la hauteur de l'obstacle.

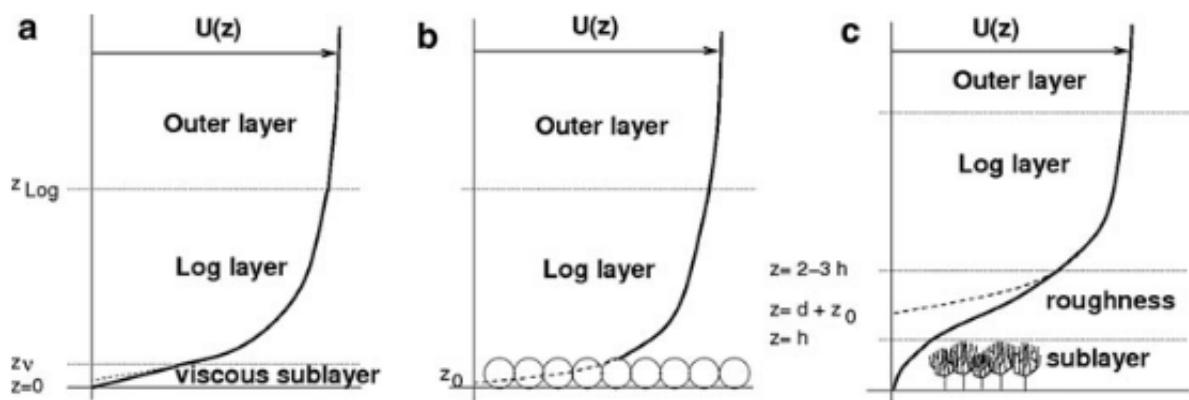


FIGURE 3 – Diagramme schématique du profil vertical de vitesse dans (a) une couche limite à fond lisse, (b) une couche limite à fond rugueux, et (c) une couche limite formée par des obstacles de hauteur h . **Source : GUIZIEN et GHISALBERTI, 2017**

La plupart de ces études ont été effectuées sur des forêts terrestres ou des forêts urbaines, formées par les villes. Bien que le nombre d'études portées sur les forêts animales est moindre, de plus en plus de chercheurs s'intéressent à leur sujet. Comprendre ce qu'il se passe au fond des océans lors de la présence de ces forêts est primordial. En effet, ces forêts animales formées essentiellement de coraux, gorgones et éponges ont énormément d'effets positifs écologiques, économiques, biogéochimiques et autres sur leurs environnements avoisinants.

L'atténuation du courant et les zones de faible turbulence au sein des forêts animales permettent à la matière organique particulaire non dégradée de sédimerter plus facilement

(GUIZIEN et GHISALBERTI, 2017). Comme avec les forêts terrestres, l'atténuation du courant permet à de nombreuses espèces de s'abriter mais permet aussi aux larves de se développer dans un environnement favorable.

Ensuite, les zones de fortes turbulences situées au sommet des forêts animales augmentent les apports en nourriture et composés organiques (SHASHAR et al., 1996).

L'effet canopée explique sans doute que les forêts de coraux font partie des écosystèmes les plus riches du monde. Il s'agit d'un apport économique très important notamment via le tourisme et la pêche.

Enfin, les environnements marins jouent un rôle prépondérant dans le cycle du carbone, notamment dans la séquestration du CO_2 (à l'aide des herbiers, algues et autres végétaux). Plus de 50% du dioxyde de carbone est séquestré dans les environnements marins (Rossi et Rizzo, 2020) dont les forêts animales font aussi partie. A cause des activités humaines, ces environnements sont de plus en plus menacés et leur préservation est primordiale.

Bien que de plus en plus d'études se concentrent sur la modification de l'écoulement à proximité de ces forêts animales (GHISALBERTI et NEPF, 2006, LOWE, 2005, DAVIS et al., 2021) afin de mieux comprendre les différents apports qu'elles fournissent sur l'environnement, seules des hypothèses ont été émises. Aucune étude ne décrit précisément le comportement d'un écoulement à proximité de forêts animales de tailles et de densités différentes.

Le sujet de notre étude vise à améliorer la compréhension actuelle du comportement de l'eau à proximité de forêts animales. En utilisant des données de vitesse d'écoulement, prélevées à Lanzarote dans les îles Canaries, nous allons essayer d'observer et de quantifier un effet canopée (effet d'atténuation du courant) à proximité de coraux noirs. Outre la détection et la quantification de l'atténuation du courant, nous essayerons de répondre à la question suivante : Combien de coraux noirs (en terme de densité et de hauteur) sont nécessaires pour observer un effet canopée ?

2 Matériel et méthodes

2.1 Expériences menées

Les données utilisées dans ce travail de recherche proviennent des expéditions menées en 2021 à proximité de forêts de coraux noirs au niveau des îles Canaries et plus précisément à Lanzarote.

Les données ont été récoltées sur trois sites variant suivant leur géomorphologie (figure 4 et table 1). Le premier site est appelé "Promontoire" (PROM), à environ 50m de profondeur et s'agit d'un plateau en pente douce présent au large de la "Playa Chica" sur lequel de nombreuses agrégations de coraux noirs sont présentes. Le deuxième endroit, situé au nord de ce promontoire est appelé le site "profond" (DEEP) à environ 70m de profondeur et où les données ont été prélevées le long de la pente du talus entourant l'île. Enfin, le dernier point de collecte de données est appelé le site "isolé" (ISO), à environ 60m de profondeur situé à l'est du promontoire, le long de la pente du talus qui entoure l'île. Ces différents endroits sont représentés sur la figure ci-dessous :

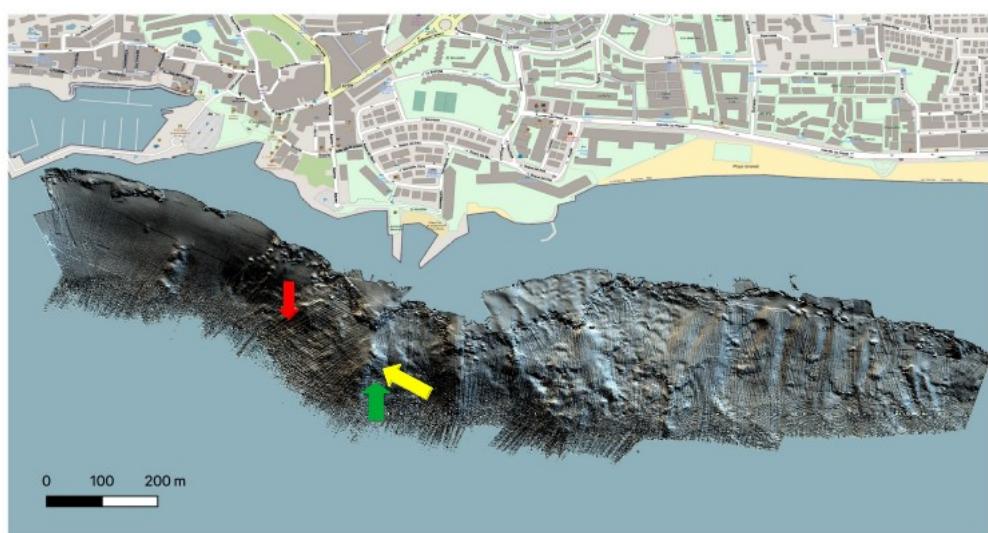


FIGURE 4 – Localisation des différents sites. En rouge le site profond (DEEP), en vert le site "PROM" et en jaune "ISO".

Les données récoltées par l'appareil de mesure permettent d'obtenir des profils verticaux de courant correspondant aux multiples lieux de collecte de données. Les différents sites ont été choisis pour faire varier la densité de colonies de corail noir dans la zone de mesure. Les mesures ont été répétées à différents moments et différentes distances des obstacles dans les sites pour observer la réponse face à différents types d'écoulement. Afin de comparer les résultats obtenus pour ces différents types d'écoulement, lors de deux collectes de données, l'appareil de mesure a été placé sur un fond sableux sans corail noir aux alentours pour avoir un profil vertical de base pouvant nous servir de témoin dans la suite de ce travail.

Les conditions expérimentales ont été notées au cours des expéditions. Grâce à ces dernières, les expériences ont pu être classées en trois différents groupes. Les expériences pour lesquelles l'appareil a simplement été placé sur un fond sableux seront nommées "P + numéro de l'expérience". Une deuxième classe d'expériences regroupe toutes les prises de données effectuées au milieu d'une forêt de coraux noirs. Les expériences de cette classe sont dites "symétriques" car les observations attendues seraient d'avoir un effet canopée visible et analogue, peu importe la direction du courant. Elles seront dénommées "S + numéro de l'expérience". Finalement, la dernière classe est celle des expériences asymétriques. Elle regroupera toutes les mesures faites en lisière de forêt de coraux noirs, pour lesquelles un effet canopée devrait être différent en fonction du sens du courant. Ces dernières seront citées par la lettre "A" suivi d'un numéro. Le tableau 1 regroupe les différentes expériences menées à Lanzarote ainsi que les conditions expérimentales :

Nom	Dates de début et de fin du prélèvement	Profondeur [m]	hauteur colonies [cm]	distance [m]	site
P1	10/02 11h30-11/02 11h17	52	/	/	/
P2	16/02 10h30-17/02 10h35	48	/	/	PROM
S1	08/02 14h00-09/02 11h47	48	70	/	PROM
S2	13/02 12h00-14/02 10h50	66	80-100	/	DEEP
S3	16/04 11h00-17/04 12h20	56-57	80-100	/	ISO
A1	17/02 11h00-19/02 10h50	48	/	/	/
A2	11/04 12h30-12/04 11h50	67	80-100	1.5 et 4	DEEP
A3	13/04 12h15-14/04 11h20	55	/	/	PROM
A4	18/10 14h15-19/10 05h05	48	70-80 et 80-100	0.5 et 4	PROM
A5	20/10 11h45-21/10 11h05	48	60-80 et 90-100	1 et 4	PROM
A6	21/10 11h30-23/10 11h35	48	60-80 et 90-100	4 et 1	PROM
A7	24/10 13h30-25/10 11h20	51	90-110	1	ISO
A8	25/10 11h45-26/10 11h50	51	90-110	11	ISO

TABLE 1 – Expériences menées à Lanzarote. En violet, les expériences sur fond sableux, en vert les expériences "symétriques" et les expériences "asymétriques" en marron. La colonne "Distance" correspond à la distance entre l'appareil de mesure et la colonie.

2.2 Aquadopp Profiler 2MHz

L'appareil utilisé pour la mesure des profils verticaux de courant est l'Aquadopp Profiler 2MHz (voir figure 5). Développé par l'entreprise *Nordek*, il utilise l'effet Doppler ainsi que le décalage de phase entre deux ondes afin de mesurer la vitesse de l'écoulement dans les trois directions de l'espace. L'appareil envoie donc deux ondes à la suite. La différence de phase entre les deux ondes émises est ensuite déterminée pour chaque cellules (afin d'avoir des informations

sur toute la verticale, l'appareil divise la colonne d'eau en couches de même épaisseur, ce sont les cellules) verticale. A l'aide de ces déphasages, la vitesse de l'écoulement peut-être calculée à l'aide de la formule ci-dessous ("Comprehensive Manual", 2017) :

$$V = \frac{\Delta\phi C}{4\pi F_{source} \Delta t} \quad (1)$$

(avec V la vitesse de l'écoulement, C la vitesse du son dans l'eau, F_{source} la fréquence de l'onde émise, Δt l'intervalle de temps entre l'émission de deux ondes consécutives et $\Delta\phi$ la différence de phase).

Le dispositif possède trois capteurs utilisant de grands transducteurs afin d'obtenir des faisceaux acoustiques étroits. Le fait d'avoir trois capteurs permet à l'Aquadopp de reconstruire les profils de vitesse de chaque direction de l'espace. D'autres capteurs, situés sur l'appareil sont utilisés et récoltent des informations supplémentaires telles que la pression hydrostatique ainsi que la température de l'eau. Enfin, à l'aide d'un magnétomètre et de capteurs d'inclinaison, l'instrument enregistre sa position continuellement (angles de rotations autour des trois axes principaux) lors des expériences. Ces différents angles sont appelés heading, pitch et roll (ou cap, tangage et roulis).



FIGURE 5 – Aquadopp Profiler 2MHz.

La collecte de données peut être paramétrée par l'utilisateur de l'appareil. En l'occurrence, toutes les 15 minutes, après sa mise à l'eau, l'Aquadopp récoltait des données sur un intervalle

de temps de 2 min 30 sec ou de 5 minutes en fonction du nombre de mesures à effectuer à une fréquence de $2Hz$ (soit 2 échantillons par seconde). En d'autres termes, le dispositif collectait des rafales de 2 min 30 sec à 5 min de données toutes les 15 minutes après son immersion. La durée d'une collecte de données durait environ 24h à chaque site.

Toutes les données prélevées sont stockées dans des fichiers texte (.txt) qui seront traités et analysés à l'aide de routines Matlab.

2.3 Analyse de marée

Tout au long de son déploiement, à l'aide de son capteur de pression, l'Aquadopp mesurait et enregistrait la hauteur d'eau présente au dessus de lui. La figure 6 regroupe les séries temporelles de pression ainsi que les ajustements effectués pour chacune des expériences menées à Lanzarote. Les graphiques présentent des allures périodiques avec une période d'environ douze heures. De telles séries temporelles oscillants d'une amplitude aux alentours d'un mètre aux points de mesure indiquent un signal de marée à Lanzarote.

