

T1.6.6 Produit livrable :

Rapport technique sur le travail de terrain et l'analyse des données d'écoulement haute-fidélité, y compris les mesures d'écoulement à bord de navires et les mesures de turbulence à MeyGen

V1

Juin 2023



Financement

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet TIGER (Tidal Stream Industry Energiser) et a été cofinancé par le Fonds européen de développement régional par l'intermédiaire du programme Interreg France (Manche) Angleterre.

Historique du document

Révision	Date	Description	Origine par	Examiné par	Approuvé par
1	Juin 2023	Finale	SA	DB	DB

Clause de non-responsabilité

Les informations, analyses et recommandations contenues dans ce rapport de Normandie Hydroliennes sont données à titre d'information générale. Bien que nous nous efforcions de veiller à ce que les informations soient exactes, à jour et fournies de bonne foi, toutes les informations sont fournies "en l'état", sur la base des informations fournies à Normandie Hydroliennes au moment de la rédaction et Normandie Hydroliennes ne donne aucune garantie d'exhaustivité, et ne fait aucune déclaration ou garantie de quelque nature que ce soit, expresse ou implicite, concernant l'exactitude ou la fiabilité des informations et l'adéquation à un usage particulier. Toute confiance accordée à ces informations est à vos risques et périls et Normandie Hydroliennes ne peut en aucun cas être tenue responsable de toute perte, de tout dommage, y compris, mais sans s'y limiter, de tout dommage indirect ou consécutif, ou de toute perte ou dommage, quel qu'il soit, résultant de la confiance accordée à ces informations. En aucun cas Normandie Hydroliennes, ni aucun de ses employés, affiliés, partenaires ou agents, ne pourra être tenu responsable envers vous ou toute autre personne de toute décision prise ou action entreprise sur la base des informations contenues dans ce rapport, même si elle a été informée de la possibilité de tels dommages.

Ce rapport et son contenu sont confidentiels et ne peuvent être modifiés, reproduits ou distribués en tout ou en partie sans l'accord écrit préalable de Normandie Hydroliennes.

Contenu

1	Introduction	1
---	--------------	---

1 Introduction

Le rapport « MEY-21-2-REP-001-F-MeyGen- 2022 Field Work Analysis Report_Rev2 » ci-dessous résume les résultats des travaux de terrain et d'analyse des données d'écoulement haute-fidélité entrepris sur le site de MeyGen en 2022-2023.

Ce travail a été entrepris dans le cadre du projet TIGER afin de développer, et de tester concrètement sur un site clé de courant de marée (MeyGen, UK), le développement d'une nouvelle approche pour collecter des données de débit à de multiples emplacements potentiels de futures turbines à marée qui pourraient suffisamment renforcer pour le développement/optimisation de réseaux de courant de marée à grande échelle.

Cette nouvelle approche a le potentiel de fournir des données de flux plus précises pour développer réseaux de courants de marée à grande échelle que les approches industrielles standard actuelles qui sont principalement établies sur la modélisation hydrodynamique. La précision des données de débit étant un paramètre clé pour la conception et l'analyse du rendement énergétique, cette nouvelle approche présente un intérêt significatif pour Normandie Hydroliennes dans le cadre du développement de son projet d'hydrolienne au Raz Blanchard, en France, ainsi que pour le secteur de l'hydrolienne en général.

MeyGen a contacté l'équipe de maintenance de la norme CEI TS 62600-201 pour discuter des résultats des travaux. Il est aussi prévu d'intégrer cette approche dans les prochaines éditions de la spécification technique CEI TS 62600-201.

Une partie du travail sur le terrain a consisté à collecter des données de turbulence de haute-fidélité à partir de mesures ADCP à 5 faisceaux montées sur le fond marin. Il est aussi très utile pour l'industrie des courants de marée de disposer de plus d'informations du domaine public sur la turbulence grâce à tels déploiements, ces résultats de turbulence sont également présentés – ainsi qu'une analyse de la façon dont les résultats diffèrent lorsque l'on utilise une méthode à 4 faisceaux et à 5 faisceaux.

Le travail sur le terrain a aussi impliqué la collecte de données de flux haute-fidélité sur le fondement de mesures ADCP montées sur des navires afin d'évaluer les sillages des turbines opérationnelles. Comme il existe très peu d'informations dans le domaine public sur les sillages des turbines de courant de marée lors du déploiement de turbines opérationnelles, ces résultats sont aussi présentés.

Normandie Hydroliennes espère et prévoit que cette publication aidera l'ensemble de l'industrie hydrolienne à développer des réseaux à plus grande échelle.



Rapport technique sur le travail de terrain et l'analyse des données d'écoulement de haute-fidélité, y compris les mesures d'écoulement et de turbulence effectuées à partir d'un navire

Ce rapport technique résume les résultats des travaux de terrain et d'analyse des données d'écoulement haute-fidélité entrepris sur le site de MeyGen en 2022-2023.

F. Johnson

Pour diffusion publique via TIGER

Auteur : F. Johnson	Document No : MEY-21-2-REP-001-F-Meygen- 2022 Field Work Analysis Report.Docx	Révision : 2
Titre du document : Rapport technique sur le travail de terrain et l'analyse des données d'écoulement haute-fidélité, y compris les mesures de débit et de turbulence à partir de navires		



Historique et statut du document

Révision	Approuvé par (en interne)	Date d'approbation	Date d'émission	Commentaire
1	D. Taaffe	28/03/2023	28/03/2023	Première version pour commentaires de l'OREC
2	D. Taaffe	16/06/2023	16/06/2023	Finale

26 Dublin Street,
Edinburgh,
Royaume-Uni,
EH3 6NN

www.meygen.com

MEY-21-2-REP-001-F-MeyGen- 2022 Field Work Analysis Report_Rev2

1	INTRODUCTION.....	2
2	MESURES SMADCP HAUTE-FIDÉLITÉ ET ANALYSE DES DONNÉES.....	3
2.1	Turbulences.....	3
2.1.1	Le filtrage.....	4
2.1.2	Résultats.....	5
2.1.2.1	TI en fonction de l'intensité du courant pour différentes hauteurs au-dessus du fond marin.....	5
2.1.2.2	Profil TI avec hauteur au-dessus du fond marin.....	8
2.1.2.3	TI utilisant la méthode des 4 poutres par rapport à la méthode des 5 poutres..	9
2.1.2.4	Profil TKE par rapport à la hauteur au-dessus du fond marin.....	12
2.1.2.5	TI utilisant la méthode des 4 poutres concernant la méthode des 5 poutres..	13
3	MESURES VMADCP HAUTE-FIDÉLITÉ ET ANALYSE DES DONNÉES.....	14
3.1	Essais stationnaires de collecte de données.....	15
3.2	Essais de collecte de données sur les escales	15
3.3	Résultats de la mesure de la dérive du sillage	17
3.4	Résultats de la mesure de l'accélération du réveil.....	18
3.5	Résultats des mesures sur les transects de sillage	19
3.5.1	Évaluation du nombre requis de transects de sillage répétés.....	20
3.5.2	Résultats des transects de sillage répétés	21
3.6	Résultats de la mesure de l'escale de Wake	24
3.7	Évaluation des ressources à l'aide des données combinées VMADCP et SMADCP sur les escales	24
3.7.1	Enquête sur les délais	25
3.7.2	Corrélation VMADCP vs SMADCP à l'emplacement du SMADCP.....	25
3.7.2.1	Sélection des données.....	25
3.7.2.2	Analyse des données	26
3.7.2.3	Résultats.....	26
3.7.3	Corrélation VMADCP vs SMADCP aux emplacements potentiels des éoliennes	27
3.7.3.1	Résultats.....	27
3.7.3.2	Conclusions.....	29

Figure 1 - Conventions d'axe	4
Figure 2 - Profils moyens des 50 ^e , 90 ^e et 99 ^e percentiles de l'IT pour des conditions avec une magnitude de courant > 1 m/s lorsque Hm0 < 0,5 m (ronds, ligne continue) et pour tous les états de mer (étoiles, ligne pointillée)	5
Figure 3 - 50 ^e , 90 ^e et 99 ^e percentiles de TI le long de l'axe x_L	6
Figure 4 - 50 ^e , 90 ^e et 99 ^e percentiles de l'IT le long de l'axe y_L	7
Figure 5 - 50 ^e , 90 ^e et 99 ^e percentiles de l'IT le long de l'axe z_{up}	8
Figure 6 - 50 ^e , 90 ^e et 99 ^e TI percentiles le long des axes x_L , y_L et z_{up} à travers la colonne d'eau, pour des courants > 1 m/s	9
Figure 7 - Diagrammes de dispersion de l'IT dans la direction x_L grâce à les équations à 5 poutres par rapport aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin.	10
Figure 8 - Diagrammes de dispersion du TI dans la direction y_L grâce à les équations à 5 poutres face aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin.	11
Figure 9 - Diagrammes de dispersion de l'IT dans la direction z_{up} grâce à les équations à 5 poutres face aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin.	12
Figure 10 - Profils d'énergie cinétique de la turbulence répartis par centile	13
Figure 11 - Diagrammes de dispersion du TKE établi à l'aide des équations à 5 poutres face aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin	14
Figure 12 - Définition de la zone autour de TTG4 utilisée dans l'analyse des données	16
Figure 13 - Comparaison des données VMADCP et TMADCP pour l'essai d'escale TTG4	16
Figure 14 - Dérive de la veille sur le TTG3	17
Figure 15 - Dérive de la veille sur le TTG3	17
Figure 16 - Dérive de la veille sur le TTG4	18
Figure 17 - Dérive de la veille sur le TTG4	18
Figure 18 - Remontée du sillage (marée descendante)	19
Figure 19 - Wake drive -up (marée montante)	19
Figure 20 - Estimations de la vitesse en aval à partir de transects répétés dans le sillage de l'éolienne	20
Figure 21 - Convergence des vitesses en aval grâce à transects répétés dans le sillage de l'éolienne	21
Figure 22 - Vitesse aval à l'échelle, direction de la crue (turbine éteinte)	22
Figure 23 - Vitesse aval à l'échelle, direction de l'inondation (turbine en marche)	22
Figure 24 - Vitesse aval à l'échelle, direction du jusant (turbine éteinte)	23
Figure 25 - Vitesse aval à l'échelle, direction du jusant (turbine en marche)	23
Figure 26 - Déficit de vitesse en aval, direction du jusant (turbine en marche)	23
Figure 27 - Grandeur et direction de la vitesse à l'échelle à +10D (reflux)	24
Figure 28 - Magnitude et direction de la vitesse à l'échelle à +14D (inondation)	24
Figure 29 - Trajectoire des navires pour les données VMADCP par rapport à la position SMADCP et à la position de la cible	26
Figure 30 - Régression linéaire des données VMADCP face aux données SMADCP à 19 m au-dessous du LAT (données stationnaires)	27
Figure 31 - Régression linéaire des données VMADCP face aux données SMADCP pour le disque du rotor (données stationnaires)	27
Figure 32 - Régression linéaire des données VMADCP face aux données SMADCP pour le disque du rotor (données d'arrêt)	28
Figure 33 - Régression linéaire des données VMADCP face aux données SMADCP pour le disque du rotor (données d'arrêt)	28

Abréviations

ADCP	Profileur de courant acoustique à effet Doppler
SMADCP	ADCP monté sur le fond marin
TMADCP	ADCP monté sur turbine
VMADCP	ADCP monté sur le navire
CEI	Commission électrotechnique internationale
LAT	Marée astronomique la plus basse
mab	Mètres au-dessus du niveau de la mer

1 INTRODUCTION

Ce rapport technique résume les résultats des travaux de terrain et d'analyse des données d'écoulement haute-fidélité entrepris sur le site de MeyGen en 2022-2023.

Ce travail comprend

1. Développement d'une nouvelle approche pour collecter des données de débit sur les sites potentiels des futures hydroliennes (comme détaillé ci-dessous et grâce à (2) et (3)), qui pourrait suffisamment être robuste pour le développement/optimisation du réseau tout en évitant potentiellement la nécessité d'entreprendre les approches actuellement standard de l'industrie décrites ci-dessous, comme recommandé dans la norme IEC TS 62600-2011 :
 - a. déployer un ADCP monté sur le fond marin (SMADCP) pendant environ 90 jours à chaque emplacement potentiel d'une future turbine hydrolienne (financièrement non viable pour les réseaux de plus de quelques turbines, prévu pour les réseaux de moins de 10 MW) ;
 - b. ils s'appuient sur les résultats de la modélisation hydrodynamique avec l'étalonnage et la validation d'environ 35 jours de déploiements SMADCP (avec une incertitude difficile à quantifier, en particulier pour les réseaux plus importants et/ou les réseaux qui couvrent une zone relativement vaste et/ou lorsque la ressource change de manière significative dans la zone du réseau).
2. Mesures SMADCP haute-fidélité et analyse des données associées. Il s'agissait de fournir des données de turbulence de haute-fidélité pour une zone du site MeyGen éloignée du réseau de 4 turbines actuellement déployé, et de fournir une vitesse de courant précise à laquelle d'autres mesures ADCP montées sur bateau (VMADCP) pourraient être corrélées. Des résultats détaillés sont inclus dans ce rapport afin d'enrichir les connaissances de l'industrie sur la turbulence sur différents sites.
3. Mesures VMADCP haute-fidélité et analyse des données associées. Il s'agissait de :
 - a. entreprendre des mesures de la formation et de la dissipation du sillage des turbines MeyGen existantes pour permettre à l'industrie de calibrer et de valider la modélisation mathématique du sillage d'une turbine en fonctionnement ;
 - b. effectuer des mesures sur les sites potentiels des futures turbines à marée pour le développement et l'optimisation des réseaux, sur la base de l'approche développée au point (1).

L'approche novatrice décrite en (1) a d'abord fait l'objet d'une hypothèse afin de résoudre les problèmes énoncés en (1), puis a été développée sur le fondement d'une analyse des mesures existantes et d'une modélisation hydrodynamique du site de MeyGen. Elle a ensuite été développée sur le principe d'une analyse des mesures existantes et de la modélisation hydrodynamique du site de MeyGen, ce qui a permis d'affiner l'approche, qui a ensuite été utilisée dans la pratique.

L'approche utilise les données VMADCP collectées lors d'une "escale" quasi stationnaire à l'emplacement d'une turbine proposée et la corrélation des données d'escale résultantes avec les données collectées simultanément (récupérées ultérieurement) à partir d'un SMADCP situé à proximité.

La méthode a d'abord été testée pour vérifier la capacité d'un navire de sécurité/transfert d'équipage/réponse rapide relativement standard (non amarré, sans positionnement dynamique) à rester presque stationnaire dans les courants très turbulents et rapides du site de MeyGen, et si des données VMADCP suffisamment robustes pouvaient être collectées. Après ces essais pratiques, le principal travail d'étude a consisté à faire des escales d'environ 5 à 7 minutes à des emplacements potentiels d'éoliennes, toutes les heures pendant les marées de printemps. Les différents emplacements potentiels des éoliennes ont été répartis sur des journées distinctes, avec quelques chevauchements, car le nombre au maximum d'emplacements potentiels des éoliennes qui peuvent être mesurés durant une période de 12 heures est limité par l'obligation de retourner à chaque emplacement potentiel d'éolienne toutes les heures. Ces données d'escale ont été mises en corrélation avec les données SMADCP concomitantes, et cette corrélation a ensuite été utilisée pour prédire l'occurrence du débit à chaque emplacement d'éolienne.