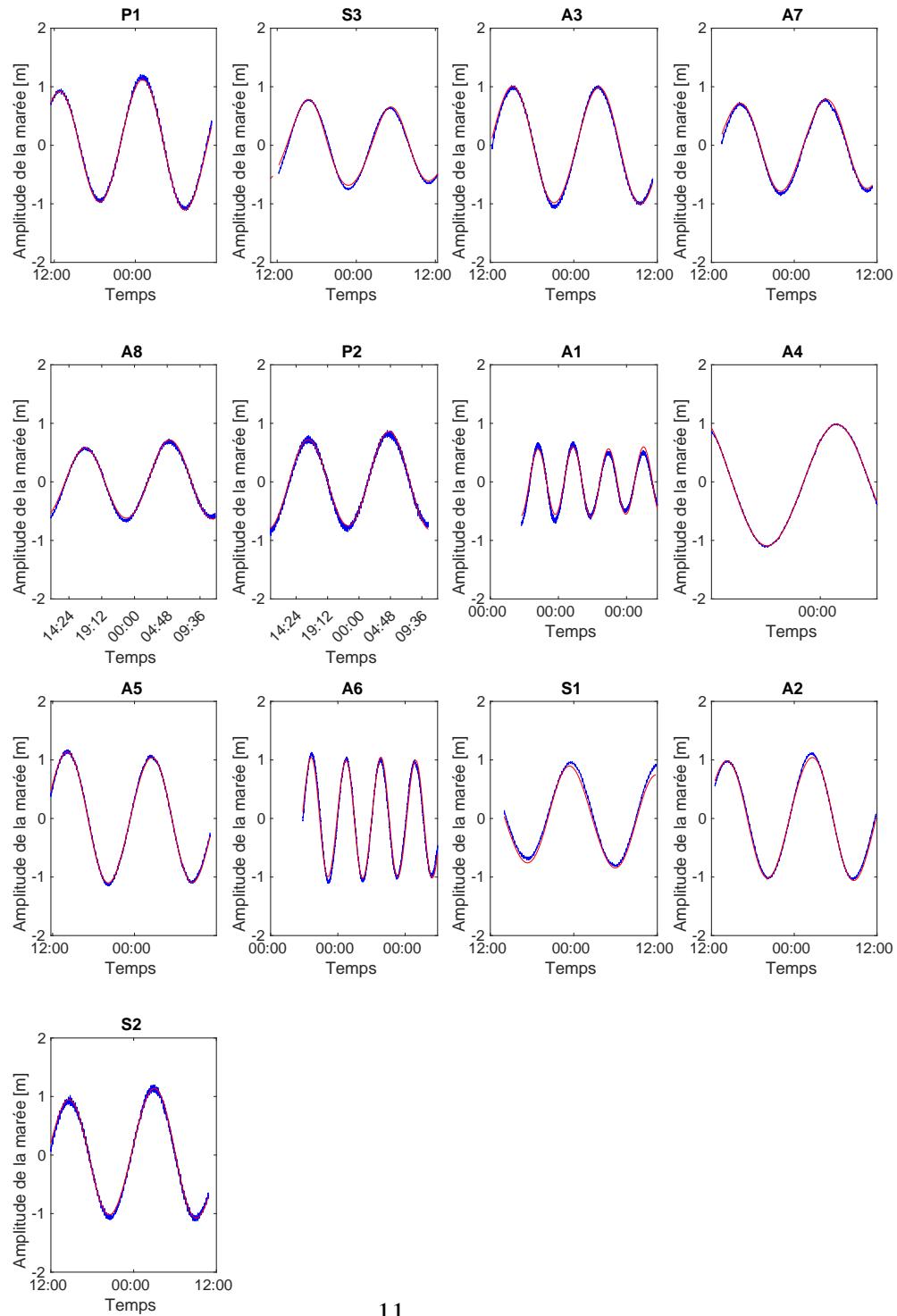


FIGURE 6 – Séries temporelles de pression des expériences faites à Lanzarote.

L'analyse harmonique est une méthode permettant de calculer les amplitudes et phases d'une série d'ondes de périodes ajustant un signal périodique. A l'aide de cette méthode d'analyse les séries temporelles de pression sont décomposées selon les trois composantes principales de la marée, les ondes $K1$ diurne, $M2$ semi-diurne et $M4$ quart-diurne (ROBERT H. STEWART, 2008, Table 2). La même décomposition a été effectuée en utilisant la composante semi-diurne $S2$ au lieu de la $M2$ (Table 3). Après application d'un filtre de Butterworth (filtre passe-bas) sur les signaux temporels, les hautes fréquences sont retirées et les signaux lissés. Ensuite les signaux sont décomposés selon les trois composantes citées précédemment. L'analyse harmonique permet d'obtenir les amplitudes des différentes ondes composant le signal de base. Les tableaux ci-dessous reprennent les valeurs d'amplitude de chaque composante de chacune des expériences. La dernière colonne correspond à l'erreur quadratique moyenne (ou RMSE) entre la série temporelle de base et le signal composé des 3 ondes de marées principales. La RMSE indique la qualité de l'ajustement, son unité est en mètres et la formule permettant de la calculer est la suivante (JAMES MOODY, 2019) :

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Où $x_i = x(t_i)$ représente la série temporelle mesurée, $\hat{x}(t_i) = \hat{x}_i = A_{K1} \cos(\omega_1 t_i) + A_{S2/M2} \cos(\omega_2 t_i) + A_{M4} \cos(\omega_3 t_i)$ le signal ajusté à l'aide des 3 composantes de la marée.

Les tables 2 et 3 indiquent que la composante dominant la marée à Lanzarote est la composante semi-diurne. Pour chaque expérience, que ce soit la composante $S2$ ou $M2$, il s'agit de celle ayant l'amplitude la plus forte, variant entre 1,1m et 55 centimètres. De telles variations de l'amplitude de la marée permettent d'identifier les expériences réalisées lors des marées de vives-eaux et de mortes-eaux. Les expériences dont l'amplitude de la composante $M2$ ou $S2$ est inférieure à 80 centimètres ont été réalisée lors d'une marée de mortes-eaux. Les autres expériences ($P1, S1, S2, A2, A3, A4, A5 et A6$) ont été effectuées lors d'un phénomène de vives-eaux.

Ensuite, afin d'essayer d'estimer laquelle des deux combinaisons est la plus fiable, une analyse de l'erreur quadratique moyenne est effectuée. Cependant, en comparant les résultats obtenus, aucune différence significative n'est remarquable. Les valeurs de RMSE sont plus ou moins identiques en fonction des expériences. Pour la suite de ce travail, nous retenons

les composantes de marée principales $K2$, $M2$ et $M4$ décrites par ROBERT H. STEWART, 2008.

Expérience	amplitude de la composante K1 [m]	M2 [m]	M4 [m]	RMSE
P1	0.1193	1.0265	0.0131	0.03292
P2	0.07592	0.7872	0.00683	0.0379
S1	0.08586	0.8061	0.02773	0.07284
S2	0.10164	1.03994	0.03454	0.04016
S3	0.07474	0.679	0.04393	0.087
A1	0.0292	0.5791	0.00344	0.0591
A2	0.0355	1.0233	0.0361	0.0423
A3	0.0132	0.9946	0.0329	0.0434
A4	0.10764	1.0551	0.0192	0.01531
A5	0.04762	1.0922	0.0344	0.0254
A6	0.0269	1.0131	0.0328	0.07692
A7	0.0411	0.752	0.0339	0.04651
A8	0.06793	0.635	0.0146	0.03014

TABLE 2 – Tableau descriptif des amplitudes des différentes composantes de la marée (K1, M2 et M4).

Expérience	amplitude de la composante K1 [m]	S2 [m]	M4 [m]	RMSE [m]
P1	0.1816	1.0259	0.0307	0.0502
P2	0.07869	0.7728	0.0082	0.03625
S1	0.15058	0.7962	0.03137	0.06279
S2	0.1261	1.05155	0.0101	0.0446
S3	0.1088	0.6772	0.0241	0.0851
A1	0.03585	0.5593	0.007	0.0953
A2	0.08552	1.03406	0.01177	0.0314
A3	0.0431	1.0061	0.0128	0.03228
A4	0.1267	0.9912	0.0306	0.01076
A5	0.0394	1.1066	0.0101	0.05487
A6	0.0386	1.0209	0.0109	0.1071
A7	0.0850	0.7519	0.0263	0.0392
A8	0.0858	0.6272	0.0048	0.0279

TABLE 3 – Tableau descriptif des amplitudes des différentes composantes de la marée (K1, S2 et M4). En rose, les expériences de marée de vives-eaux et en orange celles de mortes-eaux. La RMSE est l'erreur moyennée des carrées entre le signal de base et le signal comprenant uniquement les 3 composantes de la marée.

2.4 Pré-traitement

Les données brutes récoltées par l'Aquadopp ont été pré-traitées avant de pouvoir être utilisées pour la quantification de l'effet canopée. Ce pré-traitement a été effectué à l'aide de routines Matlab. Leur objectif est de vérifier qu'aucune perturbation ou incohérence ne soit présente dans l'ensemble des échantillons. Autrement dit, le pré-traitement effectue un tri des données brutes en ne prenant pas en compte les données incomplètes ou faussées et permet donc, par la suite, de n'utiliser que les données pertinentes.

Lors de la collecte des données, en plus des vitesses de l'écoulement, l'appareil mesurait des taux de corrélation. Ces derniers sont définis comme étant le pourcentage de similarité entre deux échos d'impulsions mesurés. Cette similarité est mesurée pour toutes les données obtenues et ce, sur chacun des trois faisceaux de l'Aquadopp. Les faisceaux mesurent tous la vitesse de l'écoulement. Le taux de corrélation des données récoltées par ces faisceaux devrait être significative. Un important taux de corrélation signifie qu'il y a une certitude que le système ait mesuré les deux impulsions qu'il a initialement envoyées et que le déphasage déterminé (à l'aide de l'effet Doppler) est valide.

La première partie du traitement des données consiste à appliquer un seuil de corrélation minimal (corr_lim) aux trois faisceaux simultanément. Si les taux de corrélation de ces faisceaux sont en-deçà de la limite alors les données de vitesse correspondantes ne sont pas conservées. La valeur de corrélation limite appliquée à nos données est celle conseillée par le constructeur de l'appareil, c'est-à-dire 60%.

2.4.1 Enroulement de phase et vitesse d'ambiguïté

Comme décrit dans la section 2.2, le dispositif d'échantillonage utilisé se sert du déphasage entre l'onde émise et l'onde réfléchie afin de mesurer les vitesses de l'écoulement, comme indiqué par l'équation 1.

Si la valeur absolue de $\Delta\phi$ du signal réfléchi est supérieure à π , un enroulement de phase se produit. Ce phénomène est observable sur les courbes temporelles de vitesses mesurées comme étant un changement brusque et inhabituel de l'amplitude, souvent accompagné d'un changement de signe. Ces sauts de vitesse, sont appelées les vitesses d'ambiguïté. Sur la figure 7, les enroulements de phase sont représentés, en rouge, par ces pics dans la série temporelle de vitesse.

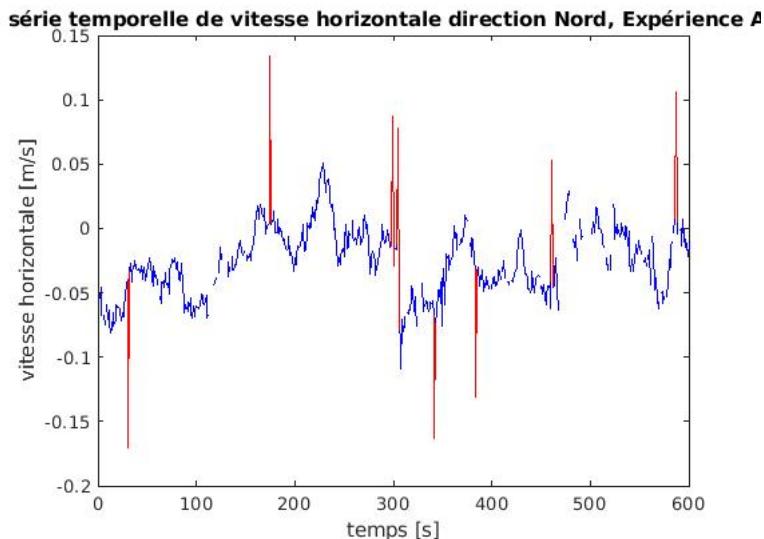


FIGURE 7 – Série temporelle de la vitesse de l'écoulement avec des enroulements de phase visibles (en rouge) pour l'expérience A1.

Afin de ne pas prendre en considération ces sauts de vitesse pouvant perturber les séries temporelles, un deuxième filtre est appliqué aux données. Les séries de vitesse temporelles sont lissées à l'aide d'une moyenne glissante autour de 7 points. Ce lissage permet de mettre en évidence, sur les séries de base des sauts de vitesse brusques et importants, dépassant les variations de vitesse attendues dans l'écoulement qui seront considérées comme des vitesses d'ambiguïté à filtrer. Ainsi, les séries lissées sont soustraites des séries temporelles brutes et, tous les points où la différence est supérieure à un seuil de vitesse limite (*vit_lim*) sont retirés des données. Cependant, la valeur de seuil de vitesse limite à appliquer n'est pas connue. Le choix de la résolution verticale dz , de la portée de mesure H et de la cadence d'échantillonnage constraint la valeur maximum de vitesse mesurable sans ambiguïté et donc la vitesse d'ambiguïté. Dans les expériences, les mesures sont réalisées sur 3 m avec un $dz = 3 \text{ cm}$ et une fréquence $f = 2Hz$. En appliquant ces paramètres au dispositif de récolte de données, la gamme de vitesses mesurables était de 0,3 m/s pour les vitesses horizontales et 0,13 m/s pour les vitesses verticales. Ces gammes de vitesse ont parfois été dépassées dans certaines expériences, conduisant à des erreurs de mesure avec enroulement de phase variable. Afin de les détecter, le seuil *vit_lim* a été varié de 0.01 à 0.1 m/s et le nombre de données perdu pour chaque valeur de seuil relevé.

2.4.2 Suppression des profils sans données et *burst_lim*

Un dernier critère de filtrage est appliqué après avoir retiré les données non corrélées et les données aberrantes. Lorsque qu'une donnée aberrante ou non corrélée est détectée à l'aide des deux derniers filtres décrits, celle-ci voit sa valeur, de base numérique, être attribuée à un "NaN" (acronyme de "Not a Number" ou "Non numérique" en français). Le retrait de données d'une série de données peut altérer les statistiques de cette série, un filtre pour éliminer les rafales dont les statistiques pourraient être altérées a été recherché. Ainsi, lorsque le pourcentage de données valides par rafale est inférieur au seuil *burst_lim*, la rafale est supprimée.

Afin de déterminer la valeur du seuil *burst_lim*, une analyse de sensibilité a été effectuée sur la moyenne de vitesse de deux séries temporelles complètes. Une série temporelle complète est représentée par une rafale de données ne possédant aucune variable *NaN*. Pour l'analyse de sensibilité, nous avons sélectionné un profil "fort" pour lequel les vitesses

d'écoulement sont importantes et un profil "faible" avec des vitesses moindres.

L'étude a été faite pour des valeurs de *burst_lim* comprises entre 50 et 100%. Pour chacune de ces valeurs, une partie aléatoire des données a été supprimée afin de simuler l'application d'un *burst_lim*. Cette suppression a été effectuée 50 fois par valeur de *burst_lim* afin d'avoir plusieurs situations différentes. Ensuite, sur base des rafales filtrées (avec les données supprimées) la moyenne de vitesse a été déterminée pour chaque simulation.

2.5 Méthodes de détection et de quantification de la hauteur de la canopée

Lorsqu'un fluide coule le long d'une surface plane, les profils verticaux d'énergie turbulente présentent une zone d'atténuation de l'énergie à proximité du fond. Cette zone d'atténuation correspond à la région du profil vertical de vitesse où celle-ci diminue plus on se rapproche du fond. Quand un obstacle vient perturber l'écoulement, les profils d'énergie cinétique et de vitesse sont décalés vers le haut d'une certaine hauteur. C'est ce qui est représenté sur la figure 8 sur laquelle le profil de vitesse est mis en parallèle avec les contraintes de Reynolds (Tau) et le profil vertical d'énergie cinétique de turbulence (TKE). Sur les graphes, on constate que la hauteur du maximum d'énergie coïncide avec celle où la vitesse de l'écoulement a été atténuée.

Afin de déterminer cette hauteur, représentée en bleue sur la figure 8, trois méthodes différentes sont utilisées. Avec ces méthodes nous obtiendrons trois résultats correspondant à la même hauteur, la hauteur de la canopée.

La première méthode vise à localiser la couche logarithmique de l'écoulement pour chaque expérience afin d'y déterminer la hauteur de déplacement du profil. En effectuant un ajustement linéaire du profil semi-logarithmique, on obtient la droite orange de la figure 8. Les deux autres méthodes consistent à simplement localiser le maximum d'énergie cinétique de turbulence et celui du profil des contraintes de Reynolds.

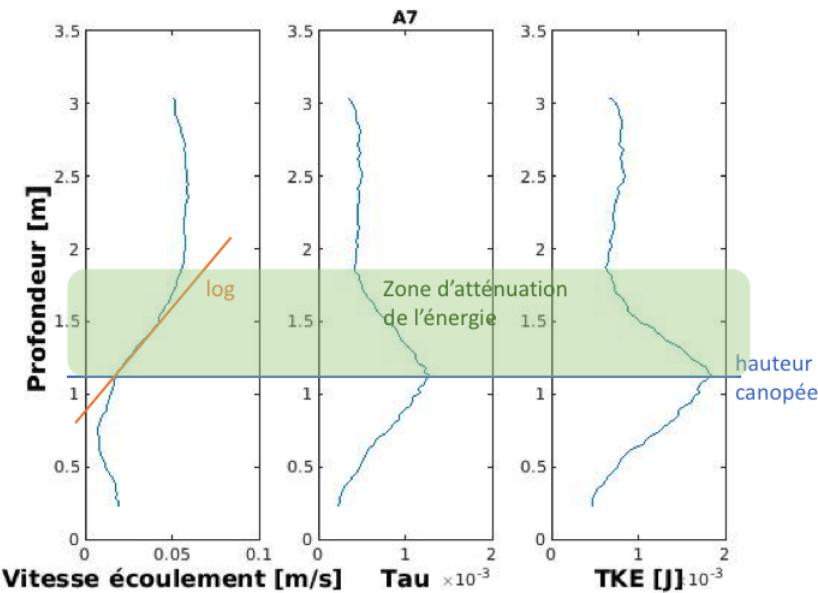


FIGURE 8 – Exemple de profil vertical de vitesse, contraintes de Reynolds et de TKE de l’expérience A7.

2.5.1 Profils logarithmiques

Lorsqu'un fluide s'écoule sur une surface plane et rugueuse, sans obstacle, celui-ci présente un profil vertical similaire à ce qui est représenté à la figure 9(b). Une partie de ce profil a un comportement logarithmique. Cette zone logarithmique de l'écoulement peut-être représentée comme suit (GUIZIEN et GHISALBERTI, 2017) :

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

Où $U(z)$ est la vitesse de l'écoulement, u_* la vitesse de frottement, z_0 la rugosité du fond, z la profondeur et κ la constante de Von Kàrmàn.

Quand un obstacle, comme une forêt de coraux, est présent sur le fond de l'écoulement, le profil de vitesse vertical est alors décalé vers le haut d'une hauteur d proportionnelle à la hauteur de l'obstacle. Cette hauteur est appelée hauteur de déplacement. C'est ce qui est représenté sur le profil de droite de la figure 9. Dans ce cas, l'expression analytique de la zone logarithmique est modifiée et l'équation 3 devient :

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{z}{z_0 + d}\right) \quad (4)$$

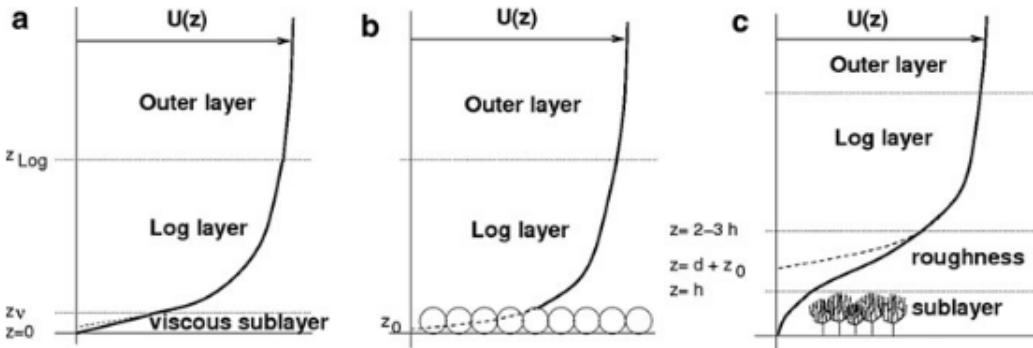


FIGURE 9 – Diagramme schématique du profil vertical de vitesse dans (a) une couche limite à fond lisse, (b) une couche limite à fond rugueux, et (c) une couche limite formée par des obstacles de hauteur h . **Source :** (GUIZIEN et GHISALBERTI, 2017)

L'objectif de cette méthode est de localiser et de déterminer la zone logarithmique des profils verticaux des différentes expériences. Pour ce faire, tous ces profils sont représentés en utilisant une échelle logarithmique sur l'axe vertical des profondeurs. En effectuant cette transformation semi-logarithmique, la zone logarithmique peut-être identifiée dans le profil vertical de vitesse par une zone linéaire. En effectuant une régression linéaire sur cette zone, on peut calculer l'ordonnée à l'origine du profil et sa pente, afin d'en déduire la hauteur de déplacement. Il a fallu déterminer la région sur laquelle effectuer ces ajustements. Pour ce faire, nous avons essayé de comparer les résultats obtenus lorsque l'on effectue les ajustements manuellement et quand on choisit une zone d'ajustement fixe. Trois intervalles différents ont été comparés à l'ajustement manuel sur 11 profils de l'expérience S1. Le premier ajustement a été effectué entre 0.605 m et 1.67 m du fond. Ensuite, un intervalle compris entre 0.82 m et 1.5 m du fond a été utilisé pour ajuster les profils verticaux. Le dernier intervalle d'ajustement testé se situe entre 1 m et 1.5 m du fond. Le choix de cet intervalle est décrit dans la section 3.3.1. Ensuite, lorsque la région du profil sur laquelle on effectue l'ajustement est définie, un seuil est appliqué sur les coefficients de détermination linéaire de chaque ajustement de façon à ne garder que les profils et droites ajustées pertinents.

Analytiquement, les ajustements se présentent sous la forme :

$$U(z) = \underbrace{\frac{u_*}{\kappa} \log(z)}_{\text{pente} = A} - \underbrace{\frac{u_*}{\kappa} \log(z_0 + d)}_{\text{ordonnée à l'origine} = B} \quad (5)$$

La régression linéaire permet d'obtenir les valeurs de pente ainsi que l'ordonnée à l'origine de chaque ajustement. La figure 10 ci-dessous, décrit un profil semi-logarithmique de l'écoulement ainsi que son ajustement. L'intersection entre l'axe vertical et la droite de l'ajustement coïncide avec la hauteur $z_0 + d$, en coordonnées logarithmiques. Cette hauteur peut être définie comme étant la hauteur de déplacement car $z_0 \ll d$. De manière analytique, l'intersection entre la droite et l'axe y se calcule en faisant le rapport entre l'ordonnée à l'origine et la pente de l'ajustement de l'équation 5 (GUIHEN et al., 2013) :

$$\begin{aligned} -\frac{B}{A} &= -\frac{\frac{u_*}{\kappa} \log(z_0 + d)}{\frac{u_*}{\kappa}} \\ &= \log(z_0 + d) \end{aligned} \quad (6)$$

En calculant l'exponentielle du résultat obtenu à l'équation 6, la hauteur de déplacement est déterminée.

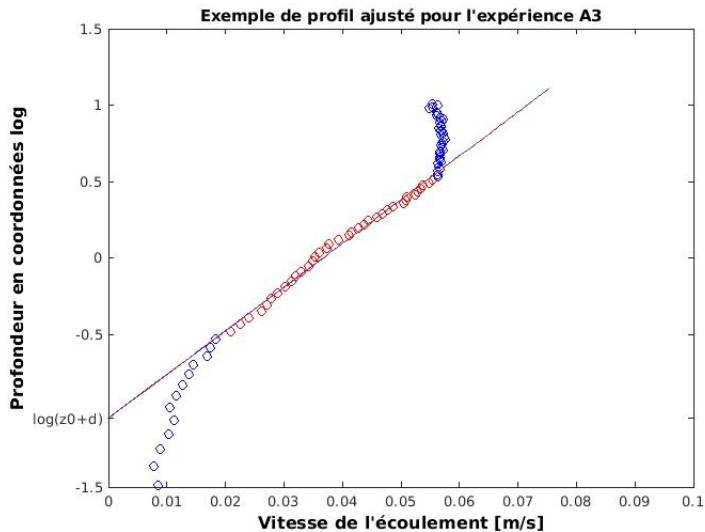


FIGURE 10 – Ajustement d'un profil semi-logarithmique de l'expérience A3.

2.5.2 Contraintes de Reynolds et énergie cinétique de turbulence

Le champ de vitesse d'un écoulement peut être séparé en deux parties en utilisant la décomposition de Reynolds. La première partie comprend un régime à basse fréquence variant peu au cours du temps et de contribution moyenne. Cette partie correspond au résultat obtenu si l'on applique un filtre passe-bas au champ de vitesse initial. La deuxième partie quant à elle, représente les turbulences du champ de vitesse. Ces turbulences fluctuent autour du signal moyen et ont une contribution moyenne nulle. La décomposition de Reynolds s'exprime comme suit (ALFONSI, 2009) :

$$u(z) = \bar{u}(z) + u'(z) \quad (7)$$

Où $u(z)$ correspond au profil vertical de vitesse, $\bar{u}(z)$ est le profil de vitesse moyenné et $u'(z)$ représente les fluctuations de vitesse autour du profil moyenné.

En appliquant cette décomposition pour les champs de vitesse de chaque composante spatiale et en isolant le terme de turbulence de l'équation 7, les termes $u'(z)$ (composante Nord), $v'(z)$ (composante Est) et $w'(z)$ (composante verticale) sont obtenus. Les équations 8 (ALFONSI, 2009) et 9 (GEORGE, 2013) décrivent comment calculer les contraintes de Reynolds (τ) ainsi que l'énergie cinétique de turbulence (tke) à l'aide de ces derniers.

$$\tau = \overline{u'(z)w'(z)} + \overline{v'(z)w'(z)} \quad (8)$$

$$tke = \frac{1}{2}(\overline{u'(z)}^2 + \overline{v'(z)}^2 + \overline{w'(z)}^2) \quad (9)$$

Les contraintes de Reynolds sont liées à l'agitation turbulente. Quand un fluide rencontre un obstacle, la turbulence de l'écoulement augmente en aval de l'obstacle. L'écoulement se comporte de la même manière avec les forêts de coraux. En effet, la présence d'une de ces forêts atténue l'écoulement de l'eau en dessous de la canopée (comme représenté sur le profil vertical de l'écoulement de la figure 9(c)). La turbulence en dessous de ces forêts est donc importante.