¹ Énergie marine - Convertisseurs de vagues, de marées et d'autres courants marins - Partie 201 : Évaluation et caractérisation des ressources en énergie hydrolienne. Édition 1.0. 2015-2004. https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62600-201%7Bed1.0%7Den.pdf

Le reste de ce rapport se concentre sur les points (2) et (3) qui, ensemble, résument l'approche novatrice visant à surmonter les problèmes mentionnés au point (1).

MeyGen a passé un contrat avec Applied Renewables Research Ltd. (ARR) de fournir les ADCP pour les travaux d'étude et d'entreprendre les principaux aspects des études ADCP et l'analyse des données obtenues ; les principaux aspects de l'analyse ont été confiés à DynamOcean EURL (DO). MeyGen a engagé séparément les navires nécessaires aux travaux.

La majorité des informations présentées dans les sections suivantes sont directement tirées des rapports ARR/DO associés, mentionnés ici dans leur intégralité et non référencés/reconnus à chaque fois.

2 MESURES SMADCP HAUTE-FIDÉLITÉ ET ANALYSE DES DONNÉES

Les résultats SMADCP haute-fidélité sont établis sur une campagne de mesure SMADCP à 5 faisceaux (utilisant un RDI Sentinel V) qui a duré 42 jours au total, dont 41 jours ont été utilisés pour l'analyse des courants moyens et des vagues, et 37 jours pour l'analyse de la turbulence. Les 41 jours pour l'analyse des courants moyens dépassent les exigences de la norme IEC TS 62600-201 (35 jours) (comme indiqué dans la section 1).

Les mesures SMADCP ont été échantillonnées à 2 Hz, avec des ensembles de 600 s et 1080 pings par ensemble :

- Tangage, roulis, cap ;
- Pression ;
- Profils le long des 5 poutres, avec une cellule de 1 m de profondeur, de :
 - Vitesse du faisceau ;
 - Intensité (ou amplitude) de l'écho ;
 - Corrélation.

Les principaux aspects à noter sont les suivants :

- Le tangage et le roulis ont fluctué à environ -1° et environ 1° respectivement. L'écart-type de l'inclinaison est généralement inférieur à $0,2^{\circ}$. Le cap moyen est d'environ 90° avec une déviation standard inférieure à $0,6^{\circ}$.
- La corrélation du faisceau, l'intensité de l'écho et les vitesses du faisceau présentent toutes des données satisfaisantes.
- Toutes les exigences de la norme IEC TS 620600-201 relatives aux déploiements de SMADCP ont été satisfaites ou dépassées.

Les mesures SMADCP ont été utilisées pour fournir une vitesse de courant précise à laquelle d'autres mesures VMADCP simultanées peuvent être corrélées, comme indiqué dans la section 0. Pour des raisons de simplicité, ces résultats sont présentés dans la section 3.

Les autres paramètres principaux d'intérêt, comme indiqué dans la section suivante, sont liés à la turbulence haute-fidélité.

2.1 Turbulences

La turbulence est décrite en termes de contraintes de Reynolds, d'intensité de la turbulence (TI) et d'énergie cinétique turbulente (TKE).

Les contraintes normales de Reynolds $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$ et $\overline{w^2}$ sont calculées à partir des variances de vitesse des faisceaux à l'aide des équations 129, 130 et 131 de Dewey et Stringer ²⁰⁰⁷². Le TKE et le TI sont ensuite dérivés des contraintes de Reynolds :

$$TKE \equiv \frac{q^2}{2} = \frac{(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})}{2} \quad TI = \frac{\sqrt{\frac{2q^2}{3}}}{U}, \quad TI_x = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{U}, \quad TI_y = \frac{\sqrt{\overline{v^2}}}{U}, \quad TI_z = \frac{\sqrt{\overline{w^2}}}{U}$$

Où U est l'amplitude de la vitesse horizontale moyenne.

L'axe YL de l'ADCP se situe à environ 6 degrés de l'axe x_{ch} du canal, ce qui permet d'utiliser les valeurs TIX et TIY horizontales dans les coordonnées de l'instrument nivelé comme approximations pour les estimations dans les coordonnées des axes du canal, voir la figure 1.

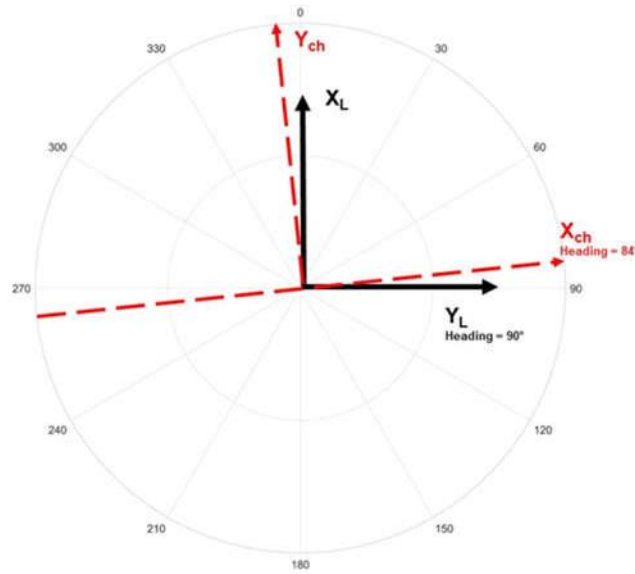


Figure 1 - Conventions d'axe

2.1.1 Filtrage

Après l'estimation et l'élimination du bruit Doppler, suivies d'un filtrage des conditions dans lesquelles de grandes vagues ($H_{m0} > 0,5$ m) ont été enregistrées, les paramètres de turbulence ont été générés. H_{m0} a été utilisé comme filtre pour minimiser l'influence des vagues ; voir la figure 2 pour une comparaison des paramètres TI avec et sans l'application du filtre. La majeure partie du filtrage des états de mer plus importants s'est déroulée sur une période d'environ 9 jours lorsqu'une grosse tempête a traversé le site ; la majorité de cette période s'est déroulée pendant les marées de mortes-eaux.

Une comparaison des paramètres TI entre les ensembles de données filtrées et non filtrées a montré que le processus de filtrage des ondes appliqué était efficace.

² Dewey, R. et Stringer, S. (2007). Reynolds Stresses and Turbulent Kinetic Energy Estimates from Various ADCP Beam Configurations : Theory. Journal of Physical Oceanography, 35.

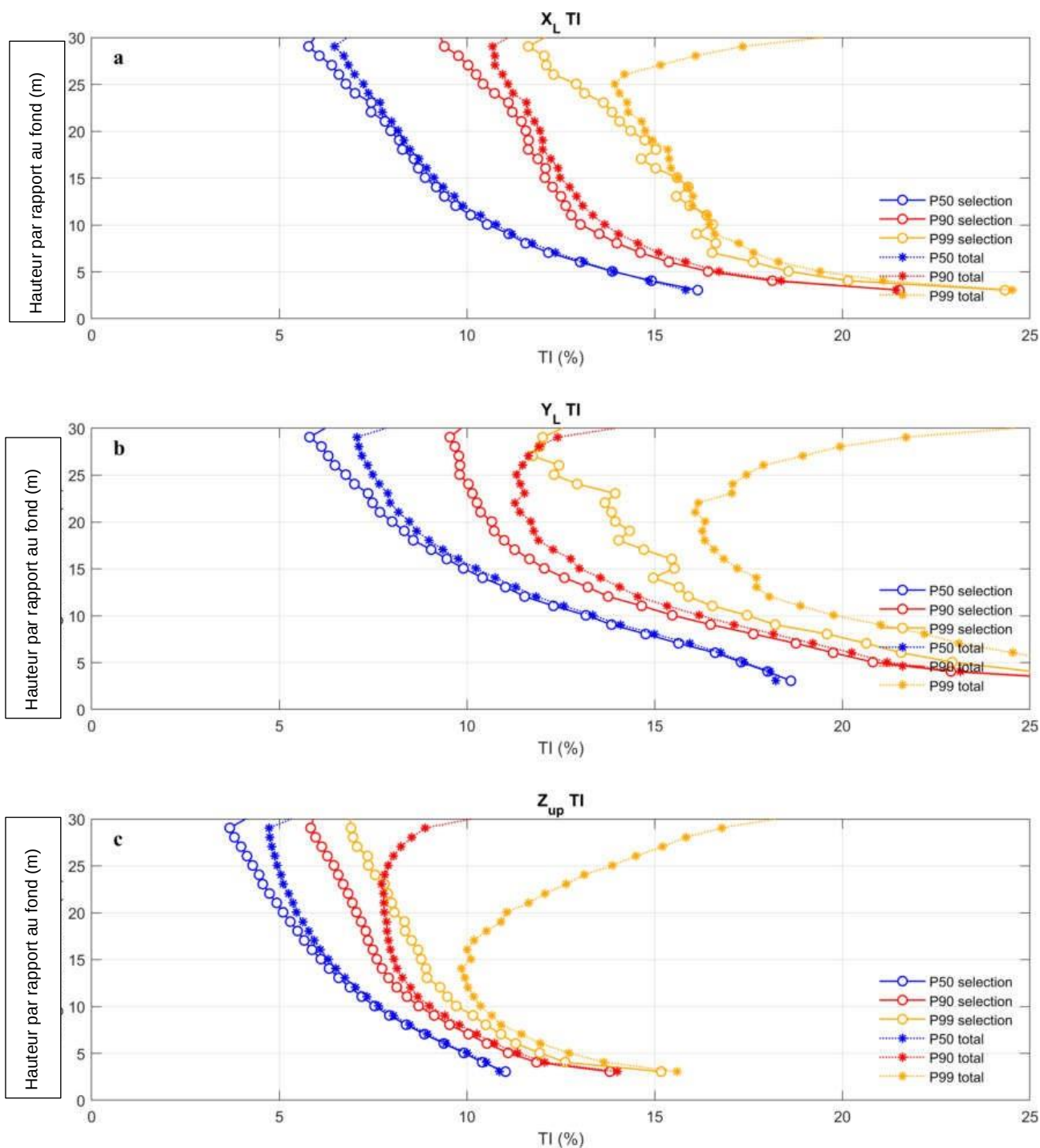


Figure 2 - Profils moyens des 50^e, 90^e et 99^e percentiles de l'IT pour les conditions avec l'ampleur du courant > 1 m/s lorsque $H_{m0} < 0,5$ m (ronds, ligne continue) et pour tous les états de mer (étoiles, ligne pointillée).

2.1.2 Résultats

2.1.2.1 TI en fonction de l'intensité du courant pour différentes hauteurs au-dessus du fond marin

Les figures 3 à 5 montrent les valeurs P50, P90 et P99 de TI dans les coordonnées X_L , Y_L et Z_{up} de l'instrument nivelé, par rapport à la magnitude, de la vitesse du courant signé et de la hauteur au-dessus du fond marin (mab). Les valeurs P50, P90 et P99 ont été calculées sur la base de la moyenne et de l'écart-type de l'IT pour chaque classe de vitesse.

Les résultats de TI montrent une asymétrie des marées, les valeurs de TI étant plus importantes pendant les marées de crue (magnitude de vitesse signée positive). Cet effet est plus visible au fond de la mer et devient plus discret vers la surface. En général, pour des vitesses supérieures à 2 m/s, l'IT est plus important près du fond marin, comme prévu. L'IT varie considérablement en fonction de la distance par rapport au fond marin et de l'étape du cycle de marée. (m/s)

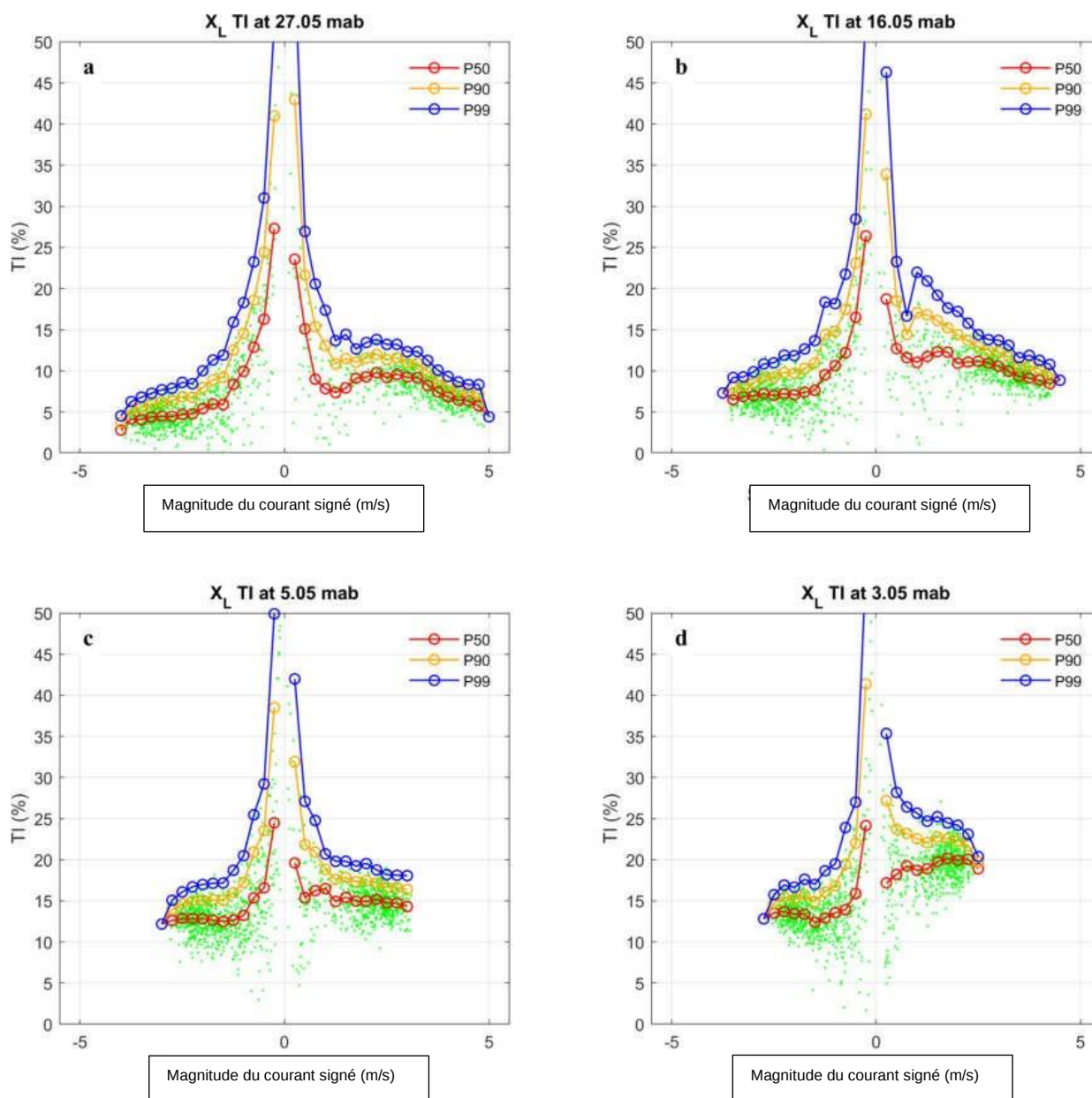


Figure 3 - 50e, 90e et 99e percentiles de l'IT le long de l'axe x_L

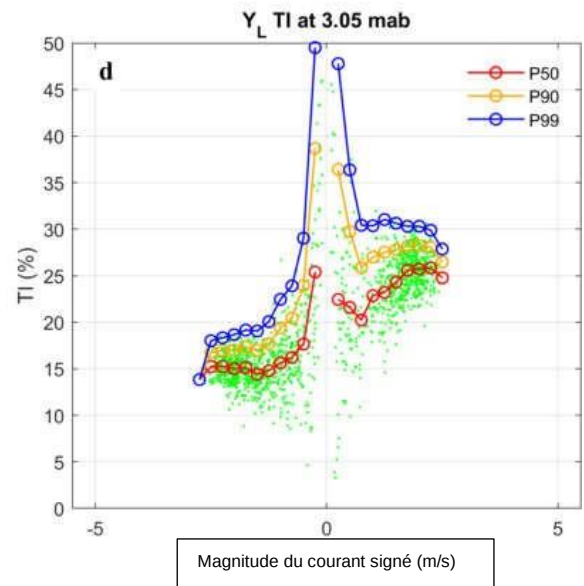
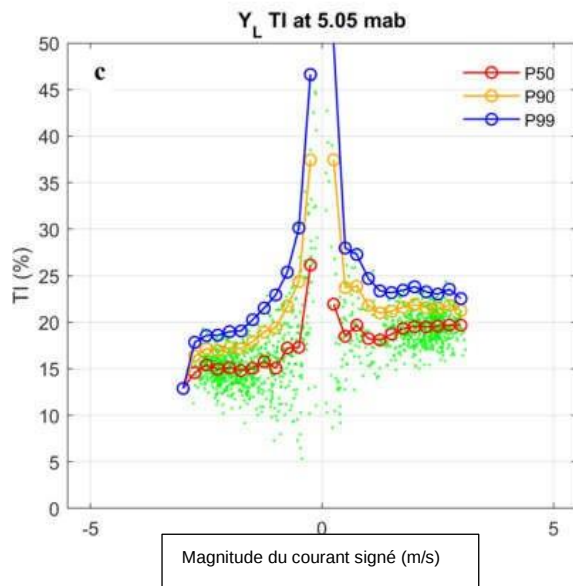
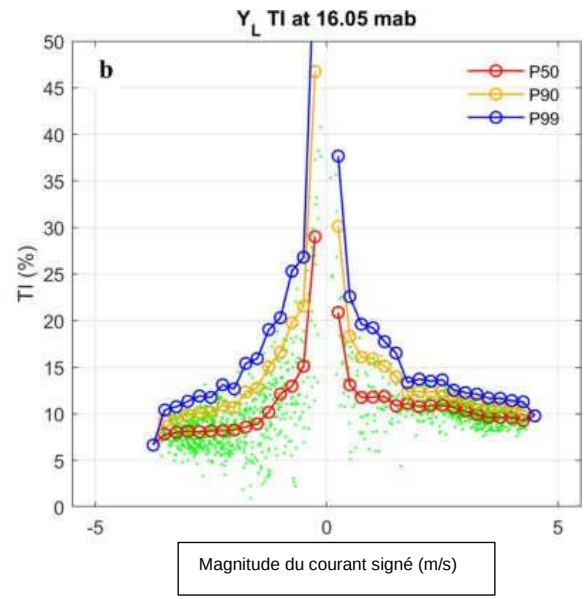
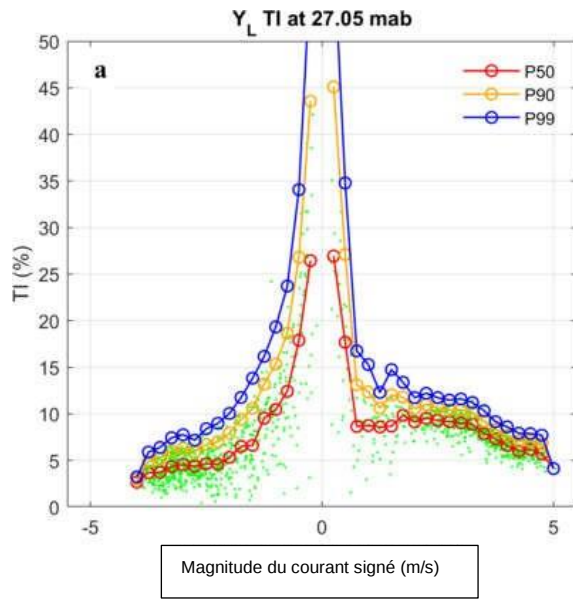


Figure 4 - 50e, 90e et 99e percentiles de l'IT le long de l'axe Y_L

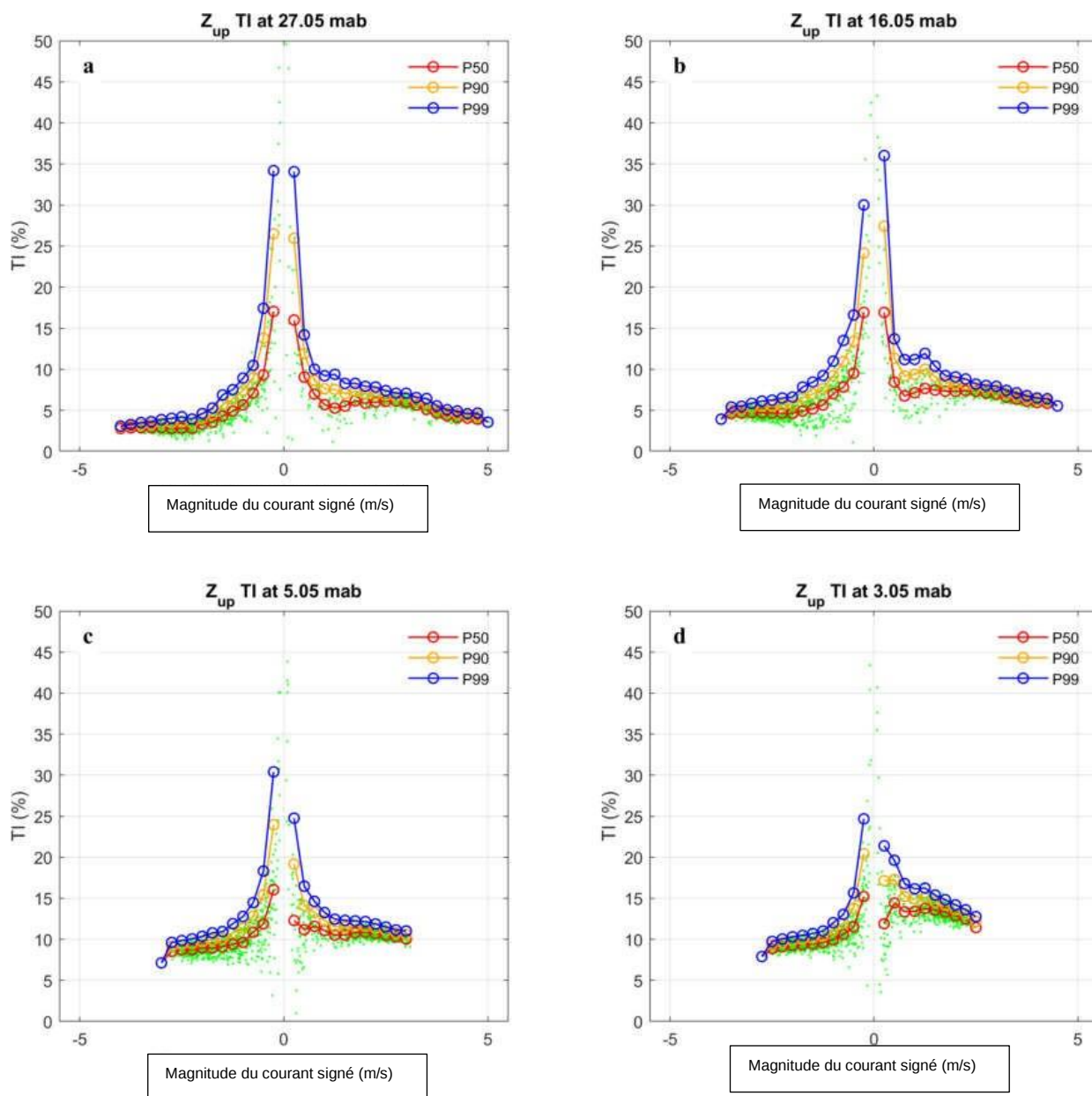


Figure 5 - 50e, 90e et 99e percentiles de l'IT le long de l'axe Z_{up}

2.1.2.2 Profil TI avec hauteur au-dessus du fond marin

La figure 6 présente les profils de TI pour une magnitude de courant > 1 m/s (et $H_{m0} < 0,5$ m). Les profils montrent les TI P50, P90 et P99 pour les directions de courant x_L , y_L et z_{up} . Comme nous l'avons vu plus haut, l'IT est plus important près du fond marin et diminue progressivement vers la surface. L'IT dans les directions horizontales est plus important que dans la direction verticale.

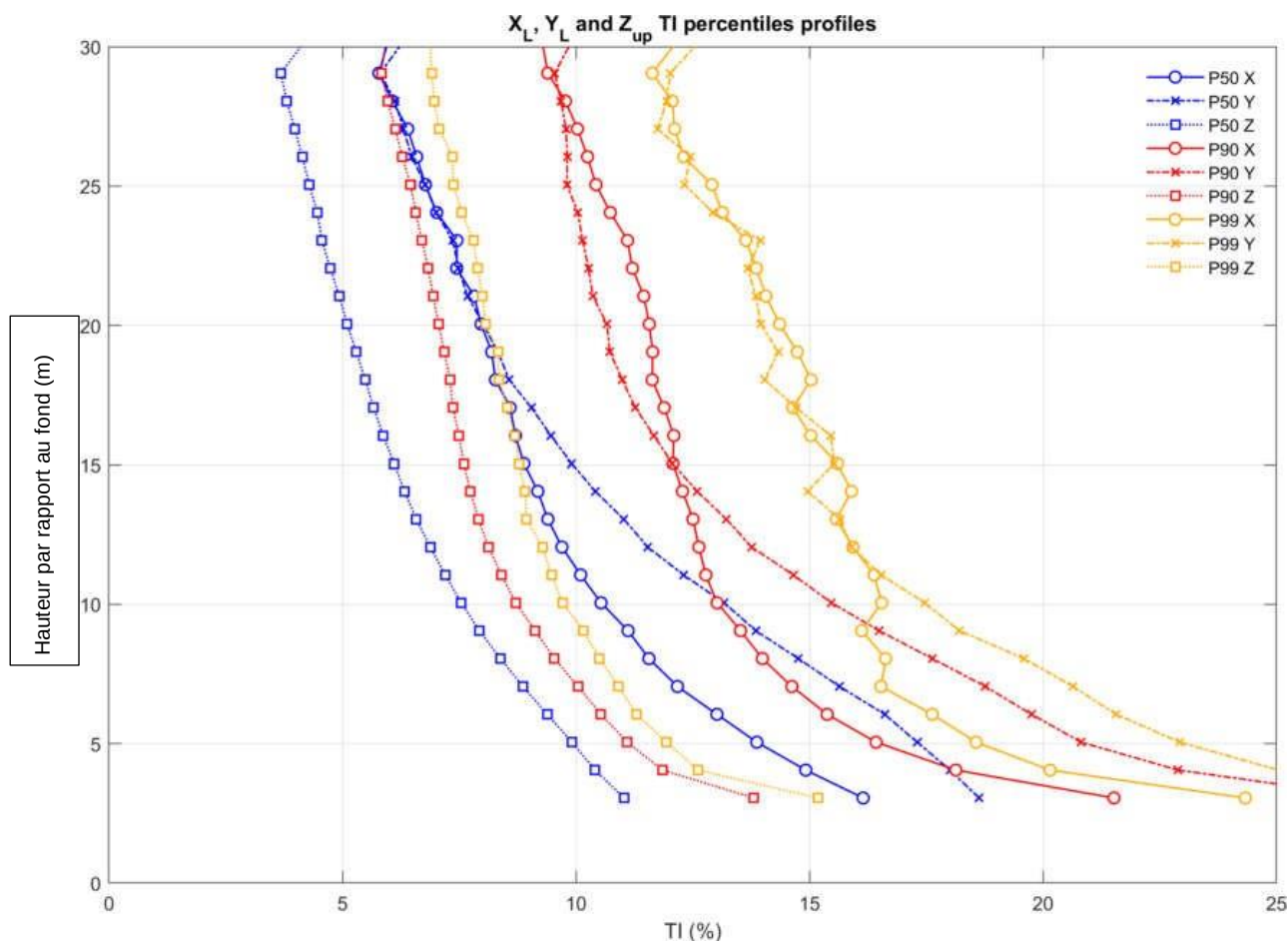


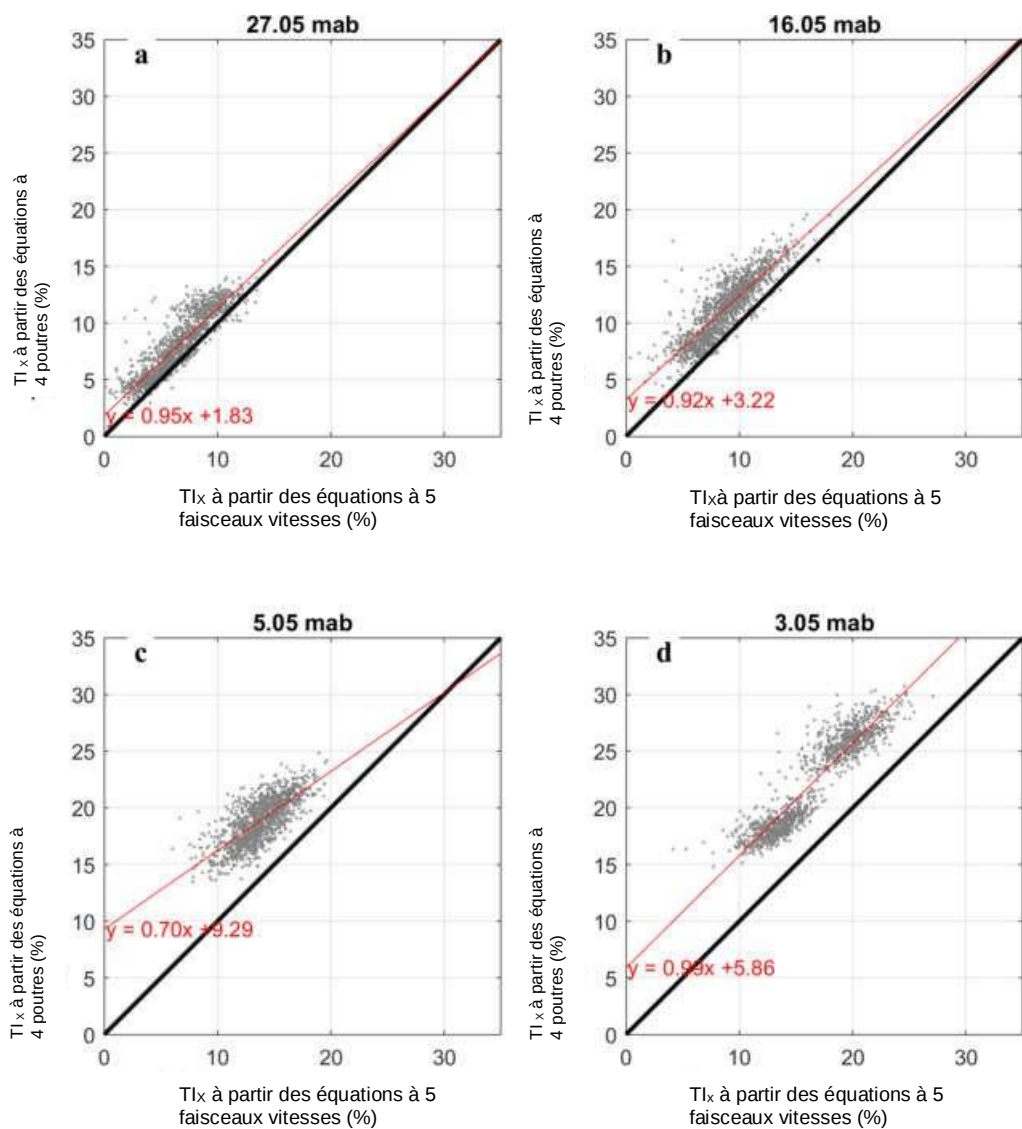
Figure 6 - 50ème , 90ème et 99^{ème} TI percentiles le long des axes x_L , y_L et z_{up} à travers la colonne d'eau, pour des courants > 1m/s

2.1.2.3 TI utilisant la méthode des 4 poutres par rapport à la méthode des 5 poutres

L'IT a également été calculé à l'aide de la méthode des 4 faisceaux, qui est établie sur les écarts types calculés directement à partir des vitesses cartésiennes immédiates. Cette méthode devrait être erronée, car les vitesses cartésiennes immédiates reposent sur l'hypothèse de l'homogénéité immédiates du flux, ce qui est systématiquement faux en présence de turbulences et de vagues. Bien qu'elle soit erronée, la variance du bruit doppler a aussi été soustraite de la variance totale par souci de cohérence. Dans ce cas, le bruit doppler a été estimé à partir des spectres de vitesse des instruments nivelés.