L'énergie turbulente cinétique est l'énergie cinétique moyenne par unité de masse associée aux tourbillons d'un écoulement turbulent. Comme la turbulence est maximum au sommet de la canopée, l'énergie cinétique de turbulence est elle aussi maximum à cet endroit.

En mettant le profil vertical de l'écoulement en parallèle avec les contraintes de Reynolds et l'énergie cinétique de turbulence en fonction de la profondeur (figure 8), un maximum devrait être visible au niveau du point d'inflexion du profil vertical de l'écoulement, situé à proximité du sommet de la canopée (DAVIS et al., 2021, RAUPACH et al., 1996, BÖHM et al., 2013).

Le but de cette méthode est donc de déterminer la hauteur de la canopée en recherchant la position de ce pic dans les profils verticaux de contraintes de Reynolds et d'énergie cinétique de turbulence.

2.5.3 Analyse des profils de vitesse verticale

La dernière méthode de quantification de la hauteur de l'effet canopée est spécifique aux écoulements de marée dans lesquels la vitesse, tant horizontale que verticale, présente des oscillations au cours d'un cycle de marée. En traçant tous les profils d'une même expérience, comme sur le graphique de gauche de la figure 11, à partir d'une certaine profondeur, on observe que les oscillations de la vitesse sont atténuées dans la canopée. L'objectif de cette méthode est de localiser les différentes zones verticales pour lesquelles l'amplitude de l'oscillation des vitesses verticales de la marée a été atténue de 50% et de 80% par rapport à l'amplitude de l'oscillation des vitesses verticales de surface.

Pour ce faire, les écarts-types des vitesses verticales pour chaque niveau de profondeur sont normalisés en fonction de l'écart-type des vitesses verticales à la surface. Un exemple est représenté sur le graphique de droite de la figure 11. Les différentes zones où le courant vertical est atténue de 50%, 60% et 80% sont ensuite déterminées numériquement à l'aide des profils de l'écart-type.

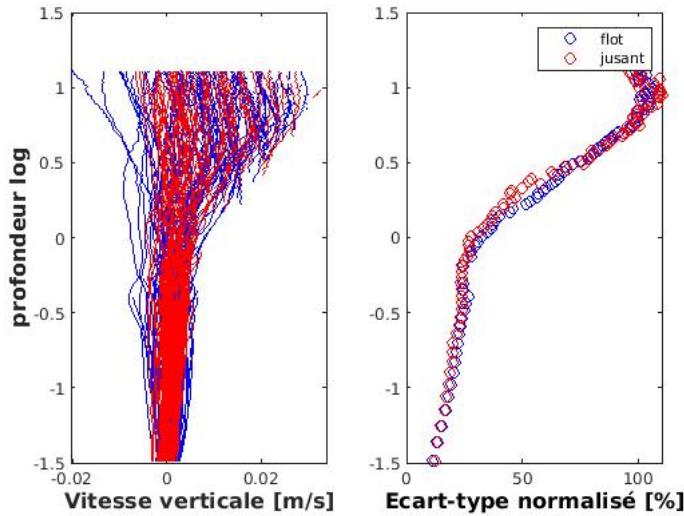


FIGURE 11 – Profils verticaux de l’expérience A1. A gauche, profil de vitesses verticales. A droite, écarts-types des vitesses verticales en fonction de la profondeur normalisés à l’aide de l’écart-type à la surface.

3 Résultats

3.1 Analyse de sensibilité

3.1.1 Choix du paramètre *vit_lim*

L’analyse de la sensibilité à la vitesse limite a été réalisée pour différentes valeurs de *vit_lim*. Toutes ces valeurs de paramètre ont été appliquées sur chacune des expériences afin d’obtenir des informations sur la valeur la plus pertinente à utiliser pour le traitement des signaux.

La figure 12 montre, pour chaque expérience, la distribution en fréquence cumulée du pourcentage de données rejetées par rafale (ou burst) pour des valeurs de seuil de vitesse d’ambiguïté variant de 0.01 à 0.1 m/s .

Sur ces différents diagrammes, on constate que pour des valeurs de seuil de vitesse d’ambiguïté supérieures ou égales à 0.03 m/s , le pourcentage de données éliminées par rafale ne varie presque pas. Dans la plupart des expériences, la proportion de valeurs rejetées par

rafale est faible. En effet, dans la moitié des bursts, la proportion de valeurs rejetées reste inférieure à 5 ou 10%. On observe aussi que lorsque l'on utilise une valeur de seuil de la vitesse d'ambiguïté faible, la proportion de valeurs éliminées par burst est plus importante. En effet, pour une valeur seuil de $0.01 m/s$, 40 à 50% des rafales contiennent 20% ou moins de données rejetées. Cette valeur du seuil de vitesse d'ambiguïté est trop limitante. En appliquant cette valeur, les vitesses de turbulence, aussi représentées par une variation plus ou moins importante autour du signal de vitesse moyen, risquent d'être filtrées en plus de ces vitesses d'ambiguïté.

Cependant, pour les expériences A4, A5 et A1, et dans une moindre mesure S1, les profils ne présentent pas la même allure. La sensibilité au seuil de vitesse limite est plus importante que pour les autres expériences. On constate que les courbes jaunes, bleues et oranges sont beaucoup plus espacées et ont des allures différentes contrairement aux autres expériences où les trois courbes sont presque confondues. L'analyse de la sensibilité des expériences au filtre traitant les vitesses d'ambiguïté nous a permis d'effectuer un premier tri en rejetant les trois expériences (A1, A4 et A5) dont la sensibilité au seuil de vitesse limite appliquée est importante. Ces différentes expériences ont été retirées car la quantité de données retirées varie avec la valeur du seuil de *vit_lim*. Cela signifie que, pour ces expériences, on retire des données de turbulence, représentées aussi par des pics (plus faibles que ceux des vitesses d'ambiguïté) de variation dans les séries temporelles de vitesse. Ces données de turbulence, pour une valeur de *vit_lim* plus importante (par exemple 0.05 ou $0.1 m/s$) ne sont plus retirées. Tandis que pour les autres expériences, pour lesquelles la quantité de données retirées ne varie pas pour des valeurs de *vit_lim* comprises entre 0.03 et $0.1 m/s$, seules les vitesses d'ambiguïté sont enlevées.

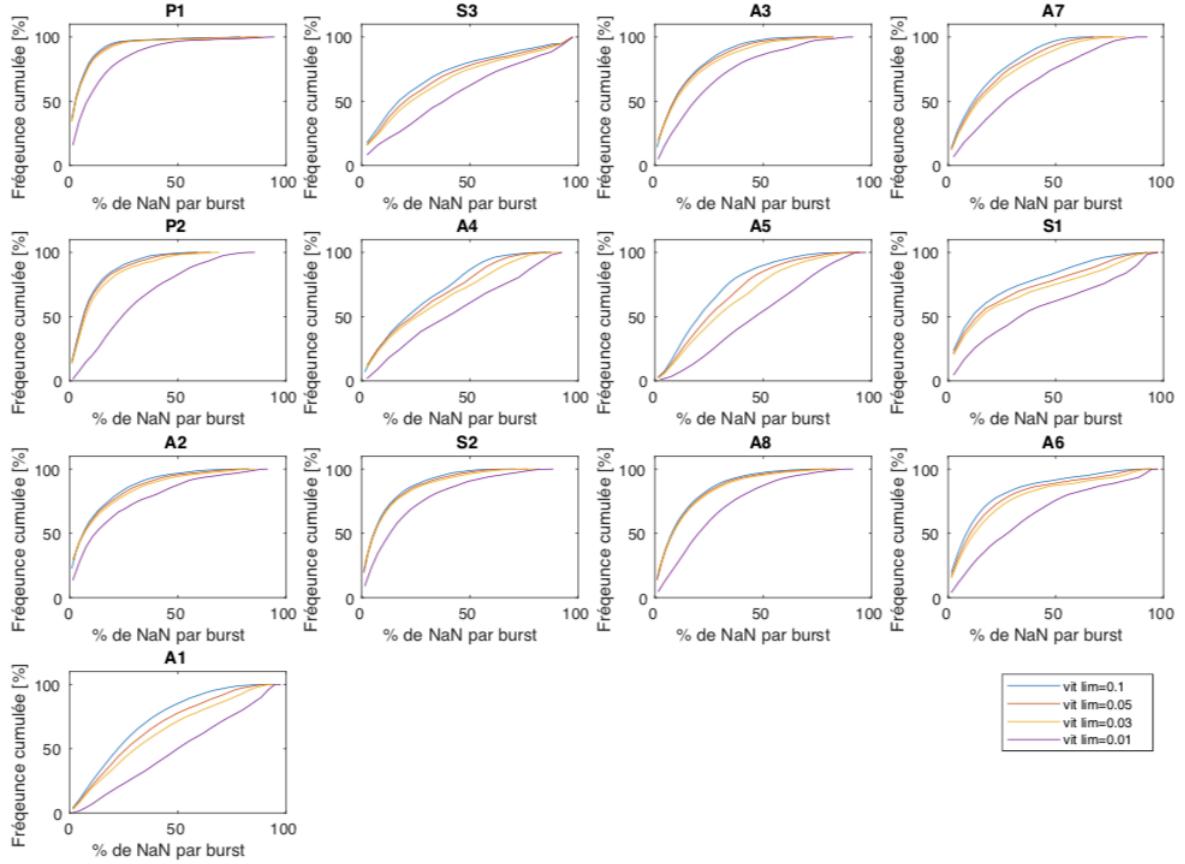


FIGURE 12 – Évolution en fréquence du nombre de valeurs rejetées par rafale (ou burst).

3.1.2 Choix du paramètre *burst_lim*

L'application du seuil de vitesse d'ambiguïté précédent conduit à éliminer des mesures de vitesse dans une rafale. La sensibilité de l'estimation de la moyenne de vitesses horizontales et verticales au pourcentage de données rejetées aléatoirement dans une rafale (*burst_lim*) a été étudiée en dégradant séquentiellement une rafale entière. La figure 13 représente la répartition des moyennes de la vitesse horizontale de 50 simulations effectuées pour des valeurs de *burst_lim* variant de 50 à 100%. Les droites noires correspondent à la vitesse moyenne de chaque rafale étudiée. Les deux droites situées autour des moyennes constituent un intervalle de variation de 10% de la moyenne.

De manière générale, on observe que l'estimation de la moyenne varie en fonction de la

quantité de données retirées dans la rafale. En effet, la variabilité de l'estimation de la moyenne de vitesse, qu'elle soit forte (en bleu sur la figure 13) ou faible (en rouge), augmente lorsque la proportion de vitesses rejetées dans la rafale croît. Cependant, lorsque moins de 80% de vitesses sont rejetées dans la rafale, les estimations de la moyenne résultantes restent comprises au sein de l'intervalle de variation de 10% autour de la moyenne calculée quand la rafale est complète. Ainsi il est souhaitable de conserver au moins 80% des données dans une rafale pour limiter l'incertitude sur l'estimation de la moyenne de la vitesse à 10%.

Néanmoins, si on impose de ne conserver que les rafales dont plus de 90% sont conservées, le nombre de rafales restantes diminue drastiquement. C'est ce qui est représenté à la figure 14, décrivant le pourcentage de rafales perdues pour chaque expérience en fonction du seuil *burst_lim*. On constate que pour des valeurs de seuil supérieures à 80%, la majorité des expériences perdent 50% ou plus de leurs rafales. La valeur de seuil de 80% est le meilleur compromis, permettant de garder un maximum de rafales et donc de données à analyser tout en limitant l'impact de la suppression de rafales sur la moyenne de l'écoulement.

En conclusion, les rafales dont le taux de validation (après application des taux de corrélation minimum et filtrage des vitesses d'ambiguïté) est inférieur à 80% sont éliminées.