Comme le montrent les figures 7 et 8, dans les directions horizontales x_L et y_L , la méthode des 4 faisceaux conduit à une surestimation de TI, avec des décalages qui varient en fonction de la distance au-dessus du fond marin.

En revanche, comme le montre la figure 9, dans la direction verticale, la méthode des 4 faisceaux sous-estime TI. Cette sous-estimation augmente vers la surface.



b

Figure 7 - Diagrammes de dispersion de l'IT dans la direction x_L en utilisant les équations à 5 poutres par rapport aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin.

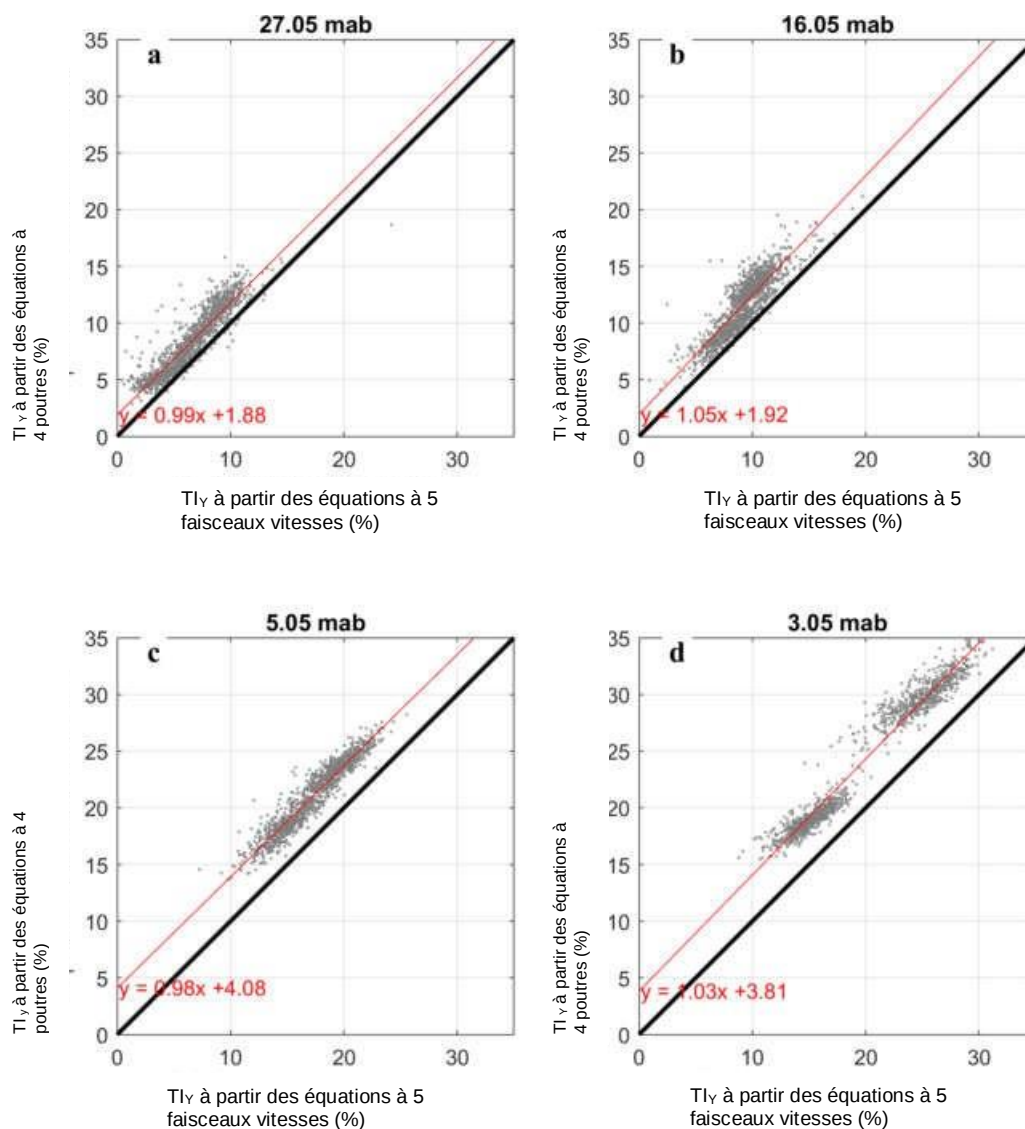


Figure 8 - Diagrammes de dispersion du TI dans la direction YL en utilisant les équations à 5 poutres par rapport aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin.

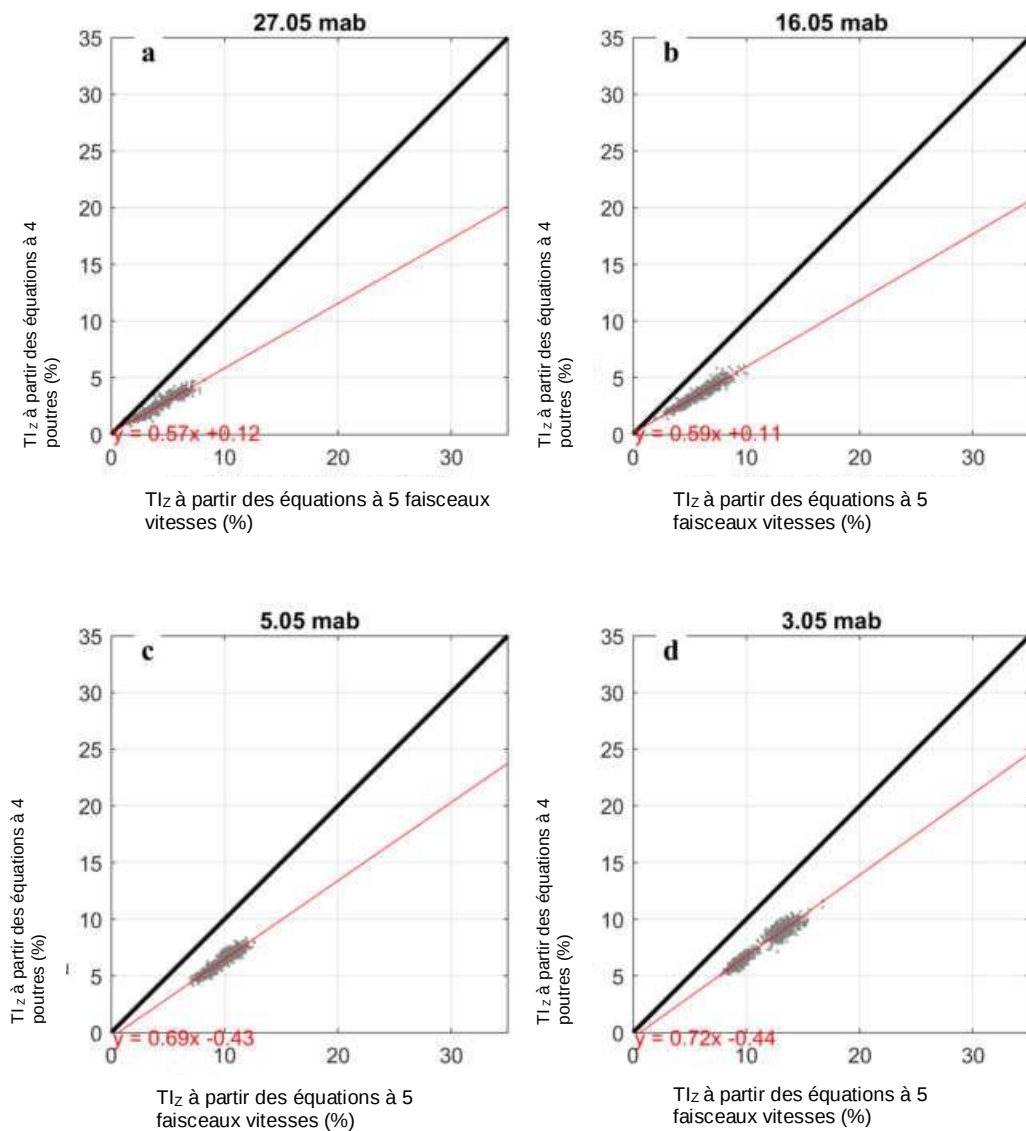


Figure 9 - Diagrammes de dispersion de l'IT dans la direction z_{up} en utilisant les équations à 5 poutres par rapport aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin.

2.1.2.4 Profil TKE en fonction de la hauteur au-dessus du fond marin

Le TKE a été calculé grâce à les contraintes de Reynolds calculées à partir des équations ADCP à 5 faisceaux, comme indiqué ci-dessus. Dans la figure 10, le profil TKE moyen se réfère aux résultats moyennés dans le temps, pour une amplitude de courant > 1 m/s (et $H_{m0} < 0,5$ m). Les percentiles P50, P90 et P99 ont été calculés comme pour le TI.

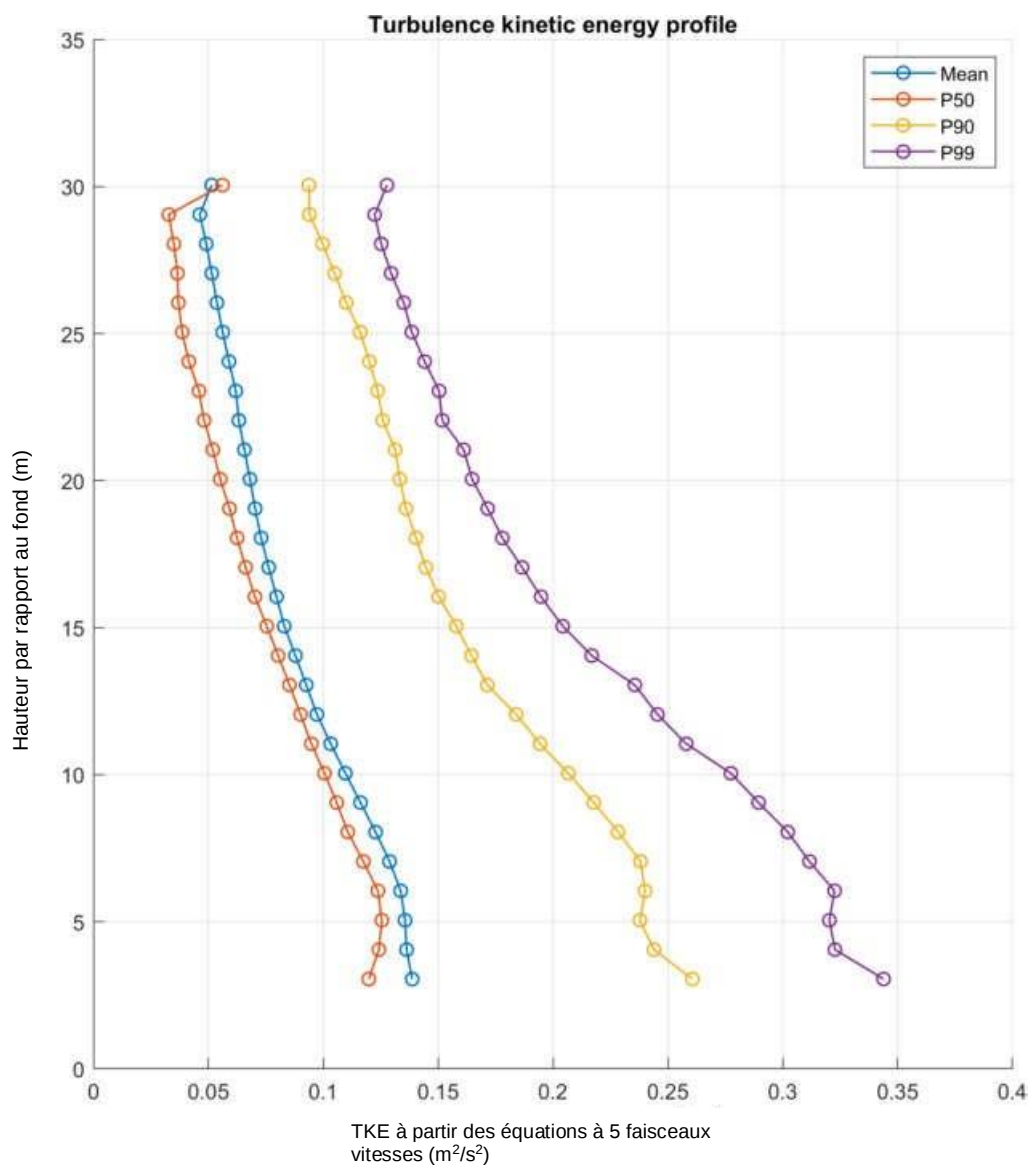


Figure 10 - Profils d'énergie cinétique de la turbulence divisés par percentile

2.1.2.5 TI utilisant la méthode des 4 poutres par rapport à la méthode des 5 poutres

Comme pour le TI, le TKE a également été calculé à l'aide de la méthode des 4 poutres, qui est établie sur les contraintes de Reynolds calculées directement à partir des vitesses cartésiennes instantanées. La comparaison des résultats à 4 poutres avec les résultats de référence à 5 poutres de la figure 11 montre que la méthode à 4 poutres surestime le TKE d'environ 25 à 50 % en fonction de la hauteur au-dessus du fond marin.

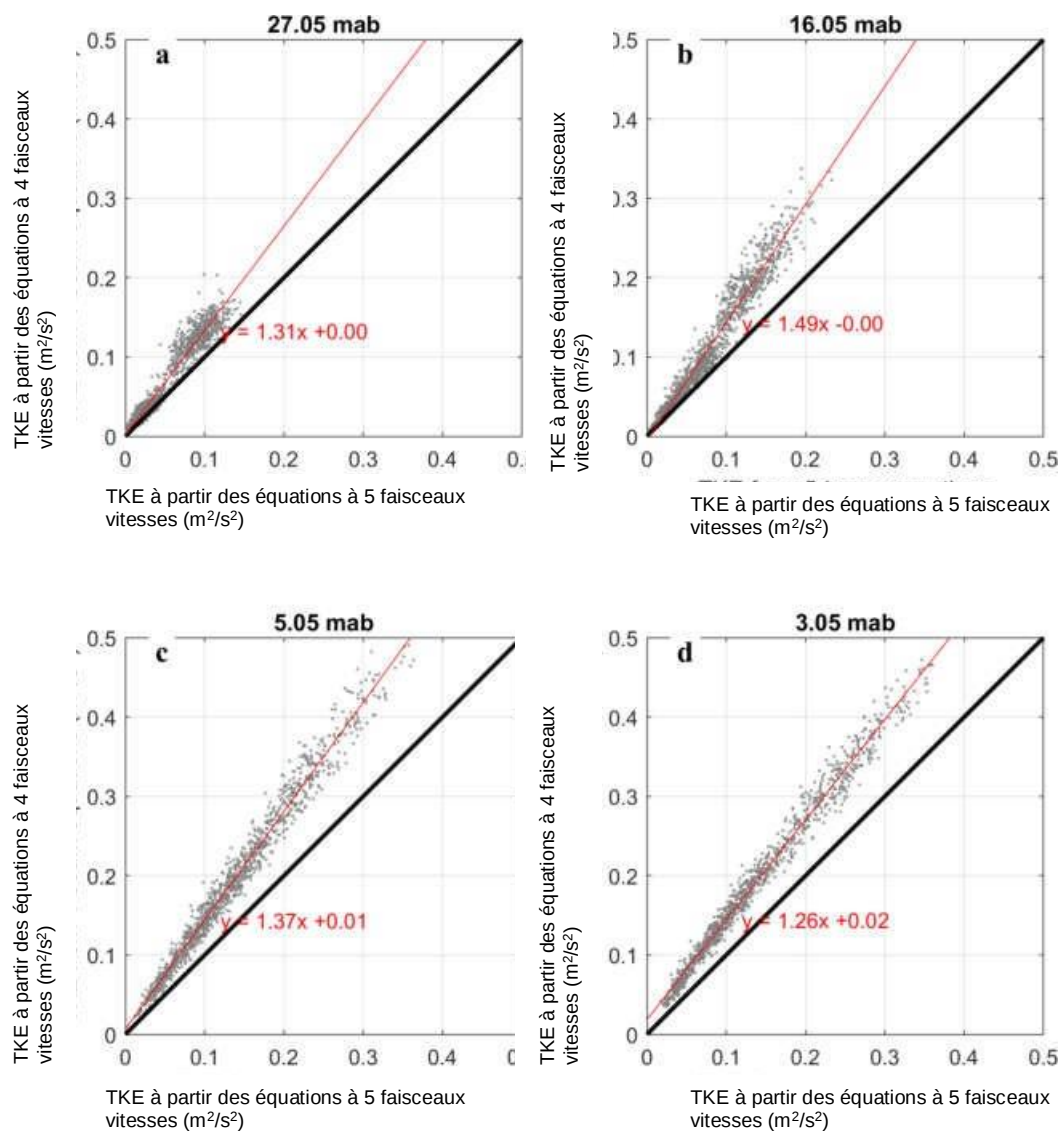


Figure 11 - Diagrammes de dispersion du TKE établi à l'aide des équations à 5 poutres par rapport aux équations à 4 poutres pour les hauteurs de référence au-dessus du fond marin

3 MESURES VMADCP HAUTE-FIDÉLITÉ ET ANALYSE DES DONNÉES

Comme indiqué dans la section 0, les mesures VMADCP haute-fidélité ont été effectuées à la fin de l'année :

- Entreprendre des mesures de la formation et de la dissipation du sillage des turbines MeyGen existantes et fournir les résultats des mesures du sillage pour permettre à l'industrie de calibrer et de valider la modélisation mathématique du sillage d'une turbine opérationnelle ;
- Effectuer des mesures sur les sites potentiels des futures turbines hydroliennes pour le développement et l'optimisation des réseaux.

Des ensembles de données VMADCP haute-fidélité ont été collectés à 1 Hz, grâce à un ADCP Teledyne Workhorse Monitor 600 kHz, configuré pour 50 cellules de profondeur de 1 m chacune. Toutes les exigences de la norme IEC TS 620600-201 relatives aux déploiements VMADCP ont été respectées ou dépassées.

Ces ensembles de données comprennent des données associées aux méthodes d'enquête suivantes :

- "stationnaire" : collecte de données presque stationnaire pendant de longues périodes continues (> 1 heure), destinée à tester la période nécessaire pour obtenir des données représentatives sur les escales.
- "escale" : comme indiqué dans la section 0, collecte de données quasi stationnaires durant de courtes périodes (typiquement environ 5-7 minutes), généralement répétée toutes les heures durant environ 12 heures (c'est-à-dire pour un cycle complet de marée de 12 heures), pour être (plus tard) corrélée aux données SMADCP à long terme concomitantes, avec l'intention que la corrélation résultante puisse être utilisée pour prédire l'occurrence du débit à long terme à chaque emplacement d'escale.
- "dérive dans le sillage" : collecte de données alors que le navire équipé du VMADCP dérive dans le sillage d'une turbine hydrolienne opérationnelle de 18 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1,5 MW.
- "wake drive-up" : collecte de données pendant que le navire équipé du VMADCP remontait le sillage d'une turbine hydrolienne opérationnelle de 18 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1,5 MW. Cette approche a également été combinée avec des études d'escale dans le sillage (également avec la turbine passant d'un état opérationnel à un état non opérationnel).
- "transect de sillage" : études répétées de transects dans le sillage d'une turbine hydrolienne opérationnelle de 18 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1,5 MW. Cette approche a été utilisée alors que la turbine passait d'un état opérationnel à un état non opérationnel.

Le reste de cette section décrit les mesures et les résultats de haute-fidélité.

3.1 Collecte de données stationnaires essais

Le navire et le VMADCP ont été positionnés pendant plus de deux heures au-dessus d'une turbine opérationnelle de 18 m de diamètre et de 1,5 MW, qui dispose d'un ADCP monté sur la turbine (TMADCP). Le TMADCP est orienté vers le haut et les données du TMADCP sont immédiatement disponibles via le système de contrôle MeyGen.

L'analyse des données a été effectuée grâce à des périodes de calcul de la moyenne de 5 minutes, 10 minutes et 15 minutes - afin d'étudier la période nécessaire pour obtenir des données représentatives sur les escales.

L'analyse comparative a permis de définir les enquêtes sur les arrêts avec un minimum de 5 minutes d'arrêt.

Cette approche, et la précision de l'utilisation des données VMADCP par rapport aux données SMADCP, ont été validées ultérieurement par une collecte et une analyse similaires de données stationnaires sur le SMADCP (voir section 3.7.2).

3.2 Collecte de données sur les escales essais

Les enquêtes en escale ont été entreprises au-dessus de deux turbines opérationnelles de 1,5 MW et de 18 m de diamètre (chacune de conception/fabrication différente), qui disposent de TMADCP embarqués, comme indiqué ci-dessus.

La figure 12 (montrant la zone utilisée pour l'analyse des données) et la figure 13 (montrant une comparaison entre les données des escales du VMADCP et celles du TMADCP à 12 m au-dessous de la LAT (zéro des cartes, CD) illustrent des exemples de résultats obtenus lors de l'un de ces essais.

3.3 Me Résultats des mesures de la dérive du sillage

Comme indiqué dans l'introduction de la section 3, les mesures de dérive du sillage se réfèrent aux ensembles de données du VMADCP dans lesquels le navire (et le VMADCP) a dérivé avec le courant le long du sillage, en aval d'une turbine opérationnelle de 18 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1,5 MW, tout en recueillant continuellement des données.

Les résultats de l'amplitude du courant horizontal en fonction de la profondeur et de la distance par rapport à la turbine (le positif est en aval de la turbine) sont présentés à différents stades de la marée, pour deux turbines différentes, dans les figures 14 à 17.