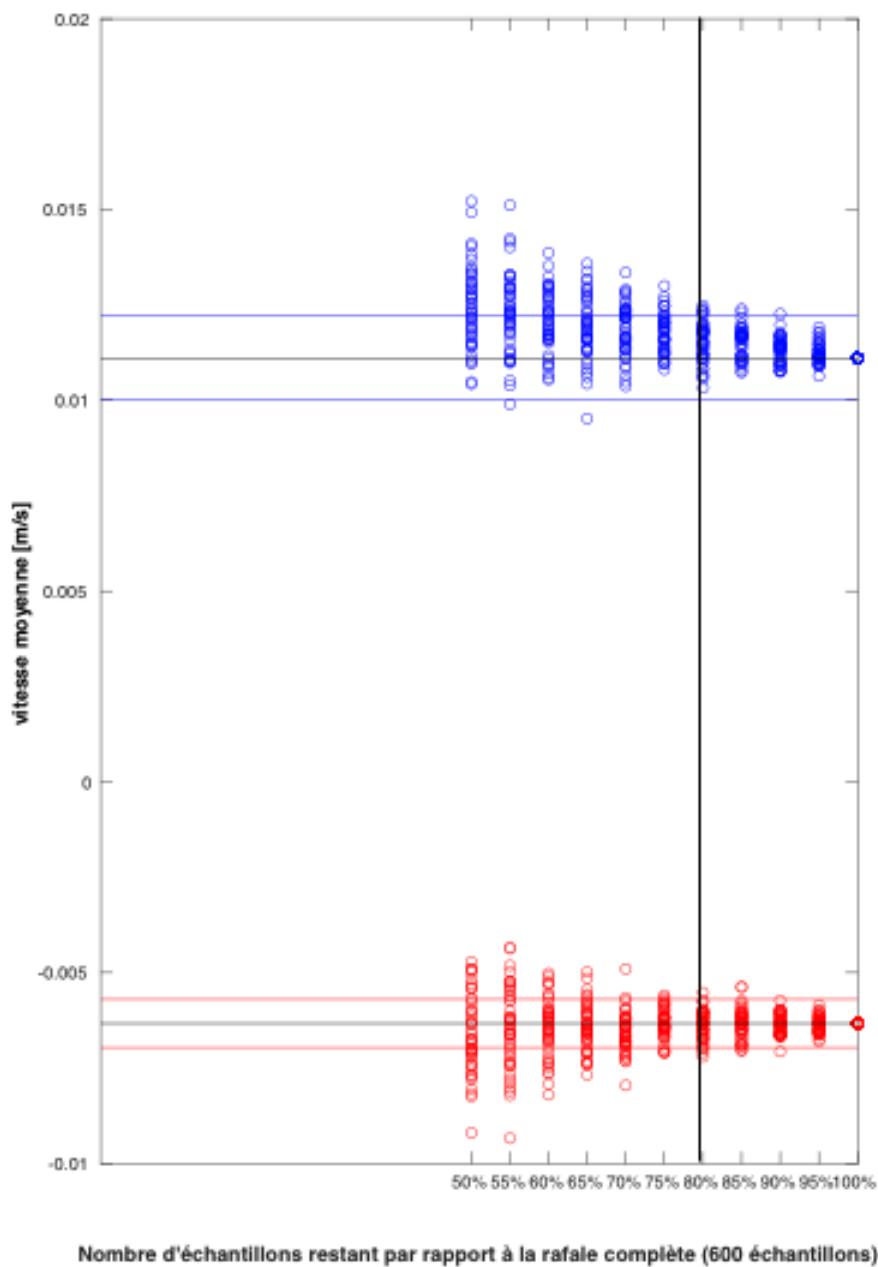


FIGURE 13 – Sensibilité de la moyenne des vitesses horizontales et verticales en fonction de la valeur de seuil de *burst_lim* appliquée. En rouge, l'évolution de la moyenne d'un profil à faibles vitesses et en bleu celle d'un profil dont les vitesses sont fortes.

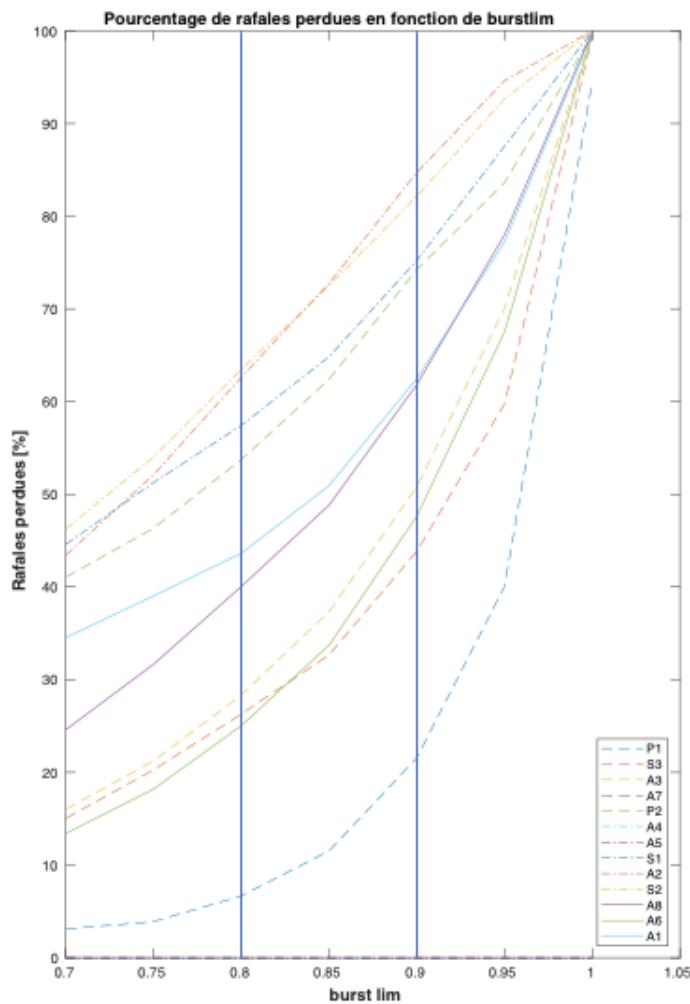


FIGURE 14 – Pourcentage de rafales perdues pour chaque expérience en fonction de *burst_lim*.

3.1.3 Données filtrées

La tableau 4 représenté ci-dessous illustre, pour chaque expérience, le pourcentage de données rejetées après chaque filtre utilisé, le pourcentage de rafales perdues après filtrage des données ainsi que le nombre de profils ne contenant aucune rafale valable. Il donne des informations sur la pertinence des filtres utilisés. En effet, comme le filtre de corrélation est imposé par le fournisseur de l'appareil de mesure, il serait judicieux d'avoir un pourcentage de données rejetées inférieur pour le filtre de la vitesse d'ambiguïté. En comparant les résultats

obtenus pour les deux premiers filtres, on constate que celui filtrant les données sur base de leur corrélation rejette bien plus de données que celui lié à la vitesse d'ambiguïté (*vit_lim*). Cette observation permet de confirmer la pertinence du seuil de vitesse d'ambiguïté choisi.

Le pourcentage de données perdues après application du filtre supprimant les rafales dont la quantité de données conservées est inférieure ou égale à 80% varie de 2 à 14%. De plus, on constate que ce nombre de rafales perdues ne dépend pas du pourcentage de données perdues après application des filtres de corrélation et de vitesse d'ambiguïté. Par exemple, dans l'expérience *P2*, le pourcentage de rafales perdues est presque quatre fois moins important que celui de l'expérience *A6*. Pourtant, si l'on compare les pourcentages de données perdues après application des filtres, on constate que lors de l'expérience *P2*, 28% des données sont retirées contre seulement 6% pour l'expérience *A6*. Pour avoir un nombre de rafales perdues plus important, les données rejetées de l'expérience *A6* peuvent être réparties plus ou moins équitablement sur les différentes rafales alors que pour l'expérience *P2*, rejetant plus de données, ces dernières peuvent quant à elles, être concentrées dans certaines rafales. Le même constat peut être effectué en comparant les pourcentages de rafales perdues et de profils perdus pour chaque expérience. Par exemple, pour l'expérience *S3*, aucun profil n'est perdu alors que le taux de rafales perdues est plus important que pour l'expérience *S2* qui perd plus de 23% de ses profils. Comme décrit précédemment, la répartition des rafales perdues expliquerait cette différence dans le pourcentage de profils perdus. Les 3% de rafales perdues dans l'expérience *S2* pourraient toutes être concentrées dans certains profils tandis que les 8% rejetées de l'expérience *S3* peuvent être plus ou moins équitablement réparties dans les différents profils ce qui expliquerait qu'aucun profil n'est retiré dans ce cas.

Lors de notre étude, les méthodes utilisées se basent sur les rafales de données récoltées par l'Aquadopp pour analyser le comportement de la couche limite de l'écoulement. Les taux de rafales perdues pour chaque expérience n'étant pas élevés, aucune expérience supplémentaire ne peut être rejetée.

Expérience	% perdu <i>corr_lim</i>	% perdu <i>vit_Lim</i>	% rafales perdues	% Profils perdus
P1	5.6	0.5	2.2	2.1
P2	24.95	3.55	2.65	17.6
S1	24.52	4.68	13.7	11.67
S2	15.94	4.64	3.1	23.32
S3	18.88	1.76	8.3	0
A2	7.16	2.1	4.1	19.15
A3	11	1.4	4.5	0
A6	6.1	0.6	10	3.1
A7	9.6	1.2	6.3	2.2
A8	7.1	1.2	4	2.3

TABLE 4 – Tableau récapitulatif des données et des profils perdus après chaque étape de filtrage pour chaque expérience.

3.2 Contraintes de Reynolds

Les résultats obtenus lors de l'analyse des contraintes de Reynolds ne fournissent malheureusement pas assez d'informations permettant d'identifier et de quantifier un potentiel effet canopée. Après calcul des contraintes de Reynolds et des énergies cinétiques de turbulence comme décrit dans la section 2.5.2, on constate que les profils verticaux ne livrent pas autant de renseignements que ce qui est attendu dans la théorie (RAUPACH et al., 1996).

La figure 15 ci-dessous, regroupe les résultats obtenus avec cette méthode pour les trois types d'expériences réalisées (fond sableux, symétriques et asymétriques). Sur la colonne de gauche sont représentés les contraintes de Reynolds de chaque profil selon la verticale. Au centre, on retrouve les profils verticaux de l'écoulement et à droite, l'énergie cinétique de turbulence de chaque profil exprimée en fonction de la profondeur.

Bien que l'atténuation du courant soit présente pour tous les profils des expériences S2 et A6, les profils d'énergie cinétique de turbulence et de contraintes de Reynolds ne sont pas aussi significatifs. Ainsi, en observant les colonnes de gauche et de droite des expériences S2 et A6, on constate que tous les profils ne présentent pas de maximum. Malgré le manque de données, certains profils présentent un pic d'énergie cinétique ou de contraintes de Reynolds selon la profondeur. Et, pour une même expérience (par exemple S2) la hauteur de ces pics varie au cours d'un cycle de marée. Ces variations de hauteurs confirment un changement de la hauteur de déplacement du courant au cours du cycle de marée.

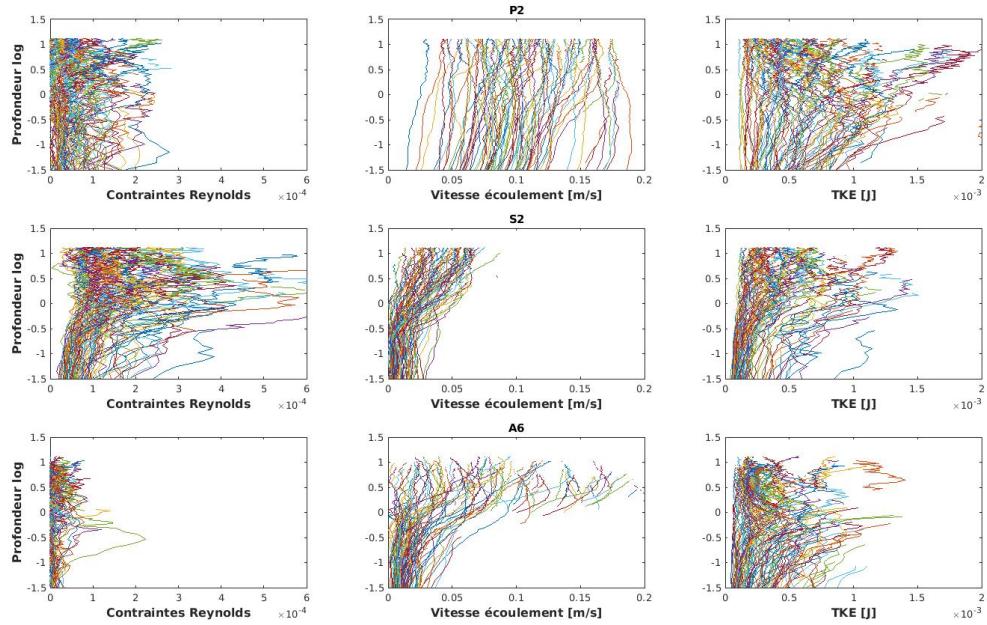


FIGURE 15 – Analyse des contraintes de Reynolds et énergie cinétique de turbulence pour les trois types d’expériences menés à Lanzarote.

3.3 Analyse logarithmique

3.3.1 Analyse de sensibilité aux différents ajustements

La représentation des 11 profils et de ces ajustements se trouve à la figure 16 ci-dessous. Sur cette figure sont représentés les onze profils de l’expérience *S1* avec les quatre différents ajustements (décrits dans la légende). Chacun des profils a été mis en parallèle avec son gradient d’énergie cinétique de turbulence (*tke*).

A première vue on pourrait croire que les ajustements manuels (en cyan sur la figure) sont plus pertinents que les autres et coïncident bien avec la partie logarithmique du profil. Cependant, en observant les profils d’énergie cinétique, on constate que ces ajustements manuels ne sont pas toujours correctement situés. Par exemple, pour les profils *e* et *f*, le pic d’énergie cinétique de turbulence est situé au niveau de $\log(z) = 0$. D’après la théorie, la zone logarithmique se situe au dessus de ce maximum d’énergie cinétique.

Pour ces profils, les ajustements systématiques (courbes bleue, rouge et rose) semblent mieux concorder avec la zone logarithmique des profils. Le même constat peut être effectué pour les profils *b* et *g*. Sur ce dernier, l'ajustement manuel est effectué entre les niveaux $\log(z) = -1$ et $\log(z) = 0$. Cette région correspond à la région du pic d'énergie turbulente. La zone logarithmique de ce profil se situe donc aux alentours d'un mètre au dessus du fond ($\log(z) = 0$). Pour ce dernier, l'ajustement fait sur 16 points (entre 1 *m* et 1.5 *m* du fond) paraît plus pertinent. Le gradient d'énergie cinétique de turbulence du profil *b* présente deux maximums avec un minimum local entre eux. Il est possible que dans le cas du profil *b* de la figure 16, la partie située entre les deux pics d'énergie cinétique ait mal été déterminée à cause de la fréquence d'échantillonage utilisée.