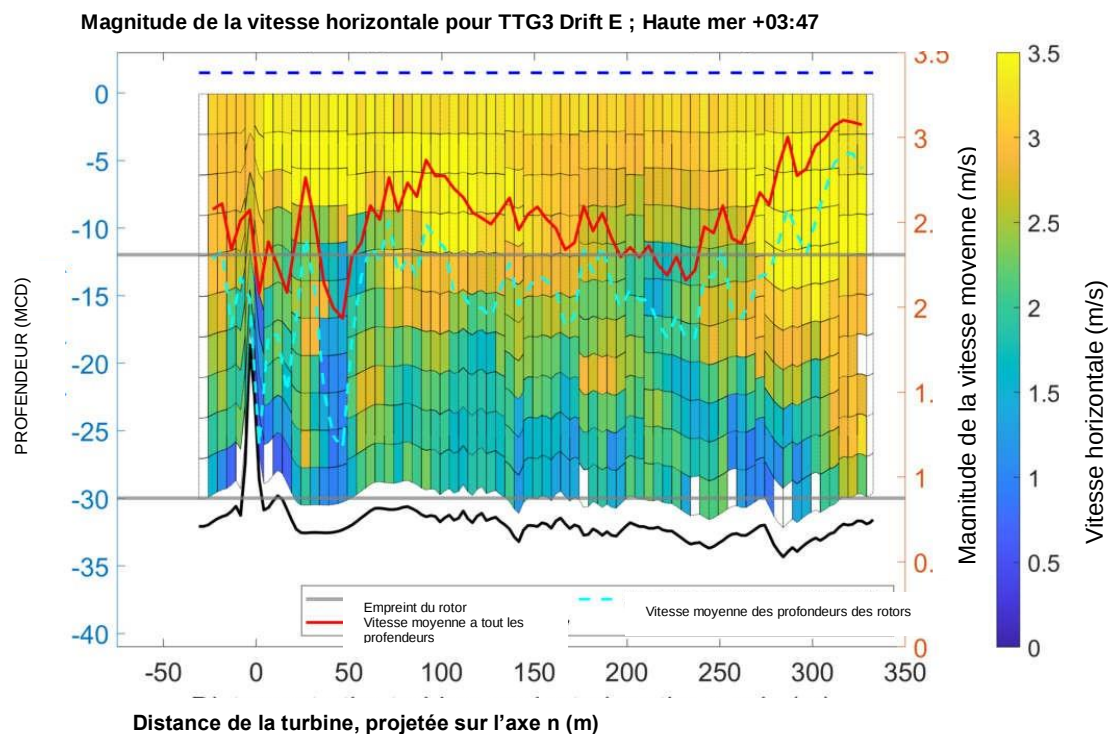


Figure 14 - Dérive de la veille sur le TTG3

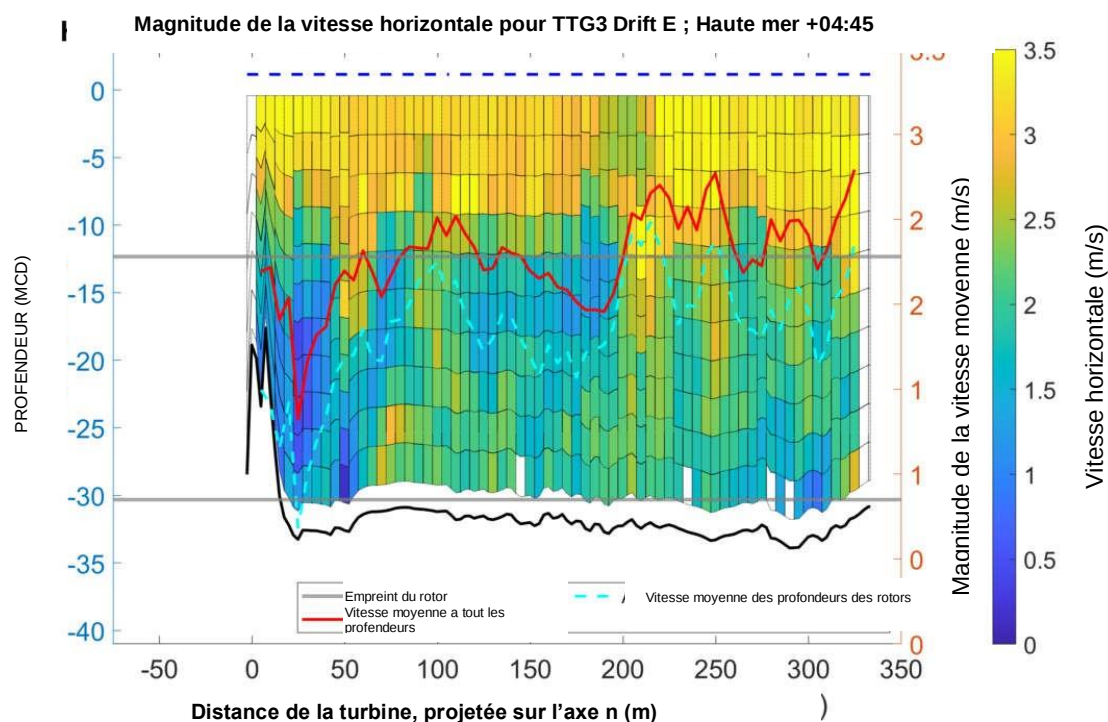


Figure 15 - Dérive de la veille sur le TTG3

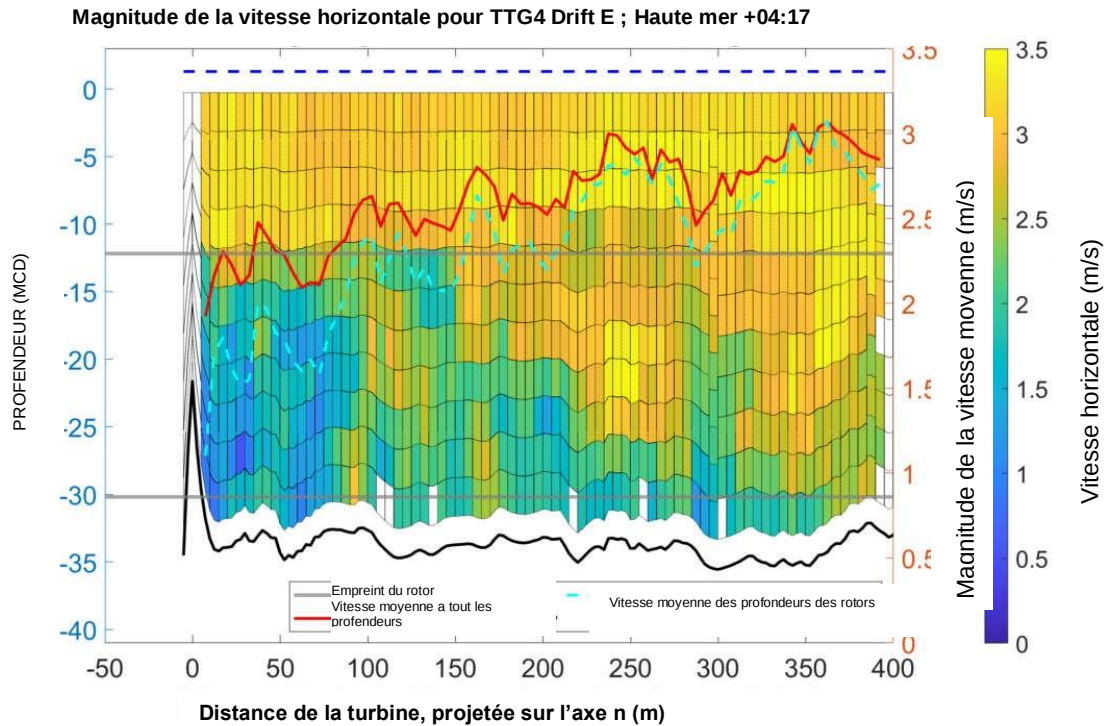


Figure 16 - Dérive de la veille sur le TTG4

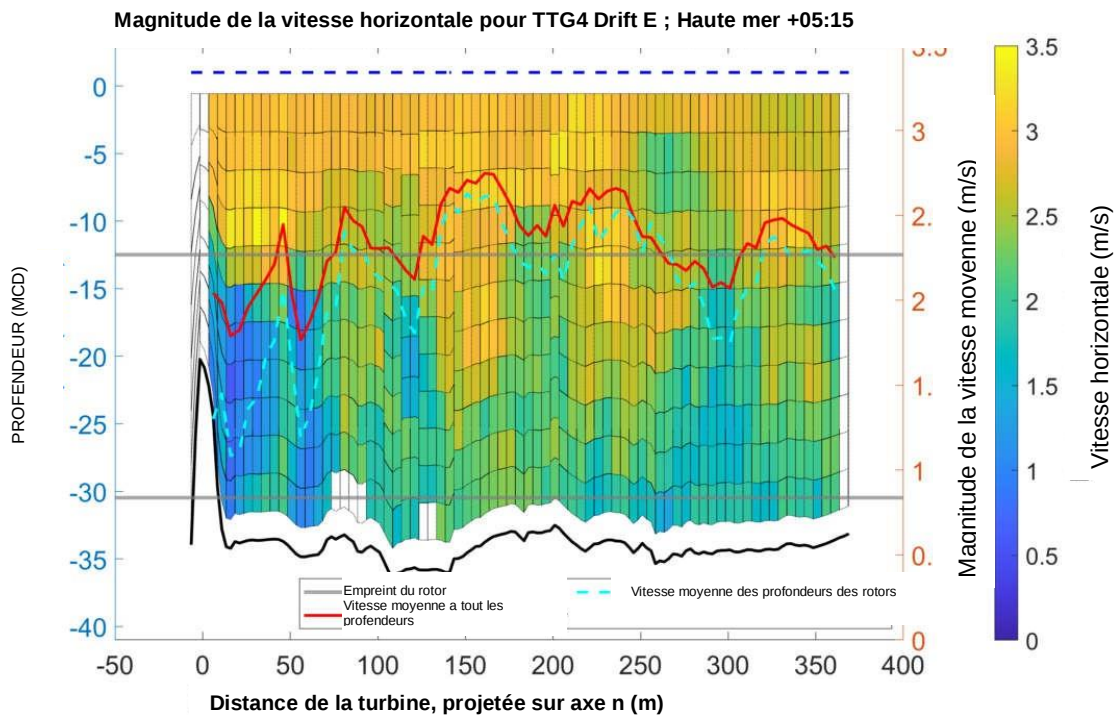


Figure 17 - Dérive de la veille sur le TTG4

3.4 Mesure de l'accélération du réveil résultats

Comme indiqué dans l'introduction de la section 3, les mesures de remontée du sillage se réfèrent aux ensembles de données du VMADCP dans lesquels le navire (et le VMADCP) remontait le courant le long du sillage, en aval d'une turbine opérationnelle de 18 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1,5 MW, tout en collectant continuellement des données. Le fait de remonter le courant, plutôt que de dériver vers l'aval, permet au VMADCP de collecter plus de données, car le navire peut se déplacer plus lentement. Les mesures en amont ont généralement été prises à partir d'environ 14 diamètres en aval de la turbine à environ 4 diamètres en amont (c.-à-d. de +14D à -4D).

Les résultats de l'amplitude du courant horizontal en fonction de la profondeur et de la distance par rapport à la turbine (le positif est en aval de la turbine) sont présentés dans les figures 18 et 19. Les déficits de vitesse comparent la vitesse à un endroit donné à la vitesse moyenne dans la zone de référence indiquée.

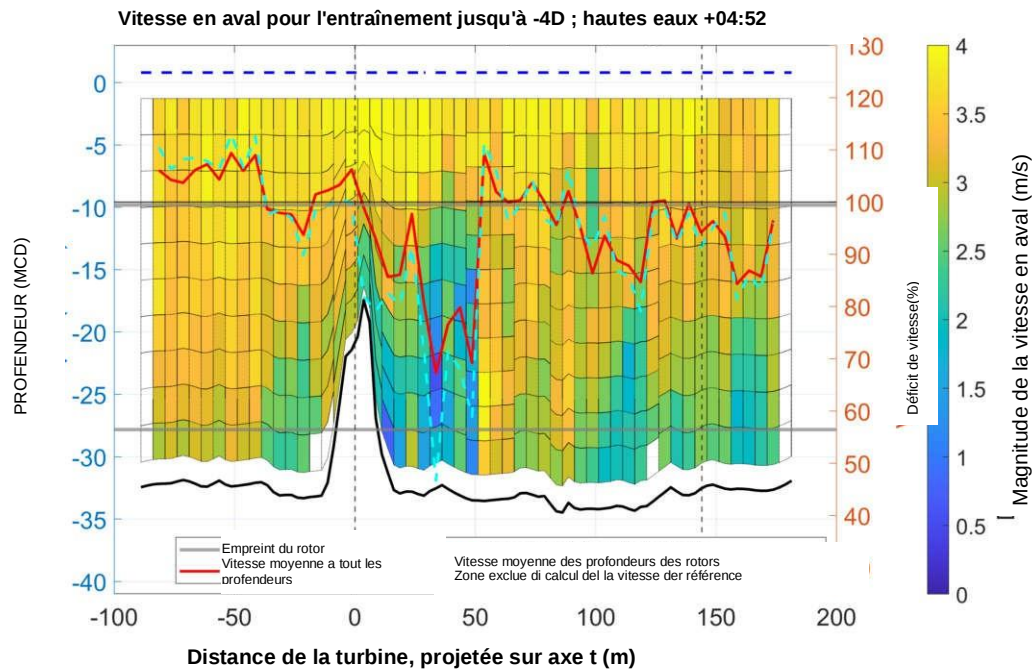


Figure 18 - Remontée du sillage (marée descendante)

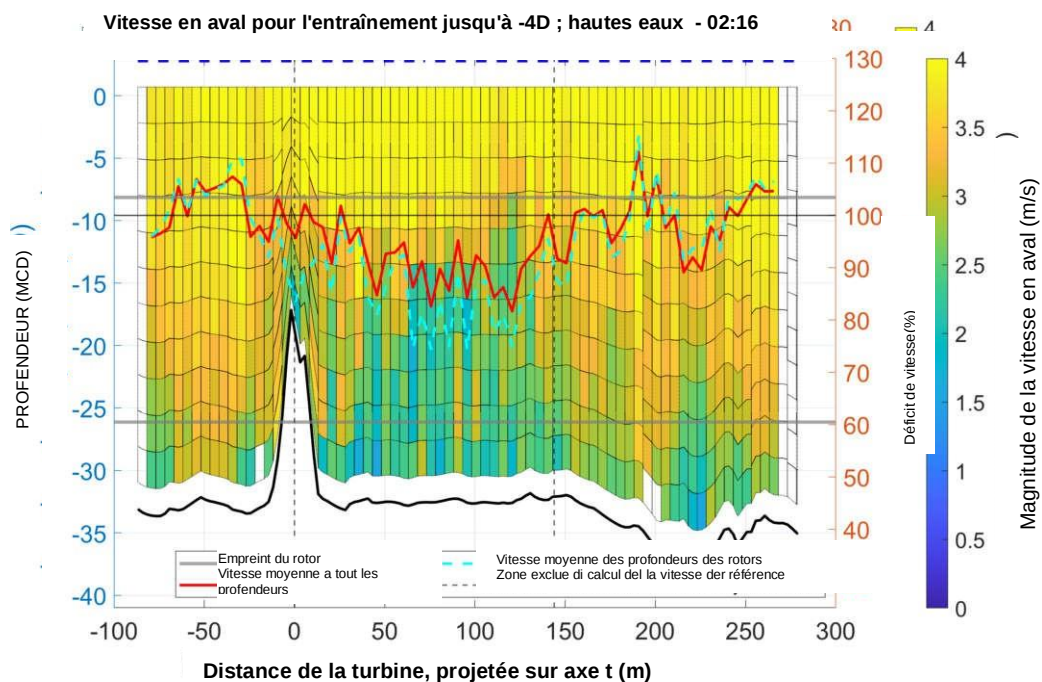


Figure 19 - Wake drive-up (marée montante)

3.5 Mesures par transects de sillage résultats

Comme indiqué dans l'introduction de la section 3, les mesures de transects de sillage se réfèrent à des ensembles de données VMADCP dans lesquels le navire (et le VMADCP) se déplaçait dans le sillage, à différentes distances en aval d'une turbine opérationnelle de 18 m de diamètre et d'une puissance nominale de 1,5 MW, tout en recueillant continuellement des données.

Les transects de sillage devaient être répétés (à la même distance en aval de l'éolienne) un certain nombre de fois afin d'obtenir des résultats satisfaisants (par exemple, en éliminant les turbulences instantanées ayant un impact sur les résultats).

3.5.1 Évaluation du nombre requis de transects de sillage répétés

Les essais initiaux ont été utilisés pour étudier le nombre de transects répétés nécessaires pour obtenir des résultats satisfaisants, car plus le nombre de transects répétés est élevé, moins le nombre de transects différents pouvant être réalisés durant une partie particulière du cycle de marée est important. Le nombre final de transects répétés a été déterminé à partir de l'examen des vitesses, des covariances et d'une analyse de convergence établie sur le nombre au maximum de transects répétés (qui était de 7 transects répétés dans les essais initiaux). Comme le montrent les figures 20 et 21, la réduction de la vitesse dans le sillage de l'éolienne est observée dès le premier transect et converge visuellement après 4 transects. La convergence était proche de 100 % sur une grande partie de la section transversale à partir de 5 transects. Sur la base de ces résultats, des mesures ultérieures ont été effectuées en répétant 5 transects. Ces résultats sont établis sur des transects à +8D. Le rotor de la turbine se trouve à une profondeur d'environ -12 m à -30 m.

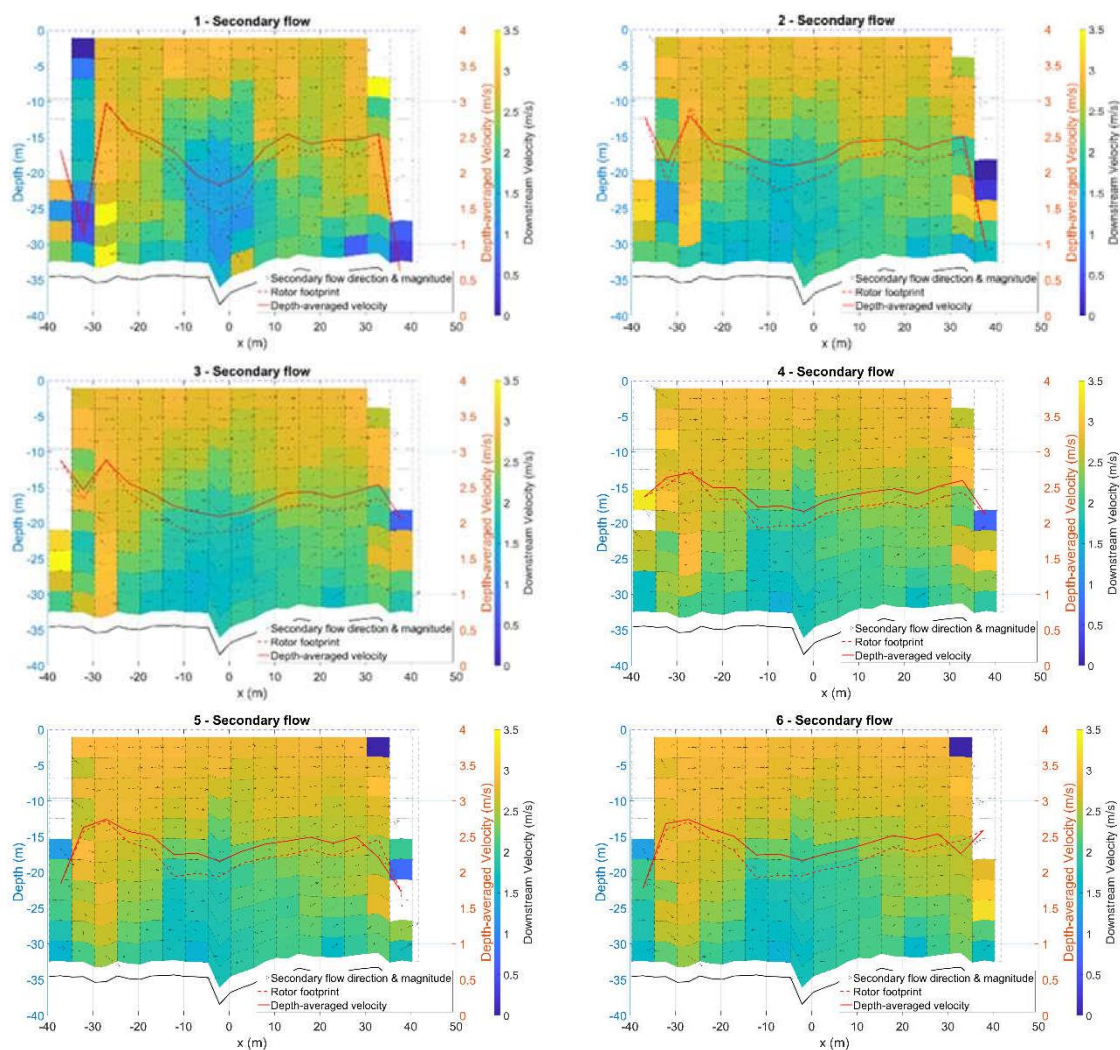


Figure 20 - Estimations de la vitesse en aval à partir de transects répétés dans le sillage de la turbine