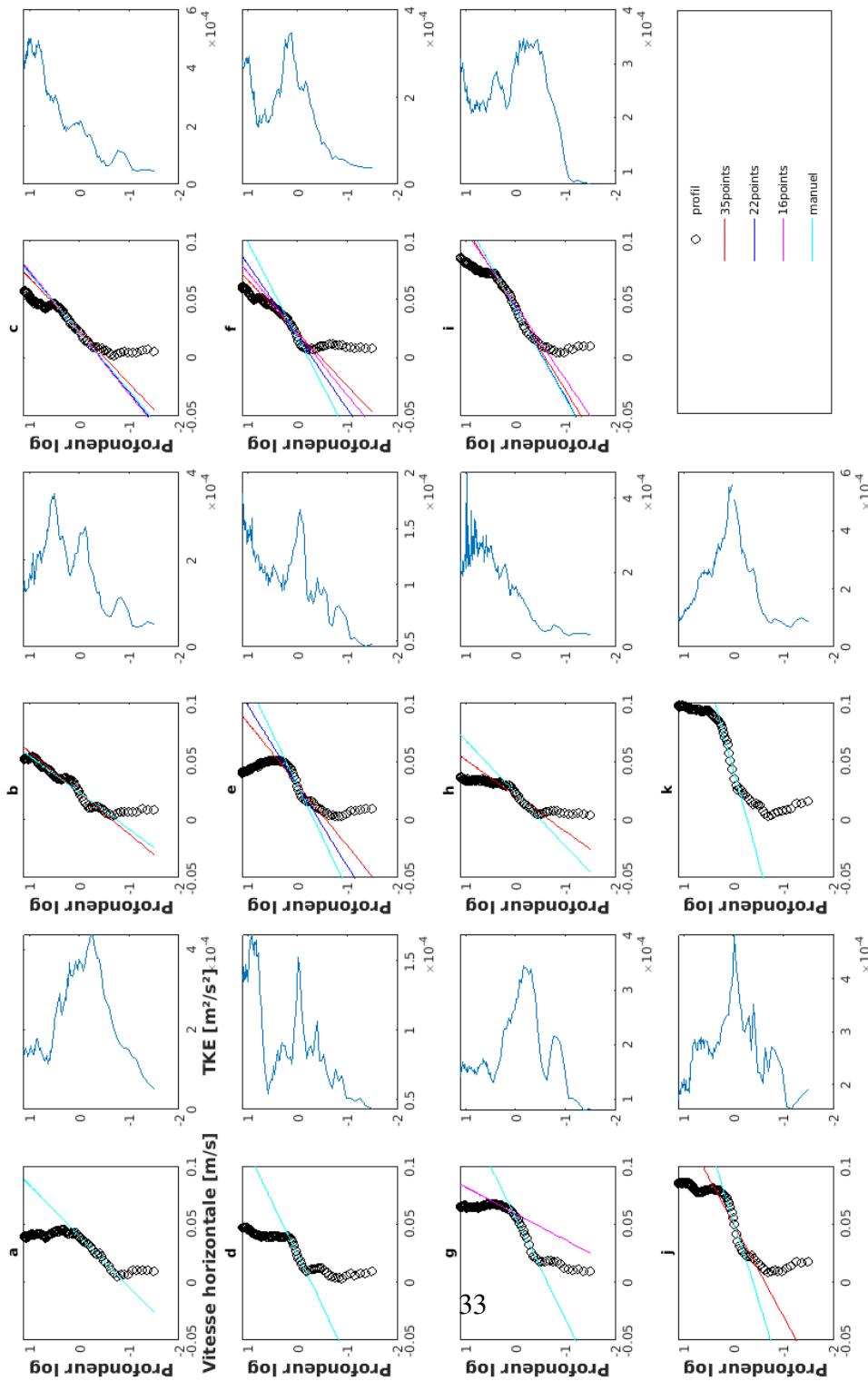


FIGURE 16 – 11 profils de vitesse de l'expérience S1 et leurs ajustements.

De fait, dans nos expériences les profils verticaux d'énergie cinétique de turbulence ne présentent pas le pic caractéristique de la dissipation d'énergie cinétique pour la majeure partie des profils enregistrés suggérant qu'une partie de l'énergie cinétique a été filtrée avec une fréquence de mesure de $2Hz$. Sans cette information on constate qu'il peut s'avérer difficile de localiser les zones logarithmiques de chaque profil manuellement. De plus, ajuster chaque profil à la main peut prendre énormément de temps. C'est pourquoi, dans notre étude, un ajustement systématique a été choisi bien qu'il soit attendu que la position de la zone logarithmique fluctue au cours du cycle de marée.

Afin de sélectionner la zone d'ajustement la plus pertinente possible, une étude de sensibilité a été effectuée sur les hauteurs de déplacement mesurées pour chaque expérience en fonction de l'ajustement. Les résultats sont représentés à la figure 17. Chacun des graphes définit, sous forme de boîtes à moustaches, la répartition des différentes hauteurs de déplacement mesurées en fonction des ajustements systématiques et ce, pour chaque expérience.

Sur ces graphiques, on observe que pour toutes les expériences sauf *A7*, la boîte à moustaches correspondant au plus petit ajustement, effectué entre 1 *m* et 1.5 *m* du fond, est toujours plus étendue que celle des deux autres ajustements. Cette forte variabilité des hauteurs de déplacement mesurées provient du fait que la zone logarithmique des profils d'une même expérience ne se situe jamais dans le même intervalle de profondeurs, notamment à cause de l'oscillation de la marée modifiant constamment les profils de vitesse. Comme cette partie logarithmique ne se situe jamais au même endroit, il est difficile de bien la localiser et l'ajuster lorsque la zone d'ajustement est petite. Ces différentes observations ont permis d'écartier l'ajustement effectué sur 16 points.

Les expériences *A8* et *P2* présentent les mêmes répartitions de hauteur de déplacement pour l'ajustement réalisé sur 22 points et celui effectué sur 35 points. Même si l'expérience *A7* présente plus ou moins la même répartition pour les deux plus grands ajustements, celui effectué sur 35 points s'avère être plus pertinent. Enfin, malgré une boîte à moustaches plus compacte pour l'ajustement sur 22 points de l'expérience *A2*, pour toutes les autres expériences, l'ajustement le plus adéquat est celui effectué entre 0.605 *m* et 1.67 *m* du fond (sur 35 points). Suite à cette analyse de sensibilité aux différents ajustements, nous avons décidé d'utiliser l'ajustement couvrant la plus large zone dans la suite des résultats.

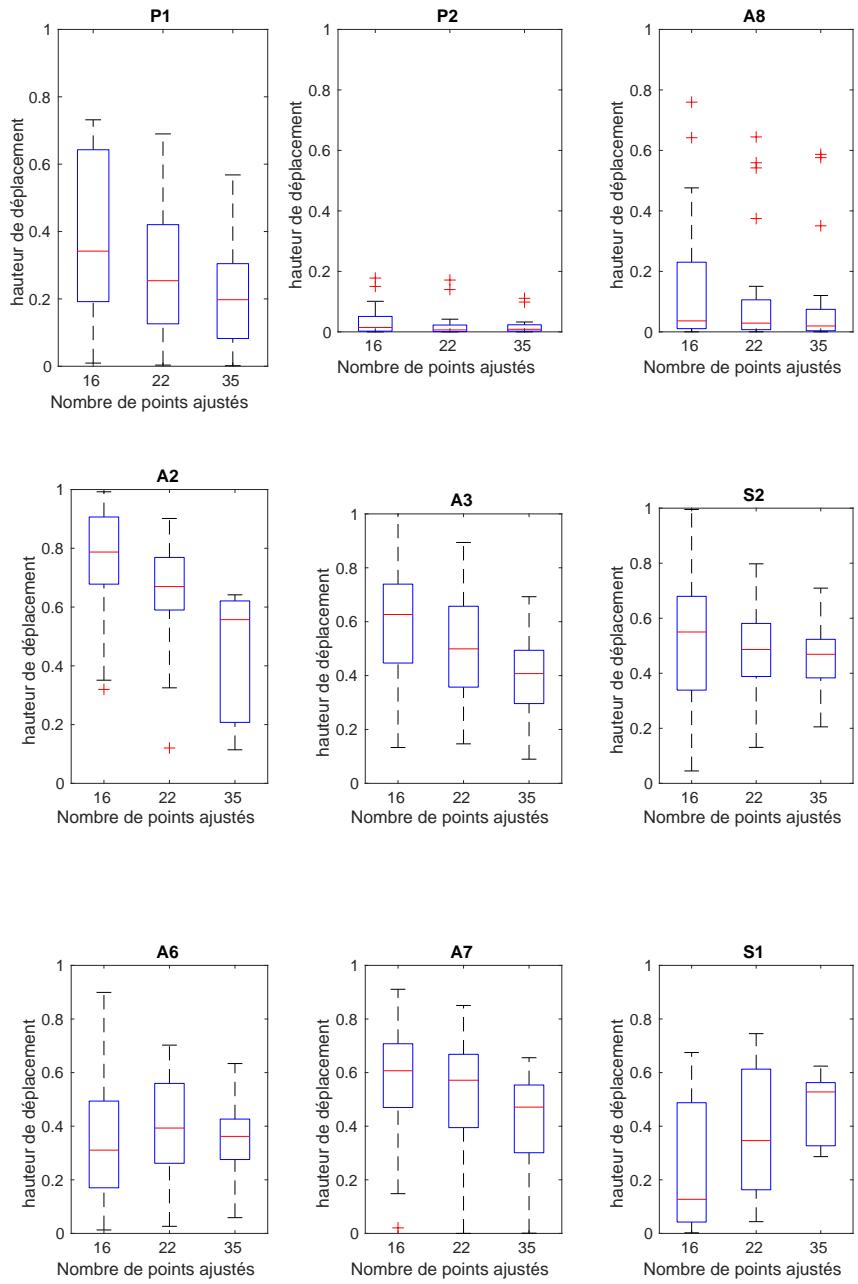


FIGURE 17 – Répartition des hauteur de déplacement d mesurées pour chaque expérience en fonction de l'ajustement.

3.3.2 Hauteurs de déplacement

La figure 18 regroupe les différents graphiques de la variation des hauteurs de déplacement mesurées pour chacune des expériences avec l'ajustement effectué entre $0.605\ m$ et $1.67\ m$ du fond. Les hauteurs de déplacement mesurées ont été séparées en fonction de la direction de marée (flot et jusant) de façon à mettre en évidence l'asymétrie dans l'effet canopée quand la mesure était réalisée en lisière de forêt. Elles sont représentées sous la forme de boîtes à moustaches. Le nombre de profils ajustés est représenté au dessus de chaque boîte.

Les hauteurs mesurées pour les expériences *P2* (fond sableux) et *A8* sont presque nulles et ce, quelque soit la direction de la marée. Lors de l'expérience *A8*, l'appareil de mesure a été placé à 11 mètres d'une forêt de corail noir d'une hauteur comprise entre $90\ cm$ et $110\ cm$. De l'autre côté de l'appareil se trouvait un substrat sableux, sans obstacle. Les résultats obtenus pour cette expérience indiquent que peu importe le sens du courant, aucun déplacement de la couche limite sur le haut n'est mesuré. Ceci indique qu'une forêt de corail noir d'environ $1m$ de hauteur n'a plus aucun effet sur l'écoulement à 11 mètres en aval. Contrairement à l'expérience *P2*, des hauteurs de déplacement ont été mesurées lors de la première expérience sur fond sableux *P1*.

Pour les expériences symétriques, les résultats devraient être identiques ou similaires durant les périodes de flot et de jusant. Les boîtes à moustaches de l'expérience *S2* confirment les attentes car elles sont plus ou moins identiques en fonction de la période de marée. Les hauteurs de déplacement varient entre 30 et $70\ cm$ et la plupart d'entre elles sont comprises entre 40 et $50\ cm$. La hauteur des coraux noirs de cette expérience est de 80 - $100\ cm$. Autrement dit, la hauteur de déplacement d varie entre $0.3h$ et $0.7h$ où h est la hauteur des coraux. L'expérience *S1* a des hauteurs de déplacement d comprises entre $0.4h$ et $0.85h$. En revanche, aucune hauteur n'a pu être mesurées lors des périodes de jusant.

Pour l'expérience *A7*, l'Aquadopp a été placé à un mètre d'une forêt de corail noir et de l'autre côté de l'appareil se trouvait un substrat sableux, sans obstacle. Les résultats indiquent que pour les périodes de flot, la hauteur d varie entre 30 et $65\ cm$ soit $d \in [0.3h; 0.7h]$. Lors des périodes de jusant, les hauteurs de déplacements avoisinent zéro mais peuvent aussi atteindre des valeurs de $50cm$. L'expérience *A2* a été effectuée à $1.5m$ d'une forêt de corail

noir d'une hauteur de 80-100 *cm* et à 4 *m* d'une autre forêt de même hauteur. Les hauteurs de déplacement maximum mesurées, peu importe le sens de la marée, est de 65 *cm* soit approximativement 0.6*h*. En revanche, les hauteurs *d* pouvaient descendre jusqu'à 30 *cm* pour les périodes de flot contre 10 *cm* lors des phases de jusant. Cette différence pourrait être le résultat de la différence de distance entre l'appareil et les deux forêts de chaque côté. L'expérience asymétrique *A6* a été réalisée en plaçant l'Aquadopp à 4 *m* de coraux de 60 à 80 *cm* de haut et à un mètre de coraux noirs d'environ 1 *m* de haut de l'autre côté. Les résultats montrent que les hauteurs de déplacement sont plus faibles pendant les périodes de flot. La boîte à moustaches est aussi plus étendue que celle des phases de jusant. Les hauteurs mesurées pour cette expérience sont comprises entre 8 et 56 *cm* (flot) et peuvent valoir *d* = 0.7*h* lors des phases de jusant. Pour l'expérience *A3*, les médianes des boîtes à moustaches sont similaires peu importe la période de la marée et valent environ 35 *cm*.

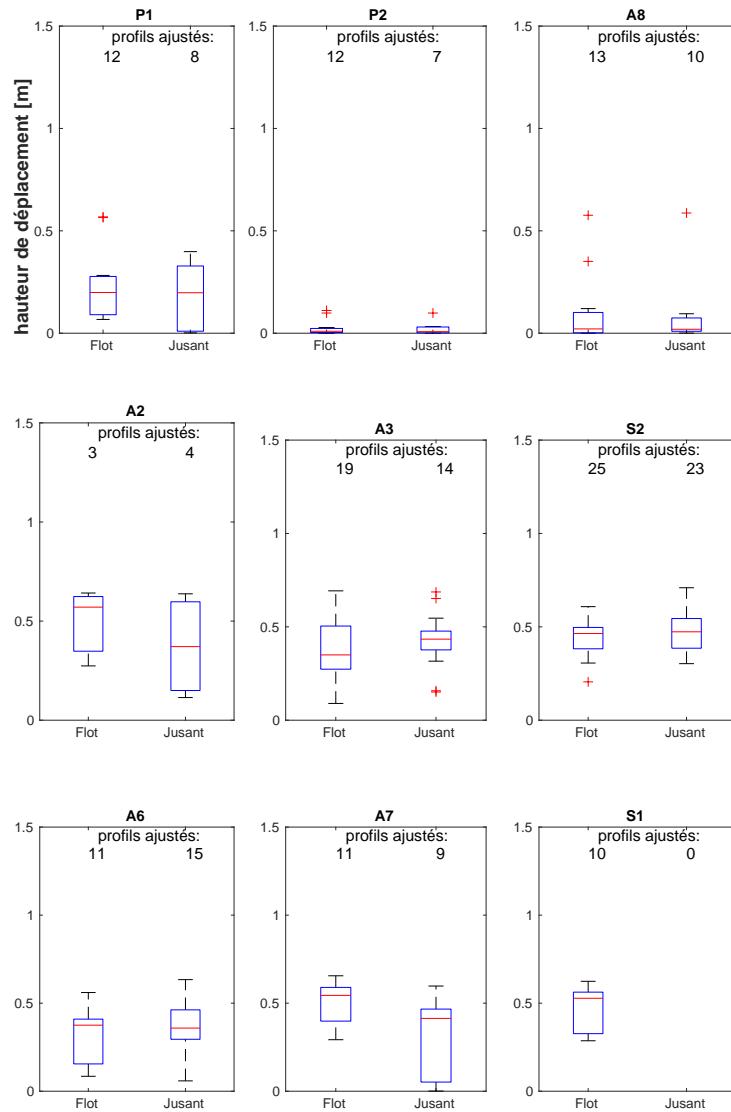


FIGURE 18 – Boîtes à moustaches représentant la répartition des hauteurs de déplacement calculées en fonction des courants de marée et pour chaque expérience (intervalle compris entre 0.605m et 1.67m).

3.4 Analyse des vitesses verticales

L'analyse des profils de vitesses verticales de chaque expérience s'avère être une méthode fournissant de nombreuses informations à propos de la hauteur de l'atténuation du courant par les coraux. La figure 19 représente, pour chaque expérience, les profils de vitesse verticale mis en parallèle avec les écarts-types moyens de ces profils pour chaque niveau de profondeur. En rouge, sont représentés les profils et les écarts-types des courants de jusant. En bleu, ce sont les résultats relatifs aux courants de flot qui sont représentés. Les écarts-types représentés sur ces différentes schémas ont été normalisés en fonction de l'écart-type des vitesses de l'eau à 3 m du fond. Ils représentent l'atténuation du courant à une profondeur donnée par rapport au courant 3 m plus haut.

De manière générale, on observe que pour les expériences sur fond sableux ainsi que l'expérience A8 pour lesquelles les hauteurs de déplacement étaient faibles ($< 5 \text{ cm}$), les vitesses verticales restent plus ou moins constantes avec la profondeur. En revanche, pour toutes les expériences réalisées à proximité d'une ou plusieurs colonies de coraux, on observe une atténuation des vitesses verticales sur une partie du profil vertical mesuré au cours d'un cycle de marée. Ces atténuations sont d'autant plus visibles sur les profils verticaux de l'écart-type des variations, au cours d'un cycle de marée, de la vitesse verticale à un niveau vertical donné. En effet, pour ces expériences, l'écart-type est minimum en dessous de la hauteur où les vitesses sont atténuerées.

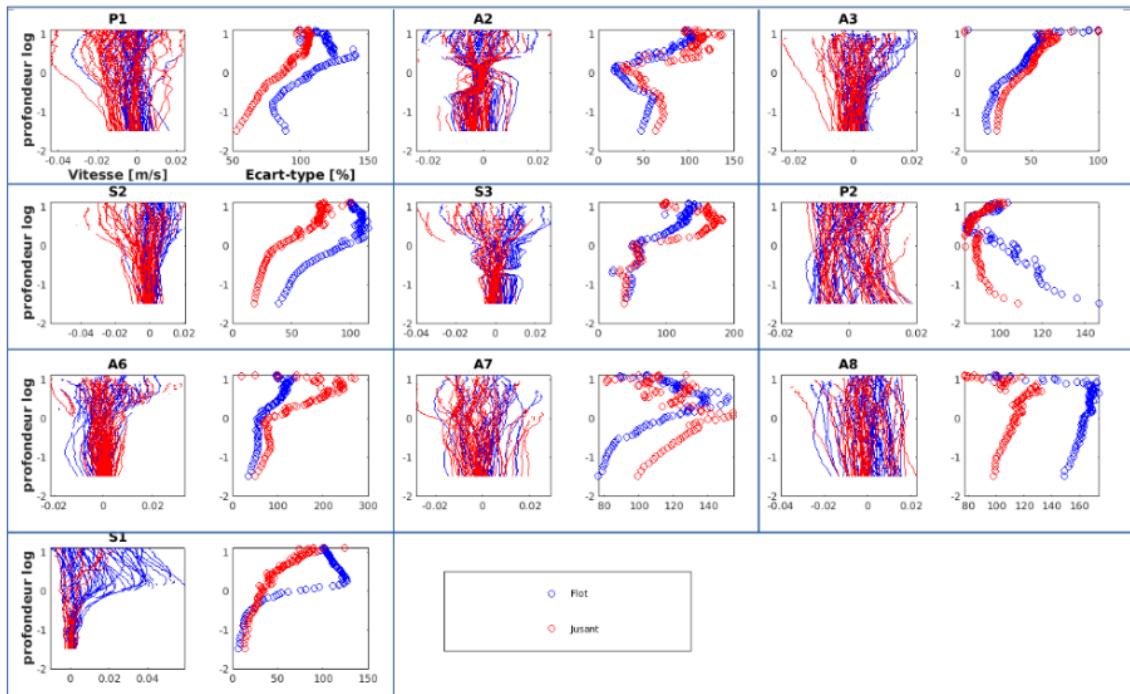


FIGURE 19 – A gauche, vitesses verticales et à droite, écart-type de ces vitesses calculé à l'aide de tous les profils sur chaque niveau de profondeur et pour chaque expérience.

Sur base des profils d'atténuation des vitesses verticales (représentés sur la figure 19), il est possible de définir des zones au sein desquelles, la vitesse verticale est atténuée d'un certain facteur par rapport à la vitesse à 3 m du fond. Ces différentes zones sont représentées sur la figure 20 pour chacune des expériences et en fonction du courant de marée. Les courbes rouges correspondent aux zones dont la vitesse verticale est atténuée de 80% par rapport à la vitesse de l'eau à 3 m au dessus du fond. Les courbes bleues 60% et les courbes noires 50%.

Peu importe le courant de marée, pour les expériences sur fond sableux et les expériences A7 et A8, aucune zone ne voit sa vitesse verticale être atténuée d'au moins 50% par rapport à la vitesse à 3 m du fond. Quant aux autres expériences, on observe des zones d'atténuation plus ou moins fortes. Les zones où le courant est atténué d'au moins 50% s'étendent du fond et peuvent aller jusqu'à 1.7 m. Les régions dont l'atténuation de la vitesse verticale est supérieure à 60% ou 80% sont plus petites que les précédentes. On observe cependant certaines expériences où les parties atténuees ne sont pas continues. C'est le cas par

exemple de l'expérience *A2* pour laquelle ces zones ne se situent pas proches du fond, mais entre 60 cm et 1.3 m du fond. Ces discontinuités sur la verticale peuvent être dues à des tourbillons de turbulence, générant des vitesses verticales. On remarque aussi que pour la plupart des expériences, l'atténuation du courant s'étend au delà de la hauteur des organismes. Effectivement, mise à part pour l'expérience *S1* et celles où aucune atténuation n'est détectée, la vitesse verticale commence à être atténuée d'au moins 50% à une hauteur supérieure à 1 m au dessus du fond. En regardant les conditions expérimentales décrites dans la section 2.1, la hauteur des coraux ne dépasse jamais 1 mètre. Pour les expériences asymétriques, le résultat est le même, peu importe la direction de la marée, l'atténuation du courant s'étend au dessus de la hauteur de la colonie de coraux à proximité.

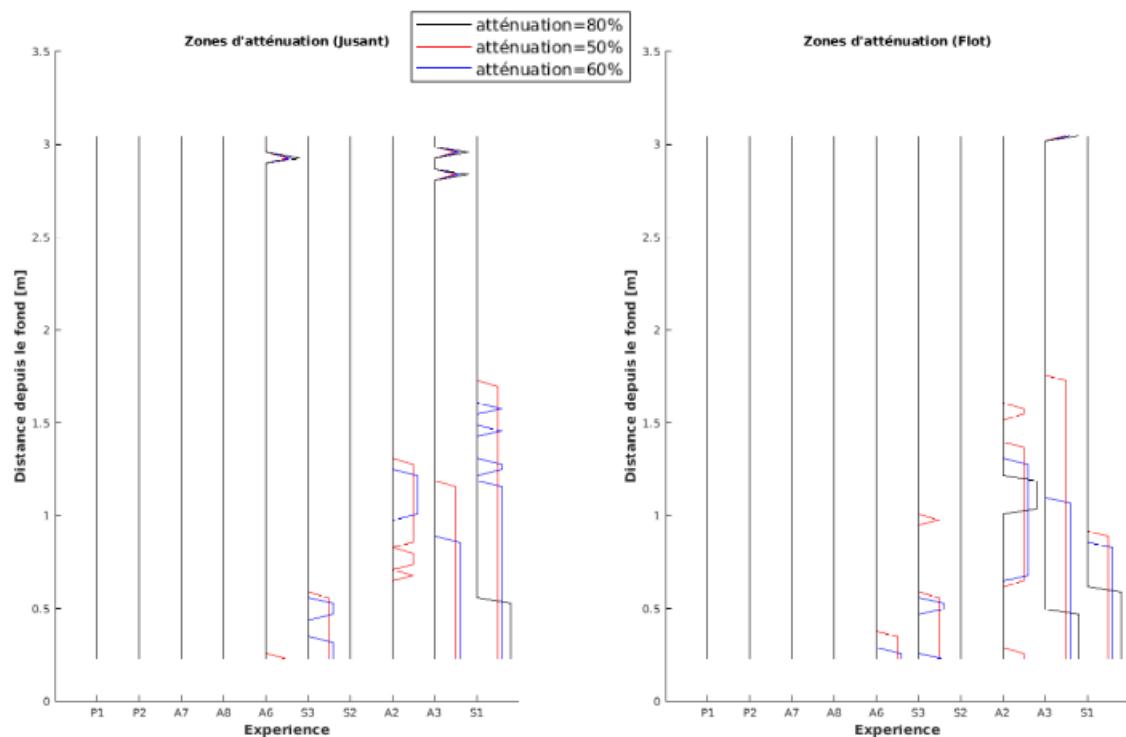


FIGURE 20 – Zones d'atténuation de la vitesse verticale par rapport à la vitesse à 3 m du fond pour chaque expérience. A gauche sont représentées les zones atténuerées lors d'une marée de jusant et à droite celles atténuerées lors d'un courant de flot.

4 Discussion

Les résultats obtenus après analyse logarithmique ou analyse des vitesses verticales (sections 2.5.1 et 3.4) dans notre étude, permettent d'affirmer la présence d'un effet canopée au sein de forêts de coraux noirs. Effectivement les gradients de vitesse verticale ainsi que l'analyse logarithmique des profils de vitesse horizontale illustrent que le courant est atténué lorsqu'il rencontre un obstacle tel que le corail noir présent à Lanzarote. Comme le montre la figure 18, les hauteurs de déplacement d mesurées dans cette étude varient. Malgré ces variations, la hauteur d ne dépasse jamais la hauteur de la canopée h et a même tendance à osciller autour de $0.4h$ ou $0.6h$.