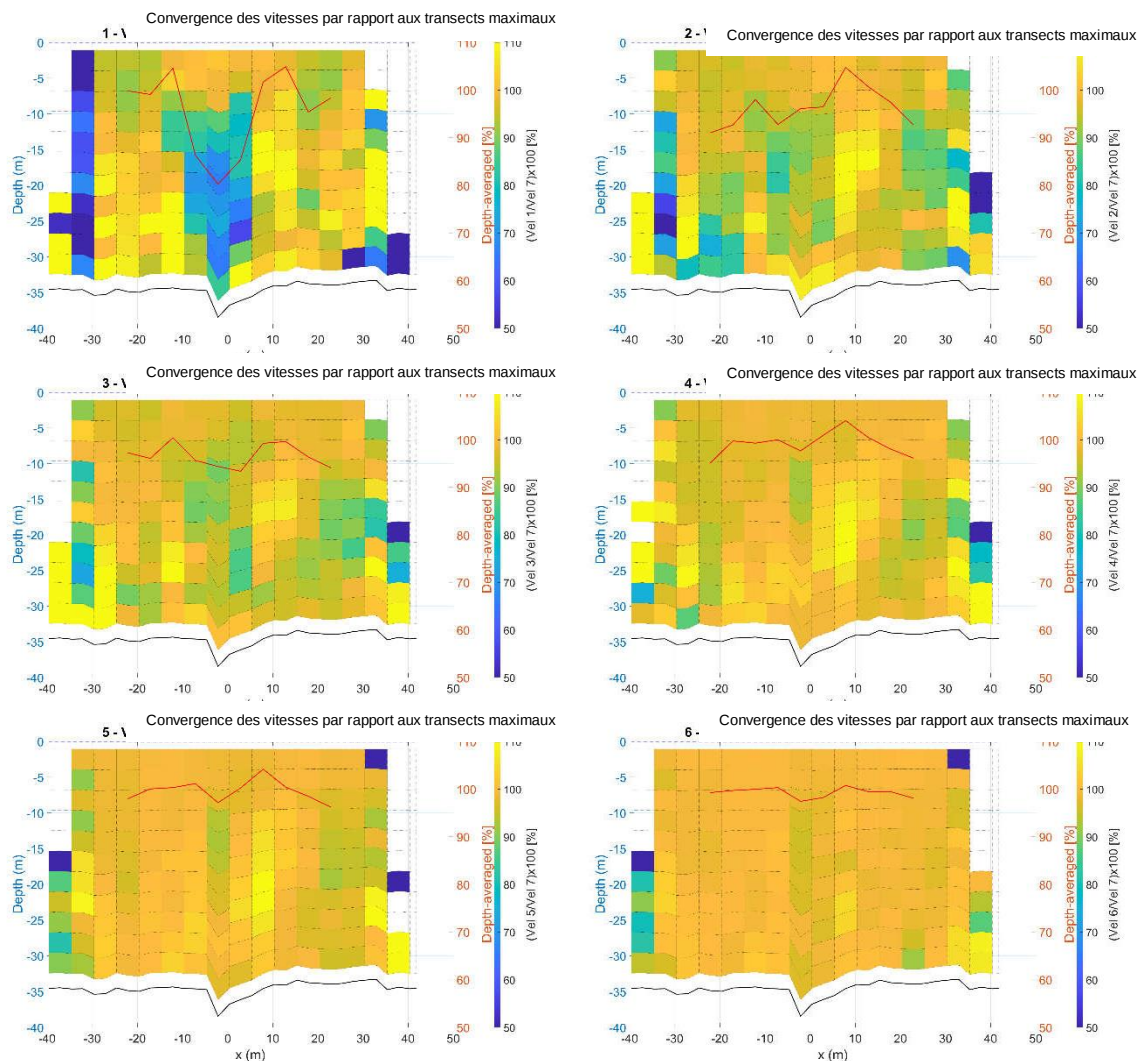


Figure 21 - Convergence des vitesses en aval à partir de transects répétés dans le sillage de la turbine

3.5.2 Résultats des transects de sillage répétés

Diverses méthodes ont été étudiées pour évaluer l'impact des sillages sur les transects répétés.

Dans un premier temps, 5 transects répétés (comme indiqué ci-dessus) ont été réalisés à différentes distances d'une turbine à marée opérationnelle de 18 m et de 1,5 MW, ces distances étant de -2D, 0D, +2D, +4D, +6D, +8D, +9D, +10D, +11D, +12D (où D est le diamètre de la turbine et positif est en aval de la turbine), avec la turbine opérationnelle et éteinte. En raison du temps nécessaire pour réaliser ce nombre de transects, les résultats de vitesse pour chaque série de transects répétés ont été mis à l'échelle par la vitesse pertinente au TMADCP.

Une sélection des résultats est présentée dans les figures 22 à 26.

Dans la Figure 22, à marée haute et avec l'éolienne éteinte, les résultats de vitesse en aval montrent un élément aléatoire (probablement dû à la forte turbulence dans les marées hautes à cet endroit), ce qui doit être considéré lors de l'évaluation de la Figure 23. Cependant, la Figure 23, avec l'éolienne en marche, montre clairement la réduction de vitesse dans le sillage de l'éolienne lorsque l'éolienne est démarrée, avec le sillage clairement visible jusqu'à 6-8D (moyenne sur toutes les profondeurs) et 9D (moyenne sur les profondeurs du rotor).

Dans la figure 24, à marée descendante et avec la turbine éteinte, les résultats de vitesse en aval sont raisonnablement cohérents (par exemple, par rapport à la figure 22). La figure 25 montre clairement la réduction de la vitesse dans le sillage de la turbine lorsque l'éolienne est en marche,

le sillage étant clairement visible jusqu'à environ 9D (toutes profondeurs) et environ 11D (profondeurs du rotor). Les impacts sont peut-être encore plus clairs si l'on considère le déficit de vitesse, comme le montre la figure 26. Les déficits de vitesse comparent la vitesse à un endroit donné à la vitesse moyenne dans la zone de référence indiquée.

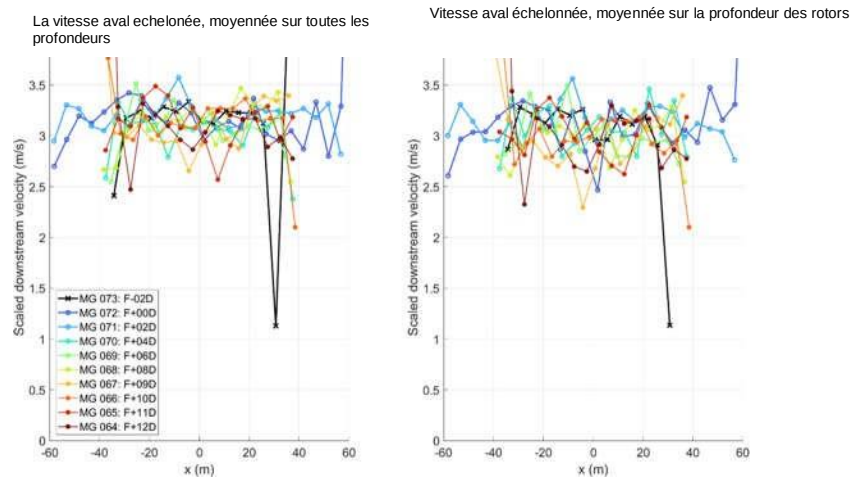


Figure 22 - Vitesse aval à l'échelle, direction de la crue (turbine éteinte)

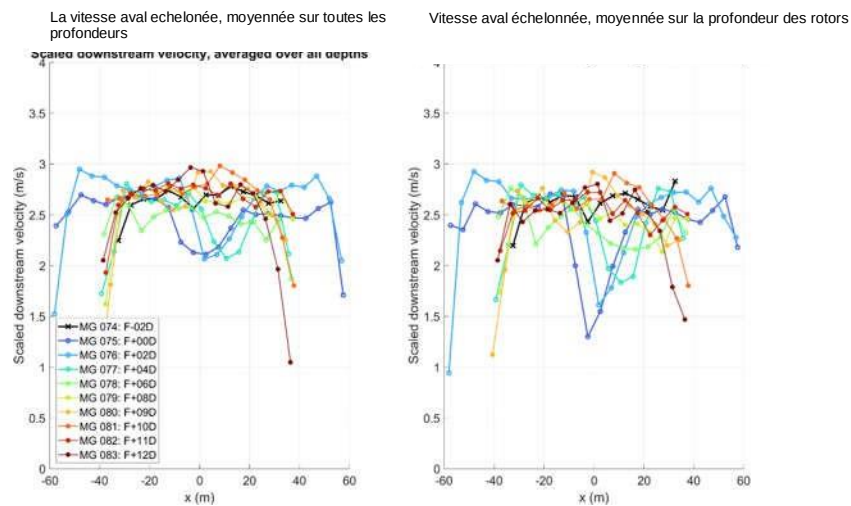


Figure 23 - Vitesse aval à l'échelle, direction de l'inondation (turbine en marche)

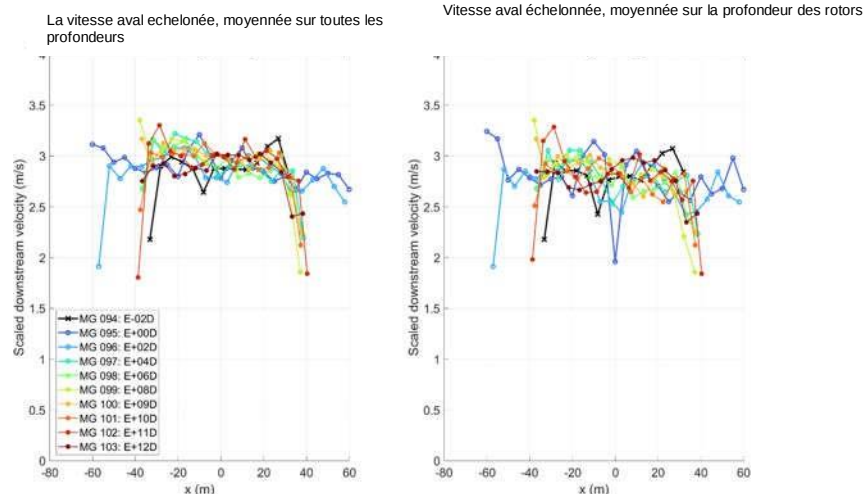


Figure 24 - Vitesse aval à l'échelle, direction du jusant (turbine éteinte)

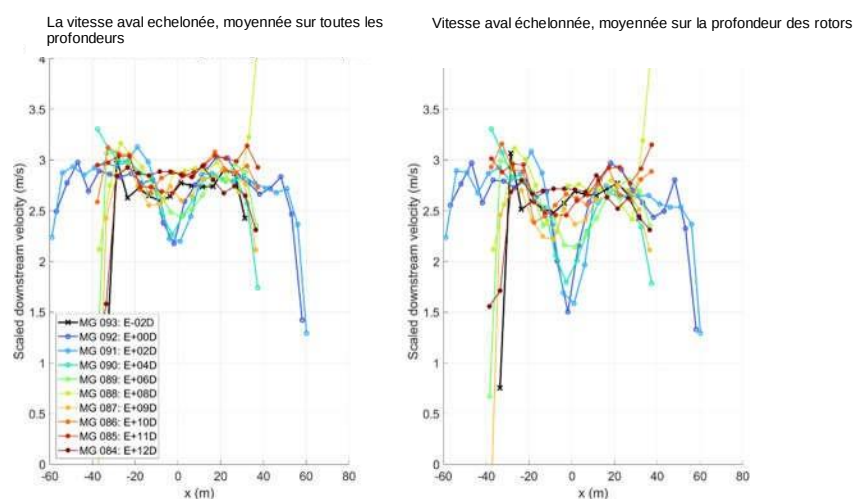


Figure 25 - Vitesse aval à l'échelle, direction du jusant (turbine en marche)

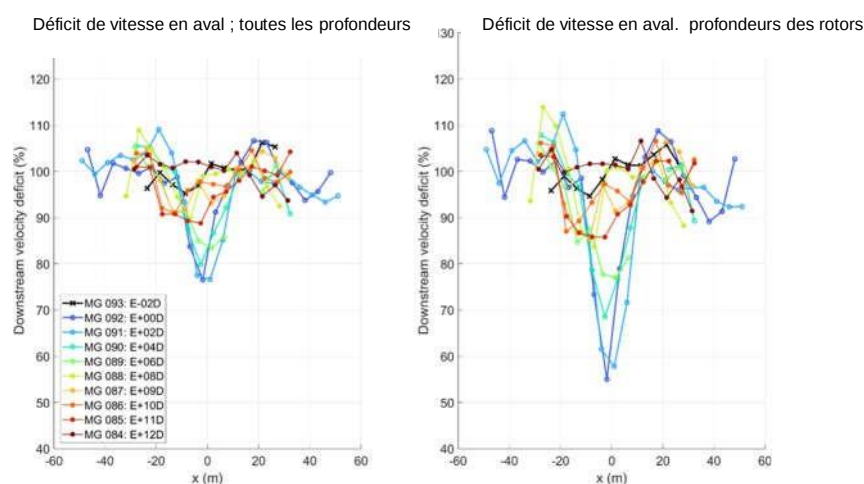


Figure 26 - Déficit de vitesse en aval, direction du jusant (turbine en marche)

3.6 Mesure de l'escale du réveil résultats

L'approche de l'arrêt, telle qu'elle a été décrite dans la section 3.2, a également été utilisée pour évaluer les sillages des turbines opérationnelles de 18 m et de 1,5 MW.

Bien qu'il n'y ait qu'environ 10 minutes entre les états de marche et d'arrêt de la turbine, l'ampleur du courant peut changer d'environ 10 % durant cette période. Par conséquent, comme indiqué dans la section 3.5.2, les résultats de vitesse ont été mis à l'échelle par la vitesse pertinente au TMADCP. Cependant, même s'il n'y a qu'environ 10 minutes entre les états de marche et d'arrêt de la turbine, cette mise à l'échelle introduite des erreurs lorsqu'un courant varie fortement dans le temps, et donc seules les données pour lesquelles cette exigence de mise à l'échelle était mineure sont considérées.

Cette approche a montré que l'amplitude de la vitesse moyenne pondérée par la puissance en profondeur sur la zone prévue du disque du rotor était réduite d'environ 10 % à +10D et d'environ 5 % à +14D. Les figures 27 et 28 montrent les profils d'amplitude et de direction de la vitesse à l'échelle en fonction de la profondeur. Les mesures de sillage n'ont pas été effectuées plus près de l'éolienne qu'à 10D.

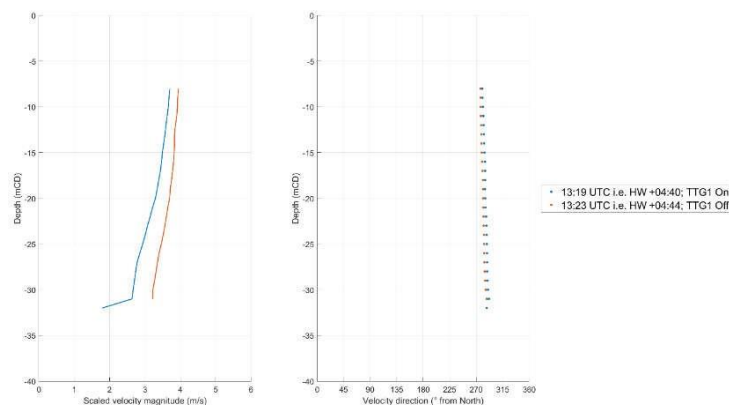


Figure 27 - Grandeur et direction de la vitesse à l'échelle à +10D (reflux)

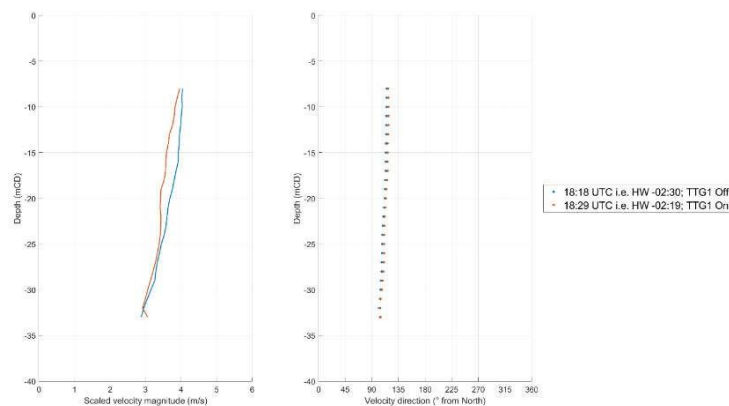


Figure 28 - Magnitude et direction de la vitesse à l'échelle à +14D (inondation)

3.7 Évaluation des ressources à l'aide des données combinées du VMADCP et du SMADCP sur les haltes migratoires

Comme indiqué dans l'introduction de la section 3, et sur la base des essais décrits à la section 3.2, d'autres mesures du VMADCP en escale ont été effectuées sur les sites potentiels des futures turbines à marée.

puis corrélées aux données SMADCP à long terme concomitantes afin de prédire l'occurrence du flux à long terme à chaque lieu d'escale pour le développement/optimisation du réseau.

3.7.1 Délai enquête

Dans un premier temps, une étude du décalage temporel potentiel des courants entre les futurs emplacements potentiels des hydroliennes et l'emplacement du SMADCP a été entreprise, afin d'évaluer si un décalage temporel était nécessaire dans la corrélation entre les données du VMADCP et celles du SMADCP. Plutôt que d'effectuer cette comparaison entre les données VMADCP et SMADCP, alors que les données VMADCP n'étaient collectées qu'à la même position toutes les 1 heure environ, cette étude a comparé les données SMADCP aux données TMADCP à l'une des turbines à marée MeyGen existantes (positionnée à une distance semblable à celle des emplacements des turbines à marée proposées les plus éloignées du SMADCP).

L'étude a utilisé une moyenne mobile de 10 minutes des données TMADCP et SMADCP moyennées sur 1 minute, afin de minimiser les effets des fluctuations à court terme, et a examiné l'heure des pics de vitesse de la marée et de l'inversion du courant, ainsi que le décalage temporel global par le biais de la corrélation croisée des données de la série temporelle de la vitesse (via le décalage temporel). L'étude a été menée sur une période de 7 jours de temps relativement calme (pour minimiser les effets de pression).

Même avec la moyenne mobile pour réduire l'influence des pics locaux dans les courants, le décalage entre les pics individuels a encore varié, atteignant 22 minutes dans un cas pendant les marées descendantes, mais restant inférieur à 8 minutes dans la plupart des cas. L'ADCP qui a atteint le premier la vitesse maximale a également varié, ce qui a eu pour effet de faire varier le signe du décalage. Le décalage moyen durant les marées montantes et descendantes était uniquement d'environ 1 minute.

Le délai au maximum obtenu pour les inversions de courant était de 11 minutes, le délai moyen étant d'environ 5 minutes.

Si l'on considère le décalage global par le biais de la corrélation croisée des données de la série temporelle de la vitesse (en décalant un ensemble de données par une série d'intervalles d'une minute), on a constaté que la corrélation croisée maximale entre les ensembles de données TMADCP et SMADCP a été obtenue avec un décalage nul.

Par conséquent, les corrélations ultérieures entre les mesures du VMADCP et du SMADCP n'ont pas été corrigées en fonction du décalage temporel.

3.7.2 Corrélation VMADCP vs SMADCP à l'emplacement du SMADCP

Comme indiqué dans la section 3.2, des essais stationnaires initiaux ont été réalisés en comparant les mesures VMADCP aux mesures TMADCP sur une turbine hydrolienne existante, et l'approche a ensuite été validée par la collecte et l'analyse de données VMADCP stationnaires similaires sur le SMADCP - comme indiqué dans cette section. Les mesures VMADCP et SMADCP ont été effectuées à des fréquences différentes afin d'éviter tout problème d'interférence.

3.7.2.1 Sélection des données

Les données VMADCP à comparer avec SMADCP ont été sélectionnées grâce à les coordonnées de la position du navire. Tous les points de données enregistrés à l'intérieur d'un cercle cible, centré sur l'emplacement du SMADCP et d'un rayon d'environ 10 mètres, ont été inclus.

La sélection des données est illustrée à la figure 29. La position du VMADCP pendant ses mesures stationnaires est représentée par des lignes grises. La croix noire indique la position du SMADCP et le cercle noir indique la circonférence du cercle cible. Le pilote du navire s'est efforcé de maintenir le VMADCP sur le navire à l'intérieur du cercle cible. Les points rouges indiquent les points de données retenus pour l'analyse.

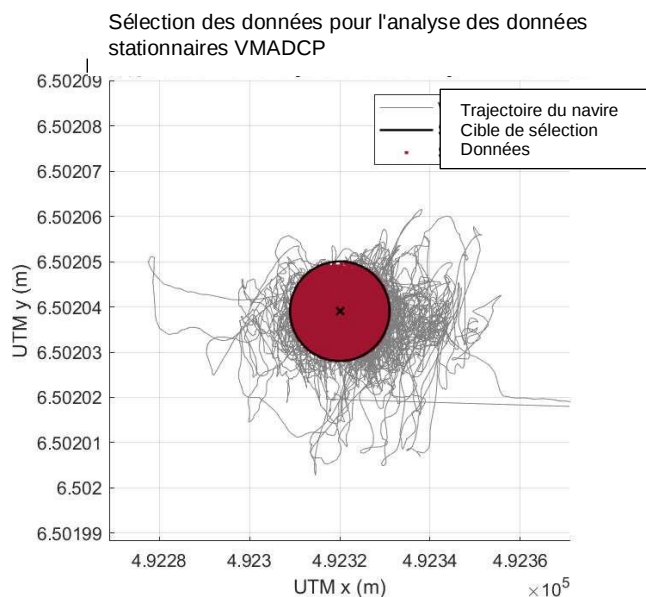


Figure 29 - Trajectoire des navires pour les données VMADCP par rapport à la position SMADCP et à la position de la cible

3.7.2.2 Analyse des données

Une régression linéaire a été appliquée à chaque cellule de profondeur pour évaluer la corrélation entre les amplitudes de vitesse des deux ensembles de données grâce à des données moyennées sur 10 minutes, la régression linéaire étant forcée par l'origine et ne considérant que les amplitudes de vitesse du VMADCP et du SMADCP supérieures à 1 m/s.

L'amplitude de la vitesse moyenne en profondeur pondérée par la puissance sur la zone prévue du disque du rotor a également été calculée, communément appelée "méthode des bacs" (IEC TS 62600-200, 2013) ³.

3.7.2.3 Résultats

Les résultats montrent une très forte corrélation entre les amplitudes de vitesse des données VMADCP à l'emplacement du SMADCP et les données SMADCP réelles.

Les ajustements linéaires ont des coefficients R supérieurs à 0,99 à toutes les profondeurs pertinentes pour les turbines, sauf à 30 m sous la LAT et plus profondément. Les coefficients angulaires sont très proches de 1 et seules de petites valeurs de décalage ont été trouvées.

Autour de la hauteur du moyeu, l'ajustement linéaire est extrêmement bon, comme le montrent les figures 30 et 31, qui montrent que les mesures VMADCP de la magnitude de la vitesse correspondent en moyenne aux données SMADCP à moins de 1 %, y compris pour la magnitude de la vitesse moyenne en profondeur pondérée par la puissance sur la zone prévue du disque du rotor.

³ Énergie marine - Convertisseurs d'énergie houlomotrice, hydrolienne et autres courants marins - Partie 200 : Convertisseurs d'énergie hydrolienne produisant de l'électricité - Évaluation des performances de puissance. Édition 1.0. 2013-05. Voir : https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62600-200%7Bed1.0%7Den.pdf

Magnitude de la vitesse (m/s) à -19 mCD à T00
régression linéaire pour une magnitude ≥ 1 m/s

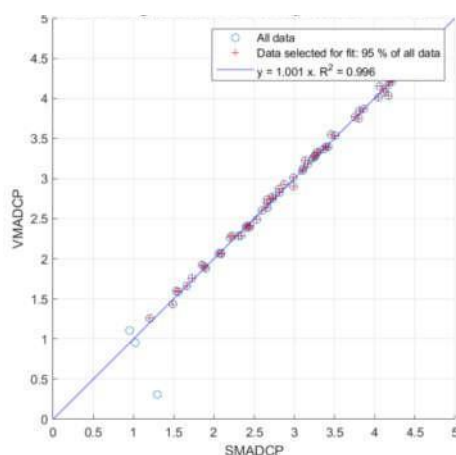


Figure 30 - Régression linéaire des données VMADCP par rapport aux données SMADCP à 19 m au-dessous du LAT (données stationnaires)

Vitesse moyenne du disque du rotor (m/s) à T00
Régression linéaire pour une vitesse ≥ 1 m/s

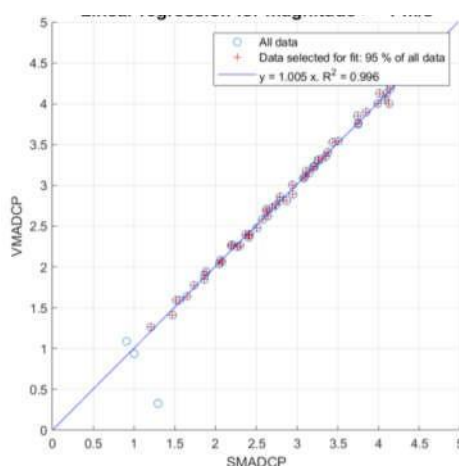


Figure 31 - Régression linéaire des données VMADCP par rapport aux données SMADCP pour le disque du rotor (données stationnaires)

3.7.3 Corrélation VMADCP vs SMADCP aux emplacements potentiels des turbines

Sur la base des résultats des essais stationnaires et d'escala décrits ci-dessus, les données du VMADCP ont ensuite été collectées grâce à la technique d'escala à plus de 10 emplacements potentiels de futures turbines à marée, ainsi que sur le SMADCP et à proximité de plusieurs turbines à marée existantes. La durée d'escala de 5 à 7 minutes à chaque emplacement a été maximisée en tenant compte des contraintes liées au nombre d'emplacements à visiter toutes les heures et au nombre de jours disponibles pour l'étude.

La sélection et l'analyse des données ont été effectuées comme indiquées aux sections 3.7.2.1 et 3.7.2.2, à l'exception de la durée des escales qui a varié selon les sites, comme indiqué ci-dessus.

3.7.3.1 Résultats

La qualité de l'ajustement dépend en grande partie de la distance entre l'emplacement potentiel de l'éolienne et l'emplacement du SMADCP.

Lors des escales du VMADCP au-dessus de l'emplacement du SMADCP, pour l'amplitude de la vitesse moyenne en profondeur pondérée par la puissance sur la zone prévue du disque du rotor, le coefficient R était légèrement inférieur à celui de l'étude stationnaire décrite à la section 3.7.2, soit 0,992 contre 0,998, et le coefficient angulaire était de 0,992 contre 0,998. 1,009 contre 1,005 ; voir figure 32.

Vitesse moyenne du disque du rotor (m/s) au SMADCP
Régression linéaire pour une magnitude ≥ 1 m/s

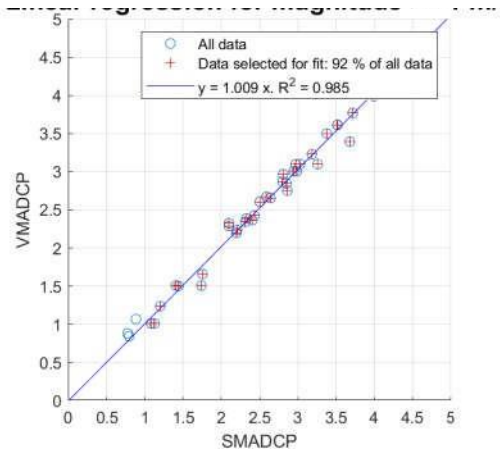
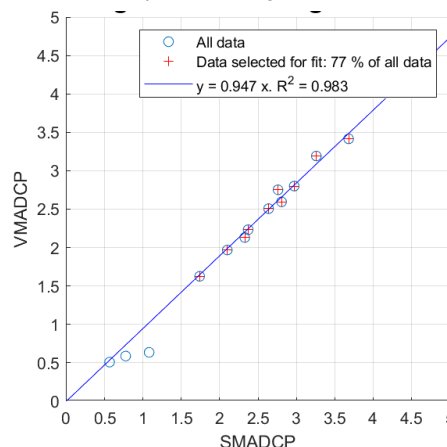


Figure 32 - Régression linéaire des données VMADCP par rapport aux données SMADCP pour le disque du rotor (données d'arrêt)

Pour les emplacements potentiels des éoliennes situés à moins de 200 m du SMADCP, les valeurs R étaient en moyenne $> 0,97$. Voir la figure 33 pour un exemple d'un tel emplacement potentiel d'éolienne.

Figure 33 - Régression linéaire des données VMADCP par rapport aux données SMADCP pour le disque du rotor (données d'arrêt)

Vitesse moyenne du disque du rotor (m/s) à T12
Régression linéaire pour une magnitude ≥ 1 m/s



Les coefficients R étaient toujours supérieurs à 0,95 pour les emplacements potentiels des turbines jusqu'à une distance d'environ 500 m du SMADCP, et au-delà, la raison de certaines valeurs R plus faibles peut être davantage liée aux lignes de cisaillement dans le flux qu'à la seule distance.

3.7.3.2 Conclusions

Les résultats montrent généralement une très forte corrélation entre les amplitudes de vitesse obtenues à partir des données VMADCP aux emplacements potentiels des turbines et les données SMADCP (avec des valeurs R généralement comprises de 0,95 à 1,00), ce qui permet d'être très confiant dans l'applicabilité de la technique.

En combinaison avec les connaissances existantes de MeyGen sur le site grâce à d'autres mesures et à la modélisation hydrodynamique entreprise depuis 2010, MeyGen a utilisé les résultats de l'approche innovante de l'escale combinée au SMADCP pour déterminer la ressource hydrolienne à long terme aux emplacements potentiels des futures turbines hydroliennes afin de l'utiliser dans le développement de son projet. En raison du succès de l'approche, aucune autre modélisation hydrodynamique n'est prévue à court terme.

MeyGen a déjà contacté l'équipe de maintenance de la norme CEI TS 62600-201 pour discuter de ses conclusions. L'approche devrait être incorporée dans les prochaines éditions de la spécification technique CEI TS 62600-201. MeyGen, ARR et DO prévoient de diffuser de plus amples détails sur l'approche lors de la conférence et des documents EWTEC en septembre 2023.



EUROPEAN UNION
European Regional Development Fund