La modification de la couche limite de l'écoulement à proximité d'obstacles a déjà été étudiée dans de nombreuses situations différentes. Parmi elles, on retrouve des études effectuées sur des plantes terrestres, des immeubles, des herbiers marins ou encore des simulations réalisées à l'aide de formes idéalisées censées représenter ces obstacles naturels. De manière générale, les études à ce sujet utilisaient un écoulement stationnaire avec une vitesse de fluide constante avec le temps. À travers ces différentes situations, on retrouve essentiellement des études visant à simuler et calculer les modifications de la couche limite d'un écoulement stationnaire à proximité de forêts terrestres. Lors de ces simulations, les chercheurs disposaient des tiges métalliques dans un tunnel à vent de façon à représenter les arbres d'une forêt. C'est ce que POGGI et al., 2004 ont fait pour ces forêts terrestres. La hauteur de déplacement d mesurée pour ce cas de figure est équivalente à la hauteur de la canopée des forêts h . BÖHM et al., 2013 ont simulé l'écoulement à travers la forêt noire et ont mesuré une hauteur de déplacement $d = 0.67h$. SEGINER et al., 1976 ont quand à eux estimé que $d = \pm 0.7h$ lors d'expériences similaires. D'autres recherches ont été menées sur des plantes de culture (plus souples que les forêts) comme le paddy ou le maïs (INOUE, 1963). Dans son étude, la hauteur de déplacement mesurée sur des paddys est de $d = 0.66h$ et pour des plants de maïs cette hauteur est de l'ordre de $d = 0.6h$.

Le sujet de notre étude portait sur les coraux noirs. Ce corail ne possède pas de squelette calcaire et est donc plus souple que les autres coraux. Cette souplesse permet de faire une analogie avec les plantes de culture (plus souples que les arbres) pour lesquelles, les hauteurs de déplacement mesurées sont semblables à celles obtenues dans ce travail. Dans son article, INOUE, 1963 révèle qu'en faisant augmenter la vitesse de l'écoulement incident, la hauteur de déplacement augmente. HENCH et ROSMAN, 2013 ont aussi observé que l'atténua-

tion du courant en aval de bottes de coraux (composées de porites, de coraux Pocillopora et Montipora, tous des genres de scléractiniaires [ou coraux durs]) varie avec le temps à cause des variations de courant. Dans notre étude, l'écoulement est dirigé par le phénomène de marée au cours duquel le courant ne cesse de changer d'intensité et de direction, expliquant que la hauteur de déplacement fluctue.

La plupart des études réalisées (LOWE et al., 2008, GHISALBERTI et NEPF, 2006, DAVIS et al., 2021, BÖHM et al., 2013) ont analysé les profils verticaux des contraintes de Reynolds et d'énergie cinétique de turbulence afin d'étudier le comportement de la couche limite de l'écoulement. Pour les expériences menées sur des forêts aquatiques, deux méthodes d'échantillonnage se distinguent. La première méthode, utilisée par LOWE, 2005, consiste à placer un anémomètre laser Doppler (LDA) qui mesure la vitesse du flux dans la direction horizontale et la verticale. Dans son étude, Lowe utilise le LDA à une fréquence de $50Hz$ afin de récolter des données de vitesse lors de périodes de 20 minutes. GHISALBERTI et NEPF, 2006 ont quant à eux utilisé un anémomètre acoustique Doppler similaire à l'Aquadopp. Leur appareil a effectué 30 enregistrements de 10 minutes à une fréquence d'échantillonnage de $25Hz$. Malheureusement, comme décrit dans la section 2.5.2, les profils d'énergie cinétique obtenus dans notre étude ne permettent pas d'utiliser la turbulence afin de déterminer le comportement de la couche limite à proximité de corail noir. En effet, dans la figure 16, on constate que les profils (b) et (g) ont, contrairement à la théorie (et aux études se basant sur la turbulence), deux maximum d'énergie cinétique. Sur base des ajustements correspondants, il devrait n'y avoir qu'un seul maximum, situé entre les deux pics visibles. Ce type de profil peut-être du aux limitations des paramètres de mesure utilisés par l'Aquadopp (fréquence d'échantillonnage de $2 Hz$). SMITH, 1978 indique que le spectre de turbulence de la couche limite de l'écoulement (de l'eau) a des périodes variant de quelques dixièmes de seconde à plusieurs semaines. Cet intervalle de périodes correspond à des fréquences comprises entre $1.7 \cdot 10^{-6}$ et $10Hz$. Toutes les turbulences de fréquences supérieures à $2Hz$ ne sont donc pas détectées dans notre cas. Revoir les méthodes d'échantillonnages permettrait de limiter les problèmes soulignés. Les contraintes de Reynolds ainsi que l'énergie cinétique de turbulence sont des paramètres essentiels à la compréhension du comportement de la couche limite de l'écoulement lors de la présence d'un obstacle tel que les forêts animales. Pour être certain d'avoir ces informations à disposition, lors de la collecte de données, il serait judicieux d'utiliser une fréquence d'échantillonnage couvrant toute la gamme de fréquences de la turbulence dans l'eau, c'est à dire une fréquence d'au moins $10Hz$.

Certains des résultats obtenus lors de l'analyse logarithmique nécessitent une remise en question de la méthode de collecte des données par l'Aquadopp. C'est le cas par exemple de l'expérience *P1* effectuée sur fond sableux. Les résultats attendus devraient être similaires à ceux obtenus pour l'expérience *P2* (la deuxième expérience sur fond sableux) où aucune hauteur de déplacement n'a été mesurée. Malheureusement ce n'est pas le cas pour *P1* où une hauteur de déplacement a été mesurée (figure 17). La présence d'un effet canopée est difficile à expliquer et conduit à penser que l'expérience ne correspond pas à un fond sableux mais a été affectée par des obstacles. L'expérience a été réalisée à proximité d'un promontoire. Pour l'expérience *S1*, aucun effet canopée n'a pu être détecté lors des périodes de jusant (figure 18). Ceci peut être du à la position de l'Aquadopp lors de la collecte de données. Il a pu être placé trop proche de la forêt de coraux adjacente ayant pu obstruer l'appareil en se plaçant au dessus des capteurs lors de la marée descendante.

5 Conclusion

A proximité de forêts de coraux noirs, l'effet canopée est bel et bien observé et est de l'ordre de 0.4 à 0.6 fois la hauteur du corail noir situé en amont de l'écoulement. Cependant plusieurs limites ont été observées lors de l'analyse des données collectées.

Premièrement, les profils d'énergie cinétique turbulente sont incomplets. Comme décrit précédemment, augmenter la fréquence d'échantillonnage de l'appareil de mesure à au moins $10Hz$ permettrait de capturer tout le spectre de turbulence de l'eau et donc d'avoir des profils complets. Mais une telle augmentation de la fréquence d'échantillonnage ne permettrait pas d'utiliser une résolution spatiale de 3 centimètres. Il faudrait réduire la résolution et donc augmenter la taille des cellules considérées par l'Aquadopp.

Deuxièmement, lors de l'analyse logarithmique des profils de vitesse horizontale, les zones d'ajustements étaient variables. En comparant les résultats obtenus manuellement et ceux acquis à l'aide d'ajustements automatiques, il serait plus judicieux d'effectuer chaque ajustement manuellement. Afin de localiser plus précisément la zone à ajuster, les profils verticaux de vitesse peuvent être mis en parallèle avec les profils d'énergie cinétique turbulente. La zone à ajuster correspond à la région du profil vertical située juste au dessus du pic d'énergie turbulence.

Troisièmement, à Lanzarote et dans de nombreux endroits partout ailleurs, les oscillations de marée dirigent l'écoulement de l'eau. Lors de ce phénomène, le courant change constamment de direction et d'intensité. Ce changement d'orientation s'accompagne donc d'un déplacement de la zone d'atténuation du courant observée lors d'un effet canopée. Le changement d'intensité du courant impacte aussi l'analyse des résultats. En effet, l'atténuation de vitesse en aval des coraux est significative quand le courant de marée est maximum. Placer l'appareil de mesure plus longtemps que 24 heures permettrait de récolter plus de données correspondant aux périodes où la marée est la plus forte.

Enfin, ce travail nous a permis d'observer un effet canopée au sein de forêts de corail noir lors d'un écoulement turbulent constamment en mouvement à cause du phénomène de marée. Afin de mieux quantifier et étudier l'atténuation du courant observée, les techniques d'échantillonnage ainsi que les paramètres à imposer à l'Aquadopp peuvent être modifiés.

Références

- ALFONSI, G. (2009). Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 62(4), 040802. <https://doi.org/10.1115/1.3124648>
- Aquadopp Profiler 2 MHz. (s. d.), 4.
- BEALE, STEVEN B. (2011). Crossflow.
- BELCHER, S. E., HARMAN, I. N. & FINNIGAN, J. J. (2012). The Wind in the Willows : Flows in Forest Canopies in Complex Terrain. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 44(1), 479-504. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101036>
- BÖHM, M., FINNIGAN, J. J., RAUPACH, M. R. & HUGHES, D. (2013). Turbulence Structure Within and Above a Canopy of Bluff Elements. *Boundary-Layer Meteorology*, 146(3), 393-419. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9770-1>
- BRAMANTI, L. & EDMUNDS, P. J. (2016). Density-associated recruitment mediates coral population dynamics on a coral reef. *Coral Reefs*, 35(2), 543-553. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1413-4>
- Comprehensive Manual. (2017), 153.
- CONNELL, J. H. (1978). Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs : High diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state. *Science*, 199(4335), 1302-1310. <https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302>
- DAVIS, K. A., PAWLAK, G. & MONISMITH, S. G. (2021). Turbulence and Coral Reefs. *Annual Review of Marine Science*, 13(1), 343-373. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-042120-071823>
- DELON, C., DRUILHET, A., DELMAS, R. & DURAND, P. (2000). Dynamic and thermodynamic structure of the lower troposphere above rain forest and wet savanna during the EXPRESSO campaign. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 105(D11), 14823-14840. <https://doi.org/10.1029/2000JD900032>
- GEORGE, W. K. (2013). Lectures in Turbulence for the 21st Century, 303.
- GHISALBERTI, M. & NEPF, H. (2006). The Structure of the Shear Layer in Flows over Rigid and Flexible Canopies. *Environmental Fluid Mechanics*, 6(3), 277-301. <https://doi.org/10.1007/s10652-006-0002-4>
- GUIHEN, D., WHITE, M. & LUNDÄLV, T. (2013). Boundary layer flow dynamics at a cold-water coral reef. *Journal of Sea Research*, 78, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.12.007>

- GUIZIEN, K. & GHISALBERTI, M. (2017). Living in the Canopy of the Animal Forest : Physical and Biogeochemical Aspects. In S. Rossi, L. BRAMANTI, A. GORI & C. OREJAS (Ed.), *Marine Animal Forests* (p. 507-528). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21012-4_14
- HENCH, J. L. & ROSMAN, J. H. (2013). Observations of spatial flow patterns at the coral colony scale on a shallow reef flat : COLONY-SCALE FLOW PATTERNS ON A CORAL REEF. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 118(3), 1142-1156. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20105>
- INOUE, E. (1963). On the Turbulent Structure of Airflow within Crop Canopies. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 41(6), 317-326.
- JAMES MOODY. (2019). What does RMSE really mean ? <https://towardsdatascience.com/what-does-rmse-really-mean-806b65f2e48e>
- LOWE, R. J. (2005). Oscillatory flow through submerged canopies : 1. Velocity structure. *Journal of Geophysical Research*, 110(C10), C10016. <https://doi.org/10.1029/2004JC002788>
- LOWE, R. J., SHAVIT, U., FALTER, J. L., KOSEFF, J. R. & MONISMITH, S. G. (2008). Modeling flow in coral communities with and without waves : A synthesis of porous media and canopy flow approaches. *Limnology and Oceanography*, 53(6), 2668-2680. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.6.2668>
- MACDONALD, R. W. (2000). Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 97(1), 25-45. <https://doi.org/10.1023/A:1002785830512>
- NICK CONNOR. (2019). Qu'est ce que la couche limite - Définition. <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-la-couche-limite-definition/>
- POGGI, D., PORPORATO, A., RIDOLFI, L., ALBERTSON, J. D. & KATUL, G. G. (2004). The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-Layer Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 111(3), 565-587. <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000016576.05621.73>
- RAUPACH, M. R., FINNIGAN, J. J. & BRUNET, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies : The mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology*, 25th Anniversary Volume(1), 351-382. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-017-0944-6_15](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0944-6_15)
- ROBERT H. STEWART. (2008). *Introduction to physical oceanography*. Récupérée 1 avril 2022, à partir de <https://hdl.handle.net/1969.1/160216>

- Rossi, S. & Rizzo, L. (2020). Marine Animal Forests as Carbon Immobilizers or Why We Should Preserve These Three-Dimensional Alive Structures. In S. Rossi & L. BRAMANTI (Éd.), *Perspectives on the Marine Animal Forests of the World* (p. 333-400). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57054-5_11
- Rossi, S., BRAMANTI, L., GORI, A. & OREJAS, C. (2017). An Overview of the Animal Forests of the World. In S. Rossi, L. BRAMANTI, A. GORI & C. OREJAS (Éd.), *Marine Animal Forests* (p. 1-26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_1-1
- SEGINER, I., MULHEARN, P. J., BRADLEY, E. F. & FINNIGAN, J. J. (1976). Turbulent flow in a model plant canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 10(4), 423-453. <https://doi.org/10.1007/BF00225863>
- SHASHAR, N., KINANE, S., JOKIEL, P. & PATTERSON, M. (1996). Hydromechanical boundary layers over a coral reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 199(1), 17-28. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(95\)00156-5](https://doi.org/10.1016/0022-0981(95)00156-5)
- SMITH, J. (1978). Measurement of turbulence in ocean boundary layers. *Proceedings of the 1978 IEEE First Working Conference on Current Measurement*, 1, 95-128. <https://doi.org/10.1109/CCM.1978.1158386